

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAYVANSAL YAĞLARDAN BİYO-YAKIT ÜRETİMİ VE
BİR DİZEL MOTORUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Şehmus ALTUN

Tez Yöneticisi:
Yrd. Doç. Dr. Cengiz ÖNER

DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAYVANSAL YAĞLARDAN BİYO-YAKIT ÜRETİMİ VE BİR DİZEL MOTORUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Şehmus ALTUN

Doktora Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez,...../...../2009 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cengiz ÖNER

Üye: Prof. Dr. Osman ELDOĞAN

Üye: Prof. Dr. Yasin VAROL

Üye: Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfü YÜCEL

Üye: Yrd. Doç. Dr. Hanbey HAZAR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve Sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasına katkıları olan çok kıymetli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Cengiz ÖNER' e saygılarımı ve sevgilerimi sunar, teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmalarında yardımlarını eksik etmeyen teknik öğretmen sayın Süleyman GAYRETLİ'ye, ve Arş. Gör. Hüseyin AYDIN'a, ilgi ve desteklerinden dolayı Öğr. Gör. Fevzi YAŞAR'a, teşekkür ederim. Ayrıca; Öğr. Gör. Günay ÖNAL'a ve Öğr. Gör. Mehmet ÖZMEN'e desteklerinden dolayı teşekkür eder, emeği geçen herkese şükranlarımı sunarım. Yapıcı eleştirileri, değerli katkıları ve yönlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Yasin VAROL ile Yrd. Doç. Dr. Halit Lütfi YÜCEL'e ve sınav jürisindeki değerli hocalarıma teşekkürü bir borç bilir, saygılarımı sunarım. Maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen ve fazlasıyla ilgi ve yardımlarını gördüğüm aileme sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Şehmus ALTUN

Ekim, 2008

Batman

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	IV
TABLoların LİSTESİ	VI
SİMGELER	VIII
KISALTMALAR	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Dünyada ve Ülkemizde Petrolün Genel Durumu	3
1.2. Dünyada Biyodizel Üretimi ve Uygulamaları	7
1.3. Ülkemizde Biyodizel	10
1.4. Biyodizel Üretimi ve Özellikleri	12
1.4.1. Biyodizelin Transesterifikasyon Reaksiyonu ile Üretim Aşamaları	13
1.4.2. Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler	15
1.4.2.1. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi	15
1.4.2.2. Alkol/Yağ Molar Oranının Etkisi	16
1.4.2.3. Katalizör Cinsi ve Miktarının Etkisi	16
1.4.2.4. Serbest Yağ Asitleri ve Suyun Etkisi	17
1.4.2.5. Reaksiyon Süresinin Etkisi	17
1.4.2.6. Alkol Cinsi ve Miktarının Etkisi	17
1.4.3. Biyodizel Üretim Teknolojilerinin Karşılaştırılması	18
1.4.4. Biyodizelin Özellikleri	20
1.4.4.1. Soğukta Akış Özellikleri	22
1.4.4.2. Depolama	22
1.4.4.3. Toksin Etki	23
1.4.4.4. Biyolojik olarak bozunabilirlik	23
1.5. Biyodizel Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları	23
1.6. Hayvansal Yağlar ve Özellikleri	25
1.7. Dizel Motorlarda Yanma ve Egzoz Emisyonları	29
1.7.1. Egzoz Emisyonları	31
1.7.1.1. Azot Oksit (NOx) Emisyonları	31
1.7.1.2. Duman (İs) Emisyonları	32

1.7.1.3. Kükürt Oksit Emisyonları (SO _x).....	33
1.7.1.4. Karbon monoksit (CO) Emisyonları	33
1.7.1.5. Yanmamış Hidrokarbon (HC) Emisyonları	33
1.8. Dizel Motorlar İçin Egzoz Emisyonu Standartları	33
1.9. Biyodizel Emisyonları	34
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	36
3. HAYVANSAL İÇ YAĞLARDAN BİYODİZEL ÜRETİMİ.....	49
3.1. Hayvansal İç Yağından Örnek Biyodizel Üretimi.....	50
3.2. Motor Testlerinde Kullanılacak Biyodizel Yakıtının Üretimi	56
3.3. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Yakıt Özelliklerinin Analizi	58
3.4. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Üretim Maliyeti	60
3.5. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılması ..	61
4. MOTOR TEST MATERYALLERİ VE METOTLAR	63
4.1. Deney Yakıtları	63
4.2. Deney Seti.....	63
4.2.1. Egzoz Emisyonları Ölçüm Cihazı	66
4.2.2. Duman Ölçüm Cihazı	67
4.2.3. Egzoz Gazı Sıcaklığı Ölçümü	67
4.3. Metot	68
4.3.1. Ortalama Efektif Basınç	68
4.3.2. Yakıt Tüketimi Ölçümü.....	69
4.3.3. Özgül Yakıt Tüketimi	69
4.3.4. Efektif Verim	70
4.3.5. 100 Saatlik Motor Testi	70
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	71
5.1. Motor Performans Testlerinin Değerlendirilmesi.....	71
5.1.1. Ortalama Efektif Basınç ve Motor Momenti Değişiminin Değerlendirilmesi	71
5.1.2. Efektif Motor Gücü Değişimi.....	74
5.1.3. Yakıt Tüketimi Değişimi.....	76
5.1.4. Efektif Verim ve Egzoz Sıcaklığı Değişimi.....	79
5.2. Egzoz Emisyonu Testlerinin Değerlendirilmesi	82
5.2.1. Karbon monoksit (CO) Emisyonu Değişimi.....	82
5.2.2. Karbon dioksit (CO ₂) ve Oksijen (O ₂) Emisyonları Değişimi	84
5.2.3. Azot oksit (NO _x) Emisyonları Değişimi	86
5.2.4. Kükürt dioksit (SO ₂) Emisyonları	89

5.2.5. Duman (İs) Emisyonları	90
5.3. 100 Saatlik Motor Testinin Değerlendirilmesi.....	92
5.3.1. Dizel Yakıtı ve B20 Yakıtlarının Motor Parçaları Üzerindeki Etkileri	93
5.3.1.1. Dizel Yakıtı ile 100 Saat Çalışma Sonunda Motor Parçalarının Durumu	96
5.3.1.2. B20 ile 100 Saat Çalışma Sonunda Motor Parçalarının Durumu.....	100
5.3.1.3. 100 Saatlik Motor Testinin Sonuçları	105
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ.....	122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 1.1 2004–2008 yılları arası ortalama dünya petrol fiyatlarındaki değişim.....	5
Şekil 1.2 2005 yılında Dünya, Avrupa Birliği ve ABD’de biyodizel üretimi değerleri....	8
Şekil 1.3 Avrupa Birliği üye ülkeleri biyodizel üretim değerleri	8
Şekil 1.4 Türkiye’de biyodizel üretimi yapılan yerler	11
Şekil 1.5 Transesterifikasyon reaksiyonu	13
Şekil 1.6 Biyodizel üretim şeması.....	15
Şekil 1.7 Farklı tip alkol kullanımının reaksiyon zamanına bağlı olarak ester dönüşümü üzerindeki etkisi	18
Şekil 1.8 Transesterifikasyondaki su içeriğinin metil ester verimine etkisi.....	19
Şekil 1.9 Biyodizel üretiminde serbest yağ asidi içeriğinin metil ester verimine etkisi...	19
Şekil 1.10 Bir dizel motoruna ait krank açısı – basınç diyagramı	30
Şekil 3.1 Biyodizel üretiminde kullanılan hayvansal iç yağı	49
Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan malzeme ve araç-gereçler.	50
Şekil 3.3 Yağın ısıtıcıda eritilmesi (a) ve reaksiyona hazır yağ numunesi (b).	53
Şekil 3.4 Metil alkol ve sodyum hidroksitin çözeltisi (a), ısıtma ve karıştırma (b)	53
Şekil 3.5 Ester ve gliserin fazları (a), ayırma hunisinden gliserinin alınması (b), esterin yıkanması (c).....	54
Şekil 3.6 Hayvansal iç yağı (sıvı) ve biyodizel.....	55
Şekil 3.7 Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz ve şematik gösterimi.....	56
Şekil 3.8 Biyodizel üretiminde takip edilen işlem basamakları.....	57
Şekil 3.9 Hayvansal iç yağı ve hayvansal iç yağı metil esteri (biyodizel).....	58
Şekil 4.1 Deney yakıtları (fotoğrafik)	63
Şekil 4.2 Deney setinin görünüşü (fotoğrafik).	64
Şekil 4.3 Deney setinin şematik görünüşü.....	65
Şekil 4.4 Egzoz gazı analiz cihazı.....	66
Şekil 4.5 Duman ölçüm cihazı.	67
Şekil 4.6 Yakıt tüketimi ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.	69
Şekil 5.1 Deney yakıtlarının ortalama efektif basınç değerleri değişimi.....	72
Şekil 5.2 Deney yakıtlarının motor momenti değerleri değişimi.....	74
Şekil 5.3 Deney yakıtlarının efektif motor gücü değerleri değişimi.....	75
Şekil 5.4 Deney yakıtlarının yakıt tüketimi değerleri değişimi.....	77
Şekil 5.5 Deney yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değerleri değişimi.....	78

Şekil 5.6 Deney yakıtlarının efektif verim değerleri değişimi.	80
Şekil 5.7 Deney yakıtlarının egzoz sıcaklığı değerleri değişimi.....	82
Şekil 5.8 Deney yakıtlarının karbon monoksit (CO) emisyonu değerleri değişimi.....	83
Şekil 5.9.Deney yakıtlarının karbondioksit (CO ₂) emisyonu değerleri değişimi.....	85
Şekil 5.10 Deney yakıtlarının oksijen (O ₂) emisyonu değerleri değişimi.....	86
Şekil 5.11 Deney yakıtlarının azot oksit (NO _x) emisyonu değerleri değişimi.....	89
Şekil 5.12 Deney yakıtlarının kükürt dioksit (SO ₂) emisyonu değerleri değişimi.	90
Şekil 5.13 Deney yakıtlarının duman emisyonu değerleri değişimi.....	91
Şekil 5.14 Motorun temizlenmiş halinden genel bir görünüm	93
Şekil 5.15 Pistonun üst kısmının temizlenmiş görüntüsü	93
Şekil 5.16 Pistonun üst kısmı ve silindir cidarlarının görünüş	94
Şekil 5.17 Üst kapak ve supapların genel görünüşü.....	94
Şekil 5.18 Supap yuvalarının görünüşü	95
Şekil 5.19 Yakıt enjektörünün genel görünüşü	95
Şekil 5.20 Enjektör ucunun genel görünüşü	96
Şekil 5.21 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda motorun genel görünüşü.....	96
Şekil 5.22 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda yanma odası ve silindirin görünümü	97
Şekil 5.23 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda silindirin üst kısmının görünümü	97
Şekil 5.24 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda üst kapağın görünümü.....	98
Şekil 5.25 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda supapların genel görünümü	98
Şekil 5.26 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda yakıt enjektörünün genel görünümü	99
Şekil 5.27 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda enjektör ucunda oluşan birikintiler.....	99
Şekil 5.28 B20 ile çalışma sonunda motorun genel görünümü.....	100
Şekil 5.29 B20 ile çalışma sonunda piston ve silindirin üst kısmının görünümü.....	100
Şekil 5.30 B20 ile çalışmada pistonun üst kısmı ve silindir cidarlarının görünümü.....	101
Şekil 5.31 B20 ile çalışma sonunda üst kapağın görünümü.....	102
Şekil 5.32 B20 ile çalışma sonunda üst kapakta oluşan birikintinin kalınlığı.....	102
Şekil 5.33 B20 ile çalışma sonunda emme ve egzoz supaplarının genel görünümü.....	103
Şekil 5.34 B20 ile çalışma sonunda emme ve egzoz supaplarında oluşan birikintiler...	103
Şekil 5.35 B20 ile çalışma sonunda enjektör ucunda oluşan birikintinin görünümü....	104
Şekil 5.36 B20 ile çalışma sonunda yakıt enjektörünün genel görünümü.....	104

TABLolarIN LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo.1.1 Dünya petrol talebi.....	4
Tablo 1.2 Dünya petrol üretimi.....	4
Tablo 1.3 Ham petrol ithalatı.....	6
Tablo 1.4 Petrol ürünleri ihracatı.....	6
Tablo 1.5 Akaryakıt dağıtım şirketlerinin akaryakıt türleri satışları (Ton)	7
Tablo 1.6 Yatırımcı firmaların sektörel dağılımı	11
Tablo 1.7 Ülkemizde illere göre biyodizel firma sayısı ve kapasiteleri.....	12
Tablo1.8 Biyodizel üretimi için kullanılan farklı teknolojilerin karşılaştırılması.....	20
Tablo 1.9 Biyodizel yakıtının ASTM D 6751'e göre standart özellikleri	21
Tablo 1.10 Farklı yağlardan elde edilen metil ve etil esterler yakıtların özellikleri.....	22
Tablo 1.11 Bazı hayvansal yağların ve soya yağı yağ asidi metil esterlerinin iodin değerleri ile yağ asidi dağılımları.....	26
Tablo 1.12 Farklı hayvansal yağ metil esterlerinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri...	26
Tablo 1.13 Hayvansal iç yağının, esterlerinin (metil, etil ve bütil) ve dizel yakıtı ile %50 oranlarındaki karışımlarının yakıt özellikleri.....	27
Tablo 1.14 Hayvansal iç yağı metil esterinin yakıt özelliklerinin dizel yakıtı ve soya metil esteri ile karşılaştırılması.....	28
Tablo 1.15 Ağır hizmet dizel motorları için Avrupa Birliği emisyon standartları	33
Tablo 1.16 Dizel yolcu arabaları için Avrupa Birliği emisyon standartları.....	34
Tablo 1.17 Çevre Koruma Ajansına (EPA) göre dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında ortalama biyodizel emisyon değerleri.....	35
Tablo 3.1 Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz ve araç-gereçler.....	51
Tablo 3.2 Reaksiyona ait veriler.	55
Tablo 3.3 Biyodizel ve dizel yakıtının özellikleri.	59
Tablo 3.4 Deney yakıtlarının viskozite ve yoğunluk değerleri.....	59
Tablo 3.5 Reaksiyona giren malzemelerin miktar ve tutarları.....	60
Tablo 3.6 Elektrikli aletler ve harcadıkları enerji miktarları.....	60
Tablo 4.1 Deney motorunun teknik özellikleri.....	64
Tablo 4.2 Hidrolik dinamometrenin teknik özellikleri.....	65
Tablo 4.3 Motor test tezgâhı izleme/kontrol cihazı teknik özellikleri	66
Tablo 4.4 100 saatlik motor testinin günlük çalışma adımları ve süreleri.	70

Tablo 5.1 Deney yakıtlarının ortalama efektif basınç değerleri	72
Tablo 5.2 Deney yakıtlarının motor momenti değerleri.....	73
Tablo 5.3 Deney yakıtlarının efektif motor gücü değerleri.....	75
Tablo 5.4 Deney yakıtlarının yakıt tüketimi değerleri	77
Tablo 5.5 Deney yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değerleri.....	78
Tablo 5.6 Deney yakıtlarının efektif verim değerleri.....	80
Tablo 5.7 Deney yakıtlarının egzoz gazı sıcaklığı değerleri.....	81
Tablo 5.8 Deney yakıtlarının karbon monoksit (CO) emisyonu değerleri.....	83
Tablo 5.9 Deney yakıtlarının karbondioksit (CO₂) emisyonu değerleri.....	85
Tablo 5.10 Deney yakıtlarının oksijen (O₂) emisyonu değerleri.....	86
Tablo 5.11 Deney yakıtlarının azot oksit (NO_x) emisyonları değerleri.....	88
Tablo 5.12 Deney yakıtlarının kükürt dioksit (SO₂) emisyonu değerleri.....	90

SİMGELER

B, Yakıt tüketimi (gr/h)

be, Özgül yakıt tüketimi (gr/kWh)

⁰C, Santigrat derece (Sıcaklık)

CO, Karbon monoksit

CO₂, Karbon dioksit

HC, Hidrokarbon

Hu, Alt ısı değer (kJ/kg)

Md, Motor momenti (Nm)

NO_x, Azot oksit

n, Motor devir sayısı (dak⁻¹)

Pe, Efektif motor gücü (kW)

Pme, Ortalama efektif basınç (Pa)

SO_x, Kükürt oksitler

SO₂, Kükürt dioksit

SS, Setan sayısı

η_T , Termik verim

η_e , Efektif verim

λ , Hava fazlalık katsayısı

NaOH, Sodyum hidroksit

NaMeO, Sodyum Metoksit

KOH, Potasyum hidroksit

H₂SO₄, Sülfürik Asit

KISALTMALAR

AFR, Hava – yakıt oranı

ASTM, Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu standartları

EN, Avrupa standartları

OPEC, Petrol ihraç eden ülkeler topluluğu

OECD, Ekonomik İşbirliği ve kalkınma örgütü

HİY, Hayvansal İç Yağı

ME, Metil Ester

EE, Etil Ester

YAME, Yağ Asidi Metil Esteri

DY, Dizel Yakıtı

B5, %5 biyodizel ve %95 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt

B20, %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt

B50, %50 biyodizel ve %50 dizel yakıtından oluşan karışım yakıt

B100, %100 biyodizel

DI, Direk enjeksiyon

IDI, İndirek enjeksiyon

HFK, Hava Fazlalık Katsayısı

TG, Tutuşma gecikmesi

⁰KMA, Krank mili açısı

Ü.Ö.N. Üst Ölü Nokta

A.Ö.N. Alt Ölü Nokta

TÜPRAŞ, Türkiye Petrol Rafinerisi Anonim Şirketi.

Bkz. Bakınız

Diğ. Diğerleri

Ark. Arkadaşları

ÖZET

Doktora Tezi

HAYVANSAL YAĞLARDAN BİYO-YAKIT ÜRETİMİ VE BİR DİZEL MOTORUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Şehmus ALTUN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 133

Bu çalışmada, gıda olarak kullanılmayan hayvansal iç yağlardan baz katalizörlü transesterifikasyon ile hayvansal iç yağı metil esteri (biyodizel) üretilmiştir. Metil esterinin viskozite ve yoğunluğu dizel yakıtına yakın, ısı değeri ise biraz düşük olarak bulunmuştur. Bununla beraber viskozite ve yoğunluk değerleri ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarında çıkmıştır. Biyodizel saf olarak (B100) ve dizel yakıtı ile karıştırılarak (B5, B20 ve B50) direk püskürtmeli bir dizel motorunda yakıt olarak kullanılıp, motor performans karakteristikleri ile egzoz emisyonu değişimleri dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre; biyodizel ve karışımları dizel yakıtı ile benzer motor gücü üretirken yakıtlardaki biyodizel oranının artmasıyla özgül yakıt tüketiminde artış ve efektif verimde düşüş olduğu görülmüştür. Biyodizel kullanıldığında CO, NO_x, SO₂, CO₂ ve duman emisyonları dizel yakıtına göre ortalama olarak sırasıyla %15, %38.5, %72.7, %16.7 ve %56.8 daha düşük olmuştur. Test yakıtları arasında en düşük CO ve NO_x emisyonları B20 yakıtı kullanıldığında ölçülmüştür. Hayvansal iç yağı metil esterinin bir dizel motorunda uzun süreli kullanımlar için uygun olup olmadığını ve motor elemanları üzerindeki etkilerini belirlemek için deney motoru B20 karışım yakıtı ile 100 saat çalıştırılarak motor elemanlarının durumu dizel yakıtının 100 saat kullanımına göre karşılaştırılmıştır. B20 ile çalışmada oluşan motor birikintilerin dizel yakıtı ile çalışmaya benzer olduğu fakat B20 ile oluşan birikintilerin motor elemanlarına biraz yapıştığı ve renginde bir farklılık olduğu görülmüştür. Bununla beraber oluşan birikintiler motorun çalışmasını engellememiş ve motor 100 saat boyunca sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Yapılan kısa ve uzun süreli motor testleri sonuçlarına dayanarak biyodizel ve karışım yakıtların direk püskürtmeli dizel motorlarında motor yapısında hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca hava kirliliğinin azaltılması açısından özellikle B20 yakıtı dizel motorlar için uygun bir alternatif yakıt olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hayvansal Yağlar, Transesterifikasyon, Biyodizel, Dizel Motor.

ABSTRACT

PhD Thesis

BIO-FUEL PRODUCTION FROM ANIMAL FATS AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ITS USAGE IN A DIESEL ENGINE

Şehmus ALTUN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Education

2009, Page: 133

In this study, animal tallow methyl ester as biodiesel fuel was produced from inedible animal tallow by base-catalyzed transesterification. Viscosity and density of tallow methyl esters are found to be very close to that of diesel. The calorific value of biodiesel is found to be slightly lower than that of diesel. However, viscosity and density of methyl ester have been found to meet ASTM D6751 and EN 14214 specifications. An experimental study was carried out in order to investigate the performance and emission characteristics of tallow methyl ester (B100) and its blends with petroleum diesel fuel (B5, B20, B50) in a direct injection diesel engine and compare the findings with petroleum diesel fuel. The effective engine power was comparable by biodiesel and blend fuels compared with diesel fuel. It was observed that the addition of biodiesel to the diesel fuel decreases the effective efficiency of engine and increases the specific fuel consumption. Emissions of CO, NO_x, SO₂, CO₂ and smoke were reduced around 15%, 38.5%, 72.7%, 16.7% and 56.8%, respectively, in case of tallow methyl esters (B100) compared to diesel fuel. Besides, the lowest CO and NO_x emissions were obtained for B20 among all test fuels. In order to clarify the effect of biodiesel on engine components and whether it is suitable for long term use or not in diesel engines, the engine was operated with both B20 and diesel fuel for 100 hours. Deposits in engine components were comparable in amount, but slightly different in color and adhesive, with the B20 when compared with those of diesel fuel. Besides, formation deposits in engine were not prevent to engine operated that engine was satisfactorily operated for 100 hours. It is concluded at the results of short and long term engine experiments, biodiesel and blended fuels can be used in direct injection diesel engines without any modification to substitute diesel fuel. The reductions in exhaust emissions made especially B20 a suitable alternative fuel for diesel engines and thus could help in controlling air pollution.

Key Words: Animal Fat, Transesterification, Biodiesel, Diesel engine.

1.GİRİŞ

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı petrolden karşılanmaktadır. Petrol kaynaklarının devamlılığının sağlanması modern dünyanın ekonomik ve siyasi dengelerini etkileyen en önemli unsurlardan birisidir. Petrolün sınırlı bir rezerve sahip ve giderek tükeniyor olması ve petrol kaynaklarının yoğun olduğu coğrafi bölgelerde sıkça gündeme gelen istikrarsızlıklar, modern dünyanın önemli ihtiyacı olan petrolün kesintisiz bir şekilde temininde sıkıntılara yol açmaktadır. 1970’li yıllarda yaşanan petrol krizleri ve günümüzde başta Irak olmak üzere Venezuela ve Nijerya gibi üretici ülkelerin içinde bulunduğu belirsizlikler petrol fiyatlarını tırmandırmıştır. Çin, Hindistan, Rusya ve Brezilya gibi büyüyen ekonomilerin sürekli artan talebi de petrol fiyatlarının artmasında etkili olmuştur [1]. Bunun yanında petrol kökenli yakıtların yanma reaksiyonu ürünlerinin sebep olduğu çevre sorunları doğal hayatı ve canlı yaşamını tehdit etmektedir. Bu yanma ürünleri günümüzde dünyanın en önemli çevre sorunlarından biri olan küresel ısınmanın yanında birçok çevre sorununa neden olmaktadır. Küresel ısınma, yanma neticesinde oluşan karbondioksit (CO_2), kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksit (NO_x) gibi emisyonların bir sonucu olarak oluşmaktadır [2]. Bu emisyonlar ise daha çok fosil yakıtlar kullanılan sektörlerde yanma ürünü olarak atmosfere bırakılmaktadır. Körbitz; küresel ısınma üzerinde petrol kökenli yakıtların kullanıldığı taşımacılık sektörünün büyük bir etkisinin bulunduğunu ve gelecekte bu etkinin artacağını bildirmiştir [3].

Yolcu ve yük taşımacılığı, tarımsal ve endüstriyel faaliyetler, enerji üretimi ve inşaat işleri gibi geniş bir alanda yüksek verimleri ve dayanıklılıkları nedeniyle dizel motorlar kullanılmaktadır [4,5]. Bu geniş kullanım alanına sahip olan dizel motorlarda petrol kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Petrol sektörünün talebi karşılayamaması ve petrol fiyatlarının aşırı yükselmesi gibi olası bir durumda enerji gereksinimlerini dizel motorlarından sağlayan sektörler olumsuz yönde etkilenecektir. Petrolden bağımsız alternatif yakıtların geliştirilmesi olası bir petrol krizinde bu sektörler için hayati önem taşımaktadır. Bununla beraber petrol kökenli yakıtların yanması sonucu çevre kirliliğini artıran yanma ürünleri oluşmakta, bunlardan dizel motorlardan kaynaklanan yanma ürünleri karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler (PM) olarak sıralanabilir. Bunlardan NO_x ve PM ’ler dizel motorların başlıca iki kirleticisidir [6]. Dizel motor emisyonlarının küresel iklim değişikliği, hava, toprak ve su kirliliği, görüş mesafesinin azalması, kanser, kalp-damar ve solunum yolu hastalıklarının gelişimi üzerinde payı bulunmaktadır [7]. Dizel motorlarda petrole dayalı yakıt tüketiminin azaltılması ve bu motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonların düşürülmesi çalışmaları dünya genelinde önemli destekler görmekte ve başta Avrupa Birliği

lkeleri olmak üzere birçok gelişmiş ülkede bu konuda ciddi çalışmalar yapılıp olumlu sonuçlar hayata geçirilmektedir. Bu çalışmalardan biri alternatif dizel motor yakıtlarının araştırılması ve geliştirilmesidir. Bir alternatif yakıtın, teknik ve ekonomik yönden uygun, evre dostu ve kolay elde edilebilir olması gerekmektedir [8]. Bu bağlamda bitkisel ve hayvansal yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyodizel yakıtı petrol dizeline alternatif olarak araştırılmaktadır. Lin ve ark., [6], biyodizel yakıtının dizel motorlarında, kazanlarda ve diğer yanma araçlarında kirliliğin azaltılması için umut verici bir alternatif yakıt olarak dikkate alındığını belirtmişlerdir. Oksijenli alternatif yakıtların kullanımı, enerji güvenliği, bölgesel hava kalitesi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması adına, dizel motorlarında zararlı egzoz emisyonların azaltılmasına aday olduğunu Kumar ve ark., belirtmiştir [4]. Yapılan bir çok çalışmada alternatif dizel motor yakıtı olarak biyodizelin karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), kükürt oksitler (SO_x), partikül maddeler (PM), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve nitrik polisiklik aromatik hidrokarbon (nPAH) emisyonlarının petrol dizeline göre daha düşük seviyelerde olduğu fakat NO_x emisyonlarında bir miktar artış meydana geldiği belirtilmiştir [9, 10, 11]. Biyodizelin biyolojik olarak parçalanabilmesi, zehirleyici etkisi bulunmaması ve düşük emisyon profili [12,13], yüksek setan sayısı, yüksek oksijen içeriği, kükürt ve aromatik içermemesi [14], üstün yağlama yeteneği [15,16] onu cazip kılan özellikleri olarak sıralanabilir. Bununla beraber düşük ısıl değeri, daha yüksek NO_x emisyonları ve düşük sıcaklıklardaki yüksek hassasiyeti hala geliştirilmesi gereken özellikleridir [16]. Nitekim, dizel motorunun mucidi Rudolf DIESEL 1900’lerde Paris’teki bir sergide motorunda yer fıstığı yağını yakıt olarak kullanarak [17], bitkisel yağların dizel motorlarında kullanılabileceğini göstermiş olmasının yanında o zamanlar petrolün bol miktarda ve ucuz olarak bulunur olması nedeniyle alternatif yakıt düşüncesi çok zayıf kalıyordu. Bu durum dizel motorların tasarımınn petrol ürünü yakıtlar ile çalışacak şekilde gelişmesini beraberinde getirmiştir. Bu nedenle dizel motorunda alternatif olarak kullanılacak yakıtın motor yapısında değişiklik gerektirmeyecek nitelikte olması büyük önem taşıtmaktadır. Bitkisel ve hayvansal yağların dizel motorlarında doğrudan kullanılması durumunda ilk hareket problemleri, enjektörlerde tıkanma, yağlama yağı problemleri, yağ segmanı yapışması ve karbon birikimi gibi bazı problemler ortaya çıkmaktadır [18–21]. Bu yağların dizel motorlarında kullanımını daha uygun hale getirmek için proliz, seyreltme, emülsiyon ve transesterifikasyon gibi yöntemler uygulanmaktadır. Bunların arasında transesterifikasyon çoğunlukla kullanılan yöntemdir [22]. Bu yağlardan transesterifikasyon reaksiyonu ile elde edilen ester yakıtları dizel motorlarında rahatlıkla kullanılabilmekte ve motor yapısında çok küçük veya değişiklik gerektirmemektedir [23,24]. Bu yağ asidi (m)etil ester yakıtına biyodizel denilmektedir. Ayrıca biyomotorin, dizel-Bi ve yeşil dizel olarak da adlandırılmaktadır [25]. Transesterifikasyon reaksiyonu, yağın bir katalizör varlığında kısa

zincirli bir alkol ile reaksiyona girerek yağ asidi esteri oluşturmaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ, monohidrik bir alkolle (etanol veya metanol), katalizör (asidik, bazik katalizörler ile enzimler) varlığında ana ürün olarak yağ asidi esterleri ve gliserin vererek esterleşir. Ayrıca esterleşme reaksiyonunda yan ürün olarak digliserit ve monogliseritler, reaktan fazlası ve serbest yağ asitleri oluşur. Biyodizel üretim yöntemleri baz katalizli, asit katalizli, asit-baz katalizli ve enzimatik esterifikasyon yöntemleri olarak sınıflandırılabilir [26].

Birçok bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi yapılmaktadır. Yemeklik yağ kalitesi yüksek olan bitkisel ve hayvansal yağların biyodizel üretiminde kullanılması özellikle ülkemiz gibi yemeklik yağ ihtiyacının büyük bir kısmını ithal eden ülkeler için lüks olmaktadır. Nitekim; biyodizelin fiyatı petrol dizelinden daha yüksektir. Bunun en büyük nedeni biyodizel üretiminde kullanılan hammaddenin fiyatının yüksek oluşudur. Bu nedenle kullanılmış/atık ve gıda olarak kullanılmayan yağların biyodizel üretiminde tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Bu bağlamda bazı hayvansal yağlar ve kullanılmış yağlar iyi bir seçim olarak karşımıza çıkmaktadır. Gıda olarak kullanılmayan hayvansal iç yağlar bitkisel yağların en ucuzu olan soya yağından bile daha ucuz olduğunu Yahya ve Marley belirtmiştir [79]. Bununla birlikte hayvansal yağların setan sayıları ve ısı değerleri dizel yakıtına yakın olup oksijen içerikleri ek avantaj sağlamaktadır [4]. Hayvansal yağların yüksek oranda doymuş yağ asitlerinden oluşması onları oda sıcaklığında katı ve viskoz yapmaktadır [27], bunun yanında, onları setan sayısı bakımından bitkisel yağlara göre üstün hale getirmektedir [28]. Hayvansal yağların çok viskoz olmaları eksik yanma ile sonuçlanan yakıtın fakir buharlaşma karakteristiklerine neden olmaktadır. Bu sorunları çözmek için bitkisel veya hayvansal yağların transesterifikasyon ve emülsiyonu etkili iki çözüm yöntemidir. Bu yöntemler kullanılarak hayvansal veya bitkisel yağlardan elde edilen yakıtlar dizel motorlarında yanmayı geliştirmekte ve kirletici emisyonları azaltmaktadır [27;29–30]. Nitekim; Nelson ve Schrock; hayvansal iç yağların biyodizele dönüşümünün büyük çevresel ve ekonomik avantajlar sağlayacağını bildirmişlerdir [31].

Bu çalışmada Elazığ'da bulunan Katiboğlu hayvan kesim hanesinde et üretimi sırasında elde edilen ve gıda olarak kullanılmayıp sabun üretimi için pazarlanan hayvansal iç yağlardan biyodizel üretimi ve dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1.1. Dünyada ve Ülkemizde Petrolün Durumu

Enerji piyasası düzenleme kurulu raporuna göre, 2005 yılı sonunda dünyanın kesinleşmiş petrol rezervi 1293 milyar varil olduğu belirtilmiştir. Bu rezervlerin %62'si Orta Doğu ve Kuzey Afrika bölgesinde toplanmış, tüm rezervlerin %20'sine sahip olan Suudi Arabistan dünyanın en büyük rezervlerine sahip ülkesi konumundadır. Dünyanın kesinleşmiş

petrol rezervi cari üretim düzeyini 42 yıl daha sürdürebilecek düzeydedir. 2005 yılında küresel petrol talebi günlük 83,7 milyon varil, 2006 yılında ise 84,5 milyon varil düzeyindedir. ABD tek başına günlük 20,6 milyon varil ile en büyük petrol tüketicisi ülke konumundadır. Dünya petrol talebi Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1 Dünya petrol talebi

	Ortalama talep (milyon varil/gün)		Talepteki payı (%)	
	2005	2006	2005	2006
Ülkeler				
OECD	49.6	49.1	59.3	58.1
ABD	20.8	20.6	24.9	24.4
Avrupa	25.7	15.4	30.7	18.2
Çin	6.8	7.2	8.1	8.5
Dünya	83.7	84.5	100	100

Tablo 1.1’de görüleceği üzere, dünya enerji talebinin %58.1’lik kısmını OECD ülkelerine, yaklaşık dörtte birlik kısmı ise sadece ABD’ye aittir. 2005 yılında gerçekleşen günlük ortalama 83,6 milyon varillik petrol üretiminin 35,5 milyon varili ve 2006 yılında gerçekleşen günlük ortalama 84,5 milyon varillik petrol üretiminin 35,2 milyon varili OPEC ülkeleri tarafından yapılmıştır. Dolayısıyla dünya petrol üretiminin % 40’ından fazlası OPEC ülkeleri tarafından sağlanmıştır. Tablo 1.2’de ülkelere göre dünya petrol üretimi verilmiştir.

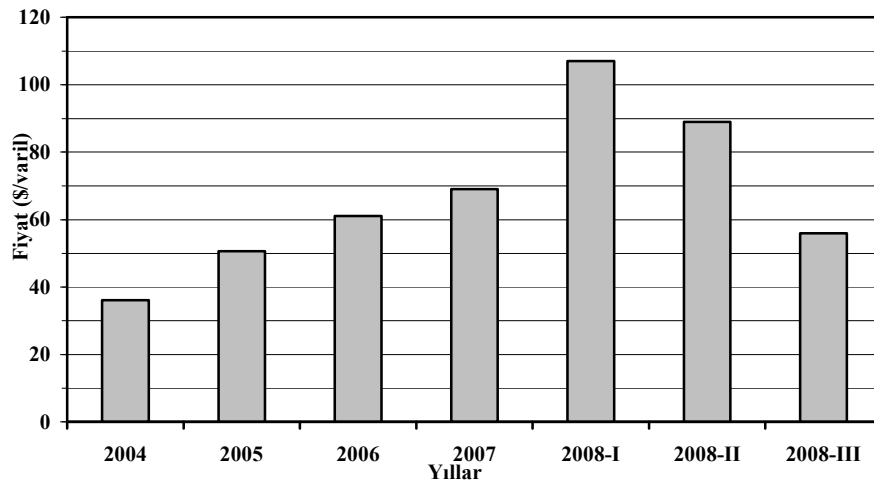
Tablo 1.2 Dünya petrol üretimi

	Ortalama üretim (milyon varil/gün)		Üretimdeki payı (%)	
	2005	2006	2005	2006
Ülkeler				
OPEC	35.5	35.2	42.5	41.7
S.Arabistan	9.5	9.1	11.4	10.8
İran	4.1	4	4.9	4.7
Venezuela	2.5	2.5	3.0	3.0
Nijerya	2.6	2.4	3.1	2.8
Dünya	83.6	84.5	100.0	100.0

Petrol kaynaklarının devamlılığının sağlanması modern dünyanın ekonomik ve siyasi dengelerini etkileyen en önemli unsurlardan birisidir. 1970’ler öncesinde bol ve ucuz olan petrol arzında, 1974 yılında Suriye ve Mısır’ın İsrail’e karşı başlattıkları askeri müdahale ile (2,5–3

dolar olan ham petrol fiyatlarının 11–12 dolara yükselmesi ile) yaşanan birinci petrol krizi, İran devrimi (ham petrol fiyatlarının 30–35 dolara kadar yükselmesi) ile 1979 yılında yaşanan ikinci petrol krizi ekonomilerin petrole mutlak şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Günümüzde petrol rezervlerinin coğrafi dağılımı değerlendirildiğinde, bütün dünyanın petrol kaynakları için Orta Doğu'ya bağımlı durumda olduğu görülmektedir. Orta Doğu'da sıkça gündeme gelen istikrarsızlıklar, modern dünyanın önemli ihtiyacı olan petrolün kesintisiz bir şekilde temininde sıkıntılara yol açmaktadır. Bu noktada en önemli hususlardan birisi, enerji ihraç eden ülkelerin dünya piyasalarında siyasi güç elde etmeleridir. 2006 yılında dünya petrol piyasalarında yaşanan gelişmeler petrol fiyatlarının maliyet tabanlı olmayıp siyasi kararlar sonucu oluştuğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Siyasi istikrarsızlıklar, özellikle Ortadoğu'da yaşanan gerginlikler üç sene önce varil başına 30 dolar olan ham petrol fiyatını 2006 yılında 75 dolar/varil seviyesine çıkarmıştır. Petrol fiyatlarını bir taraftan Çin, Hindistan, Rusya ve Brezilya gibi büyüyen ekonomilerin artan talebi, diğer taraftan da başta Irak olmak üzere Venezuela ve Nijerya gibi üretici ülkelerin içinde bulunduğu belirsizlikler de tırmandırmıştır [1]. 2004–2008 yılları arasında gerçekleşen yıllık petrol fiyatları Şekil 1.1'de verilmiştir. Fiyatların dünyadaki gelişimine bakıldığında, ham petrol fiyatları, 2000–2004 yılları arasında 25–50 dolar/varil civarındaki seviyesinden hızlı bir yükseliş eğilimine girmiş, 2005 yılı sonunda 60 dolar/varil düzeyinde bir duraklama gösterdikten sonra 2007 yılında 70 dolar/varil civarına ulaşmıştır. 2008 yılı başlarında ise petrol fiyatları 100 dolar/varili geçmiştir. 2008 yılı ikinci yarısında ise 100 dolar/varil altına inmiş ve en son 2008 yılının sonlarına doğru 60 dolar/varil'in altına inmiştir. Şekil 1.1'den anlaşılabacağı gibi petrol fiyatları ve dolayısıyla petrolün temini sürekli olarak değişmektedir. Bu nedenle petrolden bağımsız alternatif enerji kaynaklarının olması günümüzde bir zorunluluk haline gelmiştir.



Şekil 1.1 2004–2008 yılları arası dünya petrol fiyatlarındaki ortalama değişim [OPEC].

2005 yılında ülkemiz toplam rafinaj kapasitesinin %92'si kullanılarak 25,5 milyon ton ham petrol işlenmiştir. 2006 yılında ise 27,6 milyon ton / yıl olan rafinaj kapasitesinin % 94,9'u kullanılarak yaklaşık 26,2 milyon ton ham petrol işlenmiştir. 2005–2006 yıllarına ilişkin olarak Enerji Piyasası Düzenleme Kurulundan edinilen ve mevcut ham petrol ithalat verilerinin derlenmesinden oluşan bilgiler Tablo 1.3'te sunulmuştur.

Tablo 1.3 Ham petrol ithalatı

Ham petrol ithalatı (ton)	Yıllar		Değişim oranı (%)
	2005	2006	
Ocak Şubat Mart	5.130.300	4.639.000	-9.58
Nisan Mayıs Haziran	6.271.600	6.590.400	5.08
Temmuz Ağustos Eylül	6.081.000	6.345.600	4.35
Ekim Kasım Aralık	5.906.200	6.486.600	9.83
Toplam	23.389.100	24.061.600	2.88

2005 ve 2006 yılları için ham petrol ithalat rakamlarının 3'er aylık dönemler halinde sunulduğu Tablo 1.4'te de görüleceği üzere, ham petrol ithalatı 2006 yılının ilk üç aylık döneminde bir önceki yıla göre % 9.58 oranında bir azalma göstermiş, diğer üç aylık dönemlerde ise sırasıyla % 5.08, % 4.35 ve % 9.83 oranlarında artış göstermiştir. Yıllık bazda ise 2006 yılında 2005 yılına göre yaklaşık % 3 oranında bir artış göstermiştir. 2005 ve 2006 yıllarında petrol ürünleri ihracatına ilişkin yapılmış bildirimler kapsamında edinilen veriler Tablo1.4'te sunulmaktadır.

Tablo 1.4 Petrol ürünleri ihracatı

Ton	2005	2006	Değişim oranı (%)
Miktar	4.509.474	5.755.212	27.6

Tablo1.4'te görüleceği üzere, petrol ürünleri ihracatı 2006 yılında 2005 yılına göre % 27,6 oranında artış göstermiştir

Akaryakıt dağıtıcı şirketlerinin 2005 ve 2006 yılları satışlarının karşılaştırmalı analizi Tablo 1.5'te verilmiştir.

Tablo 1.5 Akaryakıt dağıtım şirketlerinin akaryakıt türleri satışları (ton)

Akaryakıt	2005	2006	Değişim oranı (%)
Benzin türü	2.752.293	2.639.183	-4.1
Motorin türü	11.616.251	12.680.018	9.2
Fuel oil türü	3.707.454	2.702.131	-27.1
Toplam	18.075.998	18.021.332	-0.3

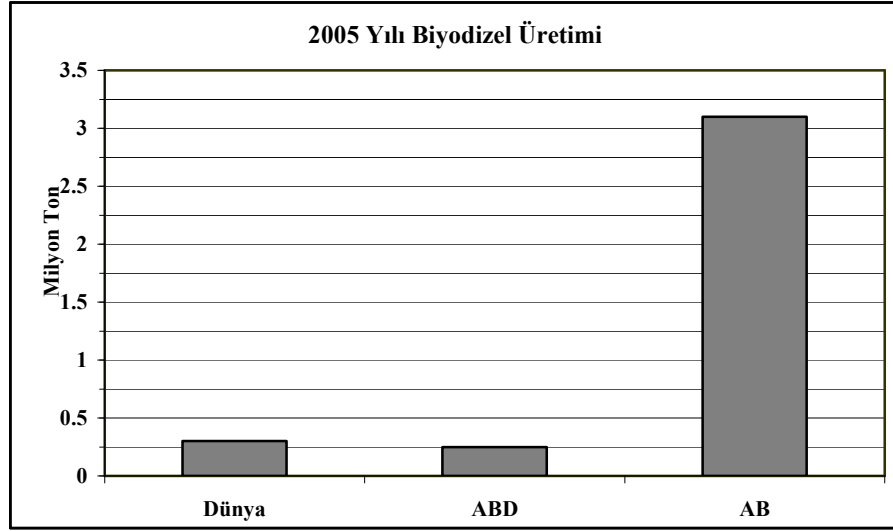
Tablo1.5 incelendiğinde, akaryakıt dağıtım şirketlerinin 2006 yılı motorin satışlarının tüm akaryakıt satışları içindeki payında 2005 yılına göre artış gözlemlenirken; benzin ve fuel oil türlerinde azalma olduğu görülmektedir.

- 2006 yılında benzin türleri satışlarının tüm satışlar içindeki payında grafikte de görüleceği üzere 2005 yılına göre gerçekleşen azalmaya paralel olarak, satış miktarı bazında da benzin satışları 2006 yılında bir önceki yıla göre % 4.1 azalma göstermiştir.
- Motorin türlerinin tüm satışlar içindeki payındaki artışa paralel olarak miktar olarak satış miktarında da % 9,2 oranında artış gözlemlenmektedir.
- Fuel oil türlerinin tüm satışlar içindeki payında gerçekleşen düşüşe paralel olarak satış miktarında da 2006 yılında 2005 yılına göre % 27,1 düşüş gözlemlenmiştir.
- Tüm ürünler temel alındığında ise satışlar 2006 yılında bir önceki yıla göre toplam miktar olarak yaklaşık aynı düzeyde kalmıştır.

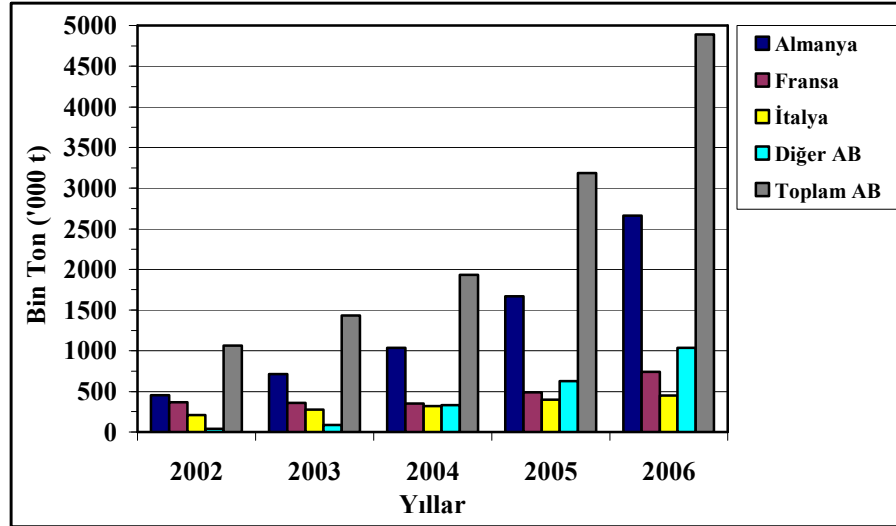
Fuel oil türleri satışındaki % 27,1 oranında azalma, ülkemizde doğal gaz kullanımının yurt çapında yaygınlaştırılması ve petrol fiyatlarındaki artış nedeniyle diğer alternatif yakıtların daha avantajlı duruma gelmesiyle açıklanabilir. Gittikçe artan araç sayısına rağmen, benzin türleri satışının % 4,1 oranında azalmasında motorin türleri satışının % 9.2 oranında yükselmesinden de anlaşılabileceği üzere motor teknolojisinin yükselişi, araçların motorin kullanımına yönelmesi ve teknolojik gelişmeler nedeniyle oluşan verimlilik kazanımlarının önemli faktörler olabileceği değerlendirilmektedir [1].

1.2. Dünyada Biyodizel Üretimi ve Uygulamaları

2005 yılında Avrupa birliği ülkelerinde toplam 3.1, Amerika Birleşik Devletinde 0.25 ve Dünyada 0.3 milyon ton biyodizel üretilmiştir (Şekil 1.2). En fazla üretimin yapıldığı Avrupa Birliği ülkelerinde bir önceki yıla göre toplam üretimde yaklaşık; 2002 yılında % 15, 2003 yılında %35, 2004 yılında %35, 2005 yılında %65 ve 2006 yılında %54'lük artış olmuştur (Şekil 1.3).



Şekil 1.2 2005 yılında Dünya, Avrupa Birliği ve ABD’de biyodizel üretimi değerleri [32].



Şekil 1.3 2002–2006 yılları arasında Avrupa Birliği üye ülkeleri biyodizel üretim değerleri [32].

AB ülkelerinde bugün 40 tesiste yılda 1.350.000 ton biyodizel üretilmektedir. Bu ülkeler başlıca Almanya, İtalya, Avusturya, Fransa ve İsveç’tir. Almanya ve Avusturya’da 1800 adet biyodizel satan akaryakıt istasyonu bulunmaktadır. Almanya’da genel olarak biyodizel; taze yağlardan, Avusturya’da ise kullanılmış yağlardan üretilmektedir. Almanya motorine karıştırılmış biyodizele izin vermemektedir. Sadece %100 biyodizel kullanımına izin vermekle birlikte, biyodizelden vergi alınmamaktadır. Almanya, Danimarka, Norveç, Belçika, İtalya, İspanya, İsveç, Çekoslovakya ve Macaristan biyodizel için %100, Avusturya ise %95 vergi indirimi uygulamaktadır.

Biyodizel ile ilgili en büyük yatırım Almanya’da yapılmıştır. Almanya, 2010 yılında 2 milyon ton/yıl biyodizel üretmeyi planlamaktadır. Almanya’da 600 istasyonda biyodizel satılmaktadır. Okul servis araçları, park yerlerindeki araçlar, belediye araçları, iş makineleri, tarım araçları (traktör gibi), milli park araçları, askeri araçlar ve zirai araçlar da öncelikli olarak biyodizel kullanılmaktadırlar. İngiltere’de her yıl 100.000 ton bitkisel ve hayvansal atık yağ toplanmakta ve biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Bitkisel ve hayvansal atık yağların toplanması, taşınması ve değerlendirilmesi İngiltere’de yeni iş alanları oluşturmuştur. ABD’de atık yağlar ayrı kaplarda depolama usulü ile toplanırken kişi başına toplanan atık miktarı 4 kg/yıl iken kanalizasyon sistemine yerleştirilen yağ tutucu ile tutulan yağ miktarı 7 kg/yıldır. Belçika’da kişi başına toplanabilir atık yağ miktarı yılda 13 kg ve Avusturya’da ise 5 kg dır. Fransa’da biyodizel, özellikle ultra düşük kükürtlü dizele katılmaktadır.

Kanada hükümeti 2010 yılına kadar yılda 500 milyon litre biyodizel üretmeye karar vermiştir. Kanada bugün 26,4 milyon hektar alanı bitki üretimi amacı ile kullanmaktadır. Bu alanın yaklaşık %3’nü biyodizel mahsulü üretimi amacı ile kullanmaktadır. Kanada laboratuvar şartlarında ve pilot tesislerde biyodizel üretimini sürdürmektedir.

Günümüzde biyodizel özellikle;

- Avusturya (B100)
- Çek Cumhuriyeti (Belediye Araç Filolarında B30-B36)
- Fransa (Belediye Araç Filolarında B30-B36) (B5-halka satışta)
- İtalya (Kalorifer yakıtı ve yağlama katkısı olarak da kullanılıyor)
- İspanya (Belediye araç filolarında B30-B36)
- A.B.D (B20)
- U.K (B5)

Şeklinde satışa sunulmaktadır.

Biyodizel Amerika ve Avrupa’da ticari olarak üretilmektedir. Avrupa’da bu konudaki aktif ülkeler özellikle Almanya, Avusturya, İtalya ve Fransa’dır.

- 11’i İtalya’da olmak üzere batı Avrupa’da 45 tesis
- 16’sı Çek Cumhuriyeti’nde olmak üzere Doğu Avrupa’da 29 tesis
- 7 tane ABD
- 2 tane Japonya
- 1 tane Nikaragua
- 1 tane Malezya’da

olmak üzere dünyada yaklaşık 28 ülkede biyodizel kullanılmaktadır. 21 ülkede toplam 85’e yakın biyodizel tesisi bulunmaktadır [28,75].

1.3. Ülkemizde Biyodizel

Biyodizel, Türkiye’de mevcut olanaklarla uygulamaya alınabilecek en önemli alternatif yakıt seçeneklerinden biridir. Ülkemizde kara taşımacılığının önemli bölümünde ve deniz taşımacılığında dizel motorlu taşıtlar kullanılmaktadır. Ayrıca endüstride jeneratörler için önemli miktarda dizel kullanılmaktadır. Petrol tüketimimizin ancak %15’i yerli üretimle sağlanabilmektedir. Petrol ürünleri tüketimi içinde ise en büyük payı %34 ile dizel almaktadır. Biyodizelin kullanımı ile petrol tüketiminde ve egzoz gazı kirliliğinde azalma gerçekleşecektir. Biyodizeli üretmek ve kullanmak için Türkiye yeterli ve uygun alt yapıya sahiptir. Türkiye’de kolza (kanola), ayçiçeği, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinin enerji amaçlı tarımı mümkündür. Hükümetimizin aldığı son tasarruf önlemleri kapsamında tarımda sadece kanola ve soya ekimine destek verilme kararı alınmıştır. Bu durum, çiftçiye bir yön vermektedir. Kanola ve soya ekimi ek bir bedelle desteklenmektedir. Kışı ılıman geçen bölgelerimizde kanola ikinci ürün olarak da ekilebilir. Tarımı sorunsuz ve maliyeti buğday ve ayçiçeğinden az olan kanola, Türk çiftçisi için önemli bir kurtarıcı olacaktır. GAP Bölgesi’nde 10 Milyon Dekar alanda sulu tarım olanağı vardır; bölgede pamuk yanı sıra dönüşümlü olarak kanola ve/veya soya ekimi olumlu olacaktır. Çok genel bir hesaplama ile, GAP Bölgesi’nde kanola ve/veya soya ekimi ve biyodizel üretimi ile yılda 1.5 Milyon Ton biyodizel üretilbileceği söylenebilir. Enerji amaçlı tarımın, Türkiye tarım politikası içinde yer alması, çiftçinin yönlendirilmesi yararlı olacaktır.

Türkiye biyodizel üretimini gerçekleştirebilecek teknolojiye ve yakıtın kullanımına kolaylıkla uyum sağlayabilir. Çeşitli kapasitelerde biyodizel üretim tesisleri öncelikle kırsal kesimde konuşlandırılarak, tarım makinelerinin, kamyonların yakıtı kullanımı özendirilebilir. Ayrıca egzoz kirliliğinin yoğun olduğu büyük şehirlerde toplu taşımacılıkta biyodizel kullanımı yararlı olacaktır. İlk aşamada motorine, %5–20 değişen oranlarında biyodizel katılarak kullanmak yakıtta kademeli geçişi sağlayacaktır. Biyodizelin ilgili bakanlıklarca ve devlet kurumlarınca tanımlanması, mevzuatının oluşturulması, yatırım teşvikleri ve vergi indirimleri ile desteklenmesi gereklidir. Konunun başarılı uygulamasının olduğu ülkelerde, devlet- petrol firmaları- biyodizel üreticileri ve tüketicileri koordinasyonu düzgün ilerlemektedir. Biyodizel çevre dostu- yenilenebilir enerji alternatifi olarak devletimizce desteklenmelidir. Örneğin, Dünya Bankası mali desteği “Biyodizel Üretim Fonu” oluşturularak kullanılabilir [25,26].

Biyodizel üretimindeki hızlı büyümeden dolayı AB Ülkeleri 2005 yılından başlayarak fosil yakıtlara belirli oranlarda biyo yakıtın katılmasını yasal zorunluluk haline getirerek sektörün gelişmesi doğrultusunda aşağıdaki oranları benimsemişlerdir. 2005 yılında % 2, 2006 yılında % 2.75, 2007 yılında % 3.50, 2008 yılında % 4.25, 2009 yılında % 5, 2010 yılında % 5.75 oranında biyodizel olarak uygulanması planlanmıştır [33].

Türkiye 90 firma ile yıllık 978.436 ton kurulu kapasiteye sahiptir. Kurulu kapasite kullanım oranı %10 olup, yaklaşık fiili üretim 90.000 ton/yıl olarak gerçekleşmektedir. Biyodizel üretimi yapan firmaların büyük çoğunluğunu yağ fabrikaları oluşturmakta ve bunu tarım, kimya ve akaryakıt sektörleri takip etmektedir. Tablo 1.6'da yatırımcı firmaların sektörel dağılımı gösterilmiştir. Tablo 1.7'de en çok üretimin yıllık 160.645 ton ile İzmit ilinde gerçekleştiği görülmekte, en fazla firma sayısının da Gaziantep'te olduğu görülmektedir [34]. Kasım 2005 itibariyle Türkiye'de yıllık biyodizel üretimi, Gebze, Adana, İzmir, Bursa, Polatlı, Şanlıurfa, Tarsus, Kırıkkale, Ankara bölgelerinde 90 000 tonu aşmış ve üretici sayısı 90'ı aşmıştır (Şekil 1.4) [28;36].



Şekil 1.4 Türkiye’de biyodizel üretimi yapılan yerler [28].

Tablo 1.6 Yatırımcı firmaların sektörlere göre dağılımı.

Sektörler	% Pay
Yağ fabrikaları	40
Tarım sektörü	21
Kimya sektörü	18
Akaryakıt sektörü	11
Diğer	10

Tablo 1.7 Ülkemizde illere göre biyodizel firma sayısı ve kapasiteleri

İL	Firma Sayısı	Kapasite (ton/yıl)
İzmit	7	160.645
Gaziantep	16	158.004
Ankara	11	71.040
Mersin	4	70.534
Adana	7	58.745
Bursa	5	46.062
İzmir	6	35.588

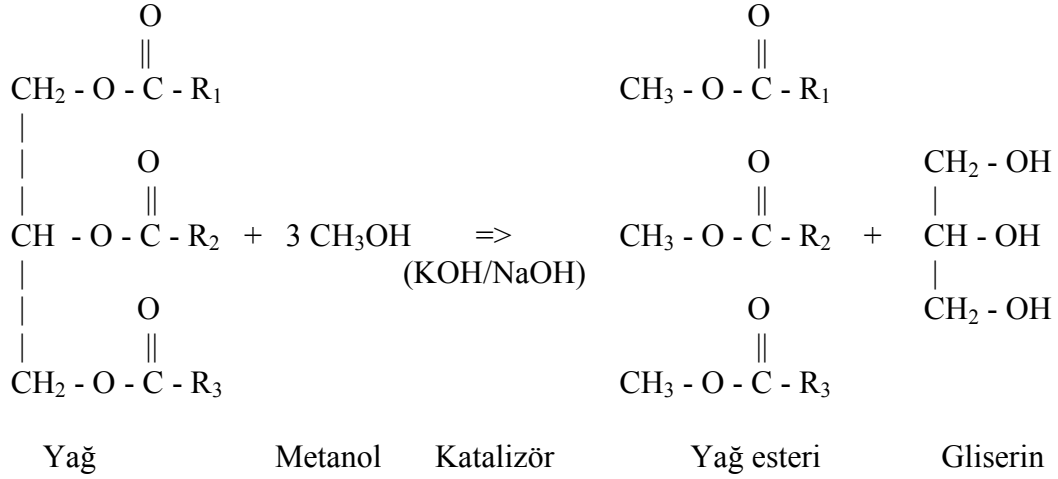
Türkiye’de kurulan birçok biyodizel tesislerinin alt yapı anlamında ciddi eksikleri ve sorunları mevcuttur. Bunlar genel hatlarıyla;

- Üretim tesisinin yeri ve yerleşimi,
- Üretim tesislerinde kullanılan malzemeler,
- Kullanılan katalizör, metanol veya etanol kalitesi,
- Enerji tasarrufu dönüşümleri (metanol /etanol geri kazanımı, saf su yerine arıtılmış su kullanımı vb),
- Üretilen yakıtların ham kaynak aynı olmasına rağmen, yakıt özelliklerinin farklı olması,
- Ham yağa göre katalizör ve alkol oranlarının değişik kullanılması,
- Üretim esnasında biyodizelin yıkama fazında problemler,
- Üretilen biyodizelin depolama koşulları ve depolama sistemlerinin yetersizliği,
- Biyodizel üretim sistemlerinde iş güvenliği tedbirleri ile ilgili hiçbir verinin olmaması olarak sıralanabilir [28].

1.4. Biyodizel Üretimi ve Özellikleri

Bitkisel ve hayvansal yağların dizel motorlarında kullanımı için seyreltme, mikro emülsiyon, proliz ve transesterifikasyon olmak üzere dört farklı yöntem vardır. Bunların arasında bitkisel ve hayvansal yağların transesterifikasyonu çoğunlukla kullanılan yöntemdir. Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ, kısa zincirli bir alkolle (etanol veya metanol), katalizör (NaOH veya KOH) varlığında yağ asidi esterleri ve gliserin oluşturmak üzere reaksiyona girer. Transesterifikasyon reaksiyonu Şekil 1.5’te verilmiştir. Yüksek viskoziteli yağların uygun bir seyrelticiyle viskozitelerini düşürme yöntemine seyreltme denir. Genellikle seyreltme işlemi için dizel yakıtı kullanılır. Mikro emülsiyon oluşturma, normalde karışmayan iki sıvı ile bir

veya daha fazla amfi filinin bir araya getirilmesidir. Proliz veya craking, kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak üzere kırılması işlemidir. Bu yöntemde yağ kapalı bir kaptan veya standart ASTM distilasyonu ile ısı parçalanma etkisinde tutularak bağları kırılmaktadır.



Şekil 1.5 Transesterifikasyon reaksiyonu [35].

1.4.1. Biyodizelin Transesterifikasyon Reaksiyonu ile Üretim Aşamaları

Biyodizel kullanımının çevreye ve ekonomiye getireceği katkıların beklenen düzeyde gerçekleşebilmesi, ancak uluslararası standartlarda uygun bir üretim ile sağlanabilir. Üretim sürecindeki yetersizlikler hammadde ve ürün kayıplarına yol açmasının yanı sıra, üretimde kesilmelere neden olarak verimliliği düşürecek ve ürünün kalitesini bozacaktır. Düşük kalitedeki ürün kullanım zorluklarına ve kullanıldığı motorların doğrudan zarar görmesine neden olacaktır. Biyodizel üretiminin çeşitli metotları olmakla birlikte günümüzde en yaygın olarak kullanılan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Biyodizel üretiminde aşağıdaki işlem basamakları takip edilmektedir [36]. Ayrıca; biyodizel üretim süreci şematik olarak Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

Alkol ve katalizörün karıştırılması: Katalizör olarak genellikle sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit kullanılır. Katalizör, bir karıştırıcı kullanılarak alkol içerisinde çözülene kadar karıştırılır.

Reaksiyon: Alkol/katalizör karışımı kapalı reaksiyon kabı içerisine doldurulur ve 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 değişmekte olup bazı sistemler reaksiyonun oda sıcaklığında olmasını gerektirir. Hayvansal veya bitkisel yağların kendi

esterlerine tamamen dönüşmesi için normalden daha fazla alkol kullanılır. Beslemedeki hayvansal veya bitkisel yağların içerisindeki su ve serbest yağ asitlerinin miktarının izlenmesi konusunda dikkatli olunmalıdır. Serbest yağ asidi veya su seviyesinin yüksek olması sabun oluşumu ve gliserin yan ürününün alt akım olarak ayrılması problemlerine neden olabilir.

Ayırma: Reaksiyon tamamlandıktan sonra iki ana üründen biri gliserin diğeri de 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.

Alkolün uzaklaştırılması: Gliserin ve biyodizel fazları ayrıldıktan sonra her bir fazdaki fazla alkol bir flaş buharlaştırma veya distilasyon prosesi ile uzaklaştırılarak reaksiyon karışımı nötralize edilir. Her iki durumda da alkol distilasyon kolonu kullanılarak geri kazanılır. Geri kazanılan alkol içerisinde su bulunmamalıdır.

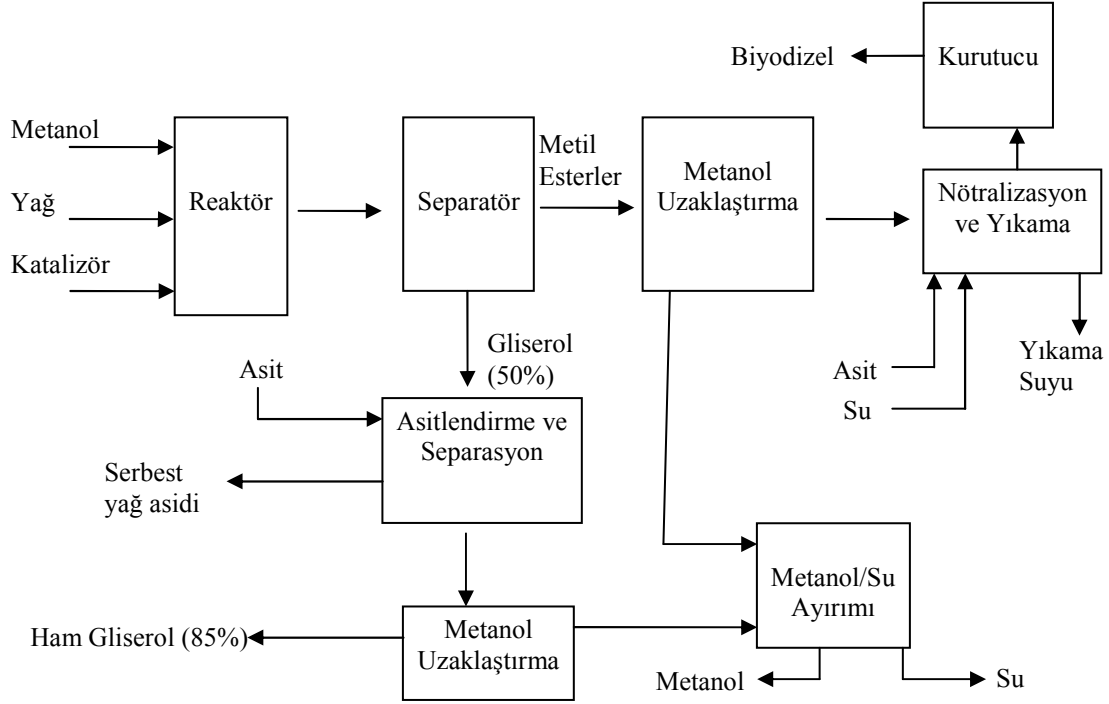
Gliserin nötralizasyonu: Gliserin yan ürünü, kullanılmamış katalizör ve bir asit ile nötralize edilmiş sabunlar içerir ve ham gliserin olarak depolanmak üzere depolama tankına gönderilir. Bazı durumlarda bu fazın geri kazanılması sırasında oluşan tuz gübre olarak kullanılmak üzere geri kazanılır. Pek 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 distillenerek kozmetik ve ilaç sektörüne pazarlanır.

Metil ester yıkama işlemi: Gliserinden ayrıldıktan sonra biyodizel kalıntı katalizör ve sabunların uzaklaştırılması amacıyla ılık suyla yavaşça yıkanır, suyu uzaklaştırılır ve depolamaya gönderilir. Bazı proseslerde bu basamak gereksizdir. Bu, açık amber-sarı renkte, petrol dizeline yakın viskoziteli bir sıvı veren üretim sürecinin sonudur. Bazı sistemlerde de biyodizel distillenerek safsızlıkların uzaklaştırılması sağlanır.

Biyodizel Üretiminde Dikkat Edilecek Hususlar

- Metil alkol sağlık açısından çok zararlı bir madde olduğundan dikkatli kullanılmalıdır.
- Sodyum hidroksit çok bazik ve nem tutma özelliğine sahip olduğundan nemsiz ortamda depolanmalıdır. Dikkatli kullanılmazsa kalıcı hasarlara neden olabilir.
- Biyodizel üretiminde kullanılmış yağlar kullanıldığında; bu yağlar 20 °C’de konsantre ve pıhtı halinde ise reaktanslar ilave edilmeden önce kullanılmış yağın ısıtılması gerekir.
- Üretimde kullanılacak kaplar sıcaklığa ve korozyona dayanıklı olmalıdır.

Sodyum metoksit (metil alkol+sodyum hidroksit) çözeltisi, çok toksin ve boyalara karşı çok koroziftir. Sodyum hidroksit, çinko, alüminyum veya teneke kaplarla reaksiyona girer. Dolayısıyla bu tür kaplar kesinlikle kullanılmamalıdır. Mümkünse çelik kaplar kullanılmalıdır [38].



Şekil 1.6 Biyodizel üretim şeması [37].

1.4.2. Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler

Transesterifikasyon ile biyodizel üretiminde ürün verimi üzerinde reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, alkol/yağ molar oranı, katalizör cinsi ve miktarı, alkol cinsi ve miktarı ile yağın içerisinde serbest yağ asidi ve suyun bulunması etkilidir. Bu değişkenlerin etkileri aşağıda açıklanmıştır.

1.4.2.1. Reaksiyon Sıcaklığının Etkisi

Reaksiyon oranı reaksiyon sıcaklığı tarafından güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Bununla birlikte yeterli zaman olursa oda sıcaklığında da reaksiyon tamamlanma noktasına kadar ilerleyebilir [8]. Reaksiyon sıcaklığının artması, özellikle süper kritik şartlar için ester dönüşüm verimi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir [22]. Yapılan bir çalışmada hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi sırasında 50 ve 55 °C sıcaklıklarda reaksiyonun başlamadığını, 65

ve 70 °C sıcaklıklarında ise metil alkolün kaynama noktasına ulaşması ve geçmesi ile ester ürünün parçalanmasından dolayı verim kaybının olduğu belirtilmiş ve 63±1 °C reaksiyon sıcaklığının en uygun değer olduğu belirtilmiştir [28]. Çanakçı ve Özsezen; transesterifikasyon reaksiyonunun, kullanılan alkol ve yağa bağlı olarak farklı sıcaklıklarda gerçekleşebileceğini ve genelde reaksiyon sıcaklığı alkolün kaynama noktasına yakın bir sıcaklıkta tutulması gerektiğini belirtmişlerdir [39]. Yapılan başka bir çalışmada diğer şartların aynı olduğu, 60, 45 ve 32 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ester verimlerinin sırasıyla %94, 87 ve 64 olduğu belirtilmiştir [40].

1.4.2.2. Alkol/Yağ Molar Oranının Etkisi

Yüksek molar oranlı reaksiyonlarda çok daha kısa sürede daha yüksek oranda ester dönüşümü gerçekleşmektedir [39]. Ester ürünlerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi de alkol/yağ molar oranıdır. Stokiyometrik transesterifikasyon reaksiyonu 1 mol gliserid ile 3 mol alkol reaksiyona girerek 3 mol yağ asidi esteri ile 1 mol gliserin oluşturur [40,41]. Molar oranının kullanılan katalizör ile ilişkisi vardır. Asit katalizörlü bir reaksiyonda soya yağı/BuOH molar oranının 30:1 gerektiği durumda, alkali katalizör kullanıldığında sadece 6:1 molar oranda verilen reaksiyon zamanı için aynı ester verimi elde edilmiştir [40;42]. Çıldır ve Çanakçı, 1:3, 1:6 ve 1:10 olmak üzere üç farklı bitkisel yağ/alkol molar oranlarında ayçiçeği, mısırözü ve kolza yağı kullanarak biyodizel üretimini yaptıkları çalışmalarında 1:3 molar oranında ester veriminin düşük olduğunu 1:6 molar oranında verimin arttığını ve 1:10 molar oranında ise daha yüksek verimin elde edildiğini belirtmişlerdir [43]. Demirbaş, alkol/yağ molar oranının artmasıyla alkil ester veriminde artış olduğunu belirtmiştir [44]. Felizardo ve ark., reaksiyondaki metanol miktarındaki artış ile metil ester fazının ayrışmasının kolaylaştığını bununla beraber viskozitenin azaldığı ve metil ester fazı saflığının %98'in üzerine arttığını belirtmişlerdir [45].

1.4.2.3. Katalizör Cinsi ve Miktarının Etkisi

Katalizörler alkaliler, asitler veya enzimler olarak sınıflandırılmıştır. Genellikle asit katalizör olarak sülfürik, fosforik, hidroklorik ve organik sülfonik asitler; alkali katalizör olarak da NaOH, KOH, karbonatlar ve sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum proksit gibi alkoksitler kullanılır. Lipazlar da biyokatalizör olarak kullanılabilirler [43]. Alkali katalizörlü transesterifikasyon asit katalizörlüden çok daha hızlıdır. Bununla birlikte bitkisel yağ eğer yüksek oranda serbest yağ asidi ve su içeriyorsa asit katalizör daha uygundur [41]. Hayvansal iç yağının biyodizele dönüşümünün incelendiği bir çalışmada, yağın ağırlıkça %0.1'i kadar katalizör kullanıldığında hem NaOH hem de NaMeO katalizörleri için en düşük iç yağ metil

ester verimi, %0.3 NaOH ve %0.5 NaMeO kullanıldığında ise maksimum verimin elde edildiğini belirtilmiştir. Bununla beraber her iki katalizör karşılaştırıldığında NaOH'in NaMeO'ten daha iyi olduğunu belirtilmiştir [46].

1.4.2.4. Serbest Yağ Asitleri ve Suyun Etkisi

Biyodizel üretimi için bitkisel ve hayvansal yağların klasik transesterifikasyonun da serbest yağ asidi ve su her zaman negatif bir etkiye sahiptir ki., serbest yağ asidi ve suyun varlığı sabunlaşmaya, katalizörün tükenmesi ve katalizör etkinliğinin azalmasına sebep olur. Bununla birlikte su içeriği bitkisel yağların klasik katalizörlü transesterifikasyonun da önemli bir faktör olup, su içeriği süper kritik metanol metodunda metil ester oluşumunu olumlu yönde etkilemektedir [22,47]. Artukoğlu, hayvansal atık yağın yüksek oranda serbest yağ asidi içermesinden dolayı önce asit katalizörlü sonra da baz katalizörlü olmak üzere iki aşamalı transesterifikasyon prosesinin uygun olacağını belirtmiştir [28]. Ma ve ark., serbest yağ asidi ve su eklemeksizin iç yağı metil esteri veriminin en yüksek olduğunu belirtmiştir [46]. Tashtoush ve ark., atık hayvansal yağın %10-15 oranında serbest yağ asitleri içermesinden dolayı 2,25 M H₂SO₄ asidik katalizör kullanımının daha uygun olacağını, çünkü baz katalizör kullanılırsa sabunlaşma olacağı ve son ürününün ayrılmasında zorluk olacağını belirtmişlerdir [48]. Çanakçı ve Garpen, yağın içerisindeki serbest yağ asitlerinin alkali katalizör kullanıldığında sabunlaşmaya sebep olduğunu ve bunun da biyodizelin gliserinden ayrılmasını önlediğini belirtmişlerdir [49].

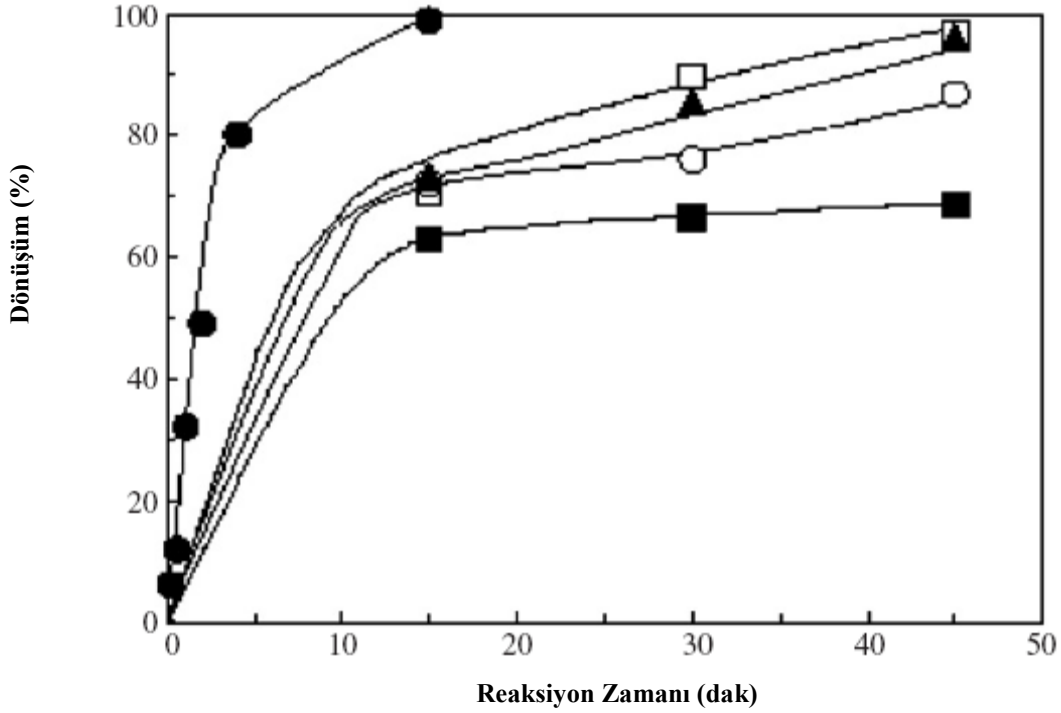
1.4.2.5. Reaksiyon Süresinin Etkisi

Reaksiyon süresinin artmasıyla dönüşüm oranı artar. Ma ve ark., hayvansal iç yağı reaksiyonunun ilk dakikalarda çok yavaş olduğunu, 15 dakika civarında ise maksimum değere ulaştığını belirtmişlerdir [46]. Şekil 1.7'de farklı alkol tipleri ile gerçekleştirilen reaksiyonlarda ilk dakikalarda reaksiyonun çok yavaş olduğu ve ester dönüşümlerinin sıfıra yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca özellikle metil alkolün kullanıldığı reaksiyonun onbeşinci dakikalarında maksimum dönüşümün sağlandığı görülmektedir.

1.4.2.6. Alkol Cinsi ve Miktarının Etkisi

Genellikle transesterifikasyon reaksiyonunda metil alkol, etil alkol, propanol ve bütanol gibi kısa zincirli alkoller kullanılır. Bu alkoller arasında kinetik ve reaksiyon sonu ürünler açısından bazı farklılıklar vardır [39]. Hayvansal atık yağın transesterifikasyonun da, alkol

olarak etanolun metanole göre daha yüksek dönüşüm sağladığı ve daha düşük viskozite değerleri verdiğini, bununla beraber %100, %150 ve %200 fazla etil alkol kullanımı sırasıyla %78, %82 ve %74 kütle dönüşümü değeri verdiğini belirtilmiştir [48].

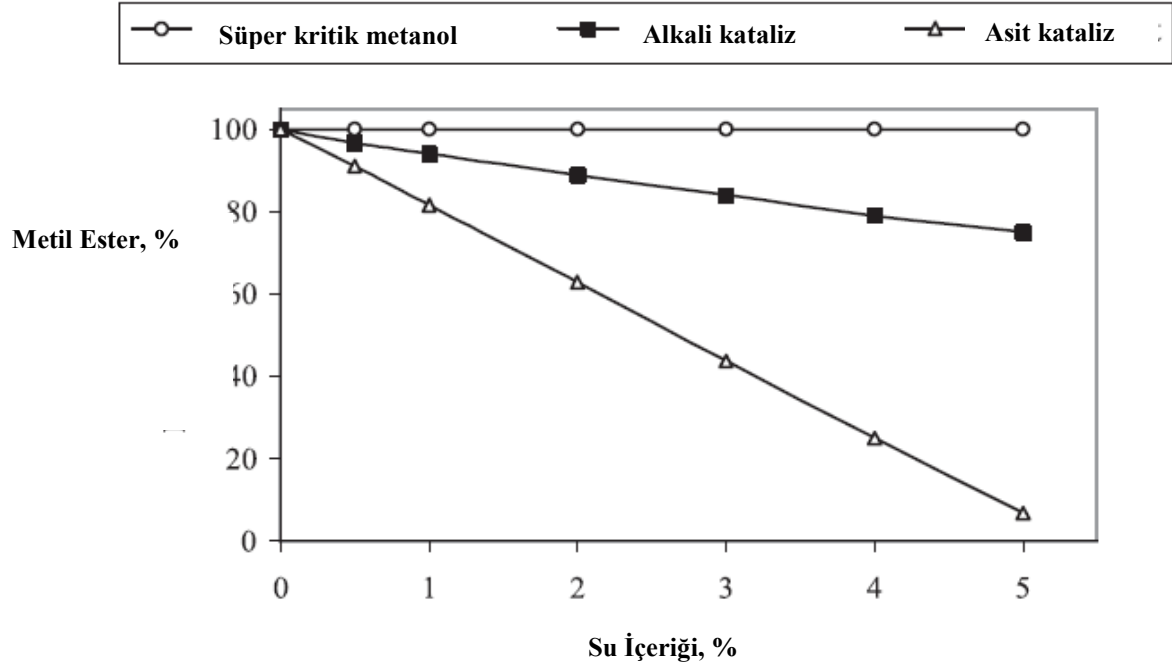


Şekil. 1.7 Farklı tip alkol kullanımının reaksiyon zamanına bağlı olarak ester dönüşümü üzerindeki etkisi ((●) metanol, (□) etanol, (▲) 1-propanol, (○) 1-butanol, (■) 1-octanol) [50].

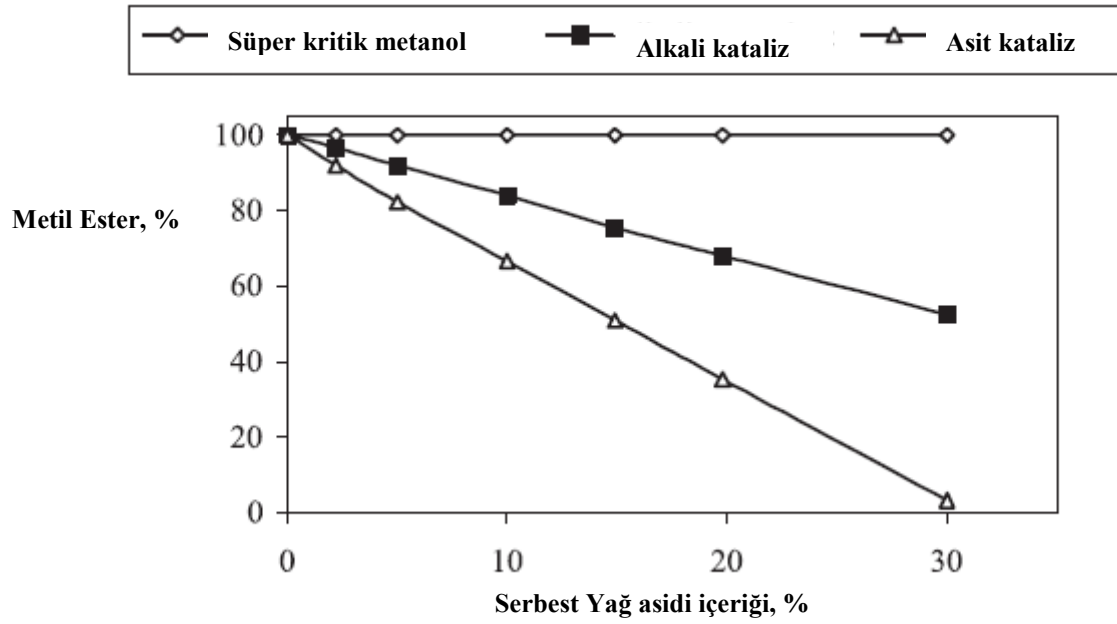
1.4.3. Biyodizel Üretim Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Baz katalizörlü yöntemde, kullanılmış, ham veya rafine yağlar metanol veya etanol kullanılarak, katalizör olarak NaOH veya KOH eşliğinde reaksiyona sokulur. Alkol / yağ oranı 1:1 ile 6:1 arasında olabilmektedir. Bununla beraber 6:1 molar oranı alkali kataliz için önemli bir dönüşüm veren en çok kullanılan orandır. Alkali katalizde sorun büyük miktarlarda serbest yağ asidi ve su içeren hammaddelerin kullanımında ortaya çıkmaktadır. Reaksiyonda serbest yağ asitleri ve su olumsuz etki yaparak sabun oluşumuna sebep olur ve son ürünün ayrılmasını güçleştirirler. *Asit katalizli* üretim yöntemi biyodizel yapımı için ikinci klasik yöntemdir. Bu kataliz tipinde esterlerde çok yüksek verim vermesinin yanında reaksiyon süresi çok uzun olmaktadır. Bazen reaksiyonun bitmesi için bir günden fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemde asit olarak genellikle sülfürik asit kullanılmaktadır. Yüksek oranda serbest yağ asidi ve su içeren hammaddeler kullanıldığında kataliz olarak bu yöntem önerilmektedir. *Lipazlar* gliserolün hidrolizi, alkoliz ve asidoliz gibi bazı reaksiyonlarda kataliz için kullanılan

enzimlerdir. Lipazlar transesterifikasyon ve esterifikasyon reaksiyonlarında kataliz olarak kullanılabilmekteler [50]. Şekil 1.8 ve 1.9’da su ve serbest yağ asidi içeriğinin farklı biyodizel yöntemlerinde metil ester verimine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Farklı kataliz tiplerinde transesterifikasyondaki su içeriğinin metil ester verimine etkisi [22].



Şekil 1.9 Biyodizel üretiminde serbest yağ asidi içeriğinin metil ester verimine etkisi [22].

Süper kritik yöntemde yüksek sıcaklık ve basınç altında çok kısa sürede reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu yöntemde serbest yağ asitleri ve su etkisiz olurken, gliserin geri kazanımı olmamaktadır. Baz katalizörlü bir reaksiyonda alkol/yağ molar oranı genellikle 6:1 civarında olmasının yanında süper kritik alkol yönteminde bu oran 30-40:1 dolaylarında olmaktadır. Bu durumlardan dolayı sistemin maliyeti çok yüksek olmaktadır. Ayrıca; baz katalizörlü, asit katalizli, lipaz ve süper kritik alkol kullanımının karşılaştırılması Tablo 1.8’de verilmiştir.

Tablo 1.8 Biyodizel üretimi için kullanılan farklı teknolojilerin karşılaştırılması [50].

Değişkenler	Alkali	Lipaz	Süper Kritik Alkol	Asit
Reaksiyon Sıcaklığı	60–70(⁰ C)	30–40(⁰ C)	239–385(⁰ C)	55–80(⁰ C)
Serbest Yağ Asitleri	Sabunlaşma Ürünleri	Metil Esterler	Esterler	Esterler
Su	Reaksiyon İle Çatışır	Etkisiz	-	Reaksiyon İle Çatışır
Metil Ester Verimi	Normal	Yüksek	İyi	Normal
Gliserin Geri Kazanımı	Zor	Kolay	-	Zor
Metil Esterlerin Saflaştırılması	Tekrar Yıkama	Yok	-	Tekrar Yıkama
Katalizör Üretim Maliyeti	Ucuz	Nispeten Pahalı	Orta	Ucuz

1.4.4. Biyodizelin Özellikleri

Tablo 1.9’da biyodizel yakıtının ASTM D 6751-02’ye göre sağlaması gereken özellikleri verilmiştir. Tablo 1.10’da ise farklı yağ kaynaklarından elde edilen (m)etil esterlere (biyodizel) ait yakıt özellikleri verilmiştir. Viskozite, parlama noktası, yoğunluk gibi özelliklerinin dizel yakıtından biraz yüksek ısıl değerinin ise biraz düşük olduğu görülmekte ve bu durum yakıt sisteminde zorlanmalara ve motor performansında biraz düşüşe sebep olmaktadır. Bunun yanında setan sayısının yüksek oluşu, oksijen içeriği, sülfür ve aromatik içermemesi gibi özellikleri motor yakıtı olarak onu cazip kılmaktadır.

Biyodizel yakıtlarının viskozite ve yoğunlukları hammadde ve yapılan işlemlere bağlı olarak değişmekle birlikte dizel yakıtından biraz daha yüksektir. Isıl değerleri ise içerisinde oksijen bulundurdıkları için yaklaşık %10 daha azdır. Setan sayıları hammadde olarak kullanılan yağın kompozisyonuna bağlı olarak değişebilmektedir. Biyodizel yakıtları içinde esterleştirme işlemi esnasında kullanılan katalizörlerden gelen ve uzaklaştırılamayan artık

metallerin miktarı yakıtın kül miktarını artırır. Yakıt içinde bulunan çözünebilen metaller tortuya neden olurlar ve bu tortular iç parçaları aşındırarak zarar verir.

Tablo 1.9 Biyodizel yakıtının ASTM D 6751-02'ye göre standart özellikleri [14,51].

Özellik	Metot	Limit	Birim
Parlama noktası (kapalı kapta)	D 93	min. 130	⁰ C
Su ve tortu	D 2709	max. 0.05	% Hacim
Kinematik viskozite (40 ⁰ C'de)	D 445	1.9-6.0	mm ² /sn
Sülfat kül	D 874	max. 0.02	% Kütle
Sülfür	D 5453	max. 0.05	% Kütle
Bakır şerit korozyonu	D 130	max. no. 3	-
Setan sayısı	D 613	min. 47	-
Karbon kalıntısı (%100)	D 4530	max. 0.05	% Kütle
Asit sayısı	D 664	0.8	mg KOH / g
Serbest gliserin	D 6584	0.02	% Kütle
Toplam gliserin	D 6584	0.240	% Kütle
Fosfor içeriği	D 4951	0.001	% Kütle
Distilasyon sıcaklığı,	D 1160	max. 360	⁰ C
Oksidasyon stabilitesi	EN 14112	min. 3	Saat
Kalsiyum ve Magnezyum,	EN 14538	max. 5	ppm, (ug/g)
Sodyum / Potasyum, kombine	EN 14538	max. 5	ppm

Biyodizel hammaddeleri genel olarak çok düşük miktarda kükürt içerirler ancak biyodizel üretim prosesi esnasında proteinler, katalizör ve/veya nötralizasyon materyalleri kükürt oluşumuna neden olabilir. Biyodizel yakıtlarda bulutlanma noktası dizel yakıtına göre daha yüksek olmakta ve bu da soğukta çalışma özelliklerini kötüleştirmektedir. Bulutlanma noktası esterleştirme kompozisyonu içerisindeki doymuş yağ asidi miktarı ile anlaşılabilir. Doymuş yağ asidi miktarı yüksek olan hammaddelerden üretilen biyodizellerin bulutlanma noktası da yüksek olmaktadır. Dolayısı ile bulutlanma noktasının düşürülmesi için yakıt içine

özel katkı maddeleri karıştırılmalı veya biyodizel üretimi esnasında kullanılacak yüksek doymuş yağ asitliğine sahip yağlar düşük yağ asitliğine sahip yağlarla karıştırılmalıdır. Biyodizel üretiminde yıkama sonunda suyun tamamen uzaklaştırılması ve filtrelmesi de önemli bir noktadır [73–74].

Tablo 1.10 Farklı yağlardan elde edilen metil ve etil ester yakıtların özellikleri [18].

Yakıt	Setan Sayısı (SS)	Parlama Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/l)	Isıl Değer (Mj/kg)	Viskozite (mm ² /sn)	Akma Noktası (°C)
Soya Yağı ME	50.9	131	0.8853	37.5	4.08	-3.8
Soya Yağı EE	48.2	160	0.881	-	4.41	-4
Kolza Yağı ME	52.9	170	0.882	37,3	4.83	-10.8
Kolza yağı EE	64.9	185	0.876	-	6.17	-15
Ayçiçek yağı ME	49	183	0.88	37.5	-	-7
Pamuk yağı ME	51.2	110	0.88	37.5	-	3
Palm yağı ME	50	174	0.87	37.2	4.5	16
Kızartılmış yağ EE	61	124	0.8716	36.7	5.78	8
Donyağı EE	-	-	0.8710	-	5.93	6
Donyağı ME	58.8	117	0.8856	-	4.8	9
No.2 Dizel	52	60-72	0.85		2.6	-35 - -15

1.4.4.1. Biyodizelin Soğukta Akış Özellikleri

Biyodizel ve biyodizel-motorin karışımları, motorinden daha yüksek akma ve bulanma noktasına sahiptir; bu durum yakıtların soğukta kullanımında sorun çıkarır. Akma ve bulanma noktaları uygun katkı maddeleri (anti-jel maddeleri) kullanımı ile düşürülebilmektedir. Biyodizel-motorin karışımları 4 °C üzerinde harmanlama ile hazırlanmalıdır. Soğukta harmanlamada biyodizelin motorin üzerine eklenmesi, sıcakta harmanlama da ise karışımda daha fazla olan kısmın az kısım üzerine eklenmesi önerilmektedir. Eğer harmanda soğumaya bağlı olarak kristal yapılar oluşursa, harmanın tekrar normal görünümünü kazanması için bulutlanma noktası üzerine ısıtılması ve karıştırılması gerekmektedir [25].

1.4.4.2. Depolama

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 ve florlanmış

polipropilen seçilebilir. Depolama, taşıma ve motor malzemelerinde bazı elastomerlerin, doğal ve butil kauçukların kullanımı sakıncalıdır; çünkü biyodizel bu malzemeleri parçalamaktadır. Bu gibi durumlarda biyodizel ile uyumlu Viton B tipi elastomerik malzemelerin kullanımı önerilmektedir [25].

1.4.4.3. Toksin Etki

Biyodizelin olumsuz bir toksin etkisi bulunmamaktadır. Biyodizel için ağızdan alınmada öldürücü doz 17.4 g biyomotorin/kg vücut ağırlığı şeklindedir. Sofra tuzu için bu değer 1.75 g tuz/kg vücut ağırlığı olup, tuz biyodizelden 10 kat daha yüksek öldürücü etkiye sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testleri biyodizelin ciltte %4'lük sabun çözeltisinden daha az toksin etkisi olduğunu göstermiştir. Biyodizel toksin olmamasına karşın, biyodizel ve biyodizel-motorin karışımlarının kullanımında; motorin için zorunlu olan standart koşulların (göz koruyucular, havalandırma sistemi v.b.) kullanılması önerilmektedir [25].

1.4.4.4. Biyolojik olarak bozunabilirlik

Biyodizeli oluşturan C16-C18 metil esterleri doğada kolayca ve hızla parçalanarak bozunur, 10000 mg/l'ye kadar herhangi bir olumsuz mikrobiyolojik etki göstermezler. Suyu bırakıldığında biyodizelin 28 günde %95'i, motorinin ise %40'ı bozunabilmektedir. Biyodizelin doğada bozunabilme özelliği dekstroza (şeker) benzemektedir [25].

1.5. Biyodizel Kullanımının Avantaj ve Dezavantajları

Biyodizelin alternatif motor yakıtı olarak kullanılmasında en önemli avantaj mevcut dizel motorlu araçlarda kullanılabilmesidir. Yani biyodizeli yakıt olarak kullanmak için motor konstrüksiyonunda herhangi bir değişiklik veya ekleme yapılmasına gerek yoktur. Bilindiği gibi dizel motor teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak dizel motorlu araç sayısı da artmakta, otomobillerde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Diğer alternatifler gibi (hidrojen, LPG, CNG gibi) ek bir sistem gerektirmemesi onu alternatif yakıt olarak cazip kılmaktadır. Bunun yanında biyodizel aşağıda sıraladığımız bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir.

- Biyodizel biyolojik olarak yenilebilir ve bozunabilir yapıda bir yakıttır.
- Saf biyodizel su ile temas ettiğinde 28 gün içinde %80–90 oranında bozunur.
- Karbondioksit gibi sera etkisi yapan gazların etkisi önlenmektedir.
- Biyodizel %11 oranında oksijen içermektedir.
- Biyodizel motorine göre daha düşük enerjiye sahiptir fakat biyodizelin setan sayısı petrol dizelinin setan sayısından daha yüksek olduğu için motor daha az vuruntulu çalışmaktadır.

- Donma noktasının daha yüksek oluşu nedeniyle soğuk havalarda katkı gerektirmektedir.
- Biyodizel iyi bir yağlama yeteneğine sahiptir ve böylece yüksek derecede motor aşınması oluşturmamaktadır.
- Petrol esaslı dizelde kükürt içerikleri sürekli olarak azaltılmaktadır. Bu tür yakıtların yağlama işlevi de önemli miktarda azalmaktadır. Yağlama işlevi zayıf olan yakıt ile çalışan motorlar daha hızlı şekilde tahrip olmakta ve bununla birlikte daha fazla hava kirliliğine sebep olan kirleticiler atmosfere atılmaktadır.
- Motor elemanlarının (piston-segman bölgeleri, yakıt pompaları, enjektörler vb.) Sürtünme ve aşınma problemlerinin giderilmesi için yağlanmaya ihtiyacı vardır. Biyodizelin motor yağlayıcılık özelliği çok iyidir.
- Biyodizel katkılı motorin kullanıldığında motorin içinde bulunan tortular biyodizel tarafından çözülür. Bu durum ise filtrelerin tıkanmasına neden olur. Biyodizelin çözücü özelliğinden dolayı daha önceden dizel yakıtından kaynaklanan sediment ve tortuları çözerek yakıt filtresinin hatta enjektörlerin tıkanmasına sebep olabilir.
- Bazı araçların motor sistemleri biyodizel kullanıldığı zaman tahrip olmaktadır. Yakıt sistemleri ve pompa sistemlerinde kullanılan bazı malzemeler lastik ve nitrik sızdırmazlıkları gibi %100 biyodizel kullanıldığı zaman problem olmaktadır. Eğer araçlar %100 oranında biyodizel kullanılacaksa contaları değiştirmekte yarar vardır. %20 oranında kullanılıyorsa gerek olmayabilir. Fakat sızdırmaz olup olmadığı izlenmelidir. Korozyonu önlemek için lastik contalar plastik contalarla değiştirilebilir.
- Yakıt istasyonları ve araç tamirhanelerinde herhangi bir değişikliğe gerek yoktur.
- Biyodizelin alevlenme noktası petrol dizelinden daha yüksektir ve bu özelliğin biyodizelin kullanımı, taşınımı ve depolanması sırasında daha güvenli bir yakıt olmasını sağlar.
- Biyodizel petrol kökenli dizel yakıtı ile her oranda tam olarak karıştırılabilmektedir. Bu özellik petrol kaynaklı dizelin kalitesini yükseltir. Örneğin yanma sonucu oluşan ve çevreye atılan zararlı gazların emisyon değerlerini düşürür, motordaki yağlanma derecesini artırır ve motor gücünü azaltan birikintileri çözer.
- Bunların yanında biyodizel kullanımı tüketici tasarrufu, petrol ithalatının azalması, sürdürülebilir enerjiye destek, enerji tarımının (yağlı tohum tarımının) gelişmesini, kırsal kesimin sosyo-ekonomik yapısının iyileşmesi, yerel iş imkânları, imalat sanayisinin gelişmesi, doğal enerji kaynakları ve çevrenin korunmasına katkı sağlamaktadır.

1.6. Hayvansal Yağlar ve Özellikleri

Hayvansal yağlar; balık yağları, domuz yağı, iç yağı ve tavuk yağları gibi hayvansal yağlardan elde edilmektedir. İç yağ, koyun, sığır veya diğer büyükbaş hayvan yağları işlenerek kullanılır hale getirilir. Sığırlardan üretilen iç yağ stearin olarak bilinir. İşlenmiş iç yağlar, oksitlenmeyi önlemek için havasız kaplarda tutulmaları şartıyla, bileşimini bozmadan soğutma ihtiyacı duyulmaksızın uzun süre depolanabilir. Bu yağlar pişirme amaçlı işlerde, hayvan ve kuşyemi olarak, sabun ve mum yapımında kullanıldığı gibi, aynı zamanda biyodizel ve diğer oleokimyasalların üretiminde hammadde olarak da kullanılabilir. Endüstride bu tip iç yağlar sığır veya koyun yağı olarak tam bir biçimde tarif edilemez. Buna göre işlenmiş iç yağlar, erime noktası da dahil bazı teknik kriterleri karşılayan hayvansal yağlardır. İşlenmiş ticari iç yağlarda, domuz gibi diğer hayvanlardan elde edilen yağların kullanılması da yaygındır. Bu yağlar, haddeler arasında sıkıştırılan sac metal üretiminde gerekli yağlamayı sağlamak için çelik haddeleme endüstrisinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğünden dolayı haddeleme uygulamalarında yağlama işlemleri için bu yağların sentetik yağların yerine kullanılmasına doğru bir eğilim vardır. Bu yağlar lehimleme sıvısı olarak da kullanılmaktadır [52].

Tablo 1.11’de çeşitli hayvansal yağlardan üretilmiş biyodizel yakıtlarının yağ asidi metil esteri bileşimleri verilmiş ve soya biyodizeli ile karşılaştırma yapılmıştır. Hayvansal yağ esterlerinde oleik asit oranlarının çoğunlukta olduğu ve yağ asidi metil esteri profillerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Soya biyodizeline linoleik asidin ağırlıkta olup, hayvansal yağ esaslı metil esterlerden farklı olmaktadır. Sığır iç yağı ve domuz yağı yağ asidi metil esteri için palmitik asit ikinci en çok yağ asidi olup, onu stearik asit takip etmektedir. Tavuk yağı yağ asidi metil esteri için palmitik ve linoleik asitler aynı değerdedirler. Tavuk yağı yağ asidi metil esteri yüksek oranda doymamış yağ asidi içermektedir (hayvansal esterlerinin toplam doymamış yağ asidi miktarından daha yüksek oranlara sahiptir). Soya biyodizeli ise hayvansal yağ esterlerinden daha yüksek miktarlarda doymamış yağ asidi içeriğine sahiptir. Bu durum soya esaslı biyodizel ile karşılaştırıldığında hayvansal yağlardan üretilmiş biyodizelin yararları düşünüldüğünde önemli olabilir. Doymamış yağlar belirli şartlar altında otooksidasyon ve polimerizasyon gibi kimyasal deterasyonlardan daha fazla etkilenirler. Bu termal stabilite düşünüldüğünde önemli bir durumdur [53]. Bazı çalışmalar yakıttaki yüksek doymamışlık seviyeleri motorda birikintilerin oluşumu ve motor yağlama yağının bozulmasına öncülük ettiğini belirtmişlerdir [53;54]. Wyatt ve diğ., araştırmaların yakıt stabilitesi, motor performansı ve doymamışlık arasında önemli bir ilişki olmadığı yönünde olduğunu belirtmektedir [53].

Tablo 1.11 Bazı hayvansal yağların ve soya yağı yağ asidi metil esterlerinin iodin değerleri ile yağ asidi dağılımları [53].

Yağ Asidi Metil Esteri Bileşim (%Ağırlık)					
Yağ asidi	İç yağı	Domuz yağı	Tavuk yağı	Som Balığı yağı ^[55]	Soya yağı
Miristik Asit (C14:0)	3.1	1.3	0.7	5.08	0
Palmitik Asit (C16:0)	23.8	23.5	20.9	15.39	10.6
Palmitoleic Asit C16:1	4.7	2.6	5.4	7.55	0
Stearik Asit (C18:0)	12.7	13.5	5.6	4.00	4.6
Oleik Asit (C18:1)	47.2	41.7	40.9	20.76	22.1
Linoleik Asit (C18:2)	2.6	10.7	20.5	3.78	54.2
Toplam (%)	95.1	98.3	99.27	57.02	99.0
Doymuş YA	38.2	38.3	27.2	25.70	16.2
Doymamış YA	52.6	55.0	67.0	33.35	82.8
İyodin Değeri	53.6±0.2	62.5±0.1	77.4±0.4	-	129.1±1.0

Tablo 1.12 Farklı hayvansal yağ metil esterlerinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [53].

Özellik	Birim	Domuz yağı	İç yağı	Tavuk yağı	Hayvansal Atık yağ ^[28]
Viskozite	mm ² /sn	4.8	5.0	4.3	6.8 (20 °C)
Asit sayısı	mg KOH/g	0.49	0.44	0.33	-
Parlama noktası	°C	160	150	150	138
Serbest gliserin	% kütle	0.020	0.008	0.016	-
Toplam gliserin	% kütle	0.240	-	0.167	-
Su ve kalıntı	% hacim	0.005	0.030	0.020	-
Kükürt kalıntı	% kütle	0.003	0.009	0.006	-
Akma Noktası	°C	12	9	6	15.5

Tablo 1.12’de farklı hayvansal yağlardan üretilen metil ester yakıtlarına ait bazı özellikler verilmiştir. Domuz yağı, sığır iç yağı ve tavuk yağı metil esterlerinin asit sayıları sırasıyla 0.49, 0.44 ve 0.33’tür. Asit numarası biyodizel yakıtının içerisindeki serbest yağ asitleri miktarının ölçüsüdür. Serbest yağ asitleri motorda korozyona neden olurlar. Katalizör eşliğinde gerçekleşen biyodizel üretiminde serbest yağ asitleri ortadan kaldırılır. Ancak yakıtın su veya hava ile temas etmesi ile asit numarası yükselebilir. Bu nedenle üreticilerin kalite kontrol işlemleri esnasında mutlaka takip etmeleri gereken bir değerdir. Serbest gliserin, yakıt içerisinde moleküler gliserinlerin bulunmasıdır ve bu da transesterifikasyon reaksiyonunun sonunda tam anlamı ile ester ve gliserin ayrışmasının gerçekleşmediği anlamına gelir. Yeterli bir yıkama işleminin uygulanamamış veya başka bir nedenle gliserinin biyodizelden etkili bir

şekilde ayrıştırılamamış olmasıdır. Serbest gliserin motor içinde oluşan karbon birikintilerinin en önemli kaynağıdır. Toplam gliserin yakıt içerisindeki serbest ve bağlı gliserinlerin toplamıdır. Bağlı gliserinler mono-, di- ve trigliseritler içerisindeki gliserinlerdir. Yüksek toplam gliserin miktarı, tam anlamı ile gerçekleşmemiş transesterifikasyon reaksiyonunun ve motor içindeki aşırı karbon birikmesinin bir göstergesidir [73-74] .

Tablo 1.13'te Ham hayvansal iç yağı ve metil, etil ve bütil esterlerinin ve bunların dizel yakıtı ile %50 oranlarındaki karışımlarının yakıt özellikleri verilmiştir. Bitkisel ve hayvansal yağların yüksek viskozitesi, yakıt sistemi parçaları, enjeksiyon karakteristikleri ve yanma odası atomizasyonu üzerindeki etkilerine bağlı yakıt olarak kullanımlarını sınırlandırmaktadır [56]. Ham iç yağının yüksek viskozitesi onun ester haline dönüşmesinden sonra ve özellikle dizel yakıtı ile karıştırıldığında önemli derecede düştüğü Tablo 1.13'te görülmektedir.

Tablo 1.13 İç yağı esterlerinin (metil, etil ve bütil) ve dizel yakıtı ile %50 oranlarındaki karışımlarının yakıt özellikleri [56].

Yakıt	Viskozite mm ² /sn (40 °C'de)	Yoğunluk gr/ml (15 °C'de)	Distilasyon, °C IBP, %50, %90,	Parlama Noktası °C	Akma Noktası, °C	Isıl Değer, Mj/kg	Setan Sayısı
İç yağı ^[57]	Katı	0.9198	279–329–350	-	39.0	40.05	40.0
Metil Ester	5.83	0.875	104.5–327–338	23.0	6.0	40.40	57.8
Etil Ester	5.93	0.871	99–335–349	33.0	6.0	41.70	-
Bütil Ester	6.17	0.868	113.5–346–353.5	53.5	6.0	41.22	-
ME/Dizel	4.24	0.855	---	-	-	43.26	-
EE/Dizel	4.41	0.853	---	-	-	42.88	-
BE/Dizel	4.34	0.855	---	-	-	43.57	-
Dizel	3.12	0.838	202–280.5–339	50.5	-6	45.77	52 ^[18]

Yahya ve Marley [79], dizel ateşlemeli motorlar için potansiyel alternatif yakıt olarak değerlendirdikleri hayvansal iç yağı metil esteri ve soya yağı metil esterinin yakıt özelliklerini belirleyip, No.2 dizel yakıtı özellikleri ile ve birbirleri ile karşılaştırmışlardır. ASTM metotlarına göre yaptıkları analizler sonucu elde ettikleri değerler Tablo 1.14'te verilmiştir. Çalışmalarında, ester yakıtların stokiometrik yakıt-hava oranının ester bileşimindeki moleküler oksijen varlığına bağlı olarak No.2 dizelden daha yüksek olduğunu, ester yakıtlarının yüksek olan parlama noktasının onları dizel yakıtından daha güvenli bir yakıt yaptığını, iç yağı metil esterinde yüksek oranda doymuş yağ asitlerinin varlığının setan sayısını yükselttiğini fakat

yakıtın parlama noktası üzerinde önemli bir etki göstermediğini belirtmişlerdir. İç yağı ve soya yağı metil esterinin akma ve bulutlanma noktalarının onları yakıt tankında ısıtma yapılmadıkça soğuk kış şartlarına uygun olmayan yakıtlar yaptığını belirtmişlerdir. Bununla beraber ester yakıtlarının dizel yakıtından daha düşük ısıl değere, daha yüksek viskozite ve özgül ağırlığa sahip olduklarını belirtmişlerdir

Tablo 1.14 Hayvansal iç yağı metil esterinin yakıt özelliklerinin dizel yakıtı ve soya metil esteri ile karşılaştırılması [79].

Özellik	ASTM Metodu	No. 2 Dizel Yakıtı	Soya Yağı Metil Esteri	İç Yağı Metil Esteri
Karbon (% kütle)	-	87.12	77.26	76.77
Hidrojen (% kütle)	-	12.88	10.78	12.88
Oksijen (% kütle)	-	-	11.81	11.47
Kimyasal formül	-	C ₁₆ H ₂₈	C ₅₂ H ₈₈ O ₆	C ₅₃ H ₁₀₂ O ₆
Stokiyometrik yakıt-hava oranı	-	0.0693	0.0824	0.0800
Viskozite cSt (40 °C'de)	D446	2.478	4.180	4.994
Yüzey tansiyonu din/cm (40 °C'de)	D971	30.605	34.947	34.255
Özgül ağırlık (15.6 °C'de)	D2547	0.851	0.887	0.878
API ağırlık (15.6 °C'de)	D2547	36.2	28.1	29.9
Gross ısıl değeri (kJ/kg)	D240	45,425	39,823	39,961
Net ısıl değeri (kJ/kg)	D240	42,692	37,372	37,531
Bulutlanma Noktası (°C)	D2500	-21.1	-1.1	15.6
Akma Noktası (°C)	D97	-20.6	-3.9	12.8
Parlama Noktası (°C)	D92	76.7	190.6	187.8
Konradson karbon kalıntısı (% kütle)	D189	0.03	0.15	0.03
Kül içeriği (% kütle)	D482	<0.01	0.01	0.01
Su (% hacim)	D1796	Nil	Nil	Nil
Sediment (% hacim)	D1796	Nil	0.35	0.01
100 °C'de bakır korozyonu	D130	No.1b	No.1a	No.1b
Kükürt (% kütle)	D129	0.29	0.15	0.18
Setan sayısı	D613	45.6	49.6	61.8

1.7. Dizel Motorlarda Yanma ve Egzoz Emisyonları

Dizel motorlarında hava, yakıtın tutuşma sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa sıkıştırılır ve püskürtülen yakıtın sıcak havayla teması sonucu yanma başlar. Benzin motorlarında,

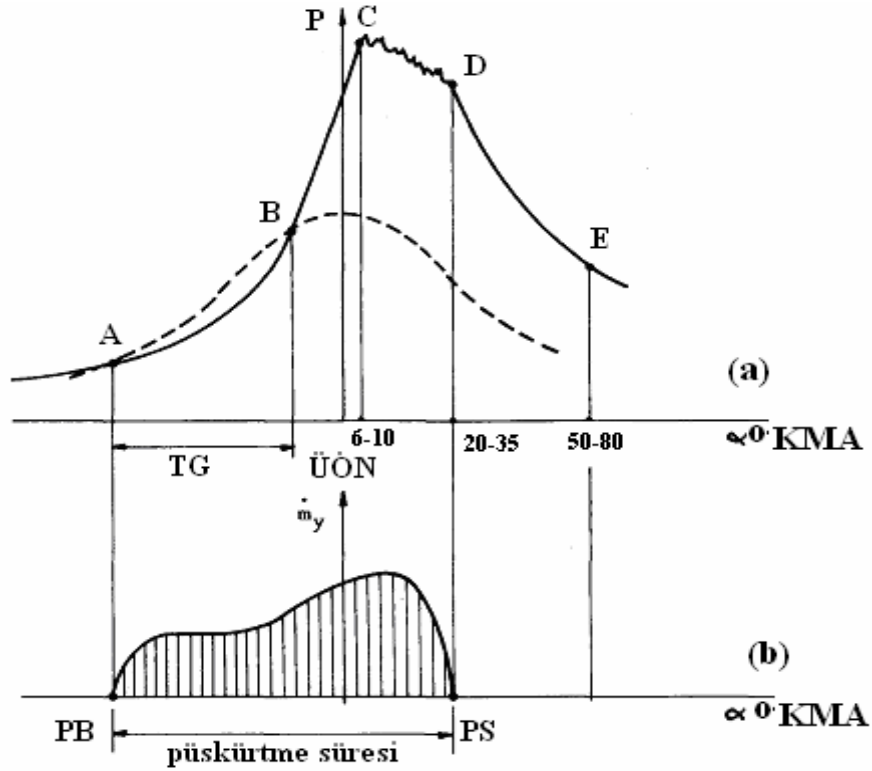
sıkıştırma işlemi sırasında yakıt-hava karışımı sıkıştırılır ve sıkıştırma oranı kendiliğinden tutuşma veya vuruntunun başlamasıyla sınırlıdır. Dizel motorlarında sıkıştırma işlemi sırasında sadece hava sıkıştırıldığı için yakıtın kendiliğinden tutuşması söz konusu değildir. Bu nedenle dizel motorları çok yüksek sıkıştırma oranlarında (genellikle 12-24 arası) çalışabilirler. Dizel motorlarında yakıt püskürtülmesi, piston üst ölü noktaya yaklaşırken başlar ve genişleme strokunun ilk bölümünde devam eder. Bu nedenle yanma daha uzun bir sürede gerçekleşir [84]. Ricardo yanma olayının üç ayrı safha halinde incelenebileceğini ileri sürmüştür. Bunlar tutuşma gecikmesi, ani ve kumandalı (kontrollü) yanma safhalarıdır. Bu safhalar aşağıda açıklanmıştır [85]. Şekil 1.10'da bir dizel motoruna ait krank açısı – basınç diyagramı ile bu safhalar gösterilmiştir. Tutuşma gecikmesi süresi yakıtın buharlaşması (fiziksel tutuşma gecikmesi) ve bunu takiben tutuşma anına kadar olan ön reaksiyonların oluştuğu (kimyasal tutuşma gecikmesi) safhalarından oluşmaktadır. Yakıt damlacıklarının buharlaşmasının belli bir süre aldığı kabul edilmektedir. Ancak damlacıkların etrafında püskürtmenin hemen ardında bir buhar tabakası oluşmakta ve yanma bu buhar tabakasında başlamaktadır. Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli faktörler yakıt kalitesi, basınç ve özellikle sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık ve basınç TG süresini kısaltır. Yakıt jetinin duvarlara kadar ulaşması durumunda, eğer duvarlar çok sıcak ise TG süresi önemli ölçüde kısalır. TG süresince püskürtülen yakıt miktarının değişmesi ise tutuşma gecikmesini etkilemez. Tutuşma gecikmesi süresince yakıt silindire girmekte ve buharlaşmaktadır. Bu süre zarfında damlacıklar daha küçük parçalara bölünüp hava ile daha mükemmel karışmaktadırlar. Yanma başladığı zaman ise oksijen ile temas etmekte olan yakıt büyük bir hızla yanar (ani yanma). Bu yanma hızı silindir içerisindeki dp/dt basınç yükselme hızını da tayin eder. Yüksek bir basınç yükselme hızı hareketli motor parçalarına ani bir yük uygulanması demek olacağından bu parçalardan sık sık yorulmadan kaynaklanan tahribatlar görülür. Ani basınç yükselmesinin bir başka istenmeyen sonucu ise şiddetli bir sestir ve dizel vuruntusu olarak bilinir. Ani yanma safhasındaki basınç artışı şu faktörlerden etkilenir.

a-) Yakıtın atomizasyon derecesi; bu, aracın enjeksiyon sisteminin dizaynına bağlıdır.

b-) Gecikme süresince püskürtülen yakıt miktarı; bu da, TG süresinin uzunluğuna bağlıdır.

c-) Tutuşma gecikmesi süresince yakıtın hava ile karışımının ne derece iyi olduğu, karışım için kullanılan zaman, püskürtme karakteristiği ve bir dereceye kadar da silindir içerisindeki hava hareketleri bu faktör üzerinde etkilidir. Uzun süren TG ve yüksek hız halinde karışım daha mükemmel olur.

d-) Tutuşma gecikmesi süresince silindire püskürtülen yakıtın miktarı. Bu süre zarfında fazla yakıt püskürtülürse bunun bir kısmı oksijenle birleşerek basınç yükselme hızının daha da artmasına sebep olur.



Şekil. 1.10 Bir dizel motoruna ait krank açısı – basınç diyagramı [85].

a-) Püskürtme seyri

b-) A-B arası Tutuşma gecikmesi; yakıtın % 5-15 yanar.

B-C arası Hızlı yanma safhası; alev yayılır, biriken ve gelen yakıt beraber yanar ve maksimum basınca ulaşılır.

C-D arası Kumandalı yanma; yakıt püskürtme ve faydalı yanma süreci sona erer.

D-E arası Art yanma; kısa sürmesi istenir.

Maksimum basınç ile yanmanın büyük ölçüde tamamlandığı an arasındaki sürede gerçekleşen yanma kumandalı (kontrollü) yanma safhasıdır. Ani yanma süresi sonunda sıcaklık ve basınç çok yüksek olduğundan bu safhayı takiben püskürtülen yakıt oksijen bulunca hemen yanar. Kumandalı yanma safhasında basınç eğrisinin seyri aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

a-) Yakıt püskürtme hızına; özellikle silindirde hala yeterli miktarda oksijen varsa bu faktör çok etkilidir.

b-) Yakıt ile hava temasını iyileştirecek şekilde ve şiddette hava hareketi olmasına. Bu motor hızına ve yanma odası şekline bağlıdır.

c-) Pistonun konumuna. Eğer üçüncü safhanın başlangıcı pistonun ÜÖN' dan epey uzaklaştığı bir piston konumunda oluyorsa o zaman hacim değişiminin basınç üzerindeki etkisi belirgindir.

Yakıt püskürtme tutuşmadan önce tamamlanmışsa o zaman üçüncü safhada basınç eğrisinin seyrini ani yanma safhasında gerekli oksijeni bulamamış yakıt damlacıkları tayin eder. Verimin yüksek olabilmesi için yanmanın ÜÖN'ya mümkün mertebe yakın tamamlanması

gerekir. Bu bakımdan üçüncü safhada oksijen/yanmamış yakıt oranının yüksek, karışımın çabuk ve mükemmel olması istenir. Yakıt püskürtme tutuşmadan önce tamamlanmış bile olsa kötü bir püskürtme karakteristiği üçüncü safhada yanmanın uzun sürmesine sebep olabilir.

1.7.1. Egzoz Emisyonları

Teorik olarak yanma için HFK=1 yani, 1 kg yakıtı takriben 15 kg hava gerekmektedir. Dizel motorunda iyi bir yanma için en azından 1.5 ila 2 katı kadar hava ile yanmayı gerçekleştirmek gereklidir. Kirletici bileşenin oluşumu yanma olayına bağlıdır. Burada gerçek hava / yakıt oranı (A/F) teorik yanma değerinden büyük olmasına rağmen silindir içerisindeki yakıt damlacıkları çevresinde yeteri kadar hava bulunmamaktadır. Bu da eksik yanma ürünü olan is'in (karbon parçacıklarının) oluşmasına yol açmaktadır. Dizel motorlarında işletme şartları sık sık değişmekte ve bazı hallerde hava – yakıt oranı istenen oranların dışına çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle dizel motorunun HC, NO_x , R.CHO ve is gibi kirletici bileşenleri artmaktadır. Motorun içerisindeki kükürt miktarı dizel egzozundan çıkan SO_x miktarını belirlemektedir. Çünkü kükürt bileşenleri yanma sırasında O₂ ile hemen reaksiyona girmektedir. Geri kalan O₂ diğer bileşenleri oksitleyebilmektedir [86;87]. Dizel motorlardan kaynaklanan yanma ürünleri karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), kükürt oksitler (SO_x), azot oksitler (NO_x) ve partikül maddeler (PM) olarak sıralanabilir. Bunlardan NO_x ve PM'ler dizel motorların başlıca iki kirleticisidir [6]. Dizel motorlarından kaynaklanan kirleticilerin oluşumu ve zararları aşağıda açıklanmıştır.

1.7.1.1. Azot Oksit (NO_x) Emisyonları

İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800 K'nin üzerine çıktığında, havanın içerisindeki azot ve oksijen kimyasal olarak birleşerek, insan sağlığına ve çevreye zararlı azot oksitlere dönüşür. Azot oksitler akciğerde, nemle birleşip nitrik asit oluşturarak solunum yolu hastalıklarına yol açmaktadırlar. Dizel motorlarının hava fazlalığı ile çalışması, azot oksit oluşturma potansiyellerini artırmaktadır [86]. NO, NO₂, N₂O₂ gibi bileşiklerin tümü birden NO_x olarak tanımlanmaktadır. NO renksiz ve kokusuz bir gazdır. NO₂ ise kırmızı-kahverengi renkli, kötü kokulu ve tahriş edici bir gazdır. Yanma ürünleri arasında genellikle NO bulunmasına rağmen atmosfere atıldıktan sonra bir kısmı NO₂'ye dönüşmektedir [88].

1.7.1.2. İs (Duman) Emisyonları

Siyah duman olarak bilinen is, hava miktarı yetersiz olduğu zaman ortaya çıkmaktadır. Dizel motorlarında hem yakıt cinsinden hem de karışım şeklinden isin doğmasına yol açan

etkenler fazladır. İis teşekkülüne, oksijence fakir ortamda bulunan yakıt moleküllerinin ısı parçalanması (termik kraking) şeklinde bakılabilir. Hidrojenleri ayrılan karbonca zengin büyük moleküller birleşmektedirler (polimerizasyon), bu birleşmeler fazlaştıkça is zerrecikleri tezahür etmektedir (aglomerizasyon). Bu is zerrecikleri hava ile yeterli bir zaman ve sıcaklık içinde temasa geçebilirlerse yanabilmektedirler [85].

1.7.1.3. Kükürt Oksitler (SO_x)

Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarına bağılı olarak, özellikle dizel motorlarında yanma sonucu kükürdün hava ile birleşmesi ile SO₂ oluşmaktadır. Renksiz ve sert kokulu bir gaz olan SO₂ solunum yolları, akciğer ve karaciğer hastalıklarına neden olmaktadır. Ayrıca su buharı ile birleşerek oluşturduğu sülfürik asidin insan sağılığı ve bitki örtüsü üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır [88]. SO_x emisyonunun önemli bir kısmı SO₂ olarak kabul edilir. Egzoz ve atmosferde kısmen SO₃'e dönüşüm olmaktadır. SO₂ üç (3) ppm'den sonra keskin ve nahoş bir koku verir, gözleri rahatsız eder ve havada sülfürik aside dönüşerek solunum yolları ve akciğerde çeşitli belirti ve tahrişlere sebep olur. Yanıcı ve eksplozif bir özelliğı yoktur [89].

1.7.1.4. Karbon monoksit (CO) Emisyonları

Yakıt içerisindeki karbonun tam yanmadığında oluşan renksiz ve kokusuz bir gazdır karbon monoksit (CO) çok zehirlidir. Bu gazın kandaki oksijeni taşıma görevine sahip olan hemoglobine bağlanma yeteneğı oksijene oranla yaklaşık 200 kere daha fazladır. Bu nedenle CO solunması akciğerlerden vücut dokularına oksijen taşınmasını bozar. Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijenin yetersiz olmasıdır. Yakıt – hava karışımı içerisinde gerekenden daha az hava var ise yanma yetersiz oksijen ortamı içinde olacak ve yakıtın karbonunun tümü CO₂'ye dönüşmeyerek CO olarak kalacaktır. Yanma odası içerisinde genel olarak oksijenin yetersiz olmasının yanında yerel olarak ta oksijen eksikliği olabilmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi CO oluşumu büyük ölçüde hava fazlalık katsayısına (HFK) bağılıdır [88].

1.7.1.5. Yanmamış Hidrokarbon (HC) Emisyonları

Egzoz gazları içerisinde hidrokarbon bulunması yakıtın tam olarak yakılmadığını gösterir. Hidrokarbon oluşumunun ana nedeni sıcaklıkların veya oksijenin yetersiz olması sonucunda yanmanın tamamlanamamasıdır. Hidrokarbonlar arasında parafinler ve olefinler solunum yollarındaki mukozayı (iç deri) tahriş edici ve bayıltıcı etkileri vardır. Aromatların ise

kanser yapıcı özellikleri vardır. Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu sonucu oluşan aldehitler ise keskin kokuları nedeniyle göz ve burun için rahatsız edici etkiye sahiptirler [88].

1.8. Dizel Motorlar İçin Egzoz Emisyonu Standartları

Emisyon standartları, çevreye bırakılan kirletici miktarlarının özel sınırlarını kuran şartlardır. Emisyon standartlarının çoğu otomobiller ve diğer taşıma araçlarının bıraktığı düzenli kirleticiler üzerinde odaklanmıştır. Standartlar genellikle azot oksitler (NO_x), partikül maddeler (PM) veya duman, karbon monoksit (CO) ve uçucu hidrokarbonları (HC) düzenler. Otomobil egzozunun ana bileşenleri karbon dioksit (CO₂) ve su buharı (H₂O) emisyon standartları ile düzenlenmemiştir. Avrupa emisyon standartları, Avrupa birliği üye ülkelerinde yeni satılan araçların egzoz emisyonları için tanımlanan kabul edilebilir şartlardır. Azot oksit (NO_x), partikül madde (PM), karbon monoksit (CO) ve uçucu hidrokarbonları (HC) emisyonları otomobiller, trenler, traktörler ve benzeri makineler için düzenlenmiştir. CO₂ emisyonlarının düzenlenmesi Avrupa komisyonu tarafından tasarlanmaktadır [92].

Her araç tipi için farklı standartlar uygulanır. İlk olarak 1988 yılında Euro 0, 1992 yılında Euro I, 1996 yılında Euro II, 2000 yılında Euro III ve 2005 yılında Euro IV yürürlüğe girmiştir. Tablo 1.15'te ve 1.16'da dizel yolcu arabaları ve ağır hizmet dizel motorları için egzoz emisyon standartları verilmiştir.

Tablo 1.15 Ağır hizmet dizel motorları için Avrupa Birliği emisyon standartları (g/km) [92].

Dizi	Tarih	Test	CO	HC	NO _x	PM
EURO I	1992, < 85 KW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612
	1992, > 85 KW		4.5	1.1	8.0	0.36
EURO II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15
EURO III	1999.10	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02
	2000.10	ESC & ELR	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13
EURO IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02
EURO V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02

Tablo 1.16 Dizel yolcu arabaları için Avrupa Birliği emisyon standartları (g/km) [92].

Dizi	Tarih	CO	HC+NO _x	NO _x	PM
EURO 1	1992.07	2.72 (3.16)	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
EURO 2, IDI	1996.01	1.0	0.7	-	0.08
EURO 2, DI	1996.01	1.0	0.9	-	0.10
EURO 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05
EURO 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025
EURO 5	2009.09	0.50	0.23	0.18	0.005
EURO 6	2014.09	0.50	0.17	0.08	0.005

1.9. Biyodizel Emisyonları

Yapılan bir çok çalışmada alternatif dizel motor yakıtı olarak biyodizelin, karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), kükürt oksitler (SO_x), partikül maddeler (PM), polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) ve nitrik polisiklik aromatik hidrokarbon (nPAH) emisyonlarının petrol dizeline göre daha düşük seviyelerde olduğu, fakat NO_x emisyonlarında bir miktar artış meydana geldiği belirtilmiştir [9,10,11]. Tablo 1.17’de Çevre Koruma Ajansı’na (Environmental Protect Agency) göre saf biyodizel (B100) ve motorin ile hacimsel olarak %20 oranındaki karışımının dizel yakıtı kullanımına göre kirletici egzoz emisyonlarındaki ortalama değişimler verilmiştir. Tablo 1.17’ye göre biyodizel kullanımında NO_x hariç diğer tüm emisyonlarda petrol esaslı dizel yakıtı kullanımına göre büyük azalmalar olmaktadır.

Tablo 1.17 Çevre Koruma Ajansı (EPA) göre dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında ortalama biyodizel emisyon değerleri.

EMİSYONLAR	B100	B20
	%	
Karbon Monoksit (CO)	-48	-12
Azot Oksit (NO _x)	+10	+2 /-2
Toplam Yanmamış Hidrokarbon (THC)	-67	-20
Partikül Maddeler (PM)	-47	-12
Kükürt	-100	- 20
Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH)	-80	-13
N-Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (Nitrath-PAH’s)	-90	- 50
Ozon (O ₃)	-50	-10

Çevresel açıdan bakıldığında biyodizel kullanımının büyük avantajlar sağladığı anlaşılmaktadır. Biyodizel, tarımsal bitkilerden elde edilmesi nedeniyle biyolojik karbon döngüsü içinde, fotosentez ile CO₂'yi dönüştürüp karbon döngüsünü hızlandırdığı için sera etkisini artırıcı yönde etki göstermez, yani biyodizel CO₂ emisyonları için doğal bir yutak olarak düşünülebilir.

- Biyodizel kullanımı ile toplam hidrokarbon miktarı (yerel olarak sis ve ozon oluşumuna katkı yapan faktörlerden biri), dizel kullanılması ile ortaya çıkan miktardan %50 daha düşüktür.
- Kükürt emisyonları, saf biyodizel kullanımıyla neredeyse tamamen yok edilmektedir. Kükürt oksitlerin ve sülfatların (asit yağmurlarının ana bileşeni) egzoz emisyonları, standart dizele kıyasla, biyodizel kullanımı ile önemli miktarda yok edilmektedirler.
- Biyodizelin, dizel motorlarda kullanımı ile yanmamış hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve partikül madde (PM) miktarında önemli düşüşler elde edilmiştir. Azot oksitlerin (NOx) emisyonları aynı veya biraz artmıştır.
- CO emisyonları biyodizel kullanımı ile dizel kullanımına göre %48 oranında azalmıştır.
- Partikül maddeleri solunmak insan sağlığı için son derece zararlıdır. Biyodizel kullanımı ile dizel kullanımına kıyasla, partikül madde miktarında %47 oranında bir azalma görülmüştür.
- Biyodizel kullanımı ile toplam hidrokarbon (yerel olarak sis ve ozon oluşumuna katkı yapan faktörlerden biri) miktarı, dizel kullanılması ile ortaya çıkan miktardan %67 daha düşüktür.
- NOx emisyonları (yerel olarak sis ve ozon oluşumuna katkı yapan faktörlerden biri), biyodizel kullanımı ile motor tipine ve test prosedürüne bağlı olarak azalır veya artar. Fakat biyodizelin kükürt içermemesi standart dizel ile kullanılamayan NOx kontrol tekniklerinin biyodizel ile kullanılabilmesini sağlar. Bu sebeple biyodizelin NOx emisyonu efektif bir şekilde kontrol ve yok edebilir [95;96].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kumar ve ark., etanol-hayvansal yağ emülsiyonunun dizel motorlarında yakıt olarak kullanımını araştırmışlardır. Tek silindirli direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda dizel yakıtı, saf hayvansal yağ ve hayvansal yağ emülsiyonunu değişik yük şartlarında yakıt olarak test etmişlerdir. Etanol hayvansal yağ emülsiyonu ile dizel yakıtı ve saf hayvansal yağa göre yüksek yüklerde duman, NO, HC ve CO emisyonlarında azalma olduğunu bildirmişlerdir. Buna karşın hafif motor yüklerinde ise emülsiyon ile daha yüksek CO ve HC değerleri bulunduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak hayvansal yağ emülsiyonunun saf hayvansal yağa göre motor performansını geliştirdiği ve tüm emisyonlarda önemli bir azalma gösterdiği belirtilmiştir [4].

Kumar ve ark., tek silindirli ve direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda yakıt giriş sıcaklığının yanma, emisyon ve performans karakteristikleri üzerinde etkisini incelemişlerdir. Çalışmada yakıt olarak kullandıkları hayvansal yağı 30, 40, 50, 60 ve 70 °C sıcaklıklarında ön ısıtmaya tabi tutarak motora göndermişlerdir. Düşük sıcaklıklarda hayvansal yağ ile çalışmada dizel yakıtına göre tutuşma gecikmesi ve yanma sürecinin daha uzun sürdüğünü, giriş sıcaklığının artmasıyla bu sürecin azaldığını tespit etmişler, yüksek yakıt giriş sıcaklıklarında da maksimum basınç ile basınç artma hızının da yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Dizel yakıtı ile çalışmada maksimum duman yoğunluğunun $K=6.5 \text{ m}^{-1}$ iken 30 °C ye ısıtılmış hayvansal yağda bu değer 3.6 m^{-1} olarak bulunduğunu ve 70 °C’de ise duman seviyesinin 1.7 m^{-1} ’e düştüğünü belirtmişlerdir. Bunun yanında dizel yakıtına göre düşük yakıt giriş sıcaklıklarındaki hayvansal yağda daha yüksek HC ve CO emisyonlarının oluştuğunu fakat ön ısıtmanın bu emisyonları düşürdüğünü belirtmişlerdir. Düşük sıcaklıklarda düşük bulunan NO emisyonlarının ön ısıtma ile artış gösterdiğini buna rağmen yüksek sıcaklıklarda bile (70 °C gibi) dizel yakıtından daha düşük çıktığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak; hayvansal yağların normal soğuk işletme şartlarındaki katılaşma eğilimi onların dizel motorlarında yakıt olarak kullanımlarını sınırlandırdığını fakat ön ısıtma ile hayvansal yağların dizel motorlarında kullanılabileceğini belirtilmiştir [5].

Lin ve ark., restoranlardan atık pişirme yağlarından transesterifikasyon reaksiyonu ile ürettikleri biyodizel yakıtını, petrol kökenli dizel yakıtı ile karışımlarını ve dizel yakıtını (D, B20, B50, B80, B100) dört silindirli bir dizel motorunda yakıt olarak kullanarak egzoz gazı bileşimlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında; B20 karışım yakıtının tüm motor hızlarında daha düşük CO değerleri verdiğini, B50 yakıtının ise tüm motor hızlarında diğer yakıtlardan daha yüksek CO₂ ürettiği belirtmişlerdir. Bunun yanında B100, B80 ve dizel yakıtının diğer

yakıtlardan daha yüksek HC değerleri gösterdiği de bildirilmektedir. Biyodizel ve biyodizel/dizel karışımı yakıtlarının farklı motor hızlarında daha yüksek NOx ürettiği ve bu yakıtlar arasında B100 yakıtının 1200 devirden daha yüksek motor hızlarında en yüksek NOx değerleri verdiği belirtilmiştir. SO₂ oluşumunun sadece motor hızının artmasıyla değil, yakıttaki dizel oranının artmasıyla da artış trendine girdiği belirtilmektedir. B100 yakıtının PM konsantrasyonunun diğer yakıtlardan daha yüksek çıktığı ve daha fazla biyodizel içeren yakıtların dizel yakıtından daha fazla PM ürettiği de belirtilmektedir. Sonuç olarak B20 ve B50 yakıtlarının optimum karışımlar olduğu belirtilmiştir [11].

Çanakçı, soya yağı biyodizeli ile iki çeşit dizel yakıtını (No.1 ve No.2) dört silindirli turboşarjlı bir dizel motorunda tam yükte ve 1400 rpm’de yakıt olarak kullanarak yanma karakteristikleri ile egzoz emisyonlarını karşılaştırmıştır. Çalışmada No.2 dizel yakıtına göre biyodizel ile çalışmada PM, CO ve yanmamış HC’ larda önemli azalmalar olduğunu fakat NOx emisyonlarında ve fren özgül yakıt tüketiminde ise artış meydana geldiğini belirtmiştir. Bunun yanında No.1 dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında biyodizelde daha iyi emisyon sonuçları, NOx ve fren özgül yakıt tüketiminde azalma olduğunu da belirtmiştir. Çanakçı, NOx emisyonundaki artışın biyodizelin oksijen içeriği ile ilişkisi olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca fren özgül yakıt tüketimindeki artışında düşük ısı değerinden kaynaklandığını belirtmiştir [14].

Pugazhvadivu ve Jeyachandran, dizel yakıtını, atık kızartma yağını, ve ön ısıtma yapılmış (75 ve 135 °C) atık kızartma yağını tek silindirli bir dizel motorunda yakıt olarak kullanarak motor performansı ve egzoz emisyonlarını belirlemişlerdir. Çalışmalarında ön ısıtma yapılmış atık kızartma yağının motor performansını geliştirdiği, CO ve duman emisyonlarını da azalttığını belirtmişlerdir. 135 °C’ye ısıtılmış atık kızartma yağının dizel yakıtı yerine kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21].

Demirbaş ve Karşlıoğlu, bitkisel ve hayvansal yağların dizel motorlarında kullanımı için proliz, seyreltme, emülsiyon ve transesterifikasyon olmak üzere dört farklı yöntem vardır, bunların arasında bitkisel ve hayvansal yağların transesterifikasyonunun çoğunlukla kullanılan yöntemdir. Transesterifikasyon reaksiyonu, katalizör, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, alkol ve yağın molar oranı, bitkisel ve hayvansal yağın içindeki su ve serbest yağ asitlerinden etkilenmektedir. Transesterifikasyonda serbest yağ asitleri ve su daima katalizör etkinliğinin azalması, katalizörün tükenmesi ve sabun oluşumu gibi olumsuz etkiler yapmakta ve bu da düşük dönüşümler ile sonuçlanmaktadır [22].

Artukoğlu, hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimini ve sıcaklık, reaksiyon süresi, metil alkol miktarı, katalizör miktarı gibi parametrelerin etkisini incelemiştir. Hayvansal atık yağın yüksek oranda serbest yağ asidi içermesinden dolayı önce asit katalizörlü sonra da baz katalizörlü olmak üzere iki aşamalı transesterifikasyon prosesini uygulamış ve asit olarak yağın

%8'i oranında sülfürik asit (H_2SO_4) kullanımının uygun olduğunu belirtmiştir. Sadece H_2SO_4 kullanıldığında biyodizel üretiminin gerçekleşmediğini bu nedenle hem yağın içerisindeki reçine asitlerinin dönüşümü hem de reaksiyon verimini artırmak için ikinci aşamada NaOH kullandığını belirtmiştir. Çalışmasında 50 ve 55 $^{\circ}C$ sıcaklıklarda reaksiyonun başlamadığını, 65 ve 70 $^{\circ}C$ sıcaklıklarında ise metil alkolün kaynama noktasına ulaşması ve geçmesi ile ester ürünün parçalanmasından dolayı verim kaybının olduğunu belirtmiştir. Hayvansal atık yağın %0,2 ve %0,5'i kadar sodyum hidroksit kullanıldığında, metil ester dönüşüm reaksiyonunun başlamadığını, %1,5 oranında NaOH kullanıldığında reaksiyon sırasında az da olsa sabunlaşma olduğunu, %4 oranında kullanıldığında ise fazla sabunlaşma meydana geldiğini ve dolayısıyla verim kaybının olduğunu belirtmiştir. Hayvansal atık yağın %25 ve %30'u kadar metil alkolün dönüşüm verimi için düşük bir oran olduğunu ve %35'in üstündeki oranlarda hem verim kaybının olduğunu hem de alkol maliyetini artırdığını belirtmiştir. Sonuç olarak; 63 ± 1 $^{\circ}C$ 'de, kütlece %35 metanol/yağ oranında, %1 sodyum hidroksit katalizörlüğünde ve 2 saat sürede en yüksek verimin elde edildiğini belirtmiştir [28].

Nelson ve Schrock, dizel yakıtı yerine kullanmak için gıda olarak kullanılabilen ve kullanılmayan hayvansal iç yağının biyodizele dönüşümde hammadde olarak elverişli olup olmadığını, enerjik ve ekonomik yönden verimliliğini araştırmışlardır. Biyodizel geniş bir çapta kabul edilen bir sıvı alternatif yakıt olduğunu, çeşitli hayvansal, bitkisel ve atık yağ hammaddelerinden üretilebilir ve modifiyesiz dizel motorlarda başarılı bir şekilde kullanılabildiğini, biyodizelin üretim ve kullanımının 1999'dan beri çarpıcı bir şekilde arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca; biyodizelin sahip olduğu enerjik uygunluk, konvensiyonel petrol dizeline göre çevresel yararları, artan enerji güvenliği ve ultra düşük kükürtlü dizele göre yağlamayı geliştirmesi gibi fiziksel özelliklerinin avantajlarını artırdığı da belirtilmektedir. Sonuç olarak büyükbaş hayvan kesim hanelerinde elde edilen hayvansal iç yağlarının biyodizele dönüşümü ile geniş bir enerji alanı, çevresel ve ekonomik avantajların sağlanacağı belirtilmiştir [31].

Çildir ve Çanakçı, çeşitli bitkisel yağlardan biyodizel üretiminde alkol ve katalizör miktarının yakıt özellikleri (kinematik viskoziteleri, yoğunlukları, akma noktaları, asit numaraları ve parlama noktası) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bitkisel yağ olarak ayçiçek yağı, mısırözü yağı ve kolza yağı, alkol olarak metil alkol ve katalizör olarak da NaOH kullandıkları çalışmalarında, 1:3, 1:6 ve 1:10 yağ/alkol molar oranlarında, 0,1; 0,3; 0,5; 1,0 ve 3,0 miktarlarında da katalizör kullanmışlardır. 1:6 molar oran kullanılarak yapılan reaksiyonlarda elde edilen esterlerin dönüşüm oranlarının maksimum %99,65'e kadar çıktığı ve mısır yağı metil esterlerinin dönüşüm oranlarının diğer esterlere göre fazla olduğu belirtilmiştir. Mısır, kolza ve ayçiçek yağı metil esterleri için molar oranlar arttıkça parlama noktasının

düşüğünü ve 1:6 ve 1:10 molar oranlarında stokiyometrik 1:3 oranına göre, istisnai durumlar dışında, daha düşük akma noktası elde edildiğini ve bunun sebebi olarak da biyodizel üretiminde reaksiyona giren alkol miktarındaki artışın olduğunu belirtmişlerdir. Katalizör miktarının artmasıyla yoğunluğun azalmakta olduğunu ancak katalizör miktarının %1'in üstüne çıktığı zaman ise ester oluşumunun gözlenmediği bunun yerine sabunlaşmanın arttığı belirtilmiştir. Molar oran ve % katalizör oranı arttıkça esterlerin kinematik viskozitelerinde azalma eğilimi tespit edildiği de çalışmada belirtilmektedir [43].

Felizardo ve ark., okul kafeteryalarından ve yerel restoranlardan topladıkları atık kızartma yağlarından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimini araştırmışlardır. Reaksiyonda atık kızartma yağı ile beraber alkol olarak metanol ve katalizör olarak ta NaOH kullanmışlardır. Atık kızartma yağlarından biyodizel üretimi için yaptıkları ön çalışmalarda en yüksek metil ester veriminin, bir saat reaksiyon süresinde, metanol/atık kızartma yağı oranının 4.8, katalizör/atık kızartma yağı oranının ise %0.6 olduğu durumda elde edildiğini belirtmişlerdir. Katalizör veya metanol miktarındaki artış ile metil ester fazının ayrışmasının kolaylaştığını bununla beraber viskozitenin azaldığı ve metil ester fazı saflığının %98'in üzerine arttığını belirtmişlerdir [45].

Ma ve ark., hayvansal iç yağının transesterifikasyonu üzerinde katalizör, serbest yağ asidi ve su içeriği, reaksiyon süresi gibi parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Katalizör olarak NaOH ve NaMeO'in her ikisi için yağın ağırlıkça %0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 0.9'u olmak üzere beş ayrı oranda, serbest yağ asidi miktarını %0.0, 0.2, 0.4 ve 0.6 olarak, su içeriğini de %0.0, 0.3, 0.5 ve 0.9 olarak, reaksiyon sürelerini ise 0, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 13, 15, 20, 30, 45 ve 60 dakika olarak araştırmışlardır. Yağın %0.1'i miktarda katalizör kullanıldığında her iki katalizör için en düşük iç yağı metil ester verimi, %0.3 NaOH ve %0.5 NaMeO kullanıldığında ise maksimum verimin elde edildiğini belirtmişlerdir. Bununla beraber her iki katalizör karşılaştırıldığında NaOH'in NaMeO'ten daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Serbest yağ asidi ve su eklemeksizin iç yağı metil esteri verimi en yüksek olduğunu bunun yanında %0.6 serbest yağ asidi eklendiğinde iç yağı metil esteri en düşük seviyeye ulaştığını, NaOH ile yapılan transesterifikasyonda iç yağın içinde var olan %0.06 suyun ötesinde eklenmiş suyun ester verimini önemli bir şekilde düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca reaksiyonun ilk dakikalarda çok yavaş olduğunu, 15 dakika civarında ise maksimum değere ulaştığını belirtmişlerdir [46].

Tashtoush ve ark., restoranlardan topladıkları atık hayvansal yağın biyodizele dönüşümünü incelemişlerdir. Reaksiyon sıcaklığı ve süresi, alkol ve yağ molar oranı, alkol ve katalizör tipi gibi transesterifikasyon reaksiyonunun önemli değişkenlerin optimum koşullarını belirlemişlerdir. Atık hayvansal yağın %10-15 oranında serbest yağ asitleri içermesinden dolayı 2,25 M H_2SO_4 asidik katalizör kullanımının daha uygun olacağını, çünkü baz katalizör

kullanılırsa sabunlaşma olacağı ve son ürününün ayrılmasında zorluk olacağını belirtmişlerdir. Alkol olarak etanolün metanole göre daha yüksek dönüşüm sağladığı ve daha düşük viskozite verdiği için etanolün tercih edildiği belirtilmektedir. Bununla beraber %100 fazla alkol kullanımının en iyi dönüşümü ve en düşük viskoziteyi verdiği de belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca reaksiyon sıcaklığının nihai dönüşüm oranına ve viskozite üzerinde fazla etkili olmadığı, bunun yanında yüksek sıcaklıkların maksimum dönüşüme ulaşmak için gerekli süreyi azalttığı ve bunun da enerji maliyetini artırdığı belirtilmiştir. Tam dönüşüm için 50 °C reaksiyon sıcaklığı ile 2 saat reaksiyon süresinin optimum koşullar olduğu belirtilmiştir [48].

Çanakçı ve Van Garpen, büyük oranlarda serbest yağ asidi içeren kullanılmış kızartma yağları gibi düşük maliyetli hammaddelerin biyodizele dönüşümünün karmaşık olduğunu, yağın içerisindeki serbest yağ asitlerinin alkali katalizör kullanıldığında sabunlaşmaya sebep olduğunu ve bunun da biyodizelin gliserinden ayrılmasını önlediğini belirtmişlerdir [49].

Wyatt ve ark., domuz yağı, hayvansal iç yağları ve tavuk yağı yağ asidi metil esterini biyodizel olarak kullanmak için baz katalizörlü transesterifikasyon ile hazırlamışlardır. Hayvansal yağlardan ürettikleri biyodizel yakıtının NOx emisyonu değerleri, soğuk akış özellikleri, yağlama ve oksitlenme kararlılığı ve yakıt özelliklerini soya yağı biyodizeli ve dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Hayvansal yağ esaslı yakıtların soğuk akış özelliklerinin soy biyodizelden daha az, kayganlığı ise benzer veya daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Hayvansal yağ esterlerinin ve soya yağı biyodizelinin petrol dizel yakıtı ile hacimsel olarak % 20 oranındaki karışımları için yaptıkları NOx emisyonu testlerinde; hayvansal yağ esaslı B20 yakıtlarının soya yağı esaslı B20 yakıtına göre daha düşük NOx emisyonu değerleri verdiğini ve hayvansal iç yağı metil esterleri ile çalışmada, petrol dizeli ile ölçülen NOx emisyonu seviyelerinin üstünde bir artışın olmadığını belirtmişlerdir. Domuz yağı, hayvansal iç yağı ve tavuk yağı metil esterlerinin soya metil esterinden daha fakir düşük sıcaklık özelliklerine sahip olduğunu fakat bu farkın; esterlerin petrol dizeli ile %20 oranında karıştırılmasıyla en aza indiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak; hayvansal yağ esterlerinin NOx üzerinde nötr olduğunu, onların yakıt karışımlarında soya biyodizeline alternatif olarak veya yakıt katkısı olarak dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir [53].

Reyes ve Sepulveda, yüksek oranda serbest yağ asidi içeren som balığı yağından ürettikleri ham biyodizel ve rafine edilmiş biyodizel yakıtlarının dizel yakıtı ile farklı oranlardaki karışımlarını altı silindirli, dört zamanlı ve su soğutmalı bir dizel motorunda performans ve partikül madde (PM-10) emisyonu seviyelerini belirlemek için test etmişlerdir. Som balığı yağını sülfürik asit katalizörlüğünde metanol ile 60 °C'de 65 dakika, daha sonra ise sodyum hidroksit katalizörlüğünde 55 °C'de 60 dakika reaksiyona sokmuşlardır. Elde edilen biyodizeli yıkayarak gliserin, asit ve baz kalıntılarından temizleyerek, yıkanmış biyodizeli 30

dakika 70 °C’de ısıtmışlardır. Elde ettikleri biyodizelin viskozitesinin 4,96 Cs ve erime noktasının da -11 °C olarak bulunduğunu belirtmişleridir. Daha sonra balık yemlerinden gelen renkli kalıntıları ve dönüşmemiş gliserin kalıntılarını elimine etmek için ham biyodizelden distilasyon ile rafine biyodizeli elde etmişlerdir. Rafine edildikten sonra biyodizelin viskozitesi 3,46 Cs ve erime noktasının -10,5 °C olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları motor testlerinde, %100 rafine biyodizel kullanıldığında dizele oranla maksimum güç kaybının %3,5 ve PM-10 emisyonunda yaklaşık %50 azalma olduğu, daha az ham biyodizel veya rafine biyodizel içeren karışımlarda ise güç kaybının daha az olduğunu ve PM-10 emisyonunda daha az azalma olduğu belirtmişlerdir [55].

Zheng ve Hanna, hayvansal iç yağlardan esterifikasyon yöntemi ile iç yağı metil esteri elde etmişlerdir. Çalışmalarında iç yağı metil ester üretimini aşağıda anlatıldığı gibi gerçekleştirmişlerdir. “500 gr iç yağı bir kapta 60 °C’ye ısıtılarak karıştırılmıştır. 111.6 gr metanol ve 5.55 gr NaOH, NaOH’in tümünün metanol içerisinde çözülünceye kadar karıştırılmış ve bu sırada sıcaklık 60 °C’de tutulmuştur. Karışım daha sonra iç yağına eklenerek 70 °C’de 30 dakika ısıtma ve karıştırma yapılmıştır. Karışım daha sonra ester ve gliserin tabakaları ayrılana kadar oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Üstte kalan bölüm başka bir reaksiyon kabına akıtılıp tekrar 60 °C’ye ısıtılarak, esterin ağırlığına bağlı olarak ısıtılmış %0.2 NaOH ve %20 metanol karışımı kaba eklenmiş ve reaksiyon 1 saat sürmüştür. İkinci esterifikasyondan sonra ayrılmış esterler, gliserin ve reaksiyona girmemiş NaOH’in çıkarılması için üç kez saf su ile yıkanmıştır. Yıkamadan sonra iç yağ metil esteri vakum altında kurutulmuştur”. Elde edilen iç yağı metil esteri üzerinde yaptıkları analizler sonucu, iç yağın toplam doymuş ve doymamış yağ asidi içeriğinin sırasıyla %48 ve %52, iç yağı metil esterinin ise doymuş %48.5 doymamış %51.5 olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. İç yağın setan indeksinin esterifikasyon ile 40.2’den 57.8’e yükseldiğini, enerji içeriğinin yaklaşık 40 MJ/kg olarak bulunduğunu ve bu değerin dizel yakıtından %12 daha az olduğu belirtilmiştir. Özgül ağırlık, erime noktası, bulutlanma noktası ve akma noktası gibi özelliklerin de iç yağı metil esteri ve karışımlarında ham iç yağa göre düştüğü belirtilmiştir [57].

Çanakçı, yüksek serbest yağ asidi içeren hammaddelerden üretilmiş biyodizelin motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada soya yağından ve %9 serbest yağ asidi içeren hayvansal yağ esaslı sarı iç yağdan iki farklı biyodizel hazırlamıştır. Biyodizel yakıtları ve onların No.2 dizel yakıtı ile %20 oranındaki karışımını dört silindirli turboşarızlı bir dizel motorunda sabit durum işletme şartlarında denemiştir. Sonuç olarak; her iki biyodizel yakıtının partikül, karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarında önemli azalmalar sağladığını bunu yanında iç yağı metil esterinde %11, soya yağı metil esterinde ise %13 oranında NOx artışı sağlandığını belirtmiştir [58].

Wu ve ark., kullanılmış pişirme yağları ve hayvansal yağlardan türetilmiş farklı çeşitlerde yağ asidi metil esterlerinin ürettikleri egzoz emisyonlarını araştırmışlardır. Atık bitkisel yağlardan B01 ve B02 olarak isimlendirdikleri iki takım yağ asidi metil esteri ve B03 olarak isimlendirdikleri bir takım da atık bitkisel yağ ile atık kızartma yağının %2 oranındaki karışımından toplam üç takım yağ asidi metil esteri üretmişlerdir. Bu ester yakıtların dizel yakıtına göre daha yüksek yoğunluk viskozite ve parlama noktasına sahip olduklarını buna karşın ısı değerinin de düşük olduğunu belirtmişlerdir. B01 motorunun daha yüksek CO ürettiğini, dizel yakıtlı motorun ise 1400 rpm'nin üstündeki motor hızlarında B02 ve B03'ten daha yüksek CO ürettiğini belirtmişlerdir. Yağ asidi metil esteri yakıtlarının dizel yakıtından daha yüksek CO₂, NO_x ve PM ve daha düşük SO₂ ürettiklerini de belirtmişlerdir [59].

Dorado ve ark., İspanyadaki hastane mutfaklarından toplayıp filtre ettikleri atık zeytin yağını, potasyum hidroksit (KOH) varlığında metanol kullanarak atık zeytin yağı metil esterini (biyodizel) elde etmişlerdir. Atık zeytin yağı metil esterini (%100) bir dizel direk enjeksiyonlu Perkins motorunda egzoz emisyonlarını belirlemek için yakıt olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak; dizel yakıtına göre biyodizel kullanımı ile CO (%58.9'a kadar), CO₂ (%8.6'ya kadar, %7.4 artma olan bir durum dışında), NO (%37.5'e kadar) ve SO₂ (%57.7'ye kadar) emisyonlarında azalma ve NO₂ (%81, küçük bir azalma olan bir durum dışında) emisyonunda artış olduğu belirtilmiştir. Bunların yanında biyodizelin fren özgül yakıt tüketiminde küçük bir artış (%8.5'ten daha az) olduğunu ve buna da egzoz emisyonlarındaki yaralarından dolayı katlanılabileceğini belirtilmiş, dizel yakıtına alternatif olarak kullanılmış kızartma yağlarının kullanımı durumunda fosil yakıtlara bağlılığın ve çevre kirliliğinin azalacağı vurgulanmıştır [60].

Lebedevas ve ark., bitkisel ve hayvansal kaynaklı yağ asidi metil esterlerini ve karışımlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerini, biyo yakıt karışımlarının optimum bileşimini, motor karakteristiklerini ve egzoz gazındaki zararlı emisyonları karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Kolza yağı metil esteri, domuz yağı metil esteri/hayvansal iç yağı metil esteri ve keten tohumu yağı metil esteri karışımını yakıt olarak kullanmışlardır. Çalışmada üç bileşenli karışımın yüksek hızlı dizel motoru için; CO, HC ve egzoz gazındaki duman opasitesin de önemli azalmalar olduğunu, bunun yanında NO_x emisyonlarında artış olduğunu, CO₂ emisyonlarında ise önemli bir değişimin olmadığını belirtmişlerdir [61].

Keskin ve ark., kağıt fabrikalarında üretim esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan tall yağından biyodizel üretimini ve bunun motor performans ve emisyonuna etkisini araştırmışlardır. Ham tall yağının büyük oranda reçine ve yağ asitlerinden oluştuğunu ve distilasyon yöntemi ile bu yağın reçine ve yağ asitlerine ayırmışlardır. Tall yağı yağ asitlerinden metil ester (Biyodizel) üretilip, fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemişlerdir. Tall yağı yağ

asitlerinin hemen hemen tamamının doymamış yağ asitlerinden oluştuğunu ve bu özelliğin tall yağına, biyodizel üretimi açısından önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Keskin ve arkadaşları; doymamış yağ asitleri ile üretilen biyodizel yakıtlarının bulutlanma noktası, akma noktası ve soğuk filtre tıkanma noktası değerlerinin doymuş yağ asidi ile üretilen biyodizellere göre oldukça düşük olduğunu, doymamış yağ asitlerinin, doymuş yağ asitlerine göre daha kolay esterleşme reaksiyonuna girdiklerini, bununla birlikte doymamış yağ asitlerinden elde edilen biyodizel yakıtların setan sayılarının doymuş yağ asitlerinden elde edilenlere göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Tall yağı biyodizelinin dizel yakıtı ile %90 oranındaki karışımını tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda tam yük şartlarında 1800-3200 devir/dakika aralığında yakıt olarak kullanmışlardır. Dizel yakıtı değerlerine göre, karışım yakıtın tork ve güç değerlerinde sırasıyla %2,99 ve %2,94'e varan oranlar da azalmalar olduğunu ve özgül yakıt tüketimi değerlerinin ortalama %7,63 oranında arttığını belirtmişlerdir. Karışım yakıtın kullanımı ile CO emisyonu değerlerinde %35,44'e kadar, duman emisyonlarında ise %13,27'ye kadar varan azalmalar tespit ettiklerini bunun yanında NO_x emisyonlarında %13,29 oranına varan artışlar görüldüğünü belirtmişlerdir. Sonuç olarak; tall yağı biyodizelinin dizel yakıtı ile %90 oranındaki karışımının dizel motorlarda modifikasyonsuz kullanılabileceğini, karışım yakıtın çok az kükürt içermesi ve yakıt özelliklerinin dizel yakıtı değerlerine yakın olmasının önemli avantajlar sağladığını, ayrıca ham tall yağı fiyatlarının, biyodizel üretiminde kullanılan diğer yağların fiyatlarından çok daha ucuz olmasından dolayı ekonomik olarak avantaj sağladığını belirtmişlerdir [62].

Saka ve Kusdiana, süper kritik metanol ile kolza yağının transesterifikasyon reaksiyonunu katalizör kullanmadan araştırmışlardır. Çalışmalarında yağ/metanol molar oranını 1:42 olarak almış, 45-65 MPa basınç, 350 °C ve 400 °C'de ön ısıtma yapılmış reaksiyon kabında deneylerini yerine getirmişlerdir. Metanolün süper kritik davranışı için 350 °C sıcaklık ve 240 dakikanın yeterli olduğunu, temel bir katalizör kullanarak ta metil ester üretimi yapıldığını fakat önceki metodun metil ester veriminin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [63].

Kerihuel ve ark., düşük kaliteli hayvansal yağın yanmasını geliştirmek için, hayvansal yağ (ördek yağı), su, etanol ve Sorbitan Sesquiolate diye bilinen SPAN 83 maddesini karıştırarak hayvansal yağ emülsiyonunu hazırlamışlardır. Seyreltme kabiliyetinin iyi olmasında dolayı etanol ve iyi bir dengeleyici olmasından dolayı SPAN 83 emülsiyon hazırlamak için kullanıldığını belirtmekteler. Stabilité, yapı, viskozite, yağ içeriği ve ekonomik yönden optimum emülsiyonun hacimsel olarak %36.4 etanol, %3.6 SPAN 83, %10 su ve %50 hayvansal yağ olduğunu belirtmişlerdir [64].

Keskin ve Aydın, fındık yağından biyodizel üretmiş ve dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini incelemişleridir. Reaksiyonda, fındık yağı kütlesinin %20'si oranda metil alkol ve %0.4 oranında katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanmışlardır. Reaksiyonu bir saatlik bir sürede ve 50-55 °C sıcaklıkta gerçekleştirmişlerdir. Reaksiyon sonunda elde edilen ham fındık yağı biyodizeline asetik asit eklenerek pH değerini 7 ye ayarlamışlar. Daha sonra gliserinin dibe çöküp faz oluşturması için ürünü 8 saat dinlenmeye bırakmışlar, dibe çöken gliserini ayırma hunisi ile ayırdıktan sonra elde edilen ürünü saf su ile kabarcık yöntemi kullanılarak yıkadıklarını belirtmişleridir. Yıkama sonrasında biyodizelin içerisinde kalmış olabilecek sudan arındırmak için ürünü 100 °C sıcaklığa ısıtarak 15 dakika bekletmişlerdir. Nihai ürünü analiz ederek viskozite, yoğunluk, parlama noktası, alt ısı değeri ve setan sayısı gibi özelliklerini belirlemişler ve dizel yakıtı ile karşılaştırmışlar. Biyodizelin setan sayısının, viskozitesinin, yoğunluğunun ve parlama noktasının dizel yakıtından yüksek olduğunu, alt ısı değerinin ise daha düşük olduğu belirtilmiştir. Fındık yağı biyodizelinin yakıt olarak kullanımında tork ve güç değerleri dizel yakıtına göre sırasıyla ortalama %3,22 ve %3,10 oranında azalma olduğunu, özgül yakıt tüketiminde ortalama %9,24 artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca fındık yağı biyodizeli ile CO emisyonlarında %48.74 ve ışık absorpsiyon katsayısında da %66.67 ye varan azalmalar sağlandığı, NOx emisyonların da ise %14.90 kadar varan artışlar olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte fındık yağı biyodizeli ile yapılan ölçümlerde SOx emisyonlarının tespit edilmediği de kaydedilmiştir [66].

Özsezen, biyodizel kullanıldığında püskürtme başlangıcının daha erken olduğu durumlarda NOx emisyonlarının dizel yakıtına göre daha düşük veya aynı çıktığını belirtmiştir [70].

Ali ve Hanna, iç yağı metil esteri ve etanol karışımlarının fiziksel özelliklerini No.2 dizel yakıtı ile aynı viskoziteye sahip ester/etanol karışımını bulmak için araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada iç yağı esteri ve etanol ün 65:35 (v/v) oranındaki karışımının No.2 dizel yakıtı ile aynı viskoziteyi verdiğini belirtmişlerdir. Bu karışımı No.2 dizel yakıtı ile farklı oranlarda karıştırarak yaptıkları analizlerde tüm karışımların yakıt özelliklerinin dizel yakıtına yakın olduğunu belirtmişlerdir [76].

Foglia ve ark., iç yağı ve kullanılmış iç yağından elde edilen mono-alkil esterlerin ve düşük kükürtlü No.2 dizel yakıtı ile %20 oranındaki karışımlarının düşük sıcaklık özelliklerini belirlemişlerdir. İç yağı alkil esterlerinin sahip olduğu özelliklerin onların saf dizel yakıtı olarak kullanımlarını sınırlandıracağını, bununla beraber dizel yakıtı ile karıştırıldığında sahip oldukları düşük sıcaklık değerlerinin onların dizel yakıt katkısı olarak kullanılmalarına müsaade ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca restoran artığı iç yağlardan elde edilen alkil esterlerin daha iyi düşük sıcaklık özelliklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir [77].

Callahan ve Sharp, standart ASTM metotlarını kullanarak dizel yakıtı özellikleri ile dizel yakıtı/iç yağı metil esteri karışımlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmışlardır. İç yağı veya restoran artığı iç yağları metil esterinin dizel yakıtı ile karışımlarının dizel yakıtına çok benzer özellikleri olduğunu belirtmişlerdir. Yakıtın çevre havasında soğuk akış problemleri veya elde edilen filtre tıkanması gibi fiziksel özelliklerinin potansiyel bir problem olduğu belirtilmiştir. İç yağı veya restoran artığı iç yağları metil esterinin dizel yakıtı ile karışımlarının yakıt olarak kullanıldığında karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbon (UHC) ve partikül (PM) seviyelerinin azaldığını, azot oksit (NOx) emisyonlarında ise önemli bir artışın olmadığını belirtmişlerdir [78].

Yahya ve Marley, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için potansiyel alternatif yakıt olarak değerlendirdikleri hayvansal iç yağı metil esteri ve soya yağı metil esterinin yakıt özelliklerini belirledikleri çalışmalarında, ester yakıtların stokiyometrik yakıt-hava oranının ester bileşimindeki moleküler oksijen varlığına bağlı olarak No.2 dizelden daha yüksek olduğunu, ester yakıtlarının yüksek olan parlama noktasının onları dizel yakıtından daha güvenli bir yakıt yaptığını, iç yağı metil esterinde yüksek oranda doymuş yağ asitlerinin varlığının setan sayısını yükseltmiş fakat yakıtın parlama noktası üzerinde önemli bir etki göstermediğini belirtmişlerdir. İç yağı ve soya yağı metil esterinin akma ve bulutlanma noktalarının onları yakıt tankında ısıtma yapılmadıkça soğuk kış şartlarına uygun olmayan yakıtlar yaptığını, çok doymuş hayvansal iç yağı metil esterinin soğuk hava problemlerine karşı çok fazla hassas olduğunu, bununla beraber ester yakıtlarının dizel yakıtından daha düşük ısı değere, daha yüksek viskozite ve özgül ağırlığa sahip olduklarını belirtmişlerdir [79].

Yahya ve Marley, iç yağı ve soya yağı metil esterlerini direk enjeksiyonlu ve doğal emişli John Deere 4239D motorunda yakıt olarak kullanarak, egzoz emisyonları ve motor performansı üzerinde enjeksiyon zamanı ve basıncının artırılmasının etkilerini araştırmışlardır. Motor testlerinde kullandıkları soya metil esteri ve iç yağı metil esteri yakıtlarının viskoziteleri dizel yakıtından yaklaşık iki kat, yoğunlukları yaklaşık olarak sırasıyla %4 ve %3 daha yüksektir. Isıl değerleri daha düşük olan bu yakıtların ve setan sayıları ise dizel yakıtından daha yüksektir. Motorun standart enjeksiyon basıncı ve zamanlamasında ester yakıtlar kullanıldığında No.2 dizel yakıtına göre, daha düşük CO, HC ve duman elde edilmesinin yanında fren özgül yakıt tüketiminde biraz artış kaydedildiğini belirtmişlerdir. İç yağı metil esteri ile soya yağı metil esteri arasında ise özgül yakıt tüketimi ve termik verim yönünden önemli bir farklılığın olmadığını, bununla beraber iç yağı metil esterinin (doymuş ester yakıtı) daha az CO ve HC vermekle beraber daha yüksek duman oluşturduğu ayrıca belirtmişlerdir. Enjeksiyon zamanı artırılıp ester yakıtları kullanıldığında motor performansı ile egzoz emisyonu

karakteristiklerinin enjeksiyon basıncı artışına göre daha iyi olduğu da çalışmada belirtilmiştir [80].

Sims ve Meister, hayvansal iç yağlar normal çevre sıcaklığında katı olan, çoğu bitkisel yağa benzemeyen trigliseritlerdir. Hayvansal iç yağların yakıt olarak kullanımı için esterifikasyon gereklidir. Bu şekilde çevre sıcaklığında sıvı fazında ve daha düşük viskoziteli esterlerin elde edilmesi mümkündür. Bununla beraber çok soğuk şartlar altında yakıt olarak kullanıldığında hayvansal iç yağı metil esterinin yüksek erime noktası sorun olmaktadır. Baz katalizörlü transesterifikasyonda etanol ve bütanoldan daha hızlı elde edilebildiğinden ve daha ucuz olmasından dolayı metanol kullanımı tercih edilmektedir. Bir ton hayvansal iç yağı metanol ile reaksiyona sokulduğunda 1 ton metil ester ve 0.1 ton gliserin üretilmektedir. Hayvansal iç yağının nispeten düşük oranlarda çoklu doymamış bileşenlere sahip olması onu özellikle yakıt olarak elverişli yapmaktadır [81].

Ali ve diğ., hayvansal iç yağı metil esteri, soya yağı metil esteri, etanol ve No.2 dizel yakıtının 12 farklı karışımını altı silindirli, dört zamanlı, direk püskürtmeli ve turboşarjlı bir Cummins N14-410 dizel motorunda kullanarak performans ve emisyon karakteristiklerini değerlendirmişlerdir. Motor performansı testlerini tam yük ve değişik devirlerde, egzoz emisyonu testlerini ise sabit devir değişik yük şartlarında yerine getirmişlerdir.

Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Hayvansal iç yağı metil esteri ile dizel yakıtı karışımları ile No.2 dizel yakıtının motor performansı değerleri arasında fark olmadığını,

Hayvansal iç yağı metil esteri kullanıldığında fren özgül yakıt tüketiminin arttığını,

Yakıt karışımlarının çoğunda CO, CO₂, O₂ ve NO_x emisyonlarının değişmediği ve EPA (Çevre Koruma Ajansı) tarafından konulan sınırlardan daha az olduğunu,

En az HC emisyonunun %20 hayvansal iç yağı metil esteri ve %80 dizel yakıtı karışımı ile elde edildiğini,

Karışım yakıtların dizel içeriğinin azalmasıyla duman emisyonlarının bir artış eğilimi gösterdiğini bununla birlikte üretilen en yüksek duman miktarının EPA'nın sınırlarından daha az olduğunu,

Bütün yakıtlar değerlendirildiğinde en iyi motor performansının hacimsel olarak %80:20 dizel: hayvansal iç yağı metil esteri ile elde edildiğini,

Hayvansal iç yağı metil esterinin etanol ile olan karışımlarının viskoziteyi düşürdüğünü, soya yağı metil esteri ile %50 oranındaki karışımlarının ise akma ve erime noktalarını düşürdüğünü belirtmişlerdir [82].

Ali ve Hanna, dizel yakıtı, hayvansal iç yağı metil esteri ve etanol karışımını (hacimsel olarak sırasıyla %80:13:7) altı silindirli, dört zamanlı, direk püskürtmeli ve turboşarjlı bir

Cummins N14-410 dizel motorunda 200 saat kullanarak motor performansı, egzoz emisyonları, motor yağlama yağı ve enjektör koklaşması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında motorun 148 saat normal bir şekilde çalıştığını ve motor çıkış gücünün, momentinin ve fren özgül yakıt tüketiminin yaklaşık olarak sabit kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca egzoz emisyonlarında bir değişimin olmadığını ve fren özgül emisyonlarının test periyodu boyunca sabit kaldığını belirtmişlerdir. 100 saatlik çalışma sonunda motor yağlama yağı viskozitesinde dikkate değer bir değişimin olmadığını ve motor aşınmasının da normal olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber 200 saatlik test boyunca üç enjektörün sırasıyla 148, 159 ve 197 saat sonra bozulduğunu ve bunun da farklı yakıt kullanımından değil de, mekanik bir arızadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. 197 saat çalıştıktan sonra da bir enjektörün koklaştığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak; farklı yakıt kullanımından kaynaklanmayan enjektör arızalarının dışında motorun 200 saat boyunca elverişli bir şekilde çalıştığını belirtmişlerdir [83].

Chung ve diğ., ördek iç yağından metanol kullanarak transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretmişlerdir. Transesterifikasyon reaksiyonu için farklı baz katalizörler kullanmışlardır. Katalizör olarak KOH'in, reaksiyon sıcaklığının ise 55-85 °C'ler arasında en iyi koşulların sağlandığını belirtmişlerdir. Elde ettikleri biyodizelin metil ester içeriği, asit değeri, yoğunluk ve viskozite gibi özelliklerinin Avrupa biyodizel kalite standartlarını yakaladığını belirtmişlerdir [93].

Bhatti ve diğ., atık tavuk ve koyun iç yağlarından biyodizel üretimi için uygun koşulları araştırmışlardır. Çalışmalarında biyodizel üretimi için katalizör, reaksiyon sıcaklığı ve zamanı gibi parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak; 5 gr tavuk ve koyun yağı için sırasıyla 50 ve 60 °C sıcaklıkta, 1/30 yağ/metanol molar oranı ile tavuk yağı için 1.25, koyun yağı için 2.5 gr H₂SO₄ kullanımıyla 24 saatte sırasıyla %99 ve %93 metil ester dönüşümü sağlamışlardır [94].

Bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve dizel motor yakıtı olarak kullanılması ile ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde; bitkisel ve hayvansal yağların dizel motorlarında kullanımı için ön ısıtma, proliz, seyreltme, emülsiyon ve transesterifikasyon gibi farklı yöntemler olduğunu, bunların arasında ise transesterifikasyon reaksiyonunun çoğunlukla kullanılan yöntem olduğunu görmekteyiz. Transesterifikasyon reaksiyonu kullanılan katalizör tipi, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi, alkol ve yağın molar oranı, bitkisel ve hayvansal yağın içindeki su ve serbest yağ asitleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Transesterifikasyonda serbest yağ asitleri ve su daima katalizör etkinliğinin azalması, katalizörün tükenmesi ve sabun oluşumu gibi olumsuz etkiler yapmakta ve bu da düşük ester verimi ile sonuçlanmaktadır. Yüksek oranda serbest yağ asidi ve su ihtiva eden yağların transesterifikasyonun da baz kataliz yerine asit kataliz kullanılması veya iki aşamalı yani önce asit kataliz sonrada baz katalizli

reaksiyonun uygulanmasının daha iyi dönüşüm sağladığı çalışmalarda görülmektedir. Hayvansal iç yağlardan baz katalizörlü transesterifikasyon ile üretilen biyodizelin yakıt özellikleri ASTM standartlarını yakaladığı ve dizel yakıtı özelliklerine yakın olduğu yapılmış çalışmalarda belirtilmiştir. Bununla beraber hayvansal iç yağı biyodizelinin düşük sıcaklık özelliklerinin kötü olduğu ve bunun soğuk hava şartlarında kullanımlarını güçleştirdiği görülmektedir. Hayvansal yağlar ön ısıtma, emülsiyon ve transesterifikasyon gibi yöntemler ile modifiye edildikten sonra dizel motorlarında yakıt olarak kullanılmışlardır [4, 5, 53, 55, 58, 59, 61, 64, 80, 82, 83]. Bu çalışmalar incelendiğinde hayvansal yağ esaslı yakıtların dizel motorlarında yakıt olarak kullanıldıklarında dizel yakıtına benzer motor performansı ve daha düşük CO, HC ve duman emisyonlarının yanında NOx emisyonlarında ise az bir artışın olduğu görülmektedir.

3. HAYVANSAL İÇ YAĞLARDAN BİYODİZEL ÜRETİMİ

Hayvansal iç yağlar normal çevre sıcaklığında katı olup çoğu bitkisel yağa benzemeyen trigliseritlerdir. Hayvansal iç yağların yakıt olarak kullanımı için esterifikasyon gereklidir. Bu şekilde çevre sıcaklığında sıvı fazında ve daha düşük viskoziteli esterlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bununla beraber çok soğuk şartlar altında yakıt olarak kullanıldığında hayvansal iç yağı metil esterinin yüksek erime noktası sorun olmaktadır. Transesterifikasyon için etanol ve bütanoldan daha hızlı elde edilebildiği ve daha ucuz olmasından dolayı metanol kullanımı tercih edilmekte, bir ton hayvansal iç yağı metanol ile reaksiyona sokulduğunda 1 ton metil ester ve 0.1 ton gliserin üretilmektedir. Hayvansal iç yağının nispeten düşük oranlarda çoklu doymamış bileşenlere sahip olması onun yakıt olarak kullanımını uygun hale getirmektedir [81]. Bu bölümde Elazığ'da bulunan Katiboğlu hayvan kesim hanesinde et üretimi sırasında elde edilen hayvansal iç yağlardan biyodizel üretimi yapılmıştır. Kesimi yapılan büyük ve küçükbaş hayvanların karın bölgesinden elde edilen bu yağlar, bir kazanda toplandıktan sonra eritilerek kalıplara dökülür ve gıda olarak kullanılmadığından genelde sabun yapımında kullanılmak üzere pazarlanır. Şekil 3.1'de biyodizel üretiminde kullanılan işlenmiş hayvansal iç yağı görülmektedir. Hayvan kesim hanesinde bu şekilde yıllık yaklaşık 200 ton hayvansal iç yağı elde edilmektedir.



Şekil 3.1 Biyodizel üretimi yapılan hayvansal iç yağı.

3.1. Hayvansal İç Yağlardan Örnek Biyodizel Üretimi

Hayvansal iç yağlardan motor testlerinde kullanılacak miktarda biyodizelin üretiminden önce numune bazında üretim yapılarak, biyodizel üretimi için uygun koşullar ile üretim aşamalarının ve bazı reaksiyon girdilerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu çalışmalar Batman Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Rafineri ve Petro-Kimya programı laboratuvarında yapılmıştır. Ön deneyler için Şekil 3.2’de görülen manyetik karıştırıcılı ısıtıcı, dibi düz cam balon, dijital sıcaklık ölçer, geri soğutucu, hassas terazi, cam kaplar, huniler, kağıt ve bez filtreler ve gerekli yardımcı aparatlar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan alet ve cihazların marka, model ve özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Yağın transesterifikasyonu için Riedel-de Haën marka % 99.7 saflıkta metil alkol ticari bir firmadan (Sigma-Aldrich, İnterlab) satın alınmıştır. AnalaR marka % 98 saflıkta sodyum hidroksit (NaOH) Batman Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Rafineri ve Petro-Kimya laboratuvarından sağlanmıştır.



Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan malzeme ve araç-gereçler.

Baz katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonunda serbest yağ asidi ve suyun varlığı sabunlaşmaya, katalizörün tükenmesi ve katalizör etkinliğinin azalmasına sebep olur [22,47]. Serbest yağ asidi içeriğinin %0.5’ten fazla olması durumunda, transesterifikasyon reaksiyonu üzerinde etkilerinin giderilmesi gerektiğini Freedman ve diğ., [72] belirtmiştir [57]. İç yağının,

Ma ve diğ., [46], %0.29, Zheng ve Hanna [57] ise %0.27 oranında serbest yağ asidi içerdiğini belirtmişlerdir. İç yağının içerdiği serbest yağ asidi oranının belirtilen orandan düşük olmasından dolayı yağı ön bir kimyasal işleme sokmadan baz katalizörlü transesterifikasyon ile biyodizel üretimine geçilmesine karar verilmiştir.

Tablo 3.1 Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz ve araç-gereçler.

ARAÇ-GEREÇLER VE ÖZELLİKLERİ	ADEDİ
BIBBY marka HB 502 model 550 W gücünde manyetik karıştırıcılı ısıtıcı	1
AGITATEUR marka manyetik karıştırıcı	1
500 ml kapasiteli ölçekli dibi düz cam balon	2
Geri soğutucu ve bağlantıları	2
AND marka HF-300 model 0.001gr ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazi	1
HANNA marka HI 9040 model dijital sıcaklık ölçer. Bu cihaz -50....+150 °C arasında 0.1 °C hassasiyetinde sıcaklık ölçebilmektedir.	1
250 ve 1000 ml hacimli ölçekli cam beherler	3
Farklı hacimlerde cam ve plastik huniler	2
1000 ml kapasiteli cam ayırma hunisi	1
Kağıt ve bez filtreler	4

Literatürde serbest yağ asidi oranı yüksek olan yağların biyodizele dönüşümlerinde iki adımlı transesterifikasyon uygulaması önerilmektedir. Yani ilk önce bir asit katalizörlüğünde birinci transesterifikasyon, sonra baz katalizörlü ikinci bir transesterifikasyon yapılması önerilmektedir. Bu şekilde bazı araştırmacılar [28, 48, 55, 90, 91] yüksek oranlarda serbest yağ asidi içeren yağlardan iki adımlı transesterifikasyon ile biyodizel üretmişlerdir. Bununla beraber hayvansal yağlar bir miktar su içermektedir. Su içeriğinin belirlenmesi ve giderilmesi için yağdan numune alınarak önce 60 °C'ye kadar yavaşça eritilmiş sonra sıcaklık 105–110 °C arasına kadar çıkarılarak ısıtılmıştır. Isıtma sırasında 80°C'den sonra yağın içerisinde kabarcıklar oluşmaya başladığı ve sıcaklığın artmasıyla (102 °C civarında) buharlaşmanın başladığı görülmüştür. Buharlaşma devam ederken yağ yüzeyinde oluşan kabarcıklar (köpük şeklinde) bir kepçe vasıtasıyla toplanmıştır. Yağ yüzeyindeki kabarcıkların ve buharlaşmanın bitimine kadar ısıtma devam etmiş ve eritme zamanı hariç yaklaşık bir saat sürmüştür. Bu işlemlerin sonunda yağ numunesi bir bez filtreden geçirilip tartıldığında yağın ağırlıkça yaklaşık %5'i kadarının eksildiği görülmüştür. Bu işlemler örnek ve ana biyodizelin üretiminde kullanılan yağ üzerinde tekrarlanmıştır. Farklı zamanlarda hayvan kesim hanesinden alınan yağlarda bu işlemler için gerekli sürenin yani yağ yüzeyindeki buharlaşmanın bitimine kadar ki

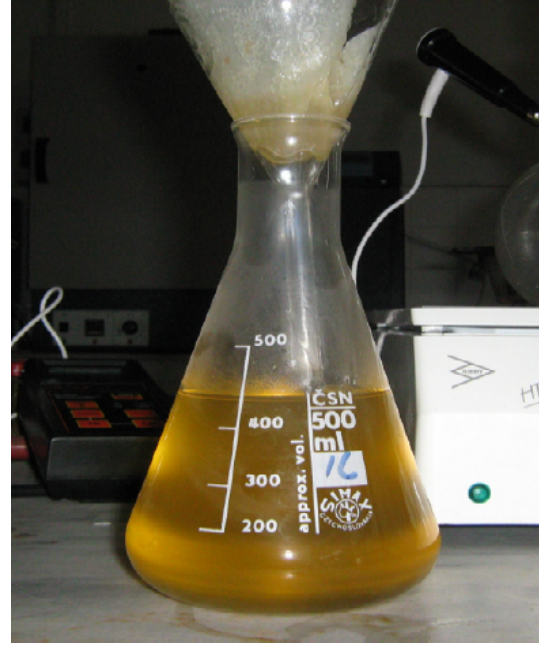
zamanın ve eksilen miktarın değiştiği görülmüştür. Farklı zamanlarda kesimi yapılan hayvanlardan elde edilen yağların farklı oranlarda su içermeleri, kesilen büyük ve küçük baş hayvan sayılarının farklı oluşu, toplama, depolama ve eritme şartları ile yağın bekleme süresi gibi değişken durum ve işlemler bu farklılığa sebep olmaktadır. Hayvansal iç yağlardan baz katalizörlü transesterifikasyon ile Ma ve diğ., [46], Wyatt ve diğ., [53], Zheng ve Hanna [57], Alcantra ve diğ., [68], Ma ve diğ., [69], Ali ve Hanna [76], iç yağı metil esterleri üretmişlerdir. Hayvansal iç yağı esterlerinin üretimi için baz katalizörlü transesterifikasyonun tercih edildiğini, iç yağı metil, etil ve bütil esterlerinin üretildiğini Sims, R.E.H. belirtmiştir [56;67]. Bu ve diğer bir çok çalışmada yağın transesterifikasyonu için alkol olarak metanol, alkol/yağ molar oranı 6:1, katalizör olarak ta sodyum hidroksit tercih edilmiştir. Bununla beraber farklı miktarlarda (yağın ağırlıkça %0.2 - %1'i arasında NaOH) katalizör kullanmışlardır (Bu konu bölüm 1.4.2 ve bölüm 2'de açıklanmıştır). Literatürdeki çalışmalarda izlenen prosedür ve kullanılan parametreler ışığında yapılan ön çalışmalar neticesinde biyodizel üretimi için alkol/yağ molar oranının 6:1, reaksiyon sıcaklığının 60 °C (metil alkolün kaynama noktasının altında), katalizör olarak yağın ağırlıkça %0.5'i kadar NaOH ve üç saatlik karıştırma süresinin seçilmesine karar verilmiştir. Bu şekilde %96 ester dönüşüm verimi ile biyodizel üretimi aşağıda anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir.

400 gram hayvansal iç yağı (0,46512 mol) 60 °C'ye eritilmiş (Şekil 3.3-a) ve daha sonra 105–110 °C arasında bir saat ısıtılarak içerisindeki suyun buharlaşması sağlanmıştır. Yağ filtreden geçirilerek soğuması için başka bir kaba alınmıştır. Şekil 3.3-b'de reaksiyon için hazırlanmış yağ numunesi görülmektedir. 2 gr NaOH (yağın ağırlıkça %0.5'i), 89,4 gr metil alkol (2,7907 mol) içerisinde çözününceye kadar BIBBY marka HB 502 model manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır (Şekil 3.4-a). Hazırlanan katalizör-alkol çözeltisine 60 °C'deki yağ eklenmiştir. Çözelti yağın sıcaklığını biraz düşürmüştür. Manyetik ısıtıcı ile karışımın sıcaklığı 60 °C'ye yükseltilmiş ve reaksiyon boyunca bu sıcaklıkta tutulmuştur. Karışım 60 °C'de 3 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Reaksiyon devam ederken alkol kaybını önlemek için reaksiyon kabına bir geri soğutucu bağlanmış ve su musluğuna bağlanarak şebeke suyunun (su sıcaklığı 15 °C) geri soğutucuda dolaşımı sağlanmıştır (Şekil 3.4-b). Bu şekilde reaksiyon sırasında buharlaşan alkolün geri soğutucuda yoğunlaşarak tekrar reaksiyon odasına geri dönmesi sağlanmıştır. Reaksiyon sonunda ester ve gliserin fazlarının ayrılması için karışım 12 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda gliserin ve ester fazları birbirinden ayrılmış (Şekil 3.5-a) ve ayırma hunisinden gliserin alınmıştır (Şekil 3.5-b). Ester iki katı miktarda 60 °C'deki saf su ile reaksiyon kabında bir süre karıştırıldıktan sonra ayırma hunisine alınarak birbirlerinden ayrılmalrı beklenmiştir (Şekil 3.5-c). Bu işlem iki defa tekrar edilmiştir. Son olarak alınan ester filtreden geçirilip oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Sonuçta açık sarı

renkte, hoş kokulu (hayvansal iç yağı eritildiğinde çok kötü bir kokuya sahip olmaktadır) ve çok daha düşük viskoziteli bir yakıt elde edilmiştir (Şekil 3.6).



(a)



(b)

Şekil 3.3 Yağın ısıtıcıda eritilmesi (a) ve reaksiyona hazır yağ numunesi (b).



(a)



(b)

Şekil 3.4 Metil alkol içerisinde sodyum hidroksitin çözünmesi (a) reaksiyon (b).



(a)



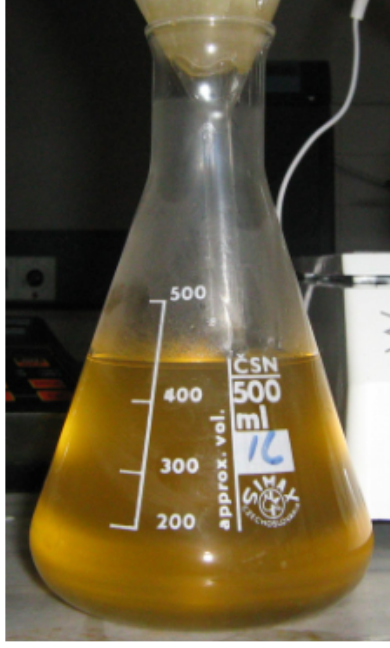
(b)



(c)

Şekil 3.5. Ester ve gliserin fazları (a), ayırma hunisinden gliserinin alınması (b), esterin yıkanması (c).

Reaksiyon verimi $\text{Verim (\%)} = \frac{m_{\text{biyodizel}}}{m_{\text{hayvansal iç yağı}}} \times 100$ formülü ile hesaplanmıştır.



(a)



(b)

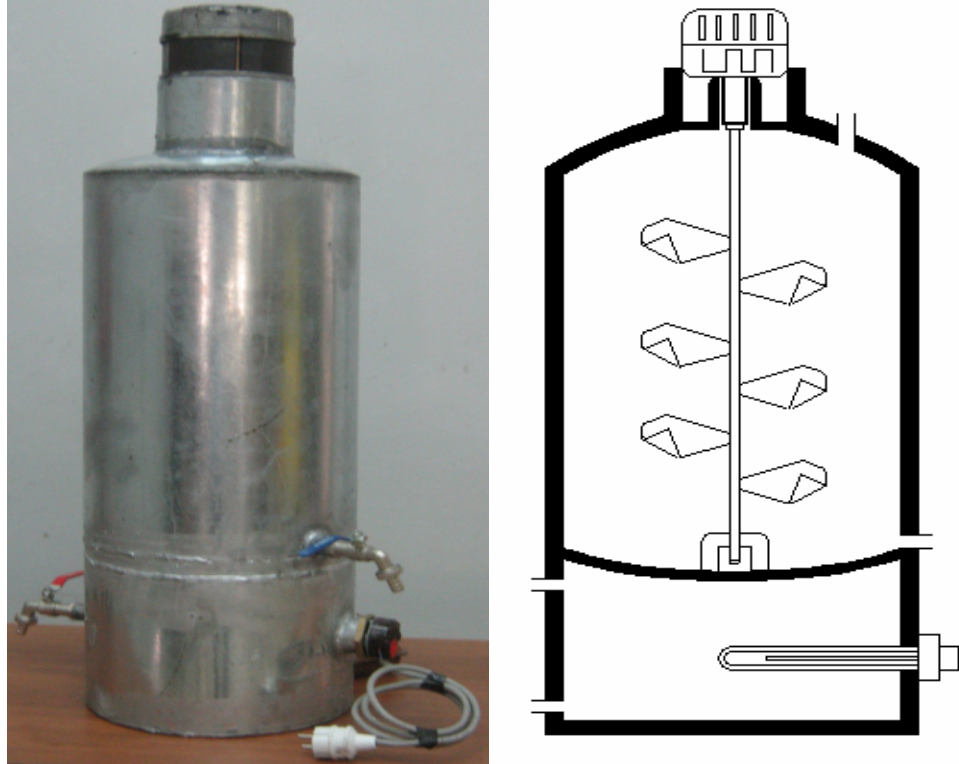
Şekil 3.6 60 °C’de hayvansal iç yağı (a) ve 17 °C’de hayvansal iç yağı metil ester (b).

Tablo 3.2 Reaksiyona ait veriler.

Kullanılan yağ ve miktarı	400 gr hayvansal iç yağı
Yağın molekül ağırlığı	859,99 gr/grmol ^[57]
Alkol / yağ molar oranı	6:1
Kullanılan alkol ve miktarı	%99.7 saflıkta Metanol, 89.4 gr
Alkolün molekül ağırlığı	32,04 g/gmol
Yağın mol sayısı	0.46512 mol
Alkolün mol sayısı	2.7907 mol
Katalizör cinsi	%98 Saflıkta NaOH
Katalizör miktarı	2 gr (yağın ağırlıkça % 0.5’i)
Reaksiyona giren toplam kütle	491.4 gr
Karıştırma süresi ve ortam sıcaklığı	3 saat, 60 °C
Reaksiyondan çıkan toplam kütle	484 gr
Buharlaştan kütle	7.4 gr
Gliserin miktarı	83 gr
Ester miktarı	401gr
Yıkama ve filtreleme sonrası ester miktarı	384 gr
Dönüşüm verimi	%96
Metil esterin viskozitesi	5,072 mm ² /sn (40 °C’de)
Metil esterin yoğunluğu	0,877 kg/l (17 °C’de)

3.2. Motor Testlerinde Kullanılacak Biyodizel Yakıtının Üretilmesi

Motor testlerinde kullanılmak üzere Şekil 3.1’de görülen hayvansal iç yağı Şekil 3.7’de görülen cihaz kullanılarak biyodizele dönüştürülmüştür. Bu cihaz reaksiyon odası ve reaksiyon odasının ısıtılması için alt kısımda bulunan bir su haznesinden oluşmaktadır. Su haznesindeki suyu ısıtmak ve belirli bir sıcaklıkta tutmak için termostatlı ısıtıcı, reaksiyon odasını karıştırmak için bir elektrik motoru ile tahrik edilen karıştırıcı mil kullanılmıştır. Reaksiyon odasının ısıtılması için 2500 W gücünde bir ısıtıcı cihazın alt kısmındaki su haznesine yerleştirilmiştir. Reaksiyona giren maddelerin ısıtıcı ile direk temasını önlemek için bu şekilde bir ısıtma yöntemi tercih edilmiştir. Böylelikle rezistans karışımın aşındırıcı etkisinden korunmuş olmaktadır. Isıtıcı için kullanılan termostat su sıcaklığını 40–80 °C arasındaki sıcaklık değerlerinde tutabilmektedir. HANNA marka HI 9040 model dijital sıcaklık ölçer ile reaksiyondan önce sıcaklık kontrolü yapılmıştır. Su sıcaklığı 60 °C’de iken reaksiyon odası sıcaklığının da 60 °C olduğu ve bu şekilde bir saat boyunca aralıklarla yapılan kontrollerde sıcaklığın yaklaşık olarak (± 1 °C) sabit kaldığı görülmüştür. Reaksiyon odasında iyi bir karışım sağlayabilmek için 480 W gücünde bir elektrik motoru ile tahrik edilen uçları ters kıvrılmış kanatçıklara sahip bir karıştırma mili kullanılmıştır.

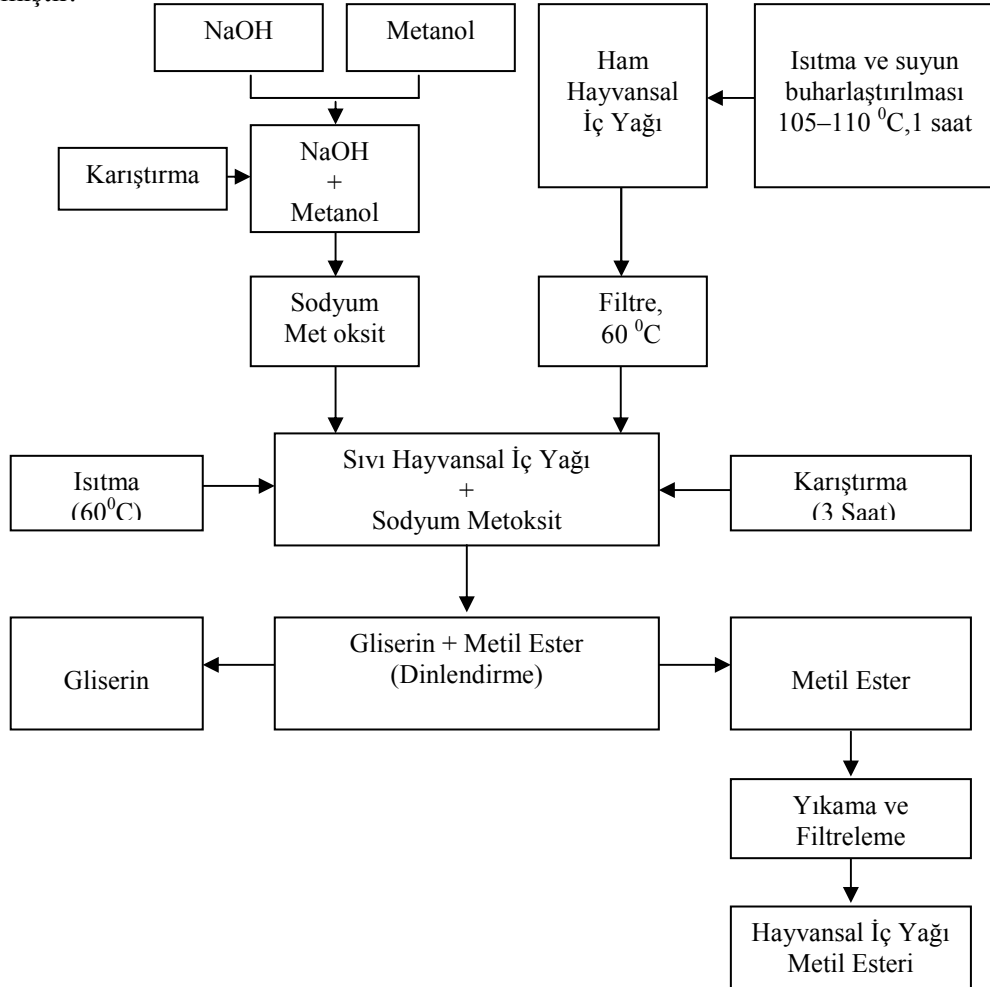


Şekil 3.7 Biyodizel üretiminde kullanılan cihaz ve şematik gösterimi.

Reaksiyonun gerçekleştiği cihazın yanında karışımın dinlendirilmesi, gliserinin alınması ve esterin yıkanması için plastik bidonlar kullanılmıştır. Hayvansal iç yağı reaksiyona sokulmadan önce su içeriğinin uzaklaştırılması ve filtreleme işlemlerinden geçirilmiştir. Reaksiyon alkol kaybını önlemek için atmosfere kapalı yapılmıştır. Biyodizelin üretimi için kullanılan yağ miktarına göre gerekli alkol ve katalizör miktarları aşağıda anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Hayvansal iç yağının molekül ağırlığı 859,99 gr/grmol'dür [57]. Metil alkolün molekül ağırlığı 32,04 gr/grmol. Buna göre; yağın mol sayısını biyodizel üretiminde kullanılacak 30 kg iç yağına göre hesaplanırsa;

$$30 \text{ kg} = 30000 \text{ gr}, n = \frac{m}{M_A} = \frac{30000}{859,99} = 34,884 \text{ mol yağ olarak bulunur. } 34,884 \text{ mol yağ}$$

için %100 fazla alkol kullanarak alkol / yağ molar oranı 6:1 olarak alındığında; $34,884 \times 6 = 209,304$ mol metil alkol olur. Molekül ağırlığı ile çarparsak; $209,304 \times 32,04 = 6706,12$ gr metil alkol olarak bulunur. 30 kg hayvansal iç yağının transesterifikasyonu için 6706,12 gr metil alkol ve 150 gr NaOH kullanılmıştır. Biyodizel Şekil 3.8'de verilen işlemler takip edilerek üretilmiştir.



Şekil 3.8 Biyodizel üretiminde takip edilen işlem basamakları.



Şekil 3.9 Hayvansal iç yağı ve hayvansal iç yağı metil esteri (biyodizel).

3.3. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Yakıt Özelliklerinin Analizi

Hayvansal iç yağı metil esterinin bazı yakıt özellikleri Dicle Üniversitesi Fen ve Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü yakıt analiz laboratuvarında yapılan analizler ile belirlenmiştir. Tablo 3.3'te biyodizelin belirlenen yakıt özellikleri verilmiştir. Biyodizelin özellikleri dizel yakıtı özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Biyodizel ve dizel yakıtı karışımlarının viskozite ve yoğunluk değerleri TÜPRAŞ Batman Rafinerisi yakıt analiz laboratuvarında belirlenmiş ve bu değerler Tablo 3.4'te verilmiştir.

Hayvansal iç yağının dizel yakıtına göre çok yüksek olan viskozitesi metil ester şekline dönüştükten sonra önemli ölçüde azalmıştır. Normal çevre sıcaklığında katı olan ham iç yağı transesterifikasyondan sonra (metil ester şekline dönüştükten sonra) çevre sıcaklığında sıvı olan bir yakıt haline dönüşmüştür. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında biyodizelin viskozitesi yaklaşık %28 daha yüksek çıkmıştır. Biyodizel ve dizel yakıtı karışımlarında viskozite düşmüştür. Hayvansal iç yağı metil esterinin viskozitesi ASTM 6751 ve EN 14214 biyodizel standartlarında belirtilen viskozite sınır değerleri içerisinde kalmıştır. Bu çalışmada hayvansal iç yağlardan üretilen biyodizelin sahip olduğu viskozite değeri literatürdeki çalışmalarda [18, 53, 56, 79, 97] elde edilen viskozite değerleri ile benzer çıkmıştır. Hayvansal iç yağı metil esterinin viskozite, yoğunluk, parlama noktası, akma noktası ve ısı değeri dışındaki özellikleri literatürden [79], alınmıştır.

Tablo 3.3 Biyodizel ve dizel yakıtının özellikleri

Özellik	ASTM D 6751	EN 14214	Biyodizel	Dizel Yakıtı
Viskozite (mm ² /sn) (40 ⁰ C'de)	1.9-6	3.5-5	5,072	3,6663
Isıl Değeri (kJ/kg)	-	-	39858	42700
Yoğunluk (kg/m ³) (15 ⁰ C)	-	860-900	877 (17 ⁰ C)	843,51
Parlama Noktası (⁰ C)	Min.130	Min.120	30	60
Akma Noktası (⁰ C)	-	-	0	-15
Setan Sayısı	Min.47	51	58.8	52
Kükürt miktarı (%kütle)	-	-	0.18	0.29
Karbon (%kütle)	-	-	76.77	87.12
Hidrojen (%kütle)	-	-	12.88	12.88
Oksijen (%kütle)	-	-	11.47	-
Su ve kalıntı (% hacim)	max. 0.05	-	0.030	
Konradson karbon kalıntısı (% kütle)	max. 0.05	-	0.03	0.03

Tablo 3.4 Deney yakıtlarının viskozite ve yoğunluk değerleri.

Özellik / Yakıt	DY	B 5	B20	B50	B100
Viskozite (mm ² /sn) (40 ⁰ C)	3,6663	3,6823	3,7650	3,869	5,072
Yoğunluk (kg/m ³) (15 ⁰ C)	843,51	844,66	846,99	853	877

Hayvansal iç yağının yüksek olan yoğunluğu metil ester şekline dönüştükten sonra önemli bir şekilde azalmış ve karışım yakıtlarında bu azalma devam etmiştir. Biyodizelin sahip olduğu yoğunluk değeri EN 14214 standartlarında belirtilen sınır değerlerin arasında çıkmıştır. Biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtı yoğunluğu ile karşılaştırıldığında yaklaşık %4 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Biyodizelin sahip olduğu ısı değeri dizel yakıtının ısı değerinden yaklaşık %7 daha düşük olarak bulunmuştur. Biyodizelin parlama noktası 30⁰C çıkmıştır. Biyodizel parlama noktası değeri ile ASTM 6751 ve EN 14214 standartlarının çok altında kalmaktadır. Düşük parlama noktası değerinin metil esterin içerdiği alkol miktarının yüksek olmasından kaynaklandığını Sims, R.E.H. [56], belirtmiş ve kendi yaptığı çalışmasında iç yağı

metil esterinin parlama noktasının 23 °C çıktığını belirtmiştir. Biodizelin parlama noktasının düşük olması onu taşıma ve depolama sırasında güvenli olmayan bir yakıt yapmaktadır. Yakıtların akmaya başladığı en düşük sıcaklık derecesine akma noktası denir. Akma noktası, motorun düşük sıcaklıklarda çalıştırılması sırasında önem kazanmaktadır. Yüksek akma noktasına sahip yakıtlar ön ısıtma yapılmadan kullanılmaları halinde başta ilk hareket zorlukları olmak üzere bazı problemlere neden olmaktadır. Hayvansal iç yağı normal çevre sıcaklığında katı olup, akma noktası 40 °C civarındadır. Metil ester şekline dönüştükten sonra ise bu değer 0°C'ye kadar düşmüştür. Bu değeri ile hayvansal iç yağı metil esteri daha çok yaz aylarında kullanmaya uygun bir yakıt olmaktadır.

3.4. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Üretim Maliyeti

Bu çalışmada üretilen hayvansal iç yağı metil esterinin basit bir şekilde üretim maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir. 30 kg hayvansal iç yağından %96 verimle yani 28.8 kg biodizel üretilir. Bölüm 3.1’de izah edilen gerekçe ile 30 kg hayvansal iç yağının reaksiyona sokabilmek için yaklaşık 32 kg yağın kullanılması gerekmektedir. Bu miktar, yağın su ve tortu içeriğiyle değişmektedir (detaylı bilgi için Bölüm 3.1). Elazığ Katiboğlu et üretim tesislerinde işlenmiş hayvansal iç yağı sabun üretiminde kullanılmak üzere kilogramı 80YKr’tan pazarlanmaktadır. Metil alkol kg fiyatı 1.5 YTL’den, ticari NaOH’in kg fiyatı 60 YTL’den hesaplanmıştır. Tablo 3.5’te kullanılan malzemelerin miktarları ve fiyatları görülmektedir.

Tablo 3.5. Reaksiyona giren malzemelerin miktar ve tutarları.

Reaktanslar	Birim Fiyat (YTL/kg)	Kullanılan Miktar (kg)	Toplam Tutar (YTL)
Hayvansal İç Yağı	0,8	32	25,6
Metil Alkol	1.5	6.706,12	10,06
Katalizör (NaOH)	60	0.15	9
Toplam			44,66

Tablo 3.6. Elektrikli aletler ve harcadıkları enerji miktarları.

Alet	Güç (kW)	Çalıştığı süre (saat)	Harcanan enerji (kWh)	Elektriğin birim fiyatı (YTL/kWh)*	Tutar (YTL)
Elektrikli ocak	1.5	2	3	0.225	0.676
Elektrik motoru	0.48	3	1.44	0.225	0.324
Isıtıcı (rezistans)	2.5	3.5	8.75	0.225	1.971
Toplam	4.48	8.5	13.19	-	2.971

*Elektriğin birim fiyatı tüm bedeller dahil mesken tipi abone fiyatıdır.

Tablo 3.5'e göre reaksiyona giren malzemelerin toplam maliyeti 44.66 YTL olarak çıkmaktadır. Yağın eritilmesi ve suyun buharlaştırılması için 1.5 kW gücünde bir elektrikli ısıtıcı 2 saat boyunca kullanılmıştır. Ayrıca reaksiyon odasının ısıtılması ve karıştırılması için 2,5 kW'lık bir ısıtıcı ile 0,48 kW gücünde bir elektrik motoru 3 saat boyunca kullanılmıştır. Toplam elektrik tüketimi Tablo 3.6'da görülmektedir.

Toplamda reaksiyon için 47.631YTL harcanmış olur. Başka bir deyişle elde edilen 28.8 kg biyodizel için 47.631YTL harcanmıştır. 1kg biyodizelin maliyeti 47.631YTL /28.8kg olarak hesaplanırsa yaklaşık olarak 1.65 YTL olarak bulunur. Sonuç olarak bu maliyetin üzerine yatırım ve işletme giderleri ile yasal vergiler eklendiğinde daha yüksek bir rakam çıkacaktır. Bu şekilde petrol kökenli dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında fiyat olarak daha ekonomik görülmemektedir. Ancak; dünyada petrol fiyatlarının sürekli artış yönünde olduğu ve petrolün tükeniyor olması göz önüne alındığında hayvansal iç yağı metil esterleri ekonomik yönden dizel motorlar için dizel yakıtına alternatif olabileceği söylenebilir. Bununla beraber, üretim küçük ölçekli laboratuvar şartlarında yapıldığı düşünüldüğünde maliyetin yüksek olması kaçınılmazdır. Büyük ölçekli üretimde sistem de üretimin fazla olması, kullanılan malzemelerin toptan fiyatlarının daha düşük olması ve işletme maliyetlerinin de azalacağı dikkate alındığında seri üretim yapılması halinde maliyet oldukça düşecektir.

Hayvansal iç yağı metil esterinin Bölüm 3 ve 5'ten anlaşılabileceği gibi hayvansal iç yağı metil esterinin dizel motorlarda dizel yakıtı yerine veya yakıt katkısı olarak kullanımı mümkündür. Bu nedenle maliyeti yüksek olsa bile günümüzde petrol rezervlerinin giderek azalması ve petrol fiyatlarındaki hızlı artıştan dolayı ileride hayvansal iç yağı metil esterinin kullanımının daha avantajlı olacağını düşünmekteyim. Örneğin olası bir petrol krizinin hasat mevsimine rastladığı düşünüldüğünde, tarım kesiminin enerji ihtiyacını karşılamak için hayvansal iç yağlardan üretilen alternatif dizel yakıtı kolaylıkla kullanılabilir.

3.5. Hayvansal İç Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılması

Bu çalışmada üretilen hayvansal iç yağı metil esterinin dizel yakıtı yerine ve dizel yakıtına katılarak kullanılabilirliğini araştırmak için dört zamanlı, tek silindirli ve direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda laboratuvar ortamında kısa ve uzun süreli testler yapılmıştır. Hayvansal iç yağı metil esterleri saf olarak ve dizel yakıtına hacimsel olarak %5, 20 ve 50 oranlarında katılarak yakıt olarak kullanılmıştır. Kısa süreli motor testlerinde biyodizel ve karışım yakıtların performans ve emisyon karakteristikleri dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hayvansal iç yağı metil esterinin dizel motorlarında alternatif yakıt olarak motor elemanları üzerindeki etkilerini ve uzun süreli kullanımlar için uygun olup olmadığını

belirlemek için 100 saatlik motor testi yapılmıştır. Bu test için dizel yakıtına benzer performans özellikleri göstermesinin yanında CO ve NO_x gibi egzoz emisyonlarının tüm yakıt türlerinden daha düşük olmasından dolayı B20 yakıtı tercih edilmiştir. Bir başka deyişle dizel yakıtına hacimsel olarak %20 oranında katılan hayvansal iç yağı metil esterinin direk enjeksiyonlu ve dört zamanlı bir dizel motorunda dizel yakıtı yerine uzun süreli kullanılabilirliği araştırılmıştır. Literatürde [120] en uygun biyodizel ve dizel karışım oranı olarak B20'nin en çok ve en uygun karışım yakıt olduğu belirtilmiş olması da B20 kullanılmasının bir başka nedeni olmuştur. B20 ve dizel yakıtı 100 saat süreyle kullanılarak motor elemanları üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

4. MOTOR TEST MATERYALLERİ VE METOTLAR

4.1. Deney Yakıtları

Deneylerde yakıt olarak, hayvansal iç yağlardan elde edilen biyodizel yakıtı ve ticari dizel yakıtı (motorin) kullanılmıştır. Dizel yakıtı USPET Batman yakıt istasyonundan satın alınmıştır. Biyodizel hacimsel olarak %5 (B5), %20 (B20) ve %50 (B50) oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılarak ve saf olarak (B100) kullanılmıştır. Motor testlerinde kullanılan yakıtlar Şekil 4.1’de görülmektedir. Dizel yakıtı ve biyodizele ait özellikler Tablo 3.3’te, test yakıtlarının viskozite ve yoğunluk değerleri Tablo 3.4’te verilmiştir.



Şekil 4.1 Deney yakıtları (fotoğrafik).

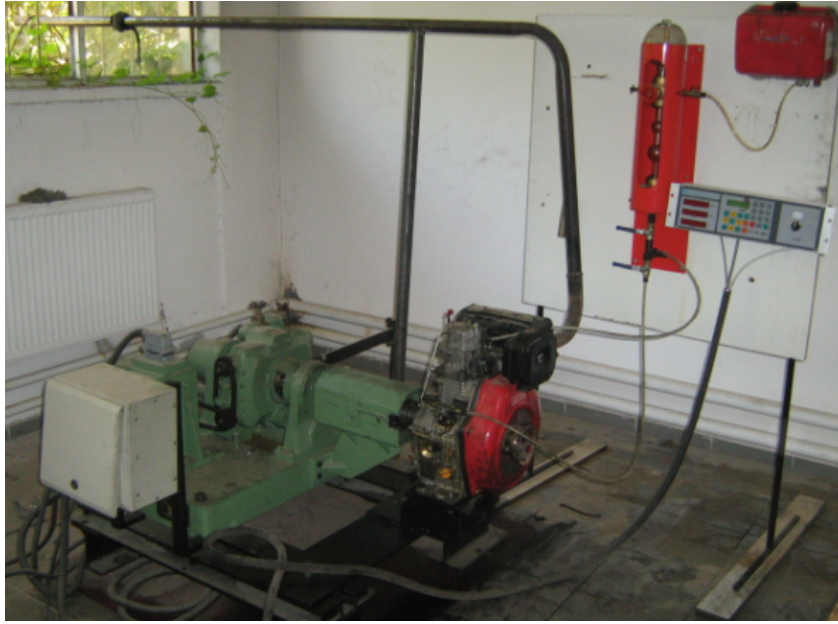
4.2. Deney Seti

Deney seti, test yatağı, hidrolik dinamometre, egzoz gazı analiz cihazı, duman ölçüm cihazı, Tablo 4.1’de teknik özellikleri verilen tek silindirli dizel motordan ve yardımcı araçlardan oluşmaktadır. Deney seti Batman Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü laboratuvarında bulunmaktadır. Şekil 4.2’de deney seti görülmektedir. Şekil 4.3’te deney seti şematik olarak gösterilmiştir. Deney seti kontrol panelinde, motor hızı ve yükünü görüntüleyen dijital göstergeler, 50 ve 100 ml’lik yakıt tüketimi ölçüm büretleri ve motor yükünün kontrolü için ayar düğmesi bulunmaktadır. Ayrıca deney setine yerleştirilmiş

olan termal elemanlar vasıtası ile kontrol panelinde bulunan dijital göstergeden egzoz sıcaklığı değerleri okunabilmektedir.

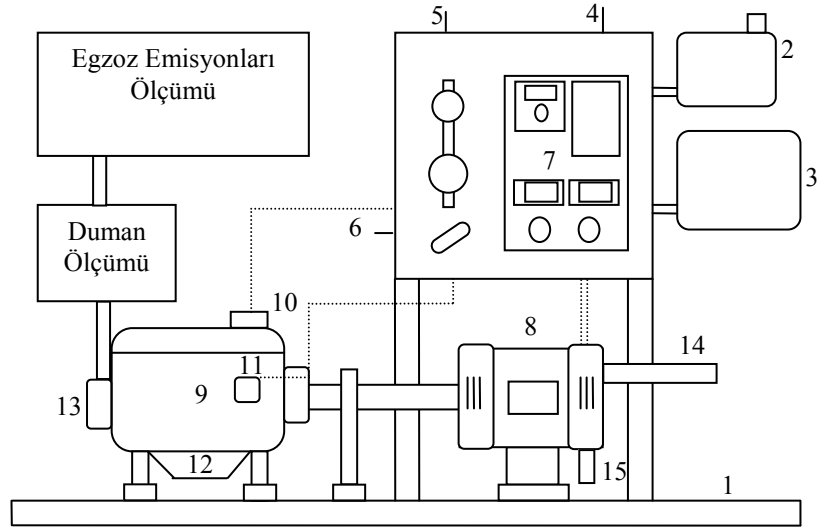
Tablo 4.1 Deney Motorunun Teknik Özellikleri

MARKASI	RAINBOW-LA186 DİZEL
Püskürtme sistemi	Direkt püskürtmeli
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı
Silindir sayısı	1
Çap x Strok	86x70 (mm)
Strok hacmi	406 cm ³
Sıkıştırma oranı	18/1
Maksimum Güç	15 HP
Püskürtme basıncı	19.6±0.49 MPa



Şekil 4.2 Deney setinin görünüşü (fotoğrafik).

Deneylerde motorun yüklenmesi için maksimum gücü 50 kW, maksimum devri 7500 dev/dak olan BT-140 model hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Kontrol cihazı üzerinden motora uygulanan yük kademeli (%10'luk dilimler halinde) olarak değiştirilebilmektedir. Hidrolik dinamometrenin ve kontrol cihazının teknik özellikleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Deney setinin şematik görünüşü.

1. Test yatağı 2. Yakıt tankı 3. Hava tankı 4. Kontrol paneli 5.Yakıt ölçme büretleri 6.Geri dönüşüm kontrol valfi 7. Devir ve yük göstergeleri 8. Hidrolik dinamometre 9. Test motoru 10. Emme manifoldu 11. Yakıt pompası 12. Karter 13. Egzoz manifoldu (Egzoz sıcaklığı ölçümü) 14. Su girişi 15. Su çıkışı.

Tablo 4.2 Hidrolik dinamometrenin teknik özellikleri

MODELİ	BT-140
Maksimum frenleme gücü	50 kW
Maksimum devir	7000 d/d
Maksimum moment (Tork)	250 Nm
Yük hücresi kapasitesi	1000 N
Maksimum güç için su sarfıyatı	V maks. 0,75 m ³ /h
Fren suyu basıncı	1–2 kg/cm ²
Fren kontrol tipi	Kayıcı fan perdeleri ile
Ağırlık sistemi	Metrik-Elektronik Yük Hücresi
Fan adedi	1
Elektrik ihtiyacı	220/380 V. 50 Hz.
Dönüş yönü	Sağ dönüşlü

Tablo 4.3 Motor test tezgâhı izleme/kontrol cihazı teknik özellikleri

MODELİ	PC101BMS
Doğruluk sınıfı	% 0.2
Hassasiyet	± 1 Dijit
Ölçüm hızı	5 ölçüm / saniye
Ağırlık ölçüm tipi	Lineer (Yük Hücresi-Load-Cell)
Devir ölçüm giriş tipi	Manyetik algılayıcı
Ekran tipi	3x6 adet, 7- Bölgeli LED 2x16 karakter LCD
Güç sarfiyatı	16 W
Çalışma ortamı sıcaklığı	0–50° C
Çalışma gerilimi	220 $\pm$ %5 VAC
Çıktı	Döküm almak için paralel yazıcı bağlı

4.2.1. Egzoz Emisyonu Ölçüm Cihazı

Deneylerde egzoz gazlarının analizi için GREENLINE 8000 marka gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz hacimsel % olarak CO₂ ve O₂, % ve ppm olarak CO, ppm cinsinden NO_x ve SO₂ emisyonlarını elektro kimyasal olarak ölçebilmektedir. Şekil 4.4'te egzoz gazı analiz cihazı görülmektedir.



Şekil 4.4 Egzoz gazı analiz cihazı

Bu cihazın numune alma probu egzoz borusuna açılan uygun bir yuvaya yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Egzoz gazı ölçümleri motor çalışma sıcaklığında ve cihaz probunun belirli bir süre (5 sn) egzoz borusunda kalmasıyla alınmıştır. Cihazın okuduğu değerler cihaz hafızasına tarih ve saati ile kaydedilerek daha sonra cihaz üzerinde bulunan bir yazıcı ile çıktı şeklinde alınmıştır.

4.2.2. Duman Ölçüm Cihazı

Duman ölçümü için BİLSA marka MOD 2100 model dizel duman ölçer kullanılmıştır. Bu cihaz egzoz gazlarındaki duman miktarını $K (m^{-1})$ olarak ölçebilmektedir. Şekil 4.5'te duman ölçümü için kullanılan cihaz görülmektedir. Bu cihaz ile otomatik ve manuel ölçüm yapılabilir. Her iki konumda da motor gaz kolu ile gaz verilerek maksimum hıza çıkarılarak beklenmiştir. Bu şekilde cihazın aldığı 5 ölçümün ortalaması duman miktarı olarak alınmıştır. Bu cihaz ile ölçüm alınması için cihaz ekranında beliren “BAS”, “BEKLE” ve “BIRAK” komutlarına göre hareket edilmektedir.



Şekil 4.5 Duman ölçüm cihazı

4.2.3. Egzoz Gazı Sıcaklığı Ölçümü

Sıcaklık ölçümünde dinamometre standı üzerinde bulunan dijital göstergeli ölçme cihazı kullanılmıştır. Termal eleman olarak Kro mel – Alu mel (CrAl – NiAl) ısıl çifti kullanılmıştır. Egzoz gazının çıkış sıcaklığının ölçülmesi için, egzoz manifoldu çıkışına bir delik açılıp uygun

bir boru yerleştirilmiştir. Termal elemanın sıcaklık ölçme ucu buraya yerleştirilmiştir. Diğer ucu ise ölçüm sonucunun alınabilmesi için dijital göstergeli PLC'ye bağlanmıştır.

4.3. Metot

Deneylere başlamadan önce yağlama yağının değişimi, hava filtresinin temizlenmesi gibi bir takım motor bakımları yapılmıştır. Motorun yakıt enjektörü yerinden sökülerek el ile çalışan bir püskürtme pompasına bağlanmış ve basınç testi yapılmıştır. Daha sonra testler için gerekli yardımcı aparatlar yerlerine yerleştirilmiştir. Biyodizel testleri motorda herhangi bir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Motor dizel yakıtı ile bir süre boşa çalıştırılmış ve sonra motor çalışma sıcaklığına geldikten sonra motora tam gaz verilerek hidrolik dinamometre ile yüklenmiştir. Yükleme her 500 dak⁻¹ devir aralıklarında beş ayrı kademedede yapılmış ve devir kademeleri 3000, 2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak olmuştur. 1000 dev/dak'ya gelindiğinde yük azaltılarak geriye dönük tekrar ölçümler alınmıştır. Bu işlem iki defa tekrar edilmiş ve ölçülen değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Her devir sayısında motorun kararlı çalışma şartlarında ölçümler yapılmıştır. Bir yakıt türü için ölçümler tamamlandığında motor durdurulup, soğuyup dinlenmesi için bir süre beklendikten sonra diğer yakıt türü ile çalışmaya geçilmiştir. Bununla beraber test yakıtlarının tümü aynı gün denenmemiştir. Test yakıtları Temmuz ayının farklı günlerinde ve farklı saatlerde kullanılmıştır. Deneylerde, motor momenti (kgm), motor gücü (HP), yakıt tüketim zamanı, egzoz gazı sıcaklığı, egzoz emisyonu ve duman miktarı ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen bu veriler ile motor momenti (Nm), ortalama efektif basınç (kPa), efektif motor gücü (kW), yakıt tüketimi (kg/h), özgül yakıt tüketimi (kg/kWh) ve efektif verim (%) değerleri hesaplanmıştır.

4.3.1. Ortalama Efektif Basınç

Ortalama efektif basınç (Pme), her test yakıtı için ölçüm alınan devir sayılarında hesaplanan motor momenti ve motorun hacmi kullanılarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$Pme = \frac{4\pi M}{Vh} (N / m^2)$$

Pme: Ortalama efektif basınç (N/m²)

M: Motor momenti (Nm)

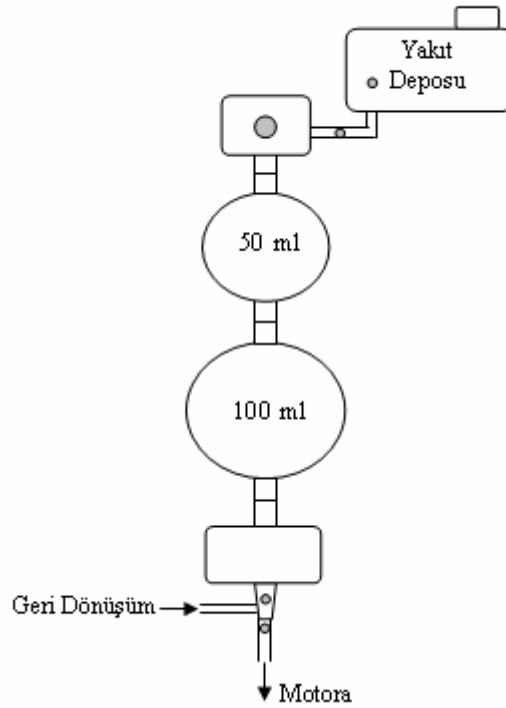
Vh: Motor hacmi (m³)

$$Vh = \frac{\pi D^2}{4} x h.z (m^3)$$

D: Silindir çapı (m), h: Kurs Boyu (m), z: Silindir sayısı

4.3.2. Yakıt Tüketimi

Deney setinde yakıt, ölçekli cam tüp üzerinden motora gönderilmektedir. Yakıt ölçüm düzeneğinde 50 ve 100 ml’lik ölçme büretleri bulunmaktadır (Şekil 4.6). Yakıt tüketiminin ölçümü için 50 ml yakıtın tüketilmesi için geçen süre bir kronometre ile belirlenmiştir. Hacimsel debi olarak belirlenen değerler her bir yakıtın yoğunluğu ile çarpılarak kütleli debiye (kg/h) dönüştürülmüştür.



Şekil 4.6 Yakıt tüketimi ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi.

4.3.3. Özgül Yakıt Tüketimi

Bölüm 4.3.1’de hesaplanan yakıt tüketimi ve efektif motor gücü değerlerine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$be = \frac{B}{Pe}$$

Burada, be: Özgül yakıt tüketimi (kg/kWh)

B: Saatlik yakıt tüketimi (kg/h)

Pe: Efektif motor gücü (kW)

4.3.4. Efektif Verim

Efektif verim, özgül yakıt tüketimi ve yakıtın alt ısı değeri kullanılarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \frac{3600}{be.Hu}$$

η_e = Efektif verim (%),

be = Özgül yakıt tüketimi (kg/kWh),

Hu = Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg).

4.3.5. 100 Saatlik Motor Testi

100 saatlik motor testi, motor performansı ve egzoz emisyonu testlerinin yapıldığı dört zamanlı, direk enjeksiyonlu tek silindirli RAINBOW marka LA 186 model dizel motorunda yapılmıştır. Dizel yakıtı ve biyodizel/dizel karışım yakıtı (B20) yakıtı 100'er saat kullanılarak motor elemanları, motor yağlama yağı, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Uzun süreli motor testine başlamadan önce motor üst kapağı sökülerek yanma odası ve elemanları benzin ile temizlenmiştir. Yakıt enjektörü ve supaplar yerlerinden sökülerek benzin ile temizlenmiştir. Motor yağlama yağı değiştirilmiş ve yakıt sistemi bağlantıları gibi diğer gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra motor önce B20 ile sonra dizel yakıtı ile çalıştırılmıştır. Bu işlemler diğer yakıt türü ile çalışmaya başlamadan önce tekrarlanmıştır. B20 Temmuz-Ağustos ayları içerisinde, dizel yakıtı ise Eylül-Ekim ayları içerisinde kullanılmıştır. Motor günde ortalama 10 saat çalıştırılarak her yakıt için toplamda 10 gün çalışılmış ve çalışma yaklaşık üç ay sürmüştür. Her çalışma dört ayrı kademede yapılmıştır. Bu kademeler rölanti, ısınma, yüksek hız ve durdurma şeklinde olmuştur (Tablo 4.4).

Tablo 4.4. 100 saatlik dayanıklılık testinin günlük çalışma adımları ve süreleri.

Çalışma Adımları	Motor Hızı (dev/dak)	Gaz Kolu Açıklığı (%)	Çalışma Süresi (dakika)
Rölanti	800	0	10
Isınma	1600	25	20
	2000	50	30
Yüksek Hız	3600	100	480
Yavaşlatma	2000	50	30
	1600	25	20
	800	0	10
Toplam			600

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde biyodizel, dizel yakıtı ve karışım yakıtların tam yükte ve değişik motor devirlerinde yapılan performans ve egzoz emisyonu testleri ile 100 saatlik motor testi sonuçları verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan değerler tablo ve grafikler halinde verilmiştir. Biyodizel ve karışım yakıtların motor performansı, egzoz emisyonu ve uzun süreli motor testi sonuçları, dizel yakıtı ile karşılaştırılarak tartışılmıştır. Bu bölümde, dizel yakıtı DY, hacimsel olarak %5 biyodizel + %95 dizel yakıtı karışımı B5, %20 biyodizel + %80 dizel yakıtı karışımı B20, %50 biyodizel + %50 dizel yakıtı karışımı B50 ve saf biyodizel ise B100 olarak adlandırılmıştır.

5.1. Motor Performans Testlerinin Değerlendirilmesi

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının motor performansı testlerinden elde edilen ortalama efektif basınç, motor momenti, efektif motor gücü, yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve egzoz sıcaklığı değerleri dizel yakıtı kullanımına göre karşılaştırılmıştır.

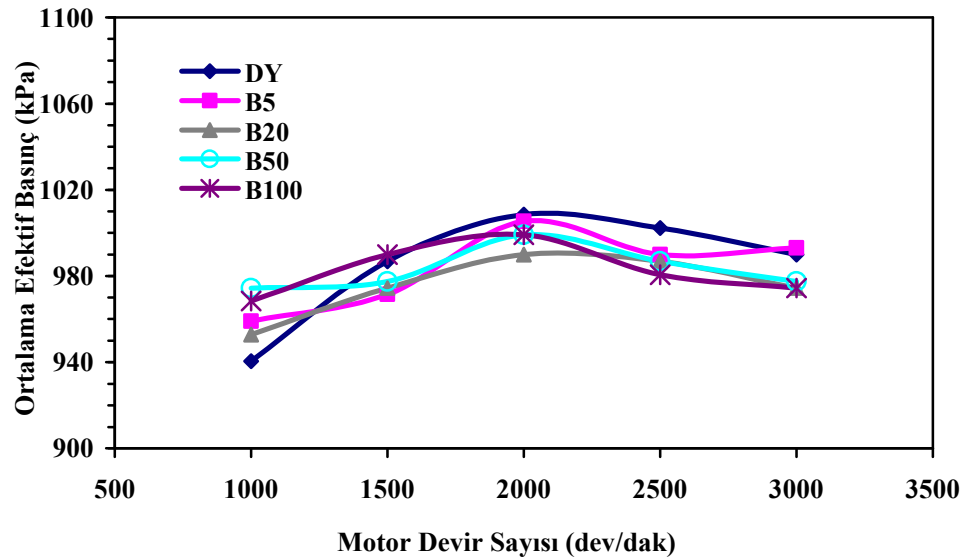
5.1.1. Ortalama Efektif Basınç ve Motor Momenti Değişiminin Değerlendirilmesi

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının ortalama efektif basınç (Pme) ve motor momenti değerleri Tablo 5.1 ve 5.2’de verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.1 ve 5.2’de ortalama efektif basınç ve motor momenti değişimleri grafik halinde sunulmuştur. Şekil 5.2 incelendiğinde tüm yakıt türleri için düşük devir sayılarında motor momentinin düşük, devir sayısının artmasıyla motor momentinin de arttığı fakat bir maksimum değere ulaştıktan sonra tekrar düştüğü görülmektedir. Bütün yakıt türleri için devir sayısının artmasıyla motor momentinin artması birim zamandaki çevrim artışının bir sonucudur. İçten yanmalı motorlarda motor momentini belirleyen temel değişken parametrenin ortalama efektif basınç (Pme) olduğu bilinmektedir. Motorlarda ortalama efektif basıncın maksimum olduğu devir sayısında motor momenti de maksimumdur. Bu devrin altına veya üstüne çıkıldığında motor momenti düşer. Belirli bir devir sayısında momentin maksimum olması ve sonra düşmesi ortalama efektif basınca bağlı olarak açıklanabilir. Şekil 5.1 ve 5.2 birlikte incelendiğinde Pme’nin yüksek olduğu noktalarda motor momentinin de yüksek olduğu, Pme’nin düşmesiyle momentinde düştüğü görülmektedir. Ortalama efektif basıncın konstrüktif faktörlerin dışında yanmanın bir fonksiyonu olarak değiştiği söylenebilir. Dizel motorlarında sıkıştırma sonunda yanma odası içerisine püskürtülen yakıt hemen tutuşmaz, tutuşmanın başlaması için karışımın hazırlanarak enerji seviyesinin kendi

kendine tutuşma sıcaklığına çıkması gerekir. Dizel motorlarında teorik (stokiyometrik) hava oranından daha fazla hava kullanılmasına rağmen yanma odasında homojen bir karışım hazırlanamaz. Tutuşma başladıktan sonra normal bir yanmada alevin yayılma hızı 25 – 30 m/sn kadardır. Yanma odasının içeriği, karışım oranı ve hava hareketleri alevin yayılma hızı üzerinde etkilidir. Motor devri arttıkça hava hareketleri de artar ve sonuçta yanma iyileşir. Bu nedenlerle yüksek devirlerde motor momentinin artması beklenen bir sonuçtur. Daha yüksek devirlere çıkıldığında, bir taraftan her çevrim için silindire alınan yakıt miktarı artarken, diğer taraftan devir sayısına bağlı olarak piston hızı artmaktadır. Bu nedenle genişleme sürecinde yanma daha uzun devam etmekte ve sonuçta ortalama efektif basınç düşmektedir. Belirli bir devir sayısında ortalama efektif basınç ve momentin maksimum olması sonra düşmesi, bu devir sayısında volümetrik verim ve yanma şartlarının iyileştiği daha düşük ve yüksek devirlerde ise kötüleştiği şeklinde açıklanabilir.

Tablo 5.1 Deney yakıtlarının ortalama efektif basınç değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Ortalama Efektif Basınç (kPa)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	940.45	959	952.8	974.48	968.2
1500	986.85	971.39	974.48	977.57	989.95
2000	1008.5	1005.4	989.95	999.23	999.2
2500	1002.3	989.95	986.85	986.85	980.6
3000	989.95	993.05	974.48	977.57	974.48



Şekil 5.1 Deney yakıtlarının ortalama efektif basınç değerleri değişimi.

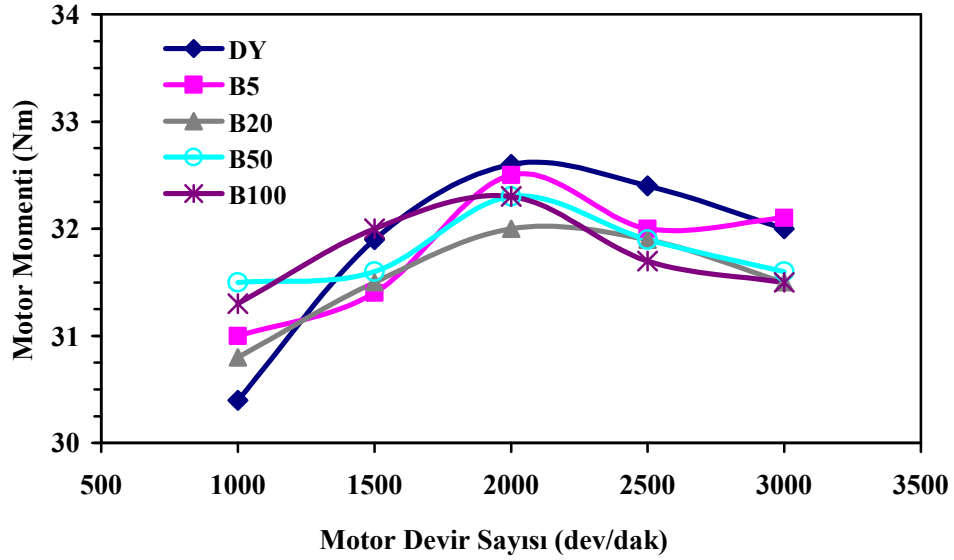
Tablo 5.2’de tüm yakıt türlerinin motor momenti değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Tüm yakıt türleri için en yüksek moment değerleri 2000 dev/dak’da en düşük moment ise 1000 dev/dak’da edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde dizel yakıtı kullanıldığında B5 kullanımına göre önemli bir değişim olmamıştır. Bununla beraber B20, B50 ve B100 kullanıldığında ise ortalama olarak %1 civarında bir azalma meydana gelmiştir. Düşük motor hızlarında dizel yakıtı kullanıldığında biyodizel ve karışımlarına göre motor momenti biraz düşük çıkmıştır. Düşük motor devirlerinde biyodizel ve karışım yakıtların motor momenti değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasının sebebi; düşük devirlerde biyodizelin yanması için yeterli bir zaman olması gösterilebilir. Yakıt özellikleri dikkate alınarak motor tasarımı yapılırken motorun en çok çalışma devir aralığı göz önünde bulundurulur. Dizel yakıtının setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve parlama noktası gibi özellikler yakıtın parçalanması, kimyasal reaksiyonlar ve yanma için önemli özelliklerdir. Yanma odası dizaynı ve yakıt enjeksiyon sistemi bu özelliklere göre düzenlenir. Motorun en çok çalıştığı devir aralığı için dizel yakıtına göre yapılan tasarım, bu devrin dışına çıkıldığında ideal şartlardan uzaklaşır. Düşük devirlerde dizel yakıtı kullanımında daha düşük moment alınması bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Yanmanın iyileşmesinin ortalama efektif basıncı artıracağı açıktır. Şekil 5.8’e bakıldığında biyodizel ve karışımları kullanıldığında düşük devirlerde, bir eksik yanma ürünü olan karbon monoksitin (CO) daha düşük olduğu, Şekil 5.7’de ise egzoz sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm bunlar düşük motor hızlarında biyodizel ve karışımları ile çalışmada daha iyi bir yanmanın olduğunun göstergesidir. Nitekim Şekil 5.1’de de düşük motor hızlarında ortalama efektif basıncın (Pme) biyodizel ve karışımlarında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2 Deney yakıtlarının motor momenti değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Motor Momenti (Nm)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	30.4	31	30.8	31.5	31.5
1500	31.9	31.4	31.5	31.6	31.7
2000	32.6	32.5	32	32.3	32.3
2500	32.4	32	31.9	31.9	32
3000	32	32.1	31.5	31.6	31.3

Biyodizel ve karışım yakıtların kullanımında bir düşüşün olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü biyodizelin sahip olduğu ısı değer dizel yakıtından düşüktür. Ayrıca, dizel yakıtının viskozitesinin biyodizel ve karışım yakıtlarına göre düşük olması nedeniyle yanmanın ve yanma hızının daha yüksek olmasına bağlanabilir. Nitekim biyodizel oranı düşük yakıt türlerinden dizel yakıtına daha yakın motor momenti değerleri elde edilmiştir. Biyodizel ve dizel yakıtı

kullanımında elde edilen motor momenti değerleri arasındaki farkın çok az olması, biyodizel kullanımında yakıt tüketiminin daha yüksek olmasından kaynaklandığı da söylenebilir.



Şekil 5.2 Deney yakıtlarının motor momenti değerleri değişimi.

Sonuç olarak; biyodizel ve karışımlarının kullanılmasıyla dizel yakıtı kullanımına göre motor momentinde çok önemli bir değişim olmamıştır. Hayvansal yağ kökenli biyodizel kullanımı ile elde edilen motor momenti değerlerinin diğer araştırmacıların [13, 70, 73, 95] bitkisel yağ esaslı biyodizel yakıtları ile elde ettikleri motor momenti sonuçlarına benzer çıkmıştır. Dolayısıyla hayvansal kökenli biyodizel yakıtının bitkisel yağ esaslı biyodizel yakıtlarına göre dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında motor momenti üzerinde önemli bir farklılığın olmadığı anlaşılmıştır.

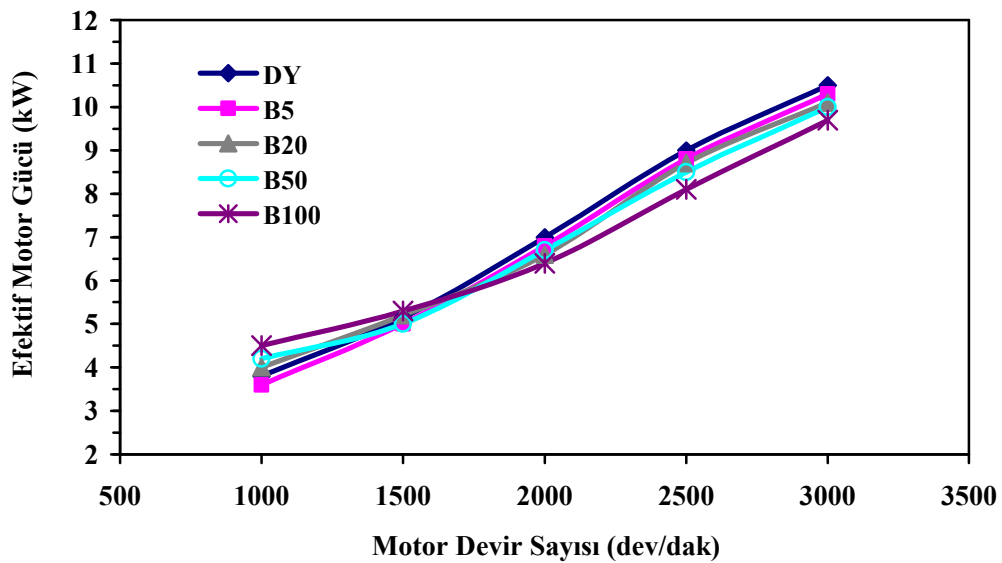
5.1.2. Efektif Motor Gücü Değişimi

DY, B5, B20, B50, ve B100 yakıtlarının efektif motor gücü değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.3'te efektif motor gücü değişimleri grafiksel olarak sunulmuştur. Şekilde tüm yakıt türleri için motor hızının artmasıyla motor gücünün de arttığı ve maksimum efektif gücün dizel yakıtı kullanıldığında 3000 motor devir sayısında elde edildiği görülmektedir. Bu devir sayısında dizel yakıtı kullanımına göre B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanımında sırasıyla %1.9, %3.8, %4.76 ve %7.6 daha düşük güç değerleri elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise dizel yakıtı kullanımına göre B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanımında ortalama olarak sırasıyla %2.65, %2.37, %2.94 ve %4 daha düşük güç değerleri elde edilmiştir. Dizel yakıtı kullanımında daha yüksek güç elde edilmesi dizel yakıtının ısı değeri yüksek oluşundan kaynaklanmaktadır [66, 70, 73]. Bununla

beraber tüm motor hızlarında biyodizel ve karışım yakıtları kullanıldığında dizel yakıtına benzer motor gücü değerleri elde edilmiştir. Biyodizelin ısıl değerinin nispeten düşük olmasına karşın motor gücünde önemli düşüşün olmaması biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtının yoğunluğuna göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yakıt yoğunluğunun yüksek olması hacimsel olarak motora püskürtülen yakıt miktarının kütleli olarak yüksek olmasına ve dolayısıyla yanma odasına daha fazla miktarda yakıtın girmesine neden olmaktadır. Bu durum da daha fazla miktarda yakıt yanmaya katılmakta ve motor gücü artmaktadır. Biyodizel ve karışımlarının ısıl değerinin nispeten düşük olmasına karşın dizel yakıtına yakın güç vermeleri biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtı yoğunluğuna göre daha yüksek olmasına bağlanabilir. Nitekim Şekil 5.4'te görüldüğü gibi biyodizel ve karışım yakıtlarının kütleli yakıt tüketimi değerlerinin dizel yakıtına göre daha yüksek olması bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Bununla beraber bazı araştırmacılar biyodizelin oksijen içeriğinin yanma üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle yakıtça zengin bölgelerde daha iyi bir yanmanın gerçekleştiğini ve bununla motor momenti ve gücünü artırdığını belirtmiştir [99;100,101].

Tablo 5.3 Deney yakıtlarının Efektif motor gücü değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Efektif Motor Gücü (kW)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	3.8	3.6	4	4.2	4.5
1500	5.14	5	5.2	5	5.3
2000	6.8	6.3	6.6	6.7	6.4
2500	9	8.8	8.7	8.5	8.1
3000	10.5	10.3	10.1	10	9.7



Şekil 5.3 Deney yakıtlarının efektif motor gücü değerleri değişimi.

Bununla beraber, 1000-1500 dev/dak gibi düşük motor hızlarında biyodizel kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre daha yüksek güç elde edilmiştir. Biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluğundan dolayı yanma odasına fazla miktarda yakıtın girmesine ve yakıt atomizasyonunun bozulması ile oluşan yakıtça zengin bölgelerin yanabilmesi için gerekli zamanın düşük motor hızlarında bulunmuş olması, bu hızlarda dizel yakıtına göre yüksek güç elde edilmesini açıklayabilir. Yüksek devirlerde ortalama efektif basınç ve motor momentinin düşmesine rağmen motor gücünün artması güç üzerinde motor devir sayısının da etkili olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada çok yüksek motor hızlarına çıkılmadı fakat 3500 dev/dak gibi motor hızlarına çıkılsaydı motor gücü düşmeye başlardı. Çünkü belirli bir devir sayısına gelindiğinde, hareketli motor parçalarının atalet kuvvetleri ve mekanik sürtünmenin artması sonucu mekanik verimin düşmesi, yüksek devirlerde hacimsel verimdeki düşüş ve yanma süresinin kısılması gibi nedenler P_{me} 'nin aşırı düşmesine ve dolayısıyla motor gücünün de düşmesine neden olur.

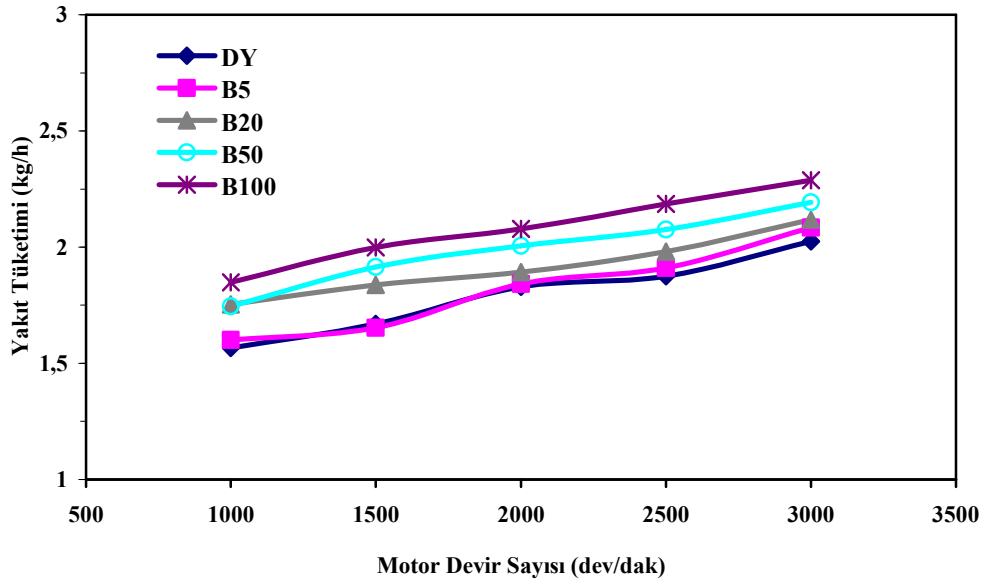
5.1.3. Yakıt Tüketimi Değişimi

DY, B5, B20, B50, ve B100 yakıtlarının değişik motor devirlerinde kullanılmasıyla elde edilen yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi değerleri Tablo 5.4 ve 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.4'te birim zamanda tüketilen yakıt miktarı grafik olarak verilmiştir. Şekilde tüm yakıt türleri için devir sayısının artmasıyla yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. Bir taraftan motor yükü artırılıp diğer taraftan bu yükü karşılamak için gaz kolu ileri sürülerek yakıt miktarı artırılmaktadır. Yük altında motor devrinin yükseltilmesi motor verilen enerji miktarının artırılması ile mümkündür. Yük altında motor devir sayısının artmasıyla hem birim zamandaki çevrim sayısının hem de yükün karşılanması yakıt tüketimini artırmaktadır. Biyodizel ve karışım yakıtlarının yakıt tüketimleri dizel yakıtı kullanımına göre yüksek çıkmıştır. En yüksek yakıt tüketimi değerleri B100 yakıtı kullanıldığında elde edilmiş, karışım yakıtlarında biyodizel oranının artmasıyla da yakıt tüketimi artış göstermiştir. B5, B20, B50 ve B100 kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre yakıt tüketiminde ortalama olarak sırasıyla %1.4, %6.9, %10.8 ve %16 artış olmuştur. Biyodizel ve karışımlarının kütleli yakıt tüketimi değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olması ısı değeri düşük, yoğunluğunun ise yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yakıt türlerindeki biyodizel oranının artmasıyla yakıt tüketiminin artması bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Ayrıca Şekil 5.3'te biyodizel ve karışım yakıtların dizel yakıtına benzer güç ürettikleri görülmektedir. Nitekim; Yahya ve Marley, ısı değeri nispeten düşük olan yakıt türlerinin benzer güç üretebilmeleri için daha fazla yakıt tüketmeleri gerektiğini belirtmiştir [80]. Srivastava ve Verma [105], biyodizelin ısı değeri düşük olmasından dolayı dizel yakıtı ile aynı güç üretebilmesi için daha fazla miktarda yakıtın

püskürtüldüğünü belirtmiştir. Bununla beraber Kumar ve ark., yüksek viskozitenin bir sonucu olarak karışım oluşumu ve yakıt atomizasyonunun kötüleşmesinin de yakıt tüketimini artırdığını belirtmişlerdir [5].

Tablo 5.4 Deney yakıtlarının yakıt tüketimi değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Saatlik Yakıt Tüketimi (kg/h)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	1.565	1.6	1.752	1.744	1.848
1500	1.668	1.652	1.836	1.914	1.998
2000	1.829	1.84	1.891	2	2.077
2500	1.874	1.910	1.979	2.074	2.186
3000	2.024	2.08	2.117	2.193	2.287



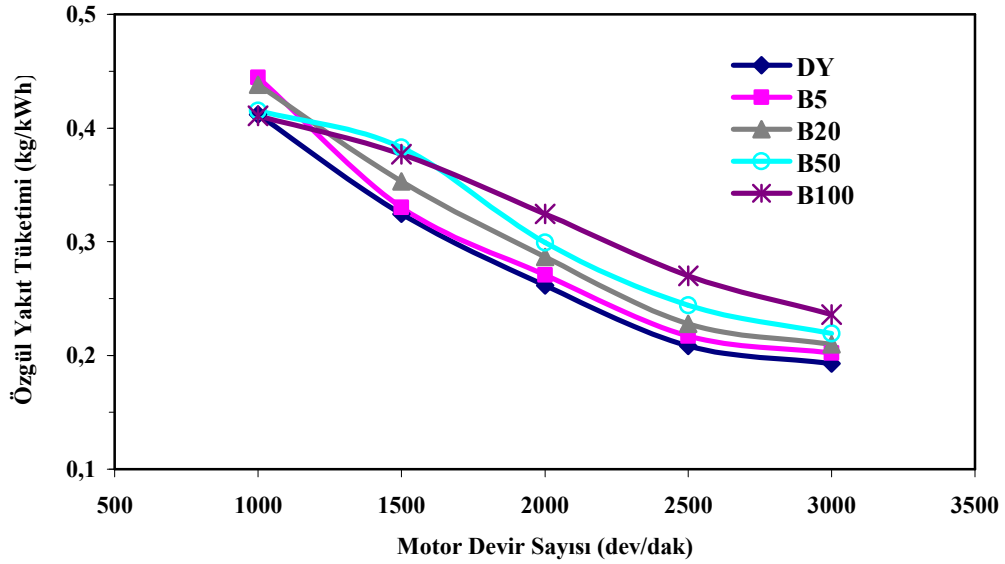
Şekil 5.4 Deney yakıtlarının yakıt tüketimi değerleri değişimi.

Şekil 5.5'e bakıldığında bütün yakıt türleri için özgül yakıt tüketiminin düşük devirlerde yüksek ve devir sayısının artmasıyla da düştüğü görülmektedir. Özgül yakıt tüketimi motor gücüne bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.3'e bakıldığında, motor gücünün 2500–3000 devir bölgesinde maksimum olduğu görülmektedir. Bu aralıkta özgül yakıt tüketiminin en düşük değeri alması beklenen bir sonuçtur. Özgül yakıt tüketiminin yüksek olduğu düşük motor hızlarında, motor gücünün düşük olmasının yanında ısı kayıplarının yüksek, ortam sıcaklığı ve hava hareketlerinin yetersiz olması nedeniyle yanma şartlarının kötüleşmesi gibi bir takım olumsuzluklar da özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Motor hızı arttıkça hava hareketlerinin ve gaz sıcaklığının artması ile yanmanın iyileşmesi neticesinde özgül yakıt tüketimi de düşmektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi motor devir sayısının artmasıyla egzoz

gazlarının sıcaklığının artması, yüksek devirlerde daha iyi bir yanma olduğunun bir kanıtı olarak ileri sürülebilir.

Tablo 5.5 Deney yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Özgül Yakıt Tüketimi (kg/kWh)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	0.412	0.444	0.438	0.415	0.410
1500	0.324	0.33	0.353	0.382	0.377
2000	0.261	0.27	0.286	0.299	0.324
2500	0.208	0.217	0.227	0.244	0.269
3000	0.192	0.202	0.209	0.219	0.235



Şekil 5.5 Deney yakıtlarının özgül yakıt tüketimi değerleri değişimi.

Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edildiği Tablo 5.5'te ve Şekil 5.5'te görülmektedir. B5, B20, B50 ve B100 kullanımında özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %4.7, %8.3, %11.6 ve %15.7 artmıştır. Biyodizel ve karışımlarının yakıt tüketimlerinin dizel yakıtına göre yüksek olması, benzer güç vermelerine karşın özgül yakıt tüketimlerini artırmıştır. Enjeksiyon pompası yakıtı hacimsel olarak ölçüp motora göndermektedir. Hayvansal iç yağı metil esterinin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütleli yakıt tüketimi hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımlarında yüksek çıkmaktadır [76]. Ayrıca; Yücesu ve İlkılıç, [103], özgül yakıt tüketiminin birim güç başına kütleli olarak tüketilen yakıt miktarı olmasından dolayı

yoğunluğu yüksek olan yakıt türlerinin özgül yakıt tüketimlerinin de yüksek çıktığını belirtmiştir.

Dizel motorlarında yanmayı etkileyen önemli faktörlerden biriside, yanma odasına püskürtülen yakıtın parçalanması, tane büyüklüğü ve yanma odasındaki dağılımıdır. Bu faktörler, yanma odası şekli, sıkıştırma sonu basıncı, yakıt püskürtme basıncı, enjektör memesi delik çapı, yakıt huzmesi şekli ve yakıt viskozitesine bağlı olarak değişmektedir. Konstrüktif faktörler tüm yakıt türleri için yaklaşık olarak aynı olduğundan yakıt huzmesi şekli ve yakıt viskozitesinin özgül yakıt tüketimindeki farklılıkta etkili olduğu söylenebilir. Biyodizel ve karışım yakıtlarının viskozitesi ve yoğunluğu dizel yakıtınıninkinden yüksektir. Yüksek viskoziteye sahip yakıt türlerinin aynı basınçta enjektörden nispeten daha iri taneli olarak püskürmeleri sonucunda yakıt molekülleri hava ile iyi bir karışım oluşturamayacaktır. Bu, yakıtın buharlaşma ve yanma süresini uzatarak yanmanın kötüleşmesine neden olacaktır. Bu durum yakıt tüketimini artırdığından özgül yakıt tüketimi de yüksek çıkmaktadır. Nitekim; diğer araştırmacılar da yakıtın yüksek viskozite ve yoğunluğunun yanmayı kötüleştirmesinden dolayı özgül yakıt tüketiminde artış olduğunu [4], yakıtın düşük enerji içeriğinin ve yüksek yoğunluğun özgül yakıt tüketimini artırdığını [13, 21, 56, 104] belirtmişlerdir.

Sonuç olarak; hayvansal iç yağı metil esteri ile dizel yakıtı arasındaki yoğunluk farkından dolayı silindire giren yakıt miktarları da farklı olmaktadır. Isıl değerlerin de farklı olmasından dolayı silindire giren enerji miktarı ve güç değerleri farklı olmaktadır. Dizel yakıtı ile eşit ısı enerjisi girişini sağlamak için nispeten daha düşük ısıl değere sahip biyodizelin daha fazla kütsel debiye sahip olması gerekmektedir. Daha fazla debide giren biyodizel miktarı ile ısı enerjisi daha düşük olduğu için dizel yakıtı ile eşdeğer enerji girişi sağlanmış olur.

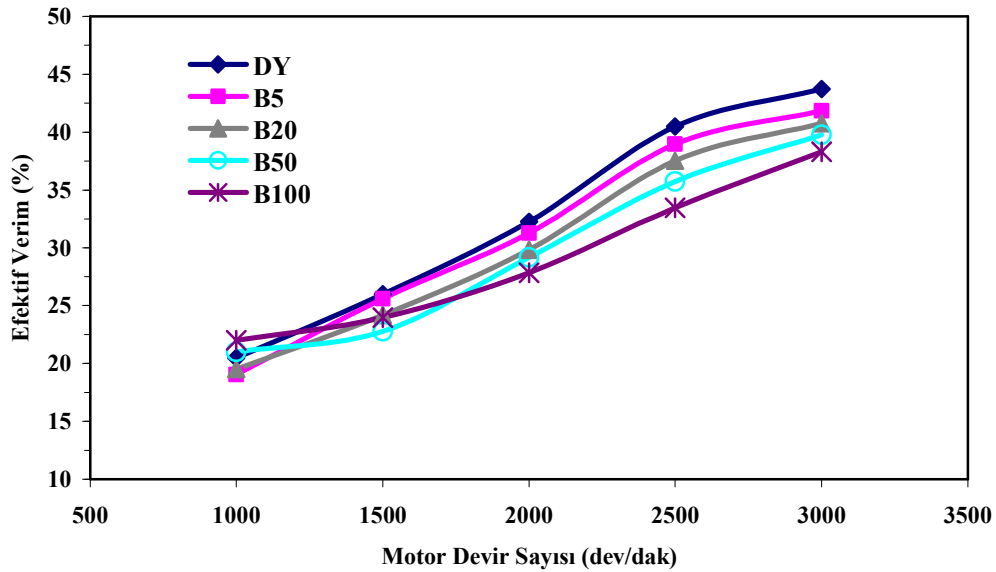
5.1.4. Efektif Verim ve Egzoz Sıcaklığı Değişimi

DY, B5, B20, B50, ve B100 yakıtlarının değişik devirlerde kullanılmasıyla elde edilen efektif verim değerleri Tablo 5.6'da, egzoz sıcaklığı değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.6'da efektif verim, Şekil 5.7'de egzoz sıcaklığı değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. İçten yanmalı motorlarda yanma odasında yakıtın yanması sonucu oluşan ısı enerjisinin büyük bir kısmı soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Bunlardan geriye kalan ısı enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılmaktadır. Efektif verim ısı enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürüldüğünü belirtmektedir. Yakıtların her biri için her devir sayında hesaplanan özgül yakıt tüketimi ve yakıtın ısı değeri kullanılarak efektif verim değerleri bölüm 4.3.3'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Biyodizel ve karışım yakıtları kullanıldığında dizel yakıtına göre efektif verimde düşüş olmuştur. Tablo 5.6'da en düşük efektif verim değerlerinin B100 kullanımında elde edildiği görülmektedir. Yakıt türlerindeki biyodizel oranının

azalmasıyla efektif verimde artış olmuştur. B5, B20, B50 ve B100 kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre efektif verimde ortalama olarak %3.8, %6.8, %8.9 ve %10.7 azalma olmuştur. Hayvansal iç yağı metil esterinin (biyodizel) viskozitesi dizel yakıtının viskozitesinden yaklaşık %28 daha yüksek, ısıl değeri ise yaklaşık %7 daha düşüktür. Biyodizel kullanıldığında efektif verimin düşmesi viskozitesinin yüksek ve ısıl değerinin ise düşük olmasına bağlanabilir. Nitekim yakıt türlerindeki biyodizel miktarının azalmasıyla efektif verimin artış göstermesi bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir.

Tablo 5.6 Deney yakıtlarının efektif verim değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Efektif Verim (%)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	20.4	19	19.5	21	21.9
1500	25.9	25.5	24.1	22.7	23.8
2000	32.2	31.2	29.8	29.1	27.8
2500	40.4	38.9	37.5	35.7	33.4
3000	43.7	41.8	40.7	39.7	38.2



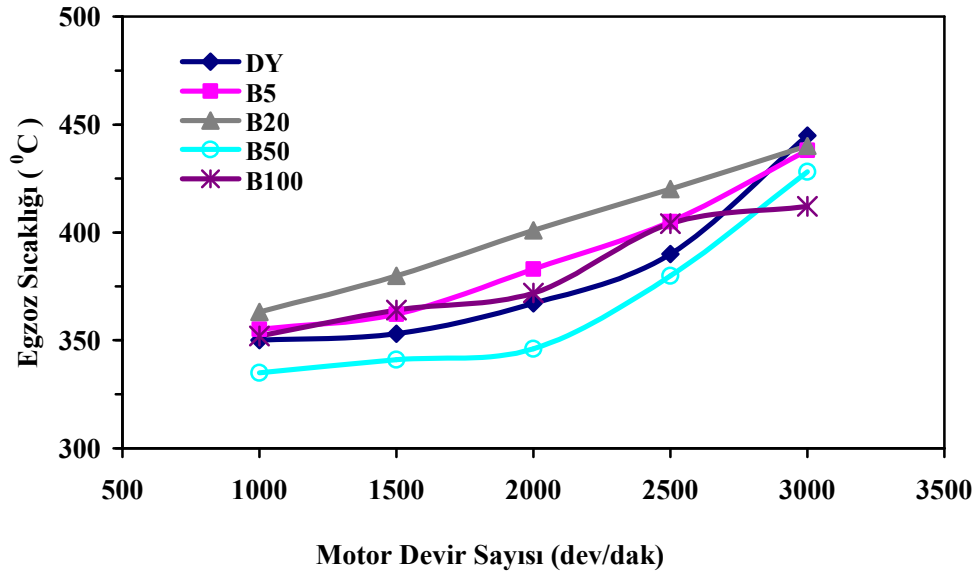
Şekil 5.6 Deney yakıtlarının termik verim değerleri değişimi.

Banapurmath ve ark., [102], viskozite ve yoğunluğun yüksek olmasının bir sonucu olarak karışımın kötüleşmesinden dolayı biyodizel kullanıldığında fren efektif verimin düştüğünü, Srivastava ve Verma, [105], yüksek viskozitenin atomizasyonu, yakıtın buharlaşmasını ve yanmayı kötüleştirdiği için biyodizel kullanımında dizel yakıtına göre daha düşük efektif verim elde edildiğini belirtmişlerdir.

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi tüm yakıt türleri için egzoz sıcaklığı değerleri devir sayısının artmasıyla artmıştır. En yüksek egzoz sıcaklığı değerleri 3000 motor devir sayısında dizel yakıtı için 445 °C, B5 için 438 °C, B20 için 440 °C, B50 için 428 °C ve B100 için 412 °C olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak en yüksek egzoz sıcaklığı değerleri B20 yakıtı kullanıldığında elde edilmiştir. Düşük motor hızlarında Biyodizel kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre daha yüksek egzoz sıcaklığı değerleri elde edilirken, yüksek devirlerde dizel yakıtı kullanımında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Düşük motor hızlarında biyodizelin yanması için yeterli zamanın olması ve biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş ve uzun bir yanmanın gerçekleşmiş olması düşük motor hızlarında biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığı elde edilmesini açıklamaktadır. Ayrıca biyodizelin oksijen içermesi daha iyi bir yanmaya ve bunda daha yüksek egzoz sıcaklığı değerleri vermesine neden olduğu düşünülmektedir. Puhon ve ark., [106], biyodizel kullanıldığında yanmanın daha uzun devam etmesinden dolayı egzoz sıcaklığının daha yüksek çıktığını belirtmiştir. Çanakçı, [14], egzoz gazı sıcaklığının tutuşma gecikmesinden etkilendiğini ve biyodizelin setan sayısının yüksek olmasından dolayı daha düşük tutuşma gecikmesi periyodu sergilediğini ve bunun da biyodizel kullanıldığında egzoz gazı sıcaklığını artırdığını belirtmiştir. Bununla beraber B50 ile en düşük egzoz sıcaklığının elde edilmesinin nedeni ise açık değil. Daha ileri araştırmaların gerekli olmasının yanında yüksek oranda biyodizel içeren karışımlarda yakıtın yanma odasında farklı bir yanma sergilediği düşünülmektedir. Yani hacimsel olarak %50 oranında biyodizel ve dizel yakıtı kullanıldığında yakıtın yanma odasındaki dağılımı daha heterojen olmakta ve sonuçta iyi bir yanma gerçekleşmemektedir. Nitekim Şekil 5.8’de görüldüğü gibi B50 kullanıldığında dizel yakıtına göre CO azalmasının diğer biyodizel ve karışımlarına göre daha düşük olması da kötü bir yanmanın olduğuna kanıt olarak gösterilebilir. Bunlarla beraber B60, B70 ve B80 gibi farklı karışım oranlarının da denenmesi bu düşüşün daha iyi açıklanması sağlayacaktır.

Tablo 5.7 Deney yakıtlarının egzoz sıcaklığı değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Egzoz Sıcaklığı (°C)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	350	355	363	335	352
1500	353	362	380	341	364
2000	367	383	401	346	372
2500	390	405	420	380	404
3000	445	438	440	428	412



Şekil 5.7 Deney yakıtlarının egzoz sıcaklığı değerleri değişimi.

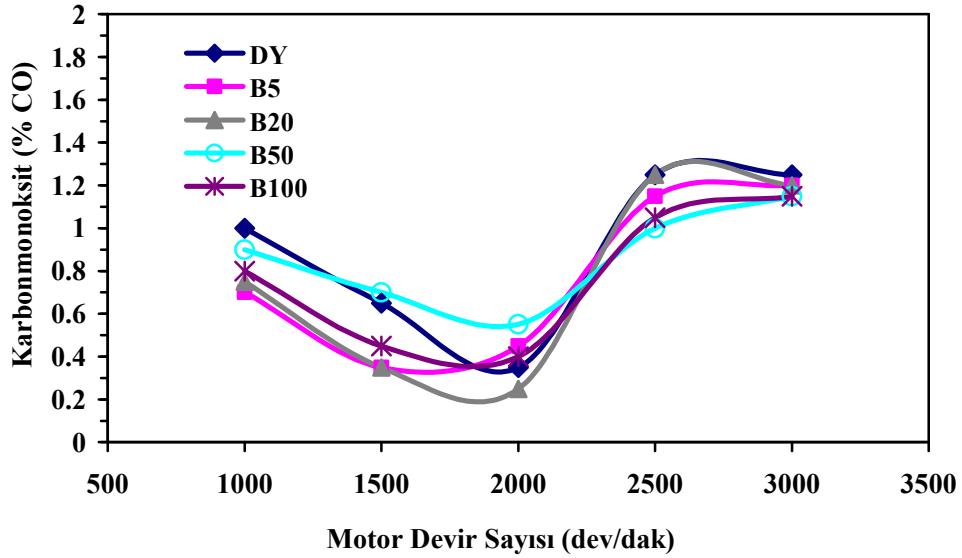
5.2. Egzoz Emisyonu Testlerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde dizel yakıtı, biyodizel ve karışım yakıtların kullanılmasıyla ölçülen oksijen (O_2), karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO_2) ve duman emisyonları değerleri dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak grafikler ve tablolar halinde verilmiş, sonuçlar yorumlanmıştır.

5.2.1. Karbon monoksit (CO) Emisyonu Değişimi

DY, B5, B20, B50, ve B100 yakıtlarının kullanılmasıyla elde edilen karbon monoksit emisyonu değerleri Tablo 5.8’de verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.8’de karbon monoksit (CO) emisyonu değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. CO emisyonları içten yanmalı motorlarda birçok parametreye bağlıdır. Yanma işlemi sırasında yakıtın tam yanmamasından kaynaklanır. Gaz sıcaklığının düşük olması, yeterli oksijenin bulunmaması ve CO_2 ’ye dönüşüm için yeterli zamanın olmamasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırır. Şekil 5.8’de tüm yakıt türleri için düşük devir sayılarında yüksek olan CO emisyonunun devir sayısının artmasıyla düştüğü ve 2000 devir sayısında minimum olduktan sonra tekrar yükseldiği görülmektedir. En yüksek CO değerleri 2500–3000 gibi yüksek motor hızlarında ölçülmüştür. Motor devir sayısının artmasıyla yanma süresinin kısılması ve hacimsel verimin düşmesi yüksek devirlerde CO miktarının artmasına neden olmaktadır. 1000 ve 1500 gibi düşük motor hızlarında 2000 devir sayısına göre CO miktarı daha yüksek olmuştur. Düşük devirlerde karbon

atomlarının oksitlenmesi için nispeten daha fazla zamanın (yanma süresi) olmasına karşın ortam sıcaklığının düşük olmasından dolayı CO oluşumu yüksek olmaktadır. Biyodizel ve karışımları kullanıldığında elde edilen CO emisyonu değerleri dizel yakıtı kullanımına göre daha düşük olmuştur. B5, B20, B50 ve B100 kullanıldığında ölçülen CO emisyonu dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %14.5, %15.5, %4.5 ve %14.4 oranında azalmıştır. B20 yakıtı kullanıldığında ise dizel yakıtına göre en düşük CO emisyonları elde edilmiştir. CO emisyonlarındaki bu düşüş biyodizelin içerdiği oksijenden kaynaklanmaktadır. Ek oksijen yakıtın tam yanmasını artırdığından CO emisyonları azalmaktadır. Diğer araştırmacılarda [6, 41, 70, 73, 95, 107] biyodizelin oksijen içermesinden dolayı dizel yakıtına göre daha düşük CO elde edildiğini belirtmişlerdir. Biyodizelin setan sayısının dizel yakıtına göre yüksek olması da CO emisyonlarını düşürmektedir [108].



Şekil 5.8 Deney yakıtlarının karbon monoksit (CO) emisyonu değerleri değişimi

Tablo 5.8 Deney yakıtlarının karbon monoksit (CO) emisyonu değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Karbon monoksit Miktarı (%)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	1	0.7	0.75	0.9	0.8
1500	0.65	0.35	0.35	0.7	0.45
2000	0.35	0.45	0.25	0.55	0.4
2500	1.25	1.15	1.25	1	1.05
3000	1.25	1.2	1.2	1.15	1.15

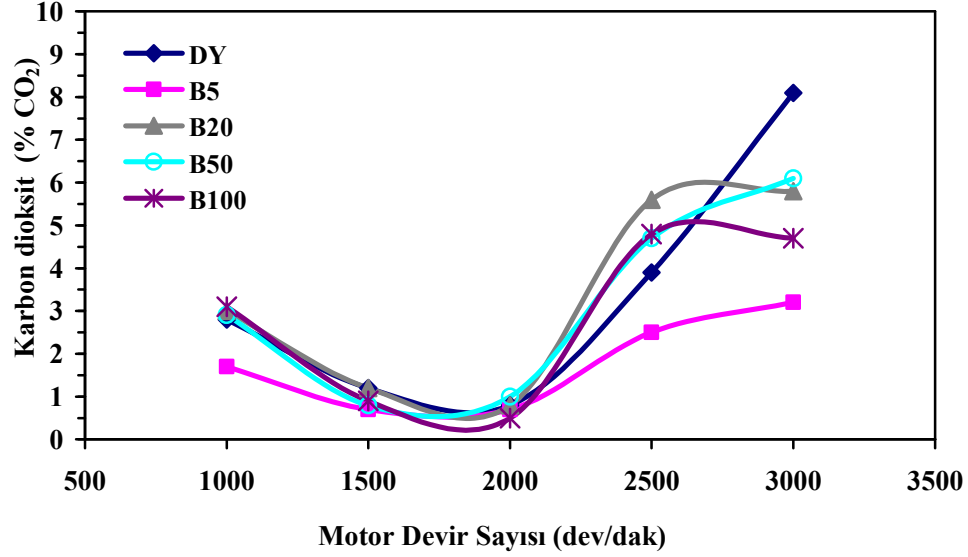
Bununla beraber CO emisyonundaki düşüş karışım yakıtlarındaki biyodizel miktarı ile

orantılı olmamıştır. Biyodizel ve dizel yakıtı ile karışımları kullanıldığında dizel yakıtına göre CO emisyonlarında düşüş olduğunu fakat düşüş miktarının yakıttaki biyodizel oranına bağlı olmadığı diğer araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir [108–109]. Bu da CO miktarındaki azalma üzerinde başka faktörlerinde etkili olduğunu göstermektedir. Biyodizel ve karışım yakıtlar kullanıldığında motor yükünün ve kullanılan petrol kökenli dizel yakıtının CO emisyonundaki bu farklı düşüş üzerinde etkili olduğunu Lapuerta ve ark., [108] belirtmiştir. CO oluşumu üzerinde sıcaklığın önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 birlikte incelendiğinde en düşük egzoz sıcaklığı ve CO azalmasının B50 yakıtı kullanıldığında elde edildiği görülmektedir. Ayrıca farklı biyodizel/dizel yakıtı karışımlarının ve motor işletme şartlarının denenmesi hayvansal iç yağı metil esterinin CO oluşumu üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

5.2.2. Karbon dioksit (CO₂) ve Oksijen (O₂) Emisyonları Değişimi

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanılmasıyla elde edilen karbondioksit ve oksijen miktarları Tablo 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.9 ve 5.10'da değişim grafiksel olarak sunulmuştur. Tüm test yakıtları için düşük devir sayılarında yüksek olan CO₂ devir sayısının artmasıyla düşüş olduğu ve sonra tekrar yükseldiği Şekil 5.9'da görülmektedir. Düşük devirlerde dizel yakıtına göre biyodizel kullanımında daha yüksek CO₂ elde edilirken, genel olarak değerlendirildiğinde dizel yakıtı kullanımında biyodizel ve karışım yakıtlarına göre CO₂ daha yüksek olmuştur. Ortalama olarak, B5, B20, B50 ve B100 kullanımıyla ölçülen CO₂ dizel yakıtına göre sırasıyla %47.6, %32.1, %7.7 ve %16.7 azalma gözlenmiştir. Düşük devirlerde biyodizel ile daha yüksek CO₂ elde edilmesi; biyodizelin düşük devirlerde daha iyi yandığını göstermektedir. Nitekim Şekil 5.3'te görüldüğü gibi düşük devirlerde biyodizel kullanımında dizel yakıtına göre daha yüksek güç elde edilmesi bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Biyodizelin oksijen içermesinden dolayı CO₂ emisyonlarının daha yüksek olması beklenirken düşüşün olması, biyodizelin özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtına göre daha yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. Özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasından dolayı tam yanma reaksiyonlarının gerçekleşmediği ve bunun bir sonucu olarak CO₂ oluşumunda beklenenden daha farklı bir yapı ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bir eksik yanma ürünü olan CO arttıkça CO₂'nin azalması beklenir. Şekil 5.8'e bakıldığında 2000 devire kadar bütün yakıt türleri için CO'nun düştüğü görülmektedir. Aynı aralıkta CO₂'nin ise artması gerekir. Oysa Şekil 5.9'da CO₂'nin de aynı aralıkta düştüğü görülmektedir. CO₂ oluşumundaki azalmanın sadece CO ile ilişkisi yanında başka faktörlerinde etkili olduğunu göstermektedir.

1000–2000 devir aralığında O₂ konsantrasyonundaki artış, bu aralıkta, CO₂'yi oluşturan O₂ ve C reaksiyonlarının yeterli hızda gerçekleşmediği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.9 Deney yakıtlarının karbondioksit (CO₂) emisyonu değerleri değişimi

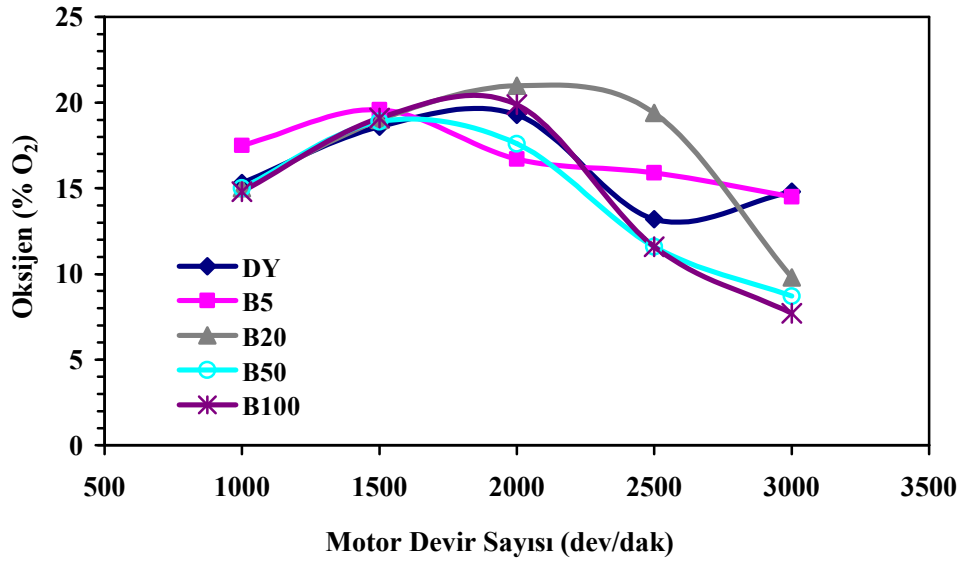
Şekil 5.9’da tüm yakıt türleri için düşük devir sayılarında yüksek olan oksijen miktarı devir sayısının artmasıyla düşmüştür. Ortalama olarak biyodizel kullanıldığında dizel yakıtına göre egzozdaki oksijen miktarı daha düşük çıkmıştır. B5 ve B20 yakıtlarının oksijen değerleri dizel yakıtına yakın, B50 ve B100 yakıtlarının ise daha düşük çıkmıştır. Bu durum biyodizelin oksijen içermesine rağmen gerçekleşmiştir. Bu B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında CO₂ değerlerinin daha yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. Yani yanma sırasında biyodizelin daha fazla karbon atomu oksitlediği ve bundan dolayı egzozdaki oksijen miktarının daha düşük çıktığı söylenebilir. Nitekim; Şekil 5.8’de görüldüğü gibi biyodizel kullanıldığında elde edilen CO emisyonlarının da daha düşük olması bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir.

Tablo 5.9 Deney yakıtlarının karbondioksit (CO₂) emisyonu değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Karbondioksit Miktarı (%)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	2.8	1.7	3	2.9	3.1
1500	1.2	0.7	1.2	0.8	0.9
2000	0.8	0.7	0.8	1	0.5
2500	3.9	2.5	5.6	4.7	4.8
3000	8.1	3.2	0.8	6.1	4.7

Tablo 5.10 Deney yakıtlarının oksijen (O_2) emisyonu değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Oksijen Miktarı (%)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	15.3	17.5	15	15	14.8
1500	18.6	19.6	19	18.9	19.1
2000	19.3	16.7	21	17.6	19.9
2500	13.2	15.9	19.4	11.6	11.6
3000	14.8	14.5	9.8	8.7	7.7



Şekil 5.10 Deney yakıtlarının oksijen (O_2) emisyonu değerleri değişimi

5.2.3 Azot oksit (NO_x) Emisyonları Değişimi

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtları ile ölçülen azot oksit emisyonları (NO_x) Tablo 5.11’de verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.11’de azot oksit emisyonlarının değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. NO_x ’ler genellikle 1800 K’in üzerindeki yüksek sıcaklıklarda teşekkül etmektedir. NO_x terimi NO ve NO_2 ’nin atmosferdeki toplam konsantrasyonunu gösterir. Dizel motorlarında fazla hava kullanılır. Bu fazla havanın oksijeni aşırı sıcak ortamlarda yeterli zamanı bulduğunda azot ile reaksiyona girerek NO_x ’leri oluşturur. Şekil 5.11’de tüm yakıt türleri için düşük devirlerde NO_x emisyonlarının yüksek devir sayısının artmasıyla önce biraz düştüğü ve daha sonra yüksek devirlerde tekrar arttığı görülmektedir. Yüksek motor hızlarında NO_x oluşumunun artması yüksek hızlarda silindir içindeki hava hareketlerinin ve sıcaklığın artışı ile açıklanabilir. Fakat hava hareketlerinin ve sıcaklığın artması tüm yakıt türleri için geçerli olmasına rağmen

dizel yakıtı için 2500–3000 devirleri arasında biyodizel ve karışım yakıtlarına göre NO_x artışı daha fazla olmuştur. Bunun nedeni NO_x oluşumunda yüksek sıcaklık kadar bu sıcaklıkta kalma süresinin de etkili olmasıdır.

Test yakıtları arasında en düşük NO_x emisyonları B20 ile elde edilmiş ve onu B100 takip etmiştir. En yüksek NO_x emisyonları ise dizel yakıtı kullanıldığında ölçülmüştür. Genel olarak biyodizel ve karışım yakıtları kullanıldığında dizel yakıtı kullanımına göre daha düşük NO_x emisyonları elde edilmiş ve B5, B20, B50 ve B100 kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %20.2, %40.1, %11.5 ve %38.5 daha düşük NO_x emisyonu ölçülmüştür. Biyodizelin yapısında oksijen bulunması ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi özgül yakıt tüketiminin daha yüksek olmasından dolayı NO_x emisyonlarının daha yüksek olması beklenmektedir. Ancak Şekil 5.11 bu beklentiye cevap vermemektedir. Bu, NO_x emisyonlarının oluşumu üzerinde sıcaklığın ve zamanın daha etkili olduğunu göstermektedir. Nitekim biyodizelin özgül yakıt tüketiminin daha yüksek olması ve oksijen içermesinden dolayı yakıtça zengin bölgelerde gerekli oksitlenmenin sağlandığı ve bununda yanma bölgelerinin sayısını artırarak daha yüksek ortam sıcaklığının elde edildiği bölge sayısının artmış olmasından dolayı daha yüksek azot oksit oluşumu meydana geldiğini Özsezen, belirtmiştir [70]. Çanakçı, NO_x emisyonlarının biyodizel kullanıldığında dizel yakıtına göre daha yüksek olduğunu ve bununda yakıtın oksijen içeriğinden kaynaklanabildiğini belirtmiştir [14]. Hayvansal iç yağı metil esterleri ve karışımları kullanıldığında da özgül yakıt tüketimi dizel yakıtına göre yüksek ve oksijen içermesine rağmen daha düşük NO_x emisyonları elde edilmesi yakıtın dizel yakıtına göre yüksek setan sayısı ve daha düşük parlama noktasına sahip olması ile açıklanabilir. Setan sayısının artması ile NO_x emisyonları azalmaktadır [7]. Biyodizelin dizel yakıtına göre setan sayısının daha yüksek, parlama noktasının ise daha düşük olmasından dolayı tutuşma gecikmesi periyodunun daha kısa sürmesi neticesinde silindirdeki basınç yükselme hızının daha yavaş olmasının yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü ve bununda NO_x emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. NO_x emisyonlarının oluşumu oksijen konsantrasyonu, max basınç, yanma sıcaklığı ve zamanı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Setan sayısının yüksek olmasından dolayı yanmanın ilk safhalarında tutuşma gecikmesinin kısılmasına bağlı olarak basınç yükselmesinin azalması neticesinde yanmanın ikinci safhasında düşük basınç ve sıcaklığın oluşması NO_x emisyonlarında azalmaya neden olmaktadır [106]. Biyodizelin yüksek setan sayısına sahip ve oksijen içeren bir yakıt olmasından dolayı NO_x emisyonlarının daha düşük olduğunu Kumar ve ark., [111], biyodizelin setan sayısının dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı tutuşma gecikmesinin ve ön yanmanın daha kısa sürdüğünü ve sonuçta NO_x emisyonlarının daha düşük çıktığını Rakopoulos ve ark., [19], biyodizel kullanıldığında setan sayısının dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı NO_x emisyonlarının düştüğünü Kalligeros ve ark., [110] belirtmiştir.

Ayrıca aromatik içeriğinin azalmasıyla yanma sıcaklığının düştüğünü ve bununla daha düşük NO_x oluşumuna neden olduğu ve yine aynı şekilde biyodizelin yapısında aromatik bileşenlerin olmamasından dolayı daha az NO_x üretildiği [19,110] belirtilmiştir. Bunla beraber Lapuerta ve ark., biyodizelin dizel yakıtına göre sahip olduğu yüksek setan sayısının NO_x emisyonları üzerindeki etkisinin motor yükü ile değiştiğini ve setan sayısının NO_x düşüşü üzerindeki etkisini daha çok düşük yüklerde gösterdiğini belirtmişlerdir [108]. Zheng ve ark., yüksek yük şartlarında NO_x emisyonlarının setan sayısına bağlı olduğunu, dizel yakıtına benzer setan sayısına sahip biyodizelin daha yüksek NO_x ürettiğini fakat setan sayısının artmasıyla tutuşma gecikmesinin kısalmasına bağlı olarak NO_x emisyonlarının azaldığını belirtmişlerdir [9].

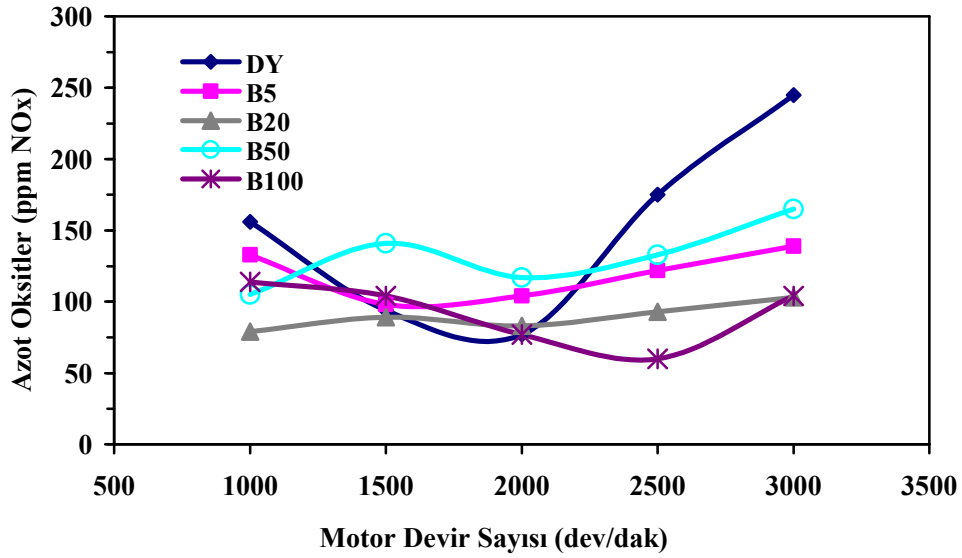
Tablo 5.11 Deney yakıtlarının azot oksit (NO_x) emisyonları değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Azot oksit Miktarı (ppm)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	156	133	79	105	114
1500	94	98	89	141	104
2000	77	104	83	117	77
2500	175	122	93	133	60
3000	245	139	103	165	104

Fernando ve ark., biyodizel kullanıldığında tutuşma zamanının erkene alınmasıyla NO_x emisyonlarının azaltılabileceğini belirtmişlerdir [112]. Bu çalışmada kullanılan biyodizelinde parlama noktasının dizel yakıtına göre daha düşük olmasından dolayı dizel yakıtına göre yanmanın daha erken başladığı ve bununla silindirdaki max basınç değerini düşürerek yanma sonu sıcaklığının düşmesine ve dolayısıyla NO_x emisyonlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bunların dışında yakıtın kimyasal yapısının da NO_x oluşumu üzerinde etkisi olmaktadır. Yağ bileşiklerinin doymamışlığı NO_x emisyonunda artışa neden olmaktadır [115]. Hayvansal yağlar bitkisel yağlara göre daha az doymamış yağlardır. Yani hayvansal yağlar doymuş yağ asidi profiline sahiptirler. Tablo 1.11’de hayvansal iç yağı, domuz yağı ve tavuk yağı metil esterlerinin soya yağı metil esterine göre daha az doymamış yağ asidi profiline sahip oldukları görülmektedir. Nitekim; yapılan bir çalışmada hayvansal yağlardan üretilen biyodizellerin soya yağı biyodizelinde daha az NO_x verdikleri belirtilmiştir [53]. Yüksek setan sayısının NO_x oluşumu üzerindeki etkisi yukarıda izah edilmişti. Doymuş yağ asidi profiline sahip yağların setan sayılarının da yüksek olduğu göz önüne alındığında; doymuş yağ asidi profiline sahip olan hayvansal yağ biyodizellerinin nispeten düşük NO_x vermeleri mantıklı gelmektedir. Literatürde biyodizel kullanıldığında dizel yakıtına göre NO_x oluşumunda artış

olduğunu belirten çalışmalarda [11, 14, 66, 70] bitkisel yağ esaslı biyodizel yakıtları kullanılmış olması yukarıdaki açıklamaları desteklemektedir.

Sonuç olarak hayvansal yağ kökenli biyodizel yakıtının NO_x emisyonu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu ve literatürdeki bitkisel yağ esaslı biyodizel yakıtı kullanımlarına göre düşüş elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.11 Deney yakıtlarının azot oksit (NO_x) emisyonu değerleri değişimi.

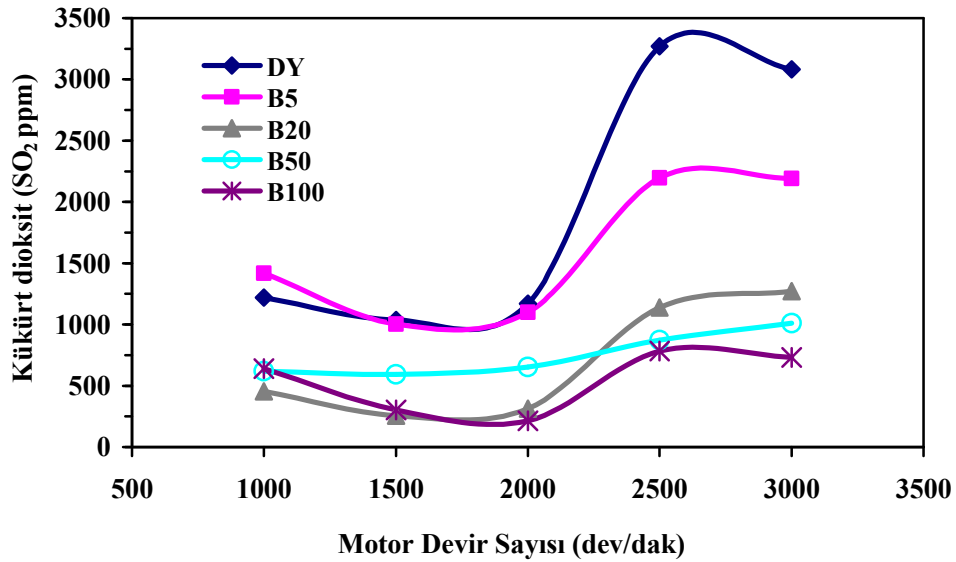
5.2.4 Kükürt dioksit (SO_2) Emisyonları

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtları ile elde edilen kükürt dioksit (SO_2) emisyonu değerleri Tablo 5.12’te verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.12’te kükürt dioksit emisyonları değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. SO_2 emisyonları motor devir sayısının ve yakıt türlerindeki dizel yakıtı oranının artmasıyla artmıştır. 1000 devir sayısında B5 kullanıldığında diğer yakıtlara göre daha yüksek SO_2 emisyonları elde edilmesinin dışında diğer tüm devirlerde dizel yakıtı kullanıldığında en yüksek SO_2 emisyonları ölçülmüştür. Tablo 5.12’e göre biyodizel ve karışımları kullanıldığında dizel yakıtı kullanımına göre daha düşük SO_2 değerleri elde edilmiştir. B100 kullanıldığında ise en düşük SO_2 emisyonları elde edildiği Şekil 5.12’te görülmektedir. B5, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %19.1, %65, %61.6 ve %72.7 oranında azalma olmuştur. B20 ve B50 yakıtlarının SO_2 emisyonu değerleri birbirine benzer çıkmıştır. SO_2 oluşumu yakıt içerisindeki kükürt oranına bağlı olarak değişmektedir. Dizel yakıtında üretimden gelen 600-700 ppm civarında kükürt bulunmaktadır. Tablo 3.3’te biyodizelin dizel yakıtına göre çok daha az miktarda kükürt içerdiği görülmektedir. Motor sıcaklığı, motor tasarımı ve motorun işletme

parametreleri ile direk bir ilişkisi bulunmamaktadır. Nitekim yakıt içerisindeki biyodizel oranı arttıkça SO_2 konsantrasyonu da azalmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına benzer olarak Lin ve ark., biyodizel ve karışımları kullanıldığında dizel yakıtına göre daha düşük SO_2 emisyonu üretildiğini ve B100 kullanıldığında ise en düşük SO_2 değerlerinin elde edildiğini belirtmişlerdir [11].

Tablo 5.12 Deney yakıtlarının kükürt dioksit emisyonu değerleri.

Motor Devir Sayısı (dev/dak)	Kükürt dioksit Miktarı (SO_2)				
	DY	B5	B20	B50	B100
1000	1221	1419	454	620	641
1500	1037	1002	255	593	303
2000	1171	1100	313	654	214
2500	3271	2197	1139	872	783
3000	3082	2192	1272	1011	731

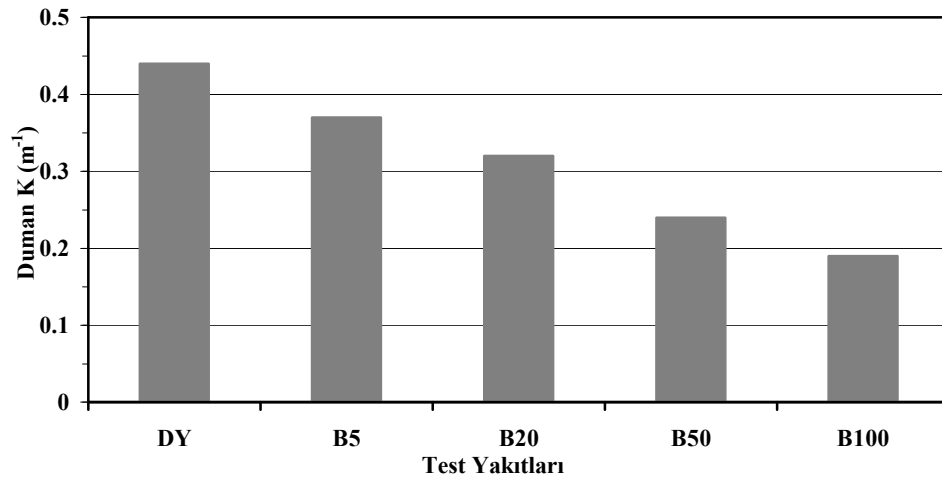


Şekil 5.12 Deney yakıtlarının kükürt dioksit (SO_2) emisyonu değerleri değişimi.

5.2.5. Duman (İs) Emisyonları

DY, B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanılmasıyla elde edilen duman emisyonu değerleri Tablo 5.13'te verilmiştir. Ayrıca; Şekil 5.13'te duman emisyonları değişimi grafiksel olarak sunulmuştur. İs oluşumuna, oksijen fakir ortamlarda bulunan yakıt moleküllerinin ısı parçalanması şeklinde bakılabilir [85]. Kirli bir egzoz, genellikle motordaki yanma işleminden gelen siyah ve isli bir dumandır. İs'in oluştuğu mekanizmalar tam olarak bilinmeyebilir. Fakat çok sayıda yayında genel bir tanım verilmiştir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda is, hidrokarbonların erimesiyle bir difüzyon alevinin yanma noktalarının yakıtça zengin tarafında

oluşur. Moleküler ayrışma ve çatlamlar yüksek sıcaklıklarda oluşurken polimerizasyon ve moleküler ilave düşük sıcaklıklarda oluşur. Dizel egzozunun siyah görüldüğü zamanlarda bile is şeklinde bulunan karbon çok küçük oranda olduğu (%1) belirtilebilir. Zamanla enjeksiyon değişimi, alev içerisindeki türbülanslı karışım alanları ve sıcaklık is oluşumunu etkileyen önemli parametrelerdir. Yerel sıcaklık değişimi ve oksijen konsantrasyonu dağılımı is oluşum mekanizmasının temel fiziksel büyüklükleridir. Bununla beraber yakıtın yüksek oksijen içeriği, düşük C/H oranı ve aromatik bileşenlerin olmaması duman oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımları kullanıldığında dizel yakıtına göre daha düşük duman (is) emisyonları ölçülmüştür. Ortalama olarak, B5, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında ölçülen duman koyuluğu değerleri dizel yakıtı kullanımına göre sırasıyla %15.9, %27.2, %45.4 ve %56.8 oranında daha düşük olmuştur. Biyodizel ve karışımları kullanıldığında duman miktarının dizel yakıtına göre düşük çıkmasının nedeni biyodizelin oksijen içermesidir. Nitekim; yakıt türlerindeki biyodizel oranının artmasıyla duman miktarının azaldığı Şekil 5.14'te görülmektedir. Biyodizel kullanıldığında daha düşük duman oluşumunun bir başka nedeni ise biyodizelin karbon içeriğinin dizele göre daha düşük olması olabilir. Hayvansal iç yağı metil esteri kütleli olarak %76.77 oranında karbon içerirken dizel yakıtında bu değer %87.12'dir [79]. Daha düşük karbon içeren biyodizelin yapısındaki oksijen yanma sırasında oksitlenme miktarını artırarak duman oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca, biyodizelin aromatik bileşenleri içermemesi duman emisyonlarında önemli azalmalar sağlamaktadır. Biyodizelin oksijen içeriğine bağlı olarak duman emisyonlarında önemli bir düşüş olduğunu Lapuerta ve ark., [113] belirtmiştir. Yakıtın oksijen içeriğinin %6.9'dan %19.5'e doğru artmasıyla duman indeksinin 2.8 kat azaldığını Sendzikiene ve ark., belirtmiştir [114]. Kumar ve ark., [5], karbon içeriğinin düşük olmasından dolayı duman emisyonlarının azaldığını belirtmişlerdir.



Şekil 5.13 Deney yakıtlarının duman emisyonu değerleri değişimi.

Yapılan deneylerde her bir yakıt türü için aynı motor kullanılmış ve enjeksiyon sisteminde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu açıdan bakıldığında mevcut yanma odası tasarımı ve enjeksiyon sisteminin biyodizel kullanımına uygun olduğu söylenebilir. Biyodizel yakıtının doymamışlık oranı arttıkça motorun yanma odasında birikinti artar, serbest gliserit etkisi de benzerdir. Hayvansal yağ esaslı biyodizel yakıtının doymuş yağ oranının yüksek olması is oluşumunun azalması üzerinde oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.13'e bakıldığında yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasıyla is miktarının düşmesi bu düşüncüyü kuvvetlendirmektedir. Bunun yanında biyodizelin ısı değeri dizel yakıtına göre düşük olmasının da duman oluşumunu azalttığı söylenebilir.

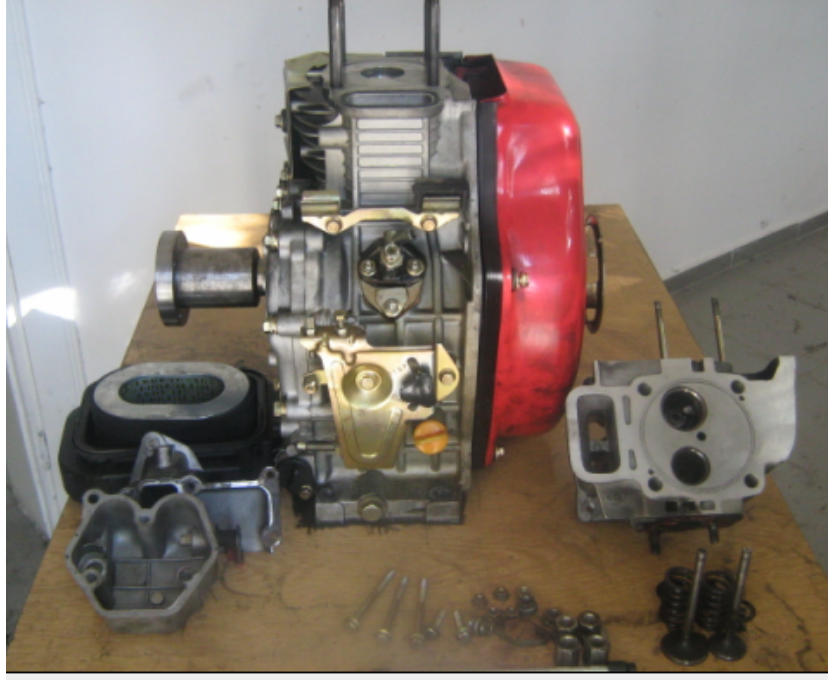
5.3. 100 Saatlik Motor Testinin Değerlendirilmesi

Hayvansal iç yağı metil esteri (biyodizel) ve dizel yakıtı karışımının dört zamanlı ve direk enjeksiyonlu dizel motorlarında alternatif yakıt olarak kullanılması halinde, motor elemanları üzerindeki etkilerini belirlemek, hayvansal iç yağı metil esteri ve dizel yakıtı karışımının uzun süreli çalışmalar için kullanılabilir olup olmadığının belirlenmesi açısından gerekli görülmüştür. Dizel motorun hayvansal iç yağı metil esteri ve dizel yakıtı karışımı ile uzun süreli olarak çalıştırılabilmesi özellikle yanma odasının, pistonun, supapların, silindir cidarının, enjektörün ve yağlama yağının özelliklerinin değişmemesine bağlıdır. Bu nedenle Bölüm 4.2'de teknik özellikleri verilen Rainbow marka LA186 model tek silindirli ve direk enjeksiyonlu dizel motor %20 hayvansal iç yağı metil esteri ve %80 dizel yakıtı karışımı (B20) ile 100 saat çalıştırılarak motor elemanlarının durumları incelenmiştir. Bununla beraber aynı motor dizel yakıtı ile de 100 saat çalıştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bölüm 5.3.2'de, önce deney motorunun incelenecek parçalarının temizlenmiş hali resimler ile tanıtılmış daha sonra B20 ile çalışma sonunda elde edilen bulgular resimler halinde verilerek dizel yakıtı kullanımına göre karşılaştırılmıştır.

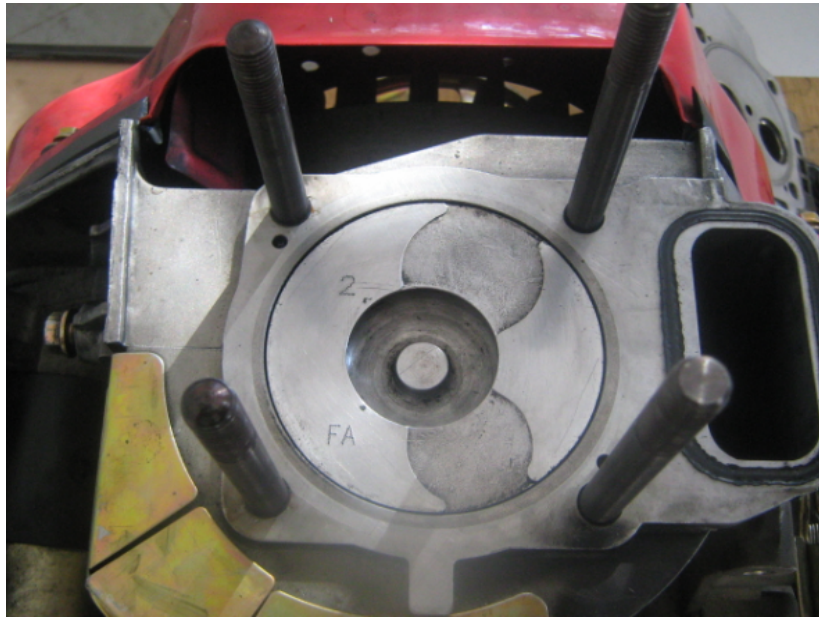
B20 ve dizel yakıtı 100 boyunca motorda sorunsuz bir şekilde kullanılmıştır. Her iki yakıt ile çalışmada başlangıçta motor yağlama yağı değiştirilmiş ve çalışma boyunca yapılan kontrollerde yağlama yağında gözle görülür bir bozulmanın olmadığı görülmüştür. Çalışma boyunca motor performansında önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Ali ve Hanna, dizel yakıtı, hayvansal iç yağı metil esteri ve etanol karışımını (hacimsel olarak sırasıyla %80:13:7) altı silindirli, dört zamanlı, direk püskürtmeli ve turboşarjlı bir dizel motorunda 200 saat sorunsuz bir şekilde kullandıklarını, çalışma boyunca motor çıkış gücünün, momentinin ve fren özgül yakıt tüketiminin yaklaşık olarak sabit kaldığını ve egzoz emisyonlarında önemli değişimin olmadığını belirtmişlerdir [83].

5.3.1. Dizel Yakıtı ve B20 Yakıtının Motor Parçaları Üzerindeki Etkileri

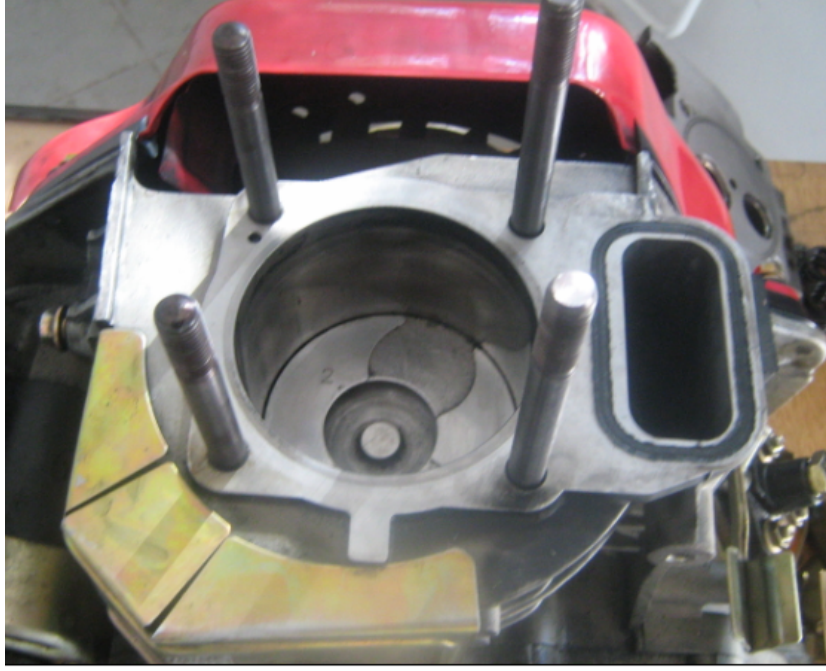
Deneylere başlamadan önce motor sökülüş ve motor elemanları incelenmiştir. Yanma odası, enjektör ucu, piston üst kısmı, silindir cidarları, üst kapak, supaplar ve yuvaları benzin ile temizlenerek yerine takılmıştır. Şekil 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 ve 5.20’de deneylere başlamadan önce temizlenmiş motor elemanlarının genel görünümü verilmiştir.



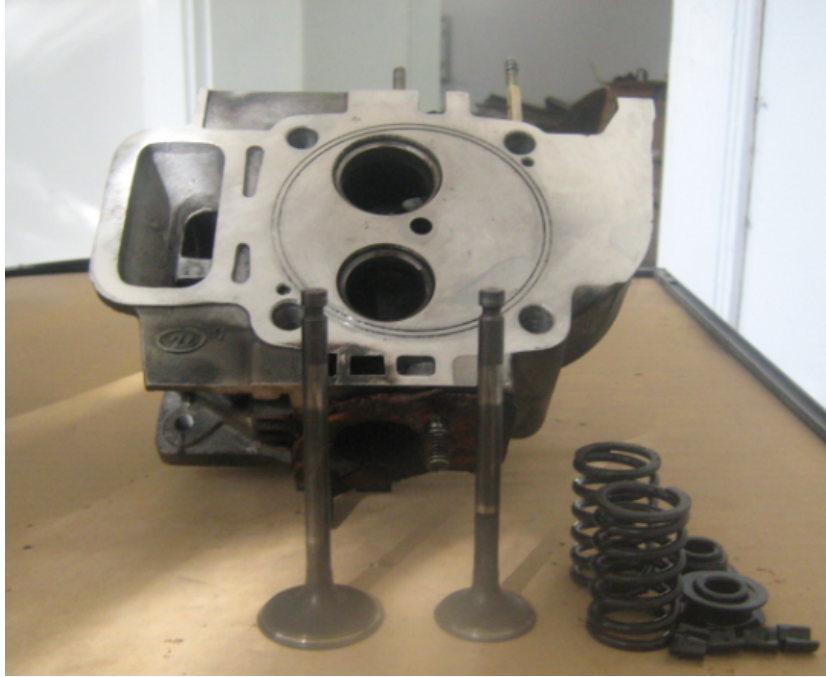
Şekil 5.14 Deneyler yapılmadan önce motorun temizlenmiş halinden genel bir görünüm.



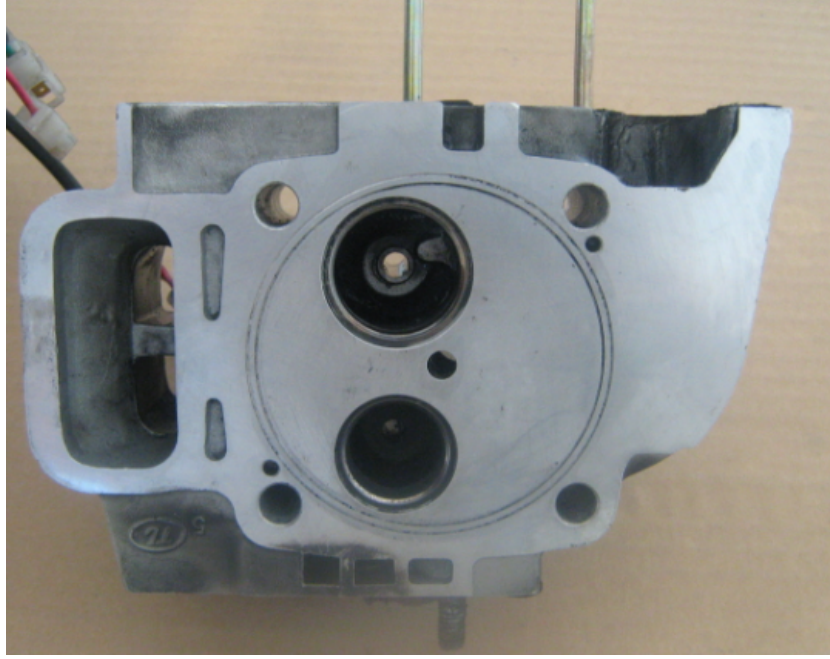
Şekil 5.15 Deneyler yapılmadan önce pistonun üst kısmının temizlenmiş görüntüsü.



Şekil 5.16 Deneyler yapılmadan önce pistonun üst kısmı ve silindir cidarlarının görünüşü.



Şekil 5.17 Deneyler yapılmadan önce üst kapak ve supapların genel görünüşü.



Şekil 5.18 Deneyler yapılmadan önce supap yuvalarının görünüşü.



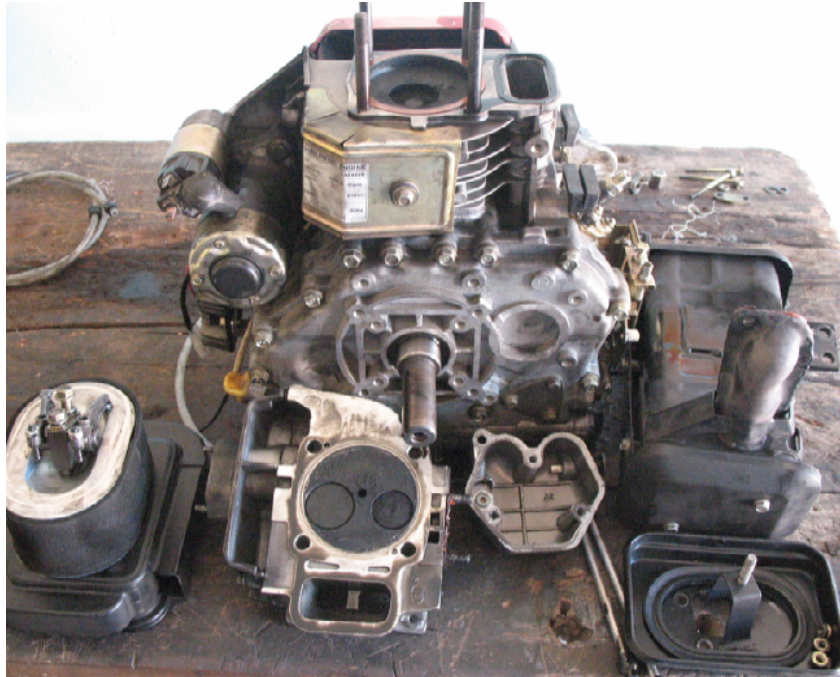
Şekil 5.19 Deneyler yapılmadan önce yakıt enjektörünün genel görünüşü.



Şekil 5.20 Deneyler yapılmadan önce enjektör ucunun genel görünüşü.

5.3.1.1. Dizel Yakıtı ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçalarının Durumu

Dizel yakıtı ile 100 saat çalışma sonunda motor sökülüş ve motor elemanları incelenmiştir. Yanma odası, enjektör ucu, piston üst kısmı, silindir cidarları, üst kapak, supaplar ve yuvaları ayrı ayrı incelenerek fotoğrafları çekilmiştir. Bu görüntüler Şekil 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 ve 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda motorun genel görünüşü.



Şekil 5.22 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda yanma odası ve silindir cidarlarının görünümü.



Şekil 5.23 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda silindirin üst kısmının görünümü.



Şekil 5.24 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda üst kapağın görünümü.



Şekil 5.25 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda emme ve egzoz supaplarının genel görünümü.



Şekil 5.26 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda yakıt enjektörünün genel görünümü.

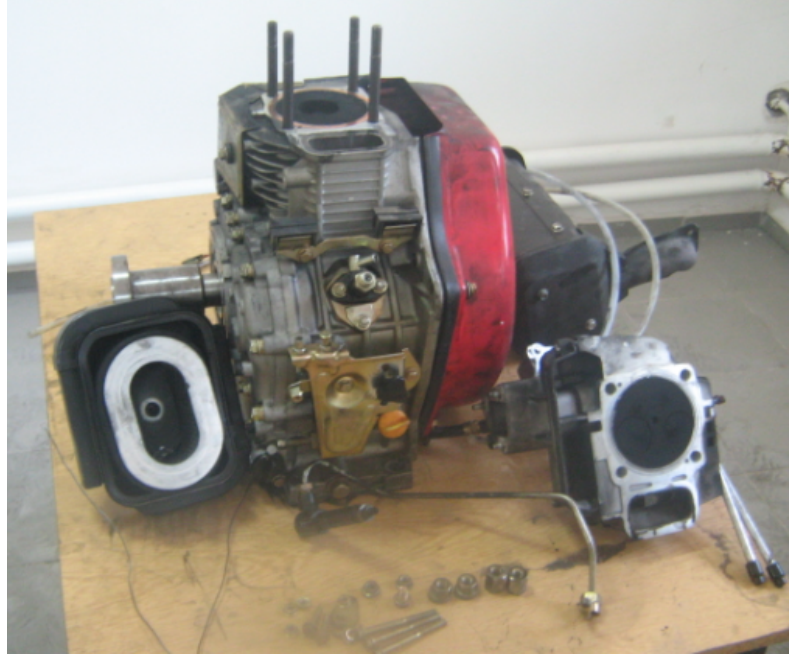


Şekil 5.27 Dizel yakıtı ile çalışma sonunda enjektör ucunda oluşan birikintinin görünümü.

Şekil 5.21’de dizel yakıtı ile 100 saat çalışma sonunda motorun genel görünümü verilmiştir. Motor söküldüğünde, üst kapak, piston üst kısmı, yanma odası, supaplar ve enjektör ucu gibi motor elemanlarının siyahlaştığı görülmüştür. Şekil 5.22’de silindir cidarları, piston üst kısmı ve yanma odası görülmektedir. Silindir yüzeyinde özellikle Ü.Ö.N’da gözle görülebilir bir islenme oluşmuştur. Bununla beraber en fazla birikinti yanma odasında olduğu görülmektedir. Pistonun üst kısmındaki supap dayanma yüzeylerinde de birikintiler oluşmuştur. Şekil 5.27 ve 5.28’de de enjektör ucu görülmektedir. Özellikle enjektörün memesi civarında birikinti olduğu görülmüştür. Oluşan tüm birikintileri siyah ve birazda parlak renkte görülmektedir. Bütün bunlarla beraber motorda oluşan islenmenin motor çalışmasına çok önemli etki etmediği görülmüştür. Çünkü bölüm 5.3.1’de de anlatıldığı gibi motor 100 saat boyunca sorunsuz bir şekilde çalışmıştır.

5.3.1.2. B20 ile 100 saat Çalışma Sonunda Motor Parçalarının Durumu

B20 ile 100 saat çalışma sonunda motor parçalarının görünüşleri Şekil 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 ve 5.36’da verilmiştir.



Şekil 5.28 B20 ile çalışma sonunda motorun genel görünümü.

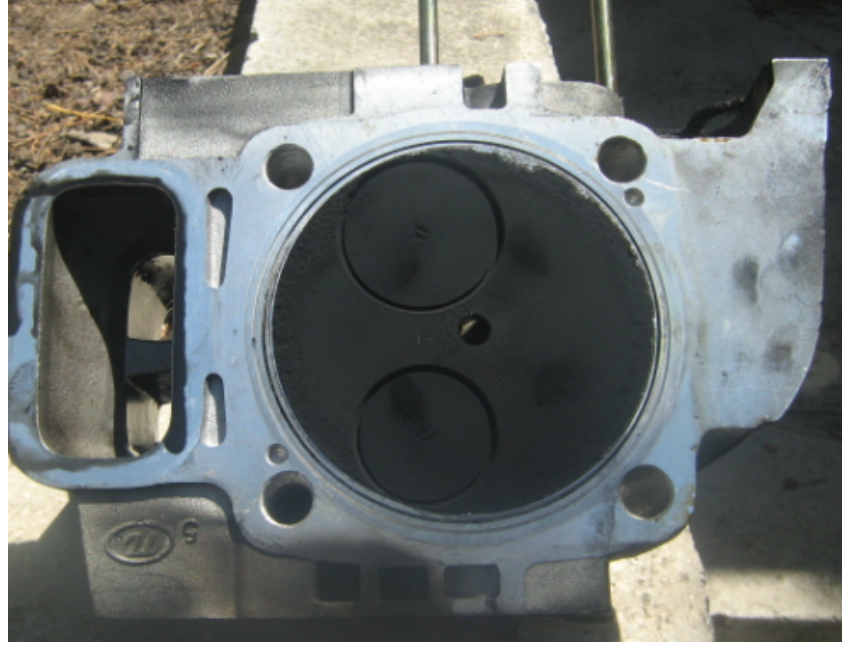


Şekil 5.29 B20 ile çalışmada pistonun üst kısmı ve silindir cidarlarının görünümü.

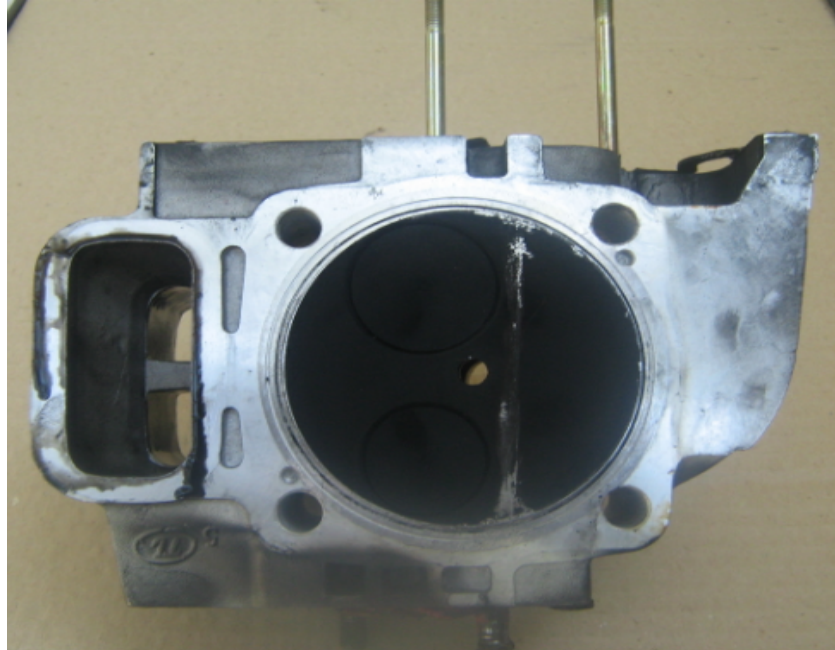


Şekil 5.30 B20 ile çalışma sonunda piston ve silindirin üst kısmının görünümü.

B20 ile 100 saat çalışma sonunda motor söküldüğünde yanma odası, piston yüzeyi, üst kapak, supaplar ve enjektör ucunda birikintilerin olduğu görülmüştür. B20 ile 100 saatlik çalışma sonunda motorun genel görünümü dizel yakıtı ile çalışmaya benzer olmuştur. Yani yanma odası islenmiş ancak çok önemli bir kurum tabakası oluşmamıştır. Setan sayısının is ve karbon birikintisi üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısının yüksek olması nedeniyle karbon birikimini artıracak düşünülebilir. Ancak; setan sayısının 70'in üzerine çıktığında isli bir yanma oluştuğu ve karbon birikintilerinin arttığı dikkate alındığında setan sayısının 70'e kadar olan artışlarında tutuşma gecikmesinin ve yanmanın iyileştiği bilinmektedir. Biyodizel yakıtının setan sayısındaki artışın karbon birikintisini artırmadığı anlaşılmıştır. Yakıtın doymamışlığı da motor birikintileri üzerinde etkilidir. Graboski ve McCormick, biyodizel yakıtların yüksek doymamışlığa sahip olmalarının motor birikintilerinin oluşumuna neden olduğunu belirtmişlerdir [18]. Aynı şekilde, Mittelbach, yakıtın yüksek doymamışlık seviyelerinin motor birikintilerinin oluşumuna ve motor yağlama yağının bozulmasına neden olduğunu belirtmiştir [53;116]. Nitekim bitkisel yağlar gibi doymamış yağ asidi profiline sahip yağlar ile yapılmış çalışmalarda motor birikintilerinin dizel yakıtı kullanımına göre yüksek olduğu bildirilmiştir [117, 118, 119]. Hayvansal yağlar ve bu yağlardan üretilen yakıtların bitkisel yağların aksine daha çok doymuş yağ bileşiklerine sahip olmaları yani doymamışlık seviyelerinin düşük olması daha az motor birikintisinin oluşumu üzerinde etkili olmuştur.



Şekil 5.31 B20 ile çalışma sonunda üst kapağın görünümü.



Şekil 5.32 B20 ile çalışma sonunda üst kapakta oluşan birikintinin kalınlığı.



Şekil 5.33 B20 ile çalışma sonunda emme ve egzoz supaplarının genel görünümü.



Şekil 5.34 B20 ile çalışma sonunda emme ve egzoz supaplarında oluşan birikintiler.



Şekil 5.35 B20 ile çalışma sonunda enjektör ucunda oluşan birikintinin görünümü.



Şekil 5.36 B20 ile çalışma sonunda yakıt enjektörünün genel görünümü.

B20 ile çalışmada dizel yakıtı ile çalışmaya göre oluşan islenme arasında iki önemli fark olmuştur. Birincisi; B20 ile oluşan isin dizel yakıtı ile oluşan ise göre daha açık renkte olmasıdır. Yani dizel yakıtı ile çalışmada daha siyah ve parlak bir renkte is oluşurken, B20 ile fûme renginde ve daha mat bir is oluşmuştur. İkincisi ise; B20 ile çalışmada oluşan birikintilerin çok az da olsa motor elemanlarına yapıştığıdır. Benzer şekilde Clark ve ark, biyodizel kullanıldığında dizel yakıtı ile benzer miktarda motor birikintilerinin oluştuğunu fakat birikintilerin renk ve dokusunda hafif bir farklılığın olduğunu belirtmişlerdir [121].

5.3.1.3. 100 Saatlik Motor Testinin Sonuçları

Dizel yakıtı ve B20 ile 100 saatlik motor testi sonucunda elde edilen verileri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

1. 100 saatlik çalışma boyunca motor çalışmasında herhangi bir anormallik görülmemiştir.
2. 100 saatlik çalışma boyunca ilk hareket problemi olmamıştır.
3. Biyodizel karışımı kullanıldığında motor içinde normal sayılabilecek karbon birikintisi oluşmuştur. Yüksek miktarda karbon birikintisinin oluşmamasında biyodizelin setan sayısının yüksek ve doymuş yağ profiline sahip olması etkili olmuştur.
4. B20 ile dizel yakıtına benzer miktarda motor birikintilerinin oluşmasının yanında birikintilerin renk ve yapısında farklılık olduğu görülmüştür.
5. Dizel yakıtı ve B20 ile çalışmada segman yapışmasına ve kırılmasına rastlanılmamıştır.
6. Hem dizel yakıtı hem de B20 ile çalışmada egzoz supabında ve yanma odasının bazı bölgelerinde daha fazla birikinti görülmüştür. Bununla beraber supaplarda herhangi bir hasara rastlanılmamıştır.
7. Çalışma süresince enjektör ucunda toplanan karbon motorun çalışmasını engellememiştir.
8. Emme supabı sapında ve giriş kanallarında karbon kalıntısına rastlanılmamıştır.
9. Silindir yüzeyinde herhangi bir çizige rastlanılmamıştır. Ü.Ö.N. ile kompresyon segmanının çıktığı son nokta arasının diğer kısımlara göre daha fazla karardığı görülmüştür.
10. B20 ile 100 saat çalışmada dizel yakıtına göre daha fazla miktarda yakıt harcanmıştır.
11. Deneylerde 20W–50 dizel motor yağı kullanılmıştır. Gözle incelemede belirgin bir probleme rastlanılmamıştır. Yağın mikro incelemesi yapılmamıştır.
12. Emme manifoldun da karbonlaşmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir [120, 121].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Elazığ'da bulunan Katiboğlu hayvan kesim hanesinde et üretimi sırasında elde edilen hayvansal iç yağlardan biyodizel üretimi ve bir dizel motorunda kullanılabilirliği araştırıldı. Bu hayvan kesim hanesinde oluşan hayvansal yağlar gıda olarak kullanılmayıp sabun üretimi için pazarlanmaktadır. Bu hayvansal iç yağlardan NaOH varlığında metanol ile baz katalizörlü transesterifikasyon kullanılarak hayvansal iç yağı metil esteri (biyodizel) üretilmiştir. Metil esterin ve dizel yakıtı ile hacimsel olarak %5, 20 ve 50 oranlarındaki karışımlarının bazı yakıt özellikleri belirlenmiştir. Biyodizel (B100) ve karışım yakıtları (B5, B20 ve B50) tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli, direk püskürtmeli ve hava soğutmalı bir dizel motorda yakıt olarak kullanılıp, motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonu değişimleri dizel yakıtı ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bununla beraber hayvansal iç yağı metil esteri yakıtının dizel motorlarında uzun süreli kullanılabilirliğini ve motor elemanları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla deney motorunda B20 yakıtı 100 saat kullanılarak motor elemanları üzerindeki etkileri dizel yakıtı kullanımına göre karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

1. Hayvansal iç yağlardan baz katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ile yağ asidi metil esteri (biyodizel) üretilmiştir. Esterleşme reaksiyonu için metanol tercih edilmiştir. Katalizör olarak ta sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. 6:1 alkol/yağ molar oranı ve yağın ağırlıkça %0.5'i kadar katalizör kullanıp, 60 °C'de toplam 3 saat reaksiyon süresiyle %96 ester dönüşüm verimi ile biyodizel üretilmiştir. Katiboğlu hayvan kesim hanesinde et üretimi sırasında elde edilen hayvansal iç yağlar ağırlığının yaklaşık %5'i kadar su ve tortu içermektedirler. Biyodizele dönüştürmeden önce su içeriğinin giderilmesi ve iyice filtrelenmesi gerekmektedir. Üretim için yağ önce 60 °C'ye yavaşça eritilmiş sonra 105–110 °C arasında 1 saat ısıtılmış ve filtrelendikten sonra biyodizel üretimi için kullanılmıştır. Bu reaksiyon parametrelerine literatür ışığında bir takım ön deneyler yapılarak ulaşılmıştır.
2. Hayvansal iç yağı metil esterinin viskozitesi dizel yakıtının viskozitesinden yaklaşık %28, yoğunluğu %4 daha yüksek, ısıl değeri ise %7 daha düşük çıkmıştır. Ham yağın, yağ asidi metil esteri şekline dönüştükten sonra viskozitesi önemli bir derecede düşmüştür. Karışım yakıtlarında ise dizel yakıtı oranının artmasıyla viskozitedeki düşüş devam etmiştir. Yoğunluk değerlerinde de buna benzer bir düşüş gözlenmiştir. Biyodizelin sahip viskozite ve yoğunluk değerleri ASTM D6751 ve EN14214 biyodizel standartlarında belirtilen sınır değerleri arasında olmuştur.

3. Biyodizelin parlama noktası 30 °C olarak ölçülmüştür. Bu, biyodizel standartlarında belirtilen minimum değerin çok altındadır. Bununla beraber dizel motor yakıtları için önerilen parlama noktası değerinin de altında çıkmıştır. Düşük parlama noktasının sebebi biyodizelin yüksek oranda alkol içermesinden kaynaklanmaktadır. Parlama noktasının çok düşük olması onu taşıma ve depolama sırasında güvensiz bir yakıt yapmaktadır. Parlama noktasını yükseltilmesi için üretim sırasında fazla alkolün alınması gerekmektedir.
4. Biyodizelin akma noktası 0 °C olarak çıkmıştır. Biyodizel bu değeri ile soğuk havalarda kullanılmaya uygun olmayan bir yakıt olmaktadır. Soğuk şartlar için donma noktası düşürücüler kullanarak veya ön ısıtma gibi bazı motor modifikasyonları ile kullanımı daha uygun olacaktır. Bununla beraber dizel yakıtına düşük oranlarda katılarak ta kolaylıkla kullanılabilir.
5. Ortalama olarak dizel yakıtı kullanıldığında biyodizel ve karışımlarına göre yaklaşık %1 daha yüksek moment elde edilmiştir. Bu; dizel yakıtının ısı değeri biyodizel ve karışımlarına göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. 1000 motor devir sayısında ise en düşük moment değerleri elde edilmiş ve dizel yakıtı kullanıldığında biyodizel ve karışımlarına göre daha düşük moment elde edilmiştir. Düşük motor devirlerinde biyodizel ve karışım yakıtların motor momenti değerlerinin dizel yakıtına göre yüksek olmasının sebebi; düşük devirlerde biyodizelin yanması için yeterli bir zaman olduğu gösterilebilir.
6. Biyodizel ve karışım yakıtların kullanımı ile motor gücünde dizel yakıtına göre biraz düşüş olmuştur. Maksimum efektif güç dizel yakıtı kullanıldığında ve 3000 motor devir sayısında elde edilmiştir. Bu devir sayısında dizel yakıtı kullanımına göre B5, B20, B50 ve B100 yakıtlarının kullanımında sırasıyla %1.9, %3.8, %4.76 ve %7.6 daha düşük güç değerleri elde edilmiştir. Dizel yakıtı kullanımında daha yüksek güç elde edilmesi dizel yakıtının ısı değerinin yüksek oluşundan kaynaklanmaktadır. Yakıt türlerindeki biyodizel oranının artması ile motor gücünde bir azalma meydana gelmiştir. Bununla beraber genel olarak değerlendirildiğinde tüm motor devirlerinde biyodizel ve karışım yakıtları kullanıldığında dizel yakıtına yakın motor gücü değerleri elde edilmiştir. Biyodizelin ısı değerinin nispeten düşük olmasına karşın motor gücünde önemli düşüşün olmaması biyodizelin yoğunluğunun dizel yakıtının yoğunluğuna göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
7. Biyodizel ve karışım yakıtlarının yakıt tüketimleri dizel yakıtı kullanımına göre yüksek çıkmıştır. En yüksek yakıt tüketimi değerleri B100 yakıtı kullanıldığında elde edilmiş, karışım yakıtlarında biyodizel oranının artmasıyla da yakıt tüketimi artış göstermiştir. B5,

B20, B50 ve B100 kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre yakıt tüketiminde ortalama olarak sırasıyla %1.4, %6.9, %10.8 ve %16 artış olmuştur.

8. Bütün test yakıtları için özgül yakıt tüketimi düşük devirlerde yüksek ve devir sayısının artmasıyla düşmüştür. Özgül yakıt tüketiminin yüksek olduğu düşük motor hızlarında, motor gücünün düşük olmasının yanında ısı kayıplarının yüksek, ortam sıcaklığı ve hava hareketlerinin yetersiz olması nedeniyle yanma şartlarının kötüleşmesi gibi bir takım olumsuzluklar da özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Motor hızı arttıkça hava hareketlerinin ve gaz sıcaklığının artması ve yanmanın iyileşmesi neticesinde özgül yakıt tüketimi de düşmektedir. Tüm yakıt türleri arasında en düşük özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtı kullanıldığında, en yüksek özgül yakıt tüketiminin de B100 kullanıldığında elde edilmiştir. B5, B20, B50 ve B100 kullanımında özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %4.7, %8.3, %11.6 ve %15.7 artmıştır. Biyodizel ve karışımlarının yakıt tüketimlerinin dizel yakıtına göre yüksek olması, benzer güç vermelerine karşın özgül yakıt tüketimlerini artırmıştır. Enjeksiyon pompası yakıtı hacimsel olarak ölçüp motora göndermektedir. Hayvansal iç yağı metil esterinin yoğunluğunun dizel yakıtına göre yüksek olmasından dolayı kütleli yakıt tüketimi hayvansal iç yağı metil ester ve karışımlarında yüksek çıkmaktadır.
9. Biyodizel ve karışım yakıtları kullanıldığında dizel yakıtına göre efektif verimde düşüş olmuştur. En düşük efektif verim değerleri B100 kullanımında elde edilmiştir. Yakıt türlerindeki biyodizel oranının azalmasıyla efektif verimde artış olmuştur. B5, B20, B50 ve B100 kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre efektif verimde ortalama olarak %3.8, %6.8, %8.9 ve %10.7 azalma olmuştur. Hayvansal iç yağı metil esterinin viskozitesi dizel yakıtının viskozitesinden yaklaşık %28 daha yüksek ısı değeri ise yaklaşık %7 daha düşüktür. Biyodizel kullanıldığında efektif verimin düşmesi viskozitesinin yüksek ve ısı değeri düşük olmasına bağlanabilir.
10. Tüm test yakıtları için egzoz sıcaklığı değerleri devir sayısının artmasıyla artmıştır. En yüksek egzoz sıcaklığı değerleri 3000 motor devir sayısında dizel yakıtı için 445 °C, B5 için 438 °C, B20 için 440 °C, B50 için 428 °C ve B100 için 412 °C olarak ölçülmüştür. Ortalama olarak en yüksek egzoz sıcaklığı değerleri B20 yakıtı kullanıldığında elde edilmiştir. Düşük motor hızlarında B100 kullanımında DY kullanımına göre daha yüksek egzoz sıcaklığı değerleri elde edilirken, yüksek devirlerde DY kullanımında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Düşük motor hızlarında biyodizelin yanması için yeterli zamanın olması ve biyodizelin sahip olduğu yüksek viskozite ve setan sayısından dolayı daha yavaş

bir yanmanın gerçekleşmiş olması düşük motor hızlarında biyodizel kullanımında daha yüksek egzoz sıcaklığı elde edilmesini açıklamaktadır. Ayrıca biyodizelin oksijen içermesi daha iyi bir yanmaya ve bununla daha yüksek egzoz sıcaklığı değerleri vermesine neden olduğu düşünülmektedir.

11. Biyodizel ve karışımları kullanıldığında elde edilen CO emisyonu değerleri dizel yakıtı kullanımına göre daha düşük olmuştur. B5, B20, B50 ve B100 kullanıldığında ölçülen CO emisyonu dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %14.5, %15.5, %4.5 ve %14.4 oranında azalmıştır. B20 yakıtı kullanıldığında ise dizel yakıtına göre en düşük CO emisyonları elde edilmiştir. CO emisyonlarındaki bu düşüş biyodizelin içerdiği oksijenden kaynaklanmaktadır. Ek oksijen yakıtın tam yanmasını artırdığından CO emisyonları azalmaktadır. Bununla beraber yakıtlardaki biyodizel oranının artmasıyla CO azalması artmamıştır. B50 kullanıldığında en düşük CO azalması elde edilmiştir.
12. Düşük devirlerde dizel yakıtına göre biyodizel kullanımında daha yüksek CO₂ emisyonu elde edilirken, genel olarak değerlendirildiğinde dizel yakıtı kullanımında biyodizel ve karışım yakıtlarına göre CO₂ emisyonu daha yüksek olmuştur. Ortalama olarak, B5, B20, B50 ve B100 kullanımıyla ölçülen CO₂ emisyonlarında dizel yakıtına göre sırasıyla %47.6, %32.1, %7.7 ve %16.7 azalma gözlenmiştir. Düşük devirlerde biyodizel ile daha yüksek CO₂ elde edilmesi; biyodizelin düşük devirlerde daha iyi yandığını göstermektedir. Biyodizelin oksijen içermesinden dolayı CO₂ emisyonlarının daha yüksek olması beklenirken düşüşün olması, biyodizelin özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtına göre daha yüksek olmasından kaynaklanıyor olabilir. Özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasından dolayı tam yanma reaksiyonlarının gerçekleşmediği ve bunun bir sonucu olarak CO₂ oluşumunda beklenenden daha farklı bir yapı ortaya çıktığı düşünülmektedir.
13. Test yakıtları arasında en düşük NO_x emisyonları B20 ile elde edilmiş ve onu B100 takip etmiştir. En yüksek NO_x emisyonları ise dizel yakıtı kullanıldığında ölçülmüştür. Genel olarak dizel yakıtı kullanımına göre B5, B20, B50 ve B100 kullanımında ortalama olarak, sırasıyla %20.2, %40.1, %11.5 ve %38.5 daha düşük NO_x emisyonu ölçülmüştür. Biyodizelin dizel yakıtına göre setan sayısının daha yüksek, parlama noktasının ise daha düşük olmasından dolayı tutuşma gecikmesi periyodunun daha kısa sürmesi neticesinde silindirdeki basınç yükselme hızının daha yavaş olmasının yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü ve bununla NO_x emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir. Setan sayısının yüksek olmasından dolayı yanmanın ilk safhalarında tutuşma gecikmesinin kısılmasına bağlı olarak basınç yükselmesinin azalması neticesinde yanmanın ikinci safhasında düşük basınç ve

sıcaklığın oluşması NO_x emisyonlarında azalmaya neden olduğunu bazı araştırmacılar belirtmiştir. Bunun yanında bu çalışmada kullanılan biyodizel yakıtının hayvansal yağ kökenli ve doymuş yağ asidi profiline sahip olması da NO_x düşüşü üzerinde etkili olmuştur.

14. SO_2 emisyonları motor devir sayısının ve yakıt türlerindeki dizel yakıtı oranının artmasıyla artmıştır. 1000 devir sayısında B5 kullanıldığında diğer yakıtlara göre daha yüksek SO_2 emisyonları elde edilmesinin dışında diğer tüm devirlerde dizel yakıtı kullanıldığında en yüksek SO_2 emisyonları ölçülmüştür. Biyodizel ve karışımları kullanıldığında dizel yakıtı kullanımına göre daha düşük SO_2 değerleri elde edilmiştir. B100 kullanıldığında ise en düşük SO_2 emisyonları elde edilmiştir. B5, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında dizel yakıtı kullanımına göre ortalama olarak, sırasıyla %19.1, %65, %61.6 ve %72.7 oranında azalma olmuştur. B20 ve B50 yakıtlarının SO_2 emisyonu değerleri birbirine benzer çıkmıştır. SO_2 emisyonlarının düşük çıkması, biyodizelin dizel yakıtına göre çok daha düşük miktarda kükürt içermesinden kaynaklanmaktadır.
15. Hayvansal iç yağı metil esteri ve karışımları kullanıldığında dizel yakıtına göre daha düşük duman (is) emisyonları ölçülmüştür. Ortalama olarak, B5, B20, B50 ve B100 yakıtları kullanıldığında ölçülen duman değerleri dizel yakıtı kullanımına göre sırasıyla %15.9, %27.2, %45.4 ve %56.8 oranında daha düşük olmuştur. Biyodizel ve karışımları kullanıldığında duman miktarının dizel yakıtına göre düşük çıkmasının nedeni biyodizelin oksijen içermesidir. Nitekim; yakıt türlerindeki biyodizel oranının artmasıyla duman miktarı azalmıştır. Biyodizel kullanıldığında daha düşük duman oluşumunun bir başka nedeni ise biyodizelin karbon içeriğinin dizele göre daha düşük olması olabilir. Hayvansal iç yağı metil esteri kütleli olarak %76.77 oranında karbon içerirken dizel yakıtında bu değer %87.12'dir. Daha düşük karbon içeren biyodizelin yapısındaki oksijen yanma sırasında oksitlenme miktarını artırarak duman oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca, biyodizelin aromatik bileşenleri içermemesi duman emisyonlarındaki düşüşe neden olabilir. Doymuş yağ profiline sahip yakıtların daha motor birikintisi oluşturduğu da göz önüne alındığında bunun da is emisyonunun daha düşük çıkması üzerinde etkili olduğu söylenebilir.
16. B20 yakıtı 100 saat boyunca deney motorunda sorunsuz bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma boyunca motor yağlama yağında normalin dışında bir bozulma olmamıştır. 100 saatlik çalışma sonunda motor söküldüğünde yanma odası, piston üst tablası, silindir cidarları ve supaplarda dizel yakıtı ile çalışmaya göre benzer birikintilerin olduğu görülmüştür. B20 ve dizel yakıtı ile çalışmada oluşan isin arasında B20 ile oluşan birikintilerin motor elemanlarına az da olsa yapıştığı ve renk farklılığıdır. Dizel yakıtı ile çalışmada oluşan is

siyah parlak bir renkte olurken, B20’de ise f me rengine ve mat olmuştur. Bununla beraber B20 ile 100 saat boyunca ilk hareket problemi olmamış, segman yapışmasına ve kırılmasına rastlanılmamış, egzoz supabında ve yanma odasının bazı bölgelerinde daha fazla birikinti görülmüş ve supaplarda herhangi bir hasara rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilirken kullanılan yakıtların farklı zamanlarda alınan yağlardan üretildiği, hava sıcaklığı ve motorun çalışma süresi gibi deney şartlarının değiştiği göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Nitekim aynı kesim haneden alınmasına rağmen her seferinde özellikle yağın içerdiği su ve tortu miktarı farklılık göstermiştir. Nitekim hayvanın beslenmesinin dahi yağın yapısına etki ettiği göz önüne alınmalıdır. Bununla beraber kesimi yapılan büyük ve küçükbaş hayvan sayıları da her zaman aynı olmamaktadır. Çalışma ortamının sıcaklığı ve nemi gibi motor karakteristik ve egzoz emisyonu değerleri üzerinde oldukça etkili olan faktörlerin sabitlenmesi için gerekli laboratuvar ve donanımın yetersiz oluşu da sonuçların her noktada açıklanmasını güçleştirmiştir. Sonuç olarak hayvansal yağ esaslı biyodizel yakıtı kullanımında bitkisel yağ esaslı biyodizel yakıtları kullanımına göre karşılaştırıldığında motor performansında önemli bir değişimin olmadığı ancak, bitkisel yağ esaslı biyodizel kullanımında çoğunlukla NO_x emisyonlarında artış olduğunun bildirilmesine karşın, bu çalışmada daha düşük NO_x emisyonlarının elde edilmesinde hayvansal yağ esaslı yakıtın kullanılmasının etkili olduğu söylenebilir. Bununla beraber CO emisyonlarındaki biyodizel konsantrasyonu ile orantılı olmayan azalmanın daha iyi açıklanabilmesi için farklı biyodizel/dizel yakıtı karışımlarının (B60, B70 gibi) daha uygun laboratuvar şartlarında denenmesi gerekmektedir. Bununla beraber deneysel sonuçlar hayvansal i  yağlardan üretilen biyodizel yakıtının ve bu çalışmada test edilen karışım oranlarının direk püskürtmeli dizel motorlarında modifikasyonsuz bir şekilde dizel yakıtı yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Birçok bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi yapılmaktadır. Yemeklik yağ kalitesi yüksek olan bitkisel ve hayvansal yağların biyodizel üretiminde kullanılması özellikle ülkemiz gibi yemeklik yağ ihtiyacının büyük bir kısmını ithal eden ülkeler için lüks olmaktadır. Bu nedenle gıda olarak kullanılmaya uygun olmayan yağların biyodizel üretiminde tercih edilmesi ekonomik ve çevresel avantajlar sağlayacaktır. Bu bağlamda domuz yağı gibi ülkemizde gıda olarak tüketilmeyen yağlarında yakıt olarak değerlendirilmesinin yararlı olacağını düşünüyorum.

Hayvansal i  yağlardan bu çalışmada üretilen biyodizel yakıtının viskozitesinin ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarına uygun olmasına rağmen daha düşük viskoziteli yakıt türleri için üretim metodu (proliz gibi) ve kullanılan kimyasallar üzerinde çalışılabilir. Bunun yanında

yakıt enjeksiyon basıncının da artırılması yüksek viskozitenin sebep olduğu bazı problemleri gidereceği düşünölmektedir. Ayrıca hayvansal iç yağı metil esterinin parlama noktasının yükseltilmesi için üretim aşamasında distilasyon veya başka bir metotla içeriğindeki fazla alkol çıkarılabilir. Biyodizel kullanıldığında özellikle düşük motor hızlarında yüksek motor gücü ve daha düşük egzoz emisyonu değeriinin elde edilmesinden dolayı bundan sonraki çalışmalarda, yüksek motor hızlarında püskürtme avansının artırılması biyodizelin motor performansını geliştirecektir. Hayvansal iç yağı metil esterinin dizel yakıtı ile farklı oranlarındaki karışımları da motor da hem kısa hem de uzun süreli testlerde kullanılabilir. En düşük emisyon oranlarının elde edildiği B20 yakıtına yakın örneğin B30 ve B40 gibi yakıt karışımları alternatif olarak araştırılmasının olumlu sonuçlar vereceği düşünölmektedir. Bununla beraber hayvansal iç yağların ve esterlerinin diğer yakma araçlarında da kullanılabilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Petrol Piyasası Raporu, 2007, Enerji Piyasası Düzenleme ve Denetleme Kurulu, www.epdk.gov.tr.
2. TÜSİAD, 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, Aralık 1998, Yayın No: TÜSİAD-T/98-12/239.
3. Körbitz, W., 1999, Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect, *Renewable Energy*, 16, 1078-1083.
4. Kumar, M.S., Kerihuel, A., Bellettre, J. and Tazerout, M., 2006, Ethanol Animal Fat Emulsions as a Diesel Engine Fuel – Part 2: Engine Test Analysis, *Fuel*, 85, 2646–2652.
5. Kumar, M.S., Kerihuel, A., Bellettre, J. and Tazerout, M., 2005, Experimental Investigation on the Use of Preheated Animal Fat as Fuel in a Compression Ignition Engine, *Renewable Energy*, 30, 1443-1456.
6. Lin, C.H. and Lin, H.A., 2006, Diesel Engine Performance and Emissions Characteristics of Biodiesel Produced by the Peroxidation Process, *Fuel*, 85, p.298-305.
7. Lloyd, A.C. and Cackette, T.A., 2001, Diesel Engines: Environmental Impact and Control, ISSN 1047-3289 *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 51, 809-847.
8. Srivastava, A. and Prasad, R., 2000, Triglycerides-Based Diesel Fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 111-133.
9. Zheng, M., Mulenga, M.C., Reader, G.T., Wang, M., Ting, D.S.K. and Tjong, J., 2008, Biodiesel Engine Performance and Emissions in Low Temperature Combustion, *Fuel*, 87, 6, 714-722.
10. Szybist, J.P., Song, J., Alam, M. and Boehman, A.L., 2007, Biodiesel Combustion, Emissions and Emission Control, *Fuel Processing Technology*, 88, 679–691.
11. Lin, Y.F., Wu, Y.P.G. and Chang, C.T., 2007, Combustion Characteristics of Waste-Oil Produced Biodiesel/Diesel Fuel Blends, *Fuel*, 86, p.1772–1780.
12. Meher, L.C., Sagar, D.V. and Naik, S.N., 2006, Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification—a Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 248–268.
13. Ramadhas A.S., Jayaraj S. and Muraleedharan C., 2004, Use of Vegetable Oils as CI Engine Fuels—A Review, *Renewable Energy*, 29, 727–742.
14. Çanakçı, M., 2007, Combustion Characteristics of a Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled with Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel, *Bioresource Technology*, 98, 1167–1175.

15. Lin, C.H., Lin, H.A. and Hung, L.B., 2006, Fuel Structure and Properties of Biodiesel Produced by the Peroxidation Process, *Fuel*, 85, 1743-1749.
16. Kegl, B., 2008, Biodiesel Usage at Low Temperature, *Fuel*, 87, 7, 1306-1317.
17. Georing, C.E., Schwab, B., Daught, M.J., Pryde, E.H. and Heakin, A.J., 1982, Fuel Properties of Eleven Vegetable Oils, American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/82/2506-1472\$02.00, Transactions of ASAE.
18. Graboski, M.S. and McCormick, R.L., 1998, Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engine, *Progress Energy Combustion Science*, 24, p.125-164.
19. Rakopoulos, C.D., Antonopoulos, K.A., Rakopoulos, D.C., Hountalas, D.T. and Giakoumis, E.G., 2006, Comparative Performance and Emissions Study of a Direct Injection Diesel Engine Using Blends of Diesel Fuel with Vegetable Oils or Bio-Diesels of Various Origins, *Energy Conversion and Management*, 47, p.3272-3287.
20. Wang, Y.D., Al-Shemmeri, T., Eames, P., McMullan, J., Hewitt, N., Huang, Y. and Rezvani, S., 2006, An Experimental Investigation of the Performance and Gaseous Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using Blends of a Vegetable Oil, *Applied Thermal Engineering*, 26, p.1684-1691.
21. Pugazhivadivu, M. and Jeyachandran, K., 2005, Investigations on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Using Preheated Waste Frying Oil as Fuel, *Renewable Energy*, 30, 2189-2202.
22. Demirbaş, A and Karşlıoğlu, S., 2007, Biodiesel Production Facilities from Vegetable Oils and Animal Fats, *Energy Sources, Part A*, 29, 133-141.
23. Çanakçı, M., Erdil, A. and Arcaklıoğlu, E., 2006, Performance and Exhaust Emissions of a Biodiesel Engine, *Applied Energy*, 83, 594-605.
24. Çanakçı, M., 2007, The Potential of Restaurant Waste Lipids as Biodiesel Feedstocks, *Bioresource Technology*, 98, 183-190.
25. Karaosmanoğlu, F., 2002, Türkiye İçin Çevre Dostu - Yenilenebilir Bir Yakıt Adayı: Biyomotorin, *Ekojenarasyon Dünyası - Kojenerasyon Dergisi*, ICCI 2002 Özel Sayısı, 10, 50-56.
26. Karaosmanoğlu, F., 2007, Biyomotorin ve Türkiye, www.biyomotorin-biyodiesel.com/biomoto.html.
27. Kerihuel, A., Kumar, M.S., Bellettre, J. and Tazerout, M., 2006, Ethanol Animal Fat Emulsions as a Diesel Engine Fuel – Part 1: Formulations and Influential Parameters, *Fuel*, 85, 2640-2645.

28. Artukoğlu, B.D., Hayvansal Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi ve Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2006, 94 s.
29. Schwab, A.W., Bagby, M.O. and Freedman, B., 1987, Preparation and Properties of Diesel Fuels from Vegetable Oils, *Fuel*, 66, 1372–1378.
30. Crookes, R. J., Fariborz, K. and Nazha Marouan AA., 1997, Systematic Assessment of Combustion Characteristics of Bio Fuels and Emulsions with Water for Use as Diesel Engine Fuels, *Energy Conversion and Management*, 38, 1785–1795.
31. Nelson, R.G. and Schrock, M.D., 2006, Energetic and Economic Feasibility Associated with the Production, Processing, and Conversion of Beef Tallow to a Substitute Diesel Fuel, *Biomass and Bioenergy*, 30, 584–591.
32. European Biodiesel Board, <http://www.ebb-eu.org/stats.php>
33. Acaroğlu, Mustafa., AB ve Türkiye'de Biyodizel Potansiyeli ve Biyodizel Üretimine Geleceği, Türkiye'de Bitkisel ve Atık / Hayvansal Yağlardan Biyodizel Üretiminde Durum Saptanması, 02 Aralık 2005, Ankara.
34. Çağlar, M., Türkiye'de Biyodizel Konusunda Yasal Altyapı, Yatırım ve Dünya Perspektifi, PAL danışma kurulu toplantısı, 3 Şubat 2006.
35. Jon Van Gerpen, Biodiesel Production Technologies, www.cisat.jmu.edu/.../presentations/Biodiesel%20Production%20Technologies-VanGerpen%202p%20presentation.ppt, November 16, 2004
36. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Web Sitesi, http://www.eie.gov.tr/biyodizel/bd_uretim.html.
37. Türkay, S., Biyodizel Üretim Teknolojileri, Türkiye'de Biyodizel Üretimindeki Mevcut Durum, Sorunlar ve Öneriler Çalıştayı, TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü, 2 Aralık 2005, ANKARA.
38. www.cevreorman.gov.tr/belgeler/yaglar.pdf
39. Çanakçı, M. ve Özsezen, A.N., 2005, Atık Mutfak Yağlarının Alternatif Dizel Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 18, 1, 81-91.
40. Ma, F. and Hanna, M.A., 1999, Biodiesel Production: a Review, *Bioresource Technology*, 70, 1, 1-15.
41. Agarwal, A.K., 2007, Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233-271.
42. Freedman, B., Butterfield, R.O. and Pryde, E.H., 1986, Transesterification Kinetics of Soybean Oil, *JAACS*, 63, p.1375-1380.

43. Çildir, O. ve Çanakçı, M., 2006, Çeşitli Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretiminde Katalizör ve Alkol Miktarının Yakıt Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21, No 2, 367-372.
44. Demirbaş, A., 2002, Biodiesel from Vegetable Oils via Transesterification in Supercritical Methanol, Energy Conversion and Management, 43, 2349–2356.
45. Felizardo, P., Correia, M.J.N., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R. and Bordado, J.M., 2006, Production of Biodiesel from Waste Frying Oils, Waste Management, 26, 487–494.
46. Ma, F., Clements, L.D. and Hanna, M.A., 1998, The Effects of Catalyst, Free Fatty Acids, and Water on Transesterification of Beef Tallow, Transaction of ASAE, Vol: 41, 5, 1261-1264.
47. Komers, K., Machek, J. and Stloukal, R., 2001, Biodiesel from Rapeseed Oil and KOH 2. Composition of Solution of KOH in Methanol as Reaction Partner of Oil, European Journal of Lipid Science Technology, 103, p.359–362.
48. Tashtoush, G.M., Al-Widyan, M.I. and Al-Jarrah, M.M., 2004, Experimental Study on Evaluation and Optimization of Conversion of Waste Animal Fat into Biodiesel, Energy Conversion and Management, 45, 2697–2711.
49. Çanakçı, M. and Van Gerpen, J., 1999, Biodiesel Production via Acid Catalysis, Transactions of the ASAE, 42, 5, 1203-1210.
50. Marchetti, J.M., Miguel, V.U. and Errazu, A.F., 2007, Possible Methods for Biodiesel Production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1300–1311.
51. Biodiesel Production and Fuel Quality, www.biodiesel.org/pdf_files/fuel/factsheets/prod_quality.pdf, ASTM standards.
52. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tallow>
53. Wyatt, V.T., Hess, M.A., Dunn, R.A., Foglia, T.A., Haas, A.J. and Marmer, W.N., 2005, Fuel Properties and Nitrogen Oxide Emission Levels of Biodiesel Produced from Animal Fats, Journal of the American Oil Chemists' Society (JAOCS), Vol.82, No.8, 585-591.
54. Mittelbach, M., 1996, Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, VI: Specifications and Quality Control of Biodiesel, Bioresource Technology, 56, 7–11.
55. Reyes, J.F. and Sepulveda, M.A., 2006, PM-10 Emissions and Power of a Diesel Engine Fueled with Crude and Refined Biodiesel from Salmon Oil, Fuel, 85, 1714–1719.
56. Sims, Ralph E.H., 1985, Tallow Esters as an Alternative Diesel Fuel, Transactions of ASAE, 28, 3, 716-721.
57. Zheng, D. and Hanna, M.A., 1996, Preparation and Properties of Methyl Esters of Beef Tallow, Bioresource Technology, 57, 137-142.

58. Çanakçı, M., 2003, Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 46, 4, 937-944.
59. Wu, Yo-ping G., Lin, Y.F. and Chang, C.T., 2007, Combustion Characteristics of Fatty Acid Methyl Esters Derived from Recycled Cooking Oil, Fuel, 86 (17-18), 2810-2816.
60. Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gómez, J. and López, F.J., 2003, Exhaust Emissions From a Diesel Engine Fueled With Transesterified Waste Olive Oil, Fuel, 82 (11), 1311-1315.
61. Lebedevas, S., Vaicekauskas, A., Lebedeva, G., Makareviciene, V., Janulis, P. and Kazancev, K., 2006, Use of Waste Fats of Animal and Vegetable Origin for the Production of Biodiesel Fuel: Quality, Motor Properties, and Emissions of Harmful Components, Energy & Fuels, 20, 2274-2280.
62. Keskin, A., Gürü, M. ve Altıparmak, D., 2007, Tall Yağı Biyodizelinin Dizel Yakıtı ile %90 Oranındaki Karışımının Alternatif Dizel Yakıtı Olarak İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 22, No:1, 57-63.
63. Saka, S. and Kusdiana, D., 2001, Biodiesel Fuel from Rapeseed Oil as Prepared in Supercritical Methanol, Fuel, 80, 225-231.
64. Kerihuel, A., Kumar, M.S., Belletre, J. and Tazerout, M., 2005, Use of Animal Fats as CI Engine Fuel by Making Stable Emulsions with Water and Methanol, Fuel, 84, 1713-1716.
65. Leung, D.Y.C. and Guo, Y., 2006, Transesterification of Neat and Used Frying Oil: Optimization for Biodiesel Production, Fuel Processing Technology, 87, 883-890.
66. Keskin, A. ve Aydın, K., 2005, Fındık Yağı Biyodizeli Üretimi ve Dizel Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Kullanımının Araştırılması, Ç.Ü.Müh.Mim.Fak.Dergisi, 20 (1), 75-83.
67. Sims, R.E.H. and Jhonson, C.B., 1982, Tallow, Rapeseed Oil and their Esters as Diesel Fuel Extenders, Massey University Agricultural Research Foundation, Research Publication Series No.2, Palmerston North, New Zealand. 26p.
68. Alcantara, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M.J. and Navarro, A., 2000, Catalytic Production Of Biodiesel From Soy-Bean Oil, Used Frying Oil and Tallow, Biomass and Bioenergy, 18, 515-527.
69. Ma, F., Clements, L.D. and Hanna, M.A., 1999, The Effect of Mixing on Transesterification of Beef Tallow, Bioresource Technology, 69, 289-293.
70. Özsezen, A.N., 2007, Atık Palmiye Yağından Üretilen Biyodizelin Motor Performans ve Emisyon Karakterleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 166 sayfa.

71. Alptekin, E. ve Çanakçı, M., 2006, Biyodizel ve Türkiye'deki Durumu, Mühendis ve Makine, 47 (561), 57-64.
72. Freedman, B., Pryde, E.H. and Mounts, T.L., 1984, Variables Affecting the Yields of Fatty Acid Esters from Transesterified Vegetable Oils, JAOCS, 61, 1638-1643.
73. Tillem, İ., 2005, Dizel Motorları İçin Alternatif Yakıt Olarak Biyodizel Üretimi Ve Kullanımı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71 sayfa.
74. Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D. and Knothe, G., 2004, Biodiesel Production Technology, NREL/SR-510-36244, www.nrel.gov/docs/fy04osti/36244.pdf
75. Öztürk, M., (2004). Kullanılmış Bitkisel ve Hayvansal Yağlar, Çevre ve Orman Bakanlığı. www.cevreorman.gov.tr/belgeler/yaglar.pdf.
76. Ali, Y., and Hanna, M.A., 1994, Physical Properties of Tallow Ester and Diesel Fuel Blends, Bioresource Technology, 47, 131-134.
77. Foglia, T.A., Nelson, L.A., Dunn, R.O. and Marmer, W.N., 1997, Low-Temperature Properties of Alkyl Esters of Tallow and Grease, JAOCS, 74, 8, 951-955.
78. Callahan, T. J. and Sharp, C. A., Evaluation of Methyl Tallowate as a Diesel Fuel Additive, www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19931201_gen-282.pdf
79. Yahya, A. and Marley, S.J., 1994, Physical and Chemical Characterization of Methyl Soyoil and Methyl Tallow Esters as CI Engine Fuels, Biomass and Bioenergy, 6 (4), p.321-328.
80. Yahya, A. and Marley, S.J., 1994, Performance and Exhaust Emissions of a Compression Ignition Engine Operating on Ester Fuels at Increased Injection Pressure and Advanced Timing, Biomass and Bioenergy, 6 (4), 297-319.
81. Sims, R.E.H. and Meister, A.D., 1984, Production and Economics of Rapeseed Oil and Tallow Esters as Alternative Fuels For Compression Ignition Engines, Energy in Agriculture, 3, p.223-232.
82. Ali, Y. and Eskridge, K.M., Hanna, M.A., 1995, Testing of Alternative Diesel Fuel From Tallow and Soybean Oil in Cummins N14-410 Diesel Engine, Bioresource Technology, 53, p.243-254.
83. Ali, Y. and Hanna, M.A., Durability Testing of a Diesel Fuel, Methyl Tallowate and Ethanol Blend in a Cummins N14-410 Diesel Engine, www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/tra/19960101_tra-035.pdf
84. Çengel, Y.A. and Boles, M.A., *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, McGraw Hill-Literatür yayıncılık, Çeviri: Taner Darbentli, 418.s.
85. Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen A., 1995, *İçten Yanmalı Motorlar*, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Matbaası, Ankara, 513s.

86. Haşımoğlu, C., İcingür, Y. ve Öğüt, H., 2002, Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneyisel Analizi, *Turkish J. Engin Environ Sci.*, 26,127-135s.
87. Balcı, M. 1995, Motorlu Taşıtlarda Kirletici Denetimi, IV. Yanma Sempozyumu, 19-21 Temmuz 1995, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uludağ Üniversitesi, Kirazlı yayla, Bursa.
88. Kutlar, O.A. Ergeneman, M., Arslan, H., Mutlu, M., *Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
89. Borat, O., *Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği*, Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü, Yayın No.107.
90. Naik, M, Meher, L.C., Naik, S.N. and Das, L.M., 2008, Production of Biodiesel from High Free Fatty Acid Karanja (*Pongamia Pinnata*) Oil, *Biomass and Bioenergy*, 32 (4), p.354-357.
91. Sharma, Y.C. and Singh, B., 2008, Development of Biodiesel from Karanja, a Tree Found in Rural India, *Fuel*, 87, p.1740–1742.
92. http://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards, (31 Mayıs 2008).
93. Chung, K.H., Kim, J. and Lee, K.Y., 2008, Biodiesel Production by Transesterification of Duck Tallow with Methanol on Alkali Catalysts, *Biomass and Bioenergy*, doi:10.1016 / j.biombioe. 2008.04.014.
94. Bhatti, N.H., Hanif, M.A., Qasim, M. and Rehman, A., 2008, Biodiesel Production from Waste Tallow, *Fuel*, doi:10.1016/j.fuel.2008.04.016.
95. Nişancı, S., 2007, Biyodizel Yakıt Karışımlarının Performans ve Emisyon Üzerine Etkilerinin Deneyisel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü 63 sayfa.
96. Altınsoy, A.S., 2006, Biyodizel Üretimi, Motorlarda Kullanımı ve Türkiye'deki Kaynakların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
97. Ali, Y., Hanna, M.A., and Cuppett, S.L., 1995, Fuel Properties of Tallow and Soybean Oil Esters, *JAOCs*, 72 (12), p.1557-1564.
98. İlkılıç, C., 1999, Çeşitli Alternatif Yakıtların Dizel Motoru Emisyonlarına Etkilerinin Teorik ve Deneyisel İncelenmesi, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 158 sayfa.
99. Usta, N., 2005, An Experimental Study on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Tobacco Seed Oil Methyl Ester, *Energy Conversion and Management*, 46, p.2373–2386.

100. Agarwal AK, and Das LM., 2001, Biodiesel Development and Characterization for Use as a Fuel in Compression Ignition Engines, *J. Eng. Gas Turbine Power*, Trans of ASME, 123, p.440–447.
101. Kalam. M.A., Husnawan. M., and Masjuki H.H., 2003, Exhaust Emission and Combustion Evaluation of Coconut Oil-Powered Indirect Injection Diesel Engine, *Renewable Energy*, 28, p.2405–2415.
102. Banapurmatha, N.R., Tewaria, P.G., and Hosmath, R.S., 2008, Performance and Emission Characteristics of a DI Compression Ignition Engine Operated on Honge, Jatropha and Sesame Oil Methyl Esters, *Renewable Energy*, 33(9), p.1982-1988.
103. Yücesu, H.S., ve İlkılıç, C., 2006, Effect of Cotton Seed Oil Methyl Ester on the Performance and Exhaust Emission of a Diesel Engine, *Energy Sources, Part A*, 28, p.389-398.
104. Raheman, H., and Phadatare, A.G., 2004, Diesel Engine Emissions and Performance from Blends of Karanja Methyl Ester and Diesel, *Biomass and Bioenergy*, 27, p.393 – 397.
105. Srivastava, P.K., and Verma, M., 2007, Methyl Ester of Karanja Oil as an Alternative Renewable Source Energy, *Fuel*, 87, p.1673-1677.
106. Puhana, S., Vedaramana, N., Rama, B.V.B., Sankarnarayananb, G., and Jeychandran, K., 2005, Mahua Oil (Madhuca Indica Seed Oil) Methyl Ester as Biodiesel-Preparation and Emission Characteristics, *Biomass and Bioenergy*, 28, p.87–93.
107. Nabi, N., Akhter, S., and Shahadat, M. Z., 2006, Improvement of Engine Emissions with Conventional Diesel Fuel and Diesel–Biodiesel Blends, *Bioresource Technology*, 97, p.372–378.
108. Lapuerta, M., Armas, O., and Rodriguez-Fernandez, J., 2008, Effect of Biodiesel Fuels on Engine Emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, p.198-223.
109. Last, R.J., Krüger, M., and Dürnholtz, M., 1995, Emissions and Performance Characteristics of a 4-Stroke, Direct Injected Diesel Engine Fueled with Blends of Biodiesel and Low Sulfur Diesel Fuel, *SAE paper*, 950054.
110. Kalligeros, S., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anastopoulos, G., Teas, Ch., and Sakellaropoulos, F., 2003, An Investigation of Using Biodiesel/Marine Diesel Blends on the Performance of a Stationary Diesel Engine, *Biomass and Bioenergy*, 24, p.141-149.
111. Kumar Jha, S., Fernando, S., and Filip To, S.D., 2008, Flame Temperature Analysis of Biodiesel Blends and Components, *Fuel*, 87, p.1982-1988.
112. Fernando, S., Hall, C., and Jha, S., 2006, NOx Reduction from Biodiesel Fuels, *Energy and Fuels*, 20, p.376-382.

113. Lapuerta, M., Rodriguez-Fernandez, J., and Agudelo, J.R., 2008, Diesel Particulate Emissions from Used Cooking Oil Biodiesel, *Bioresource Technology*, 99, p.731–740.
114. Sendzikiene, E., Makareviciene, V., Janulis, P., 2006, Influence of Fuel Oxygen Content on Diesel Engine Exhaust Emissions, *Renewable Energy*, 31, p.2505–2512.
115. Knothe, G., Sharp, C.A., Ryan, T.W., 2006, Exhaust Emissions of Biodiesel, Petrodiesel, Neat Methyl Ester and Alkanes in a New Technology Engine, *Energy and Fuels*, 20, p.403-408.
116. Mittelbach, M., 1996, Diesel Fuel Derived from Vegetable Oils, VI: Specifications and Quality Control of Biodiesel, *Bioresource Technology*, 56, p.7–11.
117. Altun, Ş., Bulut, H., Öner, C., 2008, The Comparison of Engine Performance and Exhaust Emission Characteristics of Sesame Oil–Diesel Fuel Mixture with Diesel Fuel in a Direct Injection Diesel Engine, *Renewable Energy*, 33, p.1791–1795.
118. Altun, Ş., Öner, C., 2005, Susam Yağının Alternatif Yakıt Olarak Dizel Motor Performansı Ve Motor Elemanları Üzerindeki Etkileri, *Teknoloji Dergisi*, Cilt:8, Sayı:3, Sayfa:229-236.
119. Yücel, H.L., 1998, Dizel Yakıtına Belirli Oranlarda Karıştırılmış Pamuk Yağının Motor Performansı ve Emisyon Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 121 sayfa.
120. Demirbaş, A., 2007, Importance of Biodiesel as Transportation Fuel, *Energy Policy*, 35, p. 4661- 4670.
121. Clark, S.J., Wagner, L., Schrock, M.D., Piennaar, P.G., 1984, Methyl and Ethyl Soybean Esters as Renewable Fuels for Diesel Engines, *JAOCS*, 61(10), p.1632-.

ÖZGEÇMİŞ

1979 Batman doğumluyum. 1997 yılında Batman Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi motor bölümünden mezun olduktan sonra 1998 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği bölümünü kazandım. Buradan 2002 yılında mezun olup aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında yüksek lisans yapmaya başladım. Buradan 2004 yılında mezun oldum. 2002 ve 2004 yılları arasında Dicle Üniversitesi Batman Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalında dersler okuttum. 2004 Aralık ayında Harran Üniversitesi Şanlıurfa Meslek Yüksek Okulu Otomotiv programına Öğretim Görevlisi olarak atandım. 2005 yılı şubat ayında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında doktora eğitimine başladım. Halen Batman Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktayım. Evli ve bir çocuk babasıyım.

Şehmus ALTUN