

**DİZEL MOTORLAR İÇİN ALTERNATİF YAKIT OLARAK
BİYODİZEL ÜRETİMİ VE KULLANIMI**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

İsmail TİLLEM


Danışman : Yrd. Doç. Dr. Nazım USTA


**Temmuz 2005
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

İsmail TİLLEM tarafından Yrd. Doç. Dr. Nazım USTA yönetiminde hazırlanan "Dizel Motorlar İçin Alternatif Yakıt Olarak Biyodizel Üretimi ve Kullanımı" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Rasim KARABACAK
Jüri Başkanı


Yrd. Doç. Dr. Hasalettin DELİGÖZ
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Nazım USTA
Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
17.108/2005. tarih ve ...17-8... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

Öğrenci Adı Soyadı : İsmail TİLLEM
İmza :

TEŞEKKÜR

“Dizel Motorlar İçin Alternatif Yakıt Olarak Biyodizel Üretimi ve Kullanımı” konulu yüksek lisans çalışmalarım boyunca desteğini gördüğüm tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Nazım Usta’ya ve yardımlarını bizden hiç esirgemeyen Sayın Dr. Erdal Uğuzdoğan’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımızın temelini oluşturan biyodizel hammaddelerini temin ettiğimiz Abaloğlu Yem Fabrikası-Denizli nezdinde Sayın Özgür Kocamaz’a ve Bunge Gıda Sanayi firması nezdinde Sayın Sinan Başkan’a gösterdikleri yakın ilgi ve destekleri için teşekkür ederim. Ayrıca dizel motorlarda önemli bir emisyon olan duman koyuluğunun ölçülmesi için gerekli olan duman ölçer cihazı Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi (BAP)-Fen Bilimleri Enstitüsü proje desteği (Proje No. 2004FBE05) ile temin edilmiştir. Bu yüzden Pamukkale Üniversitesi BAP ve Fen Bilimleri Enstitüsüne teşekkür ederim. Son olarak, bu güne kadar yaptığım tüm çalışmalarda benden desteğini hiç esirgemeyip, sürekli yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

Dünyanın enerji ihtiyacının en büyük bölümü fosil kaynaklı yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Fakat, bilinen fosil yakıt kaynakları tükenmekte ve bununla birlikte bu yakıtların kullanımı küresel ısınma, asit yağmurları ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bundan dolayı dünyada yenilenebilir enerji kaynakları ve alternatif yakıtlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Dizel motorlarda kullanılan petrol kaynaklı dizel yakıtı ulaşım sektörünün temel enerji kaynağıdır. Ham veya atık bitkisel yağlardan üretilen biyodizel yakıtlar dizel motorlar için önemli yenilenebilir alternatif yakıtlardır.

Bu çalışmada, biyodizel hammaddesi olarak ham kanola yağı, nötr pamuk yağı ve atık kızartma yağı kullanılmış, biyodizel üretim yöntemi olarak alkali katalizörler ile transesterifikasyon metodu izlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda, alkol olarak metil alkol, katalizör olarak sodyumhidroksit kullanılmıştır. Üretilen biyodizeller, dizel yakıtı içerisine %20 hacimsel oranda karıştırılmıştır. Biyodizel-dizel karışımları, dört zamanlı, dört silindirli, ön yanma odalı turbo-dizel bir motorda, tam yükte, performans ve emisyon değerleri bakımından test edilmiştir. Deney sonuçları, farklı çalışma şartlarında performans ve emisyon değerleri gözönüne alınarak, üretilen biyodizel yakıtların dizel yakıtına kısmi oranda karıştırılması suretiyle dizel motorda herhangi bir değişiklik veya yakıt ön ısıtması gerektirmeden kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : Biyodizel, dizel motor, performans, emisyon, kanola yağı, pamuk yağı, atık bitkisel yağ.

ABSTRACT

Fossil fuels are mainly used to meet most of the energy demand of the world. However, the known fossil fuel resources are diminishing and the use of fossil fuels causes global warming, acid rains and environmental pollution. Therefore, studies on renewable energy sources and alternative fuels have been carried out in the world.

The petroleum diesel fuel is the basic energy source of transportation sector and used in diesel engines. Biodiesel fuel, which can be produced from crude or waste vegetable oil, is an important alternative renewable fuel for diesel engines.

In this study, crude rapeseed oil, neutral cottonseed oil and waste frying oil was used as biodiesel feedstock and alkali-catalyzed transesterification method was used in biodiesel production. Methanol as an alcohol and sodium hydroxide as a catalyst were used in the transesterification reaction.

The produced biodiesels were blended in %20 (in volume) with diesel fuel. The blends were tested in a four cycle, four cylinder, turbocharged indirect injection (IDI) Diesel engine. The effects of biodiesel addition to Diesel No. 2 on the performance and emissions of the engine were examined at full load. Experimental results showed that the produced biodiesels can be partially substituted for the diesel fuel at most operating conditions in terms of the performance parameters and emissions without any engine modification and preheating of the blends.

Keywords: Biodiesel, diesel engine, performance, emission, rapeseed oil, cottonseed oil, waste frying oil.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. DİZEL MOTORLAR VE YAKITLARI	6
2.1. Dizel Motorlar	6
2.2. Dizel Yakıt No.2 Özellikleri	7
2.2.1. Kinematik viskozite	7
2.2.2. Yoğunluk.....	8
2.2.3. Su ve tortu miktarı.....	8
2.2.4. Toplam kükürt miktarı	8
2.2.5. Alevlenme noktası.....	9
2.2.6. Bulutlanma noktası	9
2.2.7. Setan sayısı.....	9
2.2.8. Kül miktarı	9
2.2.9. Isıl değer.....	10
2.2.10. Bakır korozyonu.....	10
2.2.11. Karbon kalıntısı.....	10
3. BİYODİZEL	11
3.1. Biyodizel	11
3.1.1. Transesterifikasyon yöntemi	12
3.2. Dizel Motorlarda Biyodizel Kullanımı	16
3.3. Biyodizel Üretimi İçin Kaynaklar	18
3.3.1. Kanola	19
3.3.2. Pamuk tohumu (Çiğit).....	20
3.3.3. Atık Yağlar.....	21
3.4. Biyodizellerin Genel Özellikleri	22
3.4.1. Biyodizel yakıt karakteristikleri.....	24
4. DENEY DÜZENEGİ VE METODLARI	26
4.1. Biyodizel Üretim Düzenegi ve Biyodizel Üretimi	26
4.1.1 Titrasyon	26
4.1.2. Numune üretimleri	27
4.1.3. Reaktörde ana üretim	32
4.2. Motor Test Düzenegi ve Yöntemi.....	36
4.2.1. Motor performans hesaplamaları	39

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	42
5.1. Biyodizel Özellikleri	42
5.2. Motor Performans Ölçüm Sonuçları	43
5.3. Motor Emisyonları Ölçüm Sonuçları	48
6. SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Türkiye'nin petrol üretim ve tüketimi	2
Şekil 3.1	Transesterifikasyon işlemi genel şeması	13
Şekil 3.2	Trigliseritlerin alkol ile transesterifikasyonu	14
Şekil 4.1	Manyetik karıştırıcıda metoksit karışımı oluşturma	28
Şekil 4.2	Manyetik karıştırıcıda ısıtma ve karıştırma	29
Şekil 4.3	Biyodizel ve gliserin faz ayrımı	30
Şekil 4.4	Gliserinin alınması	31
Şekil 4.5	Yıkama işlemine tabi tutulan biyodizel	32
Şekil 4.6	Biyodizel reaktörü	33
Şekil 4.7	Biyodizel reaktörü	34
Şekil 4.8	Deney sisteminin şematik resmi	37
Şekil 4.9	Deney sisteminin fotoğrafı	37
Şekil 4.10	Emisyon cihazları	39
Şekil 5.1	Biyodizel yakıtlar ve dizel yakıtının dinamik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi	43
Şekil 5.2	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının moment değerleri	44
Şekil 5.3	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının güç değerleri	44
Şekil 5.4	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının yanma sonucu egzoz gazı sıcaklıkları	46
Şekil 5.5	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında yağlama yağı sıcaklıkları	46
Şekil 5.6	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında özgül yakıt tüketimi	47
Şekil 5.7	Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında termik verim	48
Şekil 5.8	Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen duman emisyonları	49
Şekil 5.9	Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen CO emisyonları	50
Şekil 5.10	Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen CO ₂ emisyonları	51
Şekil 5.11	Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen O ₂ emisyonları	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	Dünyada yağlı tohum ve bitkisel yağ üretimi miktarları	3
Çizelge 1.2	Türkiye’de yağlı tohum bitkilerinin ekim alanları ve üretim miktarları	4
Çizelge 2.1	Dizel yakıt No.2 özellikleri (ASTM D 975)	7
Çizelge 3.1	Biyodizel yakıt özellikleri (ASTM D 6751)	22
Çizelge 3.2	Biyodizel yakıt özellikleri (EN 14214)	23
Çizelge 4.1	Numune üretimlerinde ve reaktörde üretimlerde kullanılan yağ, metil alkol, NaOH miktarları	28
Çizelge 4.2	Deney motorunun teknik özellikleri	38
Çizelge 5.1	Dizel yakıtı ve biyodizel yakıtların yoğunlukları ve kinematik viskoziteleri	42

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

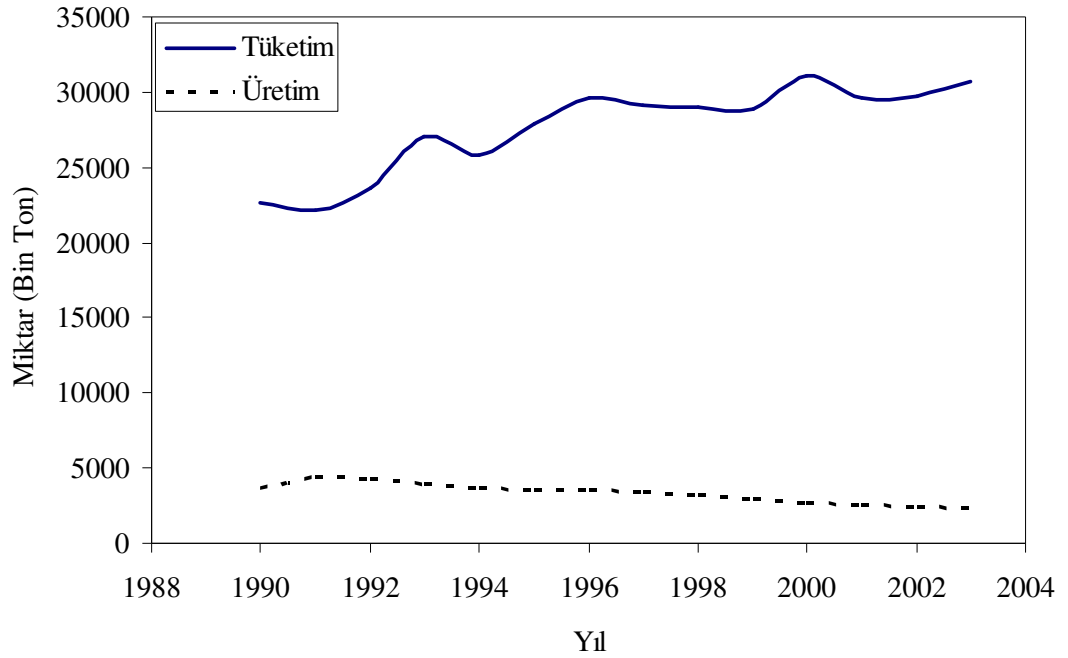
- C : Nötr pamuk yağı
- C100 : %100 biyodizel (nötr pamuk yağından üretilen)
- C20 : %20 biyodizel (nötr pamuk yağından üretilen) - %80 dizel No:2 yakıtı karışımı
- D100 : Dizel No.2 yakıtı
- F : Dinamometreye etki eden kuvvet (N)
- Hu : Alt ısııl değer (kJ/kg)
- k : Transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılacak katalizör miktarı (g)
- L : Motor deney sisteminde kuvvet kolu uzunluğu (m)
- \dot{m} : Kütleli debi (gr/s)
- η : Termik verim
- ÖYT : Özgül yakıt tüketimi (g/kW h)
- P : Güç (kW)
- ρ : Yoğunluk (kg/m³)
- Q : Hacimsel debi (ml/s)
- R : Ham kanola yağı
- R100 : %100 biyodizel (ham kanola yağından üretilen)
- R20 : %20 biyodizel (ham kanola yağından üretilen) - %80 dizel No:2 yakıtı karışımı
- T : Moment (Nm)
- w : Açısız hız (rad/s)
- W : Atık yağ
- W100 : %100 biyodizel (atık yağdan üretilen)
- W20 : %20 biyodizel (atık yağdan üretilen) - %80 dizel No:2 yakıtı karışımı

1. GİRİŞ

Dünyada enerji ihtiyacı büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlarla karşılanmaktadır. Bununla birlikte, bilinen petrol rezervlerinin belirli bölgelerde toplanmış olması ve bu bölgelerdeki siyasi ve ekonomik istikrarsızlıklar, bu rezervlerin hızla azalması, petrol ürünlerinin temininde zorluklar ve petrol fiyatlarının devamlı değişkenliği, ayrıca yanma sonucu ortaya çıkan başta CO₂ gibi gazların küresel ısınmaya, SO_x ve NO_x gibi zararlı emisyonların asit yağmurlarına ve hava kirliliğine sebep olmaları gibi olumsuzluklar yenilenebilir alternatif enerji kaynakları ve yakıtları üzerine araştırmaları teşvik etmektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency, EIA) da başta Çin olmak üzere OECD ülkeleri dışında kalan diğer ülkelerde hızlı büyümeler kaydedildiğini ve dolayısı ile petrol tüketiminin hızla arttığını belirlemiştir (Körbitz 1999). Ülkemiz de petrol ihtiyacının büyük çoğunluğunu ithal etmektedir. Yıllara göre petrol üretim ve tüketim miktarlarımız Şekil 1.1’de verilmiştir.

Dünyada ulaşım sektöründe kullanılan fosil yakıtlar önemli bir oranı teşkil etmekte ve ulaşım sektörünün küresel ısınmadaki ve hava kirliliğinin oluşmasındaki payı giderek artmaktadır. Bu sektörde kullanılan yakıtlar içinde en çok kullanılanı dizel yakıttır ve her geçen yıl dizel yakıtın kullanım oranı artmaktadır. Dizel motorlardan kaynaklanan zararlı emisyonları azaltmak ve dizel yakıtına alternatif yenilenebilir yakıtlar geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Özellikle bitkisel yağların dizel motorlarda kullanımı üzerine çalışmalar son zamanlarda hız kazanmıştır. EIA, ulaşım sektöründe kullanılacak yenilenebilir alternatif yakıtlara ihtiyaç duyulduğunu ve bunların en önemlilerinden birisinin de biyodizel olduğunu vurgulamaktadır. Avrupa Komisyonu da kademeli olarak 2020 yılına kadar biyoyakıtların kullanımının %12 oranlarına ulaşmasını hedeflemiştir (Körbitz 1999).



Şekil 1.1 Türkiye'nin petrol üretim ve tüketimi (ETKB, 2004)

Her ne kadar bitkisel yağların dizel motorlarda kullanımı yeni bir kavram olmayıp Rudolf Diesel'in dizel motoru keşfetmesinden ve yer fıstığı yağını yakıt olarak kullandığı ilk dizel motorunu 1900 yılında "Paris Fuarı"nda tanıtmasından beri bilinmesine rağmen, petrolün bolluğu, bitkisel yağlara göre daha ucuz olması ve bitkisel yağların kullanımında ortaya çıkan bazı problemlerden dolayı bitkisel yağların yaygın kullanımına geçilememiştir (Demirbaş 2002). Bitkisel yağların doğrudan herhangi bir işlem görmeden dizel motorlarda kullanılması motorlarda tam yanmanın gerçekleşmemesi, motorda tortu oluşumu ve enjeksiyon sisteminde tıkanmalar gibi önemli problemlere neden olmaktadır (Raneses vd 1999). Bu problemler bitkisel yağlara uygulanan farklı ısıl ve kimyasal yöntemlerle aşılmaya çalışılmaktadır.

Bu yöntemler içinde en önemli olan, genel olarak bitkisel yağların bir baz ve/veya asit katalizör kullanımıyla, etil ve metil alkol gibi kısa zincirli bir alkol ile transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda üretilen bitkisel yağ esteri olan ve biyodizel diye adlandırılan dizel motor yakıtının elde edilmesidir (Demirbaş 2003).

Biyodizel üretiminde hammadde olarak farklı bitkisel yağlar (Altın vd 2001, Agarwal ve Das 2001, Crabbe vd 2001, Körbitz 2002, Pramanik 2003, Usta 2005) ve kullanılmış atık bitkisel yağlar (Alcantara vd 2000, Gonzalez Gomez vd 2000, Özaktaş 2000, Al-Widyan ve Al-Shyoukh 2002, Al-Widyan vd 2002, Dorado vd 2003, Tomasevic ve Siler-Marinkovic 2003) kullanılmaktadır. Hayvansal yağlardan biyodizel üretimi üzerine az oranda çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca son zamanlarda yemeklik yağ üretimi yan ürünü olan sabun stoklarından da biyodizel üretimi üzerine çalışmalar devam etmektedir (Haas vd 2000, Haas vd 2001, Haas ve Foglia 2002, Haas vd 2003, Graboski vd 2003, Usta vd 2005). Biyodizelin kalitesi hammadde olarak kullanılan yağın özelliklerine bağlı olmakla birlikte üretim tekniğine de bağlıdır (Özaktas vd 1997, Ma ve Hanna 1999, Karaosmanoğlu 1999, Agarwal ve Das 2001, Demirbaş 2002, Demirbaş 2003).

Dünyada yağlı tohum ve bitkisel yağ üretimi miktarları Çizelge 1.1’de verilmektedir. Dünyada genel olarak biyodizel üretiminde en çok kullanılan ham bitkisel yağ kanola yağdır (Körbitz 2002). Türkiye’deki yağlı tohum bitkilerinin ekim alanları ve üretim miktarları ise Çizelge 1.2’de verilmektedir.

Çizelge 1.1 Dünyada yağlı tohum ve bitkisel yağ üretimi miktarları (TAGEM 2004)

Dünyada Yağlı Tohum Üretimi (Milyon Ton) 2003/2004		Dünyada Bitkisel Yağ Üretimi Miktarı (milyon ton) 2003/2004	
Soya	194	Soya Yağı	30,59
Palmiye Tohumu	143	Palm Yağı	25,96
Yer Fıstığı	35	Kolza (Kanola) Yağı	12,32
Pamuk Çiğidi	34	Ayçiçeği Yağı	8,31
Kolza (Kanola)	32	Pamuk Yağı	3,51
Ayçiçeği	24		
Toplam Üretim	328		

Ülkemizde toplam arazinin sadece %33,13’ü işlenmekte ve işlenmeyen arazi içinde %2,91 oranında tarıma elverişli olduğu halde kullanılmayan arazi bulunmaktadır (DİE 2004). Tarıma elverişli ama kullanılmayan arazilerde yağ bitkileri ekiminin sağlanması ile hem yemeklik bitkisel yağ hem de biyodizel üretimi için hammadde ihtiyacı karşılanabilir.

Bu yolla Türk tarımının canlandırılması, yeni iş sahaları açılması ve işsizliğin azaltılması ile milli gelir arttırılabilecektir (Ulusoy ve Tekin 2005).

Çizelge 1.2 Türkiye’de yağlı tohum bitkilerinin ekim alanları ve üretim miktarları (TAGEM 2004, FAOSTAT 2005)

YAĞLI TOHUM	2001*		2002*		2003**		2004**	
	Ekim Alanı (Ha)	Üretim (Ton)	Ekim Alanı (Ha)	Üretim (Ton)	Ekim Alanı (Ha)	Üretim (Ton)	Ekim Alanı (Ha)	Üretim (Ton)
Pamuk Çiğidi	684665	1353888	721077	1457122	711000	1300000	725000	1425000
Ayçiçeği	510000	650000	550000	850000	470000	800000	520000	650000
Susam	50000	23000	48000	22000	50000	22000	50000	22000
Kanola	290	650	550	1500	650	1000	650	1000
Soya	17000	50000	25500	75000	15000	65000	17000	50000
Yer Fıstığı	27000	72000	33000	90000	30000	85000	30000	85000
Aspir	35	25	40	25	30	170	30	170

* (TAGEM, 2004)

** (FAOSTAT, 2005)

Biyodizelin yaygınlaşması ve pratik hayata geçmesi için büyük şirketler tarafından üretilmesi ve satılması yanında, bazı ülkelerde uygulanan ve Türkiye için de önerilen tarım kooperatifleri modeli incelenmelidir. Bu modelde köylüler ortaklaşa kuracakları kooperatifler bünyesinde oluşturulacak küçük kapasiteli biyodizel tesisleri ile kendi kullanacakları yakıtı kendileri üretebilir. Farklı ürün ekimi yapılsa bile tarlaların belli bir bölümüne yağ bitkisi ekilebilir. Bu şekilde tarım sektöründe en büyük maliyetlerden birini oluşturan yakıt sorunu giderilmiş olacaktır. Bununla birlikte kooperatiflerce küçük ölçekli yapılan üretimde biyodizelin kalitesi istenilen ölçüde olmayabilir ve motorlara zarar verebilir. Bu durum tarım kooperatifi modelinde karşılaşılabilecek en önemli problemlerden biridir.

Dünyada biyodizel üretiminin en çok olduğu yer Batı Avrupa'dır ve burayı Kuzey Amerika takip etmektedir. Dünyada biyodizel üretimi 1999 yılından itibaren hızlı bir ivmelenme ile artış göstermektedir. Biyodizelin kullanımı yaygınlaştıkça zamanla üretim teknolojileri geliştirilmiş, çeşitli ülkelerde kalite standartları oluşturulmuştur. Bu gelişim sürecinde belirli oranlara kadar biyodizel yakıt kullanımı motor üretici firmalar tarafından da garanti altına alınmaktadır (Körbitz 2002).

Dizel motorlarda belirli oranlarda biyodizel kullanımı motor yapısına, çalışma şartlarına ve biyodizelin özelliklerine bağlı olarak motor performans ve emisyonlarında farklı etkiler ortaya koymaktadır (Graboski ve McCormick 1998, Özaktaş 2000, Agarwal ve Das 2001, Altın vd 2001, Çanakçı ve Gerpen 2001, Al-Widyan vd 2002, Kalligeros vd 2003, Usta 2005, Usta vd 2005). Bitkisel yağlardan elde edilen biyodizellerin ısı değerleri dizel yakıtı göre yaklaşık %10 daha az olmasına rağmen, güçte beklenen düşüş bir miktar yüksek yoğunluk ile kısmen karşılanabilmektedir. Biyodizel-dizel karışımlarında özgül yakıt tüketiminde az bir oranda artış olsa da termik verim dizel yakıt ile elde edilen değere çok yakın olmaktadır.

Biyodizellerin en önemli avantajlarından birisi de zararlı emisyonları azaltıcı özelliğe sahip olmalarıdır (Graboski vd 2003). CO ve partikül madde miktarında azalma (Schumacher vd 1993, Graboski ve McCormick 1998, Çanakçı ve Gerpen 2001, Monyem ve Van Gerpen 2001, Hofman ve Solseng 2002, Makareviciene ve Janulis 2003), biyodizel içerisinde kükürt oranının çok düşük olmasından dolayı SO₂ emisyonunda düşme tespit edilmiştir (Gonzalez Gomez 2000, Usta 2005, Usta vd 2005). NO_x emiyonlarında ise genel olarak az bir oranda artış görülmektedir (Schumacher vd 1993, Gonzalez Gomez vd 2000, Monyem ve Van Gerpen 2001, Hofman ve Solseng 2002, Usta 2005, Usta vd 2005).

2. DİZEL MOTORLAR VE YAKITLARI

2.1. Dizel Motorlar

Sıkıştırma ateşlemeli (dizel) motorlarda, silindir içindeki yüksek basınç ve sıcaklıktaki hava içine püskürtülen yakıtın damlacıklara ayrılması, buharlaşması ve tutuşması ile yanma başlamakta, ve difüzyon alevi (heterojen yanma) şeklinde devam etmektedir.

Dizel motorlar, yakıt oluşturma şekli yönünden Direk Püskürtmeli Motorlar (Direct Injection Engine – DI) ve Endirek Püskürtmeli Motorlar (Indirect Injection Engine – IDI) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Endirek püskürtmeli motorlarda bir ön yanma odası bulunmakta ve bu oda dar bir geçit ile ana yanma odasına bağlanmaktadır. Sıkıştırma zamanı sırasında, silindirden ön yanma odasına doğru oluşan hava geçişi, ön yanma odasında yüksek derecede hava hareketi oluşturur. Bu hava hareketi yakıtın ön yanma odasına püskürtülmesi ile hava-yakıt karışımının çok hızlı oluşmasını sağlar ve yanma ön yanma odasında başlar. Ön yanma odasında meydana gelen yanmanın oluşturduğu yüksek basınç ve sıcaklık ile yanma ana yanma odasında devam eder. Direk püskürtmeli motorlarda ise yanma odası bölünmemiştir ve genel olarak piston yüzeyine açılmış bir oyuk bulunmaktadır. Bu oyuk iyi yanma için gerekli hava hareketlerinin oluşmasına kolaylık sağlamaktadır. Bazı motorlarda hava hareketlerini iyileştirmek için emme kanalına da helisel bir şekil verilmektedir. Emme esnasında helisel giriş kanallarından geçen hava dönme hareketi yapar ve bu hareket sıkıştırma sırasında piston üzerindeki oyuk tarafından kuvvetlendirilir. Yakıt enjektör vasıtasıyla yüksek basınç altında yanma odası içine püskürtülür ve yanma burada başlayarak devam eder. Dizel motorlarda yanma ile ilgili detaylı bilgiler ve yanmaya etki eden faktörler Heywood 1988, Staudt 2003 ve Safgönül vd 1995’de bulunmaktadır.

Direk püskürtmeli motorlar, indirek püskürtmeli motorlara nazaran daha yüksek verimli ve yakıt tüketiminin daha az olması ile son zamanlarda daha çok tercih edilmektedir. Bununla birlikte, indirek püskürtmeli motorlar, direk püskürtmeli motorlara göre yakıt kalitesine daha az duyarlıdır (Knothe vd 1996).

2.2. Dizel Yakıt No.2 Özellikleri

Genel olarak dizel yakıtı ASTM tarafından (ASTM D 975) No.1, No.2 ve No.4 şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ulaştırma sektöründe dizel motorlarda yakıt olarak dizel No.2 kullanılmaktadır. Biyodizel de genel olarak bu yakıt ile karşılaştırılır (Knothe vd 1996). Dizel yakıt No.2'nin genel özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir. Dizel yakıt ile ilgili bazı önemli özellikler hakkında aşağıda bilgi verilmektedir.

Çizelge 2.1 Dizel yakıt No.2 özellikleri (ASTM D 975)

Yakıt Özelliği	Değer
Kinematik viskozite (mm ² /s, 40 °C de)	1,9 – 4,1
Yoğunluk (kg/m ³ , 15°C de)	0,85
Su ve tortu miktarı (% hacimce, mak.)	0,05
Toplam kükürt (% kütlece, mak.)	0,05
Alevlenme Noktası (°C, min.)	52
Bulutlanma noktası (°C)	(-15) – 5
Setan Sayısı	40-55
Kül (% kütlece)	0,01

2.2.1. Kinematik viskozite

Viskozite akışkanların akmaya gösterdiği direnç olup, dizel motorlarının özellikle yakıt besleme ve enjeksiyon sistemlerinde önemli bir parametredir. Viskozitenin yüksek olması atomizasyonu olumsuz yönde etkilemektedir. Viskozite küçüldükçe borulardaki akış direnci azalmakta, püskürtme ile oluşan yakıt demeti içindeki yakıt damlacık çapları küçülmektedir. Dolayısıyla motorda yanma iyileşmekte ve duman emisyonları miktarı da

azalmaktadır. Bununla birlikte enjeksiyon sistemlerinin ana elemanları yakıt ile yağlandığından viskozitenin belirli bir değerden daha aşağı olmaması gerekir. Ayrıca viskozitenin çok düşük olması püskürtme sistemindeki kaçakları arttırmaktadır (Safgönül vd 1995).

2.2.2. Yoğunluk

Yoğunluk birim hacimdeki yakıtın kütle miktarı olup, yakıtın yapısı, karbon-hidrojen miktarı, yakıtın parçalanması ve tutuşma kabiliyeti ile ilgili ön bilgi verir. Dizel motorlarda enjeksiyon sistemleri yakıtı hacimsel bazda gönderdikleri için yakıtın özgül kütlesi, motor içine gönderilen yakıtın kütle miktarını doğrudan etkiler. Moleküller içindeki hidrojen sayısı arttıkça genel olarak özgül kütle azalmaktadır.

2.2.3. Su ve tortu miktarı

Yakıtın temizliğini gösteren önemli bir parametredir. Yakıt içerisinde su, enjeksiyon sistemlerinde aşınma ve paslanmaya sebep olabildiği için yakıt içerisinde hiç su istenmez. Tortu ise filtrelerin tıkanmasına, enjeksiyon sisteminde birikerek tortulaşmaya ve diğer motor arızalarına neden olabilir (Gerpen vd 2004).

2.2.4. Toplam kükürt miktarı

Yakıt içinde bulunan kükürt yanma reaksiyonu sonunda SO_2 'e dönüşür, SO_2 'de su ile reaksiyona girerek H_2SO_4 (Sülfirik asit) oluşturur. Bu asidin motor içinde ve egzoz sisteminde yoğunlaşması korozyona neden olur. Ayrıca kükürdün neden olduğu SO_2 emisyonları ve bu emisyon nedeni ile oluşan sülfirik asit, doğaya ve insan sağlığına zararlı materyallerdir. Bu yüzden yakıt içerisinde kükürt oranının az olması istenir.

2.2.5. Alevlenme noktası

Yakıt buharının açık alev ile temas ettiğinde bir an için alev aldığı sıcaklığa alevlenme noktası denir (Safgönül vd 1995). Yüksek alevlenme sıcaklığı depolama ve taşıma güvenliği şartlarını kolaylaştırmaktadır.

2.2.6. Bulutlanma noktası

Bulutlanma noktası sıvıların soğutulduğunda kristalleşmesinin ilk görülmeye başladığı sıcaklığı gösterir. Yakıtın sıcaklığı bu sıcaklığın altına daha da düşmeye devam ederse yakıt jelleşerek yavaş yavaş akış durmaktadır. Buna ek olarak yakıtın hiç kristalleşme olmadan akabildiği en düşük sıcaklığa akma noktası sıcaklığı denir. Bu değerler yakıtların soğukta çalışma özelliklerinin önemli bir göstergesidir.

2.2.7. Setan sayısı

Setan sayısı dizel yakıtların tutuşma meylinin ve tutuşma gecikmesinin bir ölçüsüdür. Dizel motorlarda yüksek basınç ve sıcaklıktaki hava içine püskürtülen yakıtın kendi kendine tutuşabilmesi için dizel yakıtların tutuşma meyillerinin yüksek olması gerekir. Tutuşma meylinin düşük olması tutuşma gecikmesinin artmasına, tutuşma gecikmesinin artması yanma odasında biriken ve ani olarak yanan yakıt miktarının artmasına dolayısıyla mekanik zorlanmalara neden olan yüksek basınçların oluşmasına (dizel vuruntusu) neden olmaktadır. Setan sayısının çok yüksek olması ise tutuşma gecikmesini azaltmakta ve enjektörlere çok yakın yerde yanma başlangıcı ile enjektörlerin tıkanmasına sebep olabilmektedir (Safgönül vd 1995).

2.2.8. Kül miktarı

Yakıt içerisinde yanmayan maddelerin miktarını gösterir. Kül miktarı motorun iç parçaları üzerinde zımpara gibi etki ettiğinden oldukça az oranda olması istenir.

2.2.9. Isıl değer

Yakıtın ısıl değeri birim hacminin veya kütlesinin verdiği enerji olarak tanımlanır. Motordaki yanma sonu egzoz gazı sıcaklıklarında su her zaman buhar olarak bulunduğundan dolayı ısıl değer olarak alt ısıl değer dikkate alınır (Safgönül vd 1995). Yakıt enerjisinin miktarının göstergesi olduğu için ısıl değerin büyük olması istenir.

2.2.10. Bakır korozyonu

Yakıtın bakır veya bakır içeren malzemeler üzerinde bıraktığı aşındırma etkisinin bir göstergesidir. Esas olarak yakıt içerisindeki asit miktarını ifade etmektedir (Gerpen vd 2004).

2.2.11. Karbon kalıntısı

Petrol kaynaklı ürünlerde, ısıl ayrıştırmaya maruz bırakılınca çıkan uçucu gazların geri kalan karbon kalıntısını gösterir (Gerpen vd 2004). Bu artıklar ne kadar fazla olursa motorda aşınma o oranda artar.

3. BİYODİZEL

3.1. Biyodizel

Bitkisel yağların, petrol kaynaklı dizel yakıt ile rekabet edebilecek alternatif yakıt şeklinde değerlendirilmesi, öncelikli olarak motorlarda doğrudan kullanılması yönünde olmuştur. Ancak, bitkisel yağların doğrudan dizel motorlarda kullanımı biyodizelin getirdiği bazı avantajları sağlasa da yüksek viskozite, düşük uçuculuk ve doymamış hidrokarbon zincirlerinin reaktivasyonundan dolayı, özellikle uzun süreli çalışmalarda enjektörlerin tıkanması ve yağlama yağının bozulması gibi problemler oluşturmaktadır. Bitkisel yağların viskoziteleri oldukça yüksek olup, standart No.2 dizel yakıtının viskozitesinin 10-20 katı mertebelerinde olabilmektedir. Hatta hint yağının viskozitesi dizel yakıtın 100 katı kadardır. Yüksek viskozite de yakıtın püskürtülmesinde oldukça olumsuzluklara sebep olmaktadır (Demirbaş 2003).

Bitkisel yağların dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilmesi için motorlarda değişiklikler yapılması yerine yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilerek, dizel yakıt No.2'ye yaklaştırılması tercih edilmektedir. Yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarında ısıl ve kimyasal olmak üzere iki genel yaklaşım bulunmakla birlikte, kimyasal yöntem daha çok tercih edilmektedir. Kimyasal yöntemde kendi arasında seyreltme (inceltme), mikroemülsiyon oluşturma, proliz (ayırıştırma) ve transesterifikasyon (yeniden esterleştirme) olmak üzere dörde ayrılmaktadır (Ma ve Hanna 1999).

Seyreltme bitkisel yağların belirli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak kullanıldığı bir yöntemdir. Karışım oranı karışım yakıtın özelliklerinin standartlar içinde kalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Mikroemülsiyon oluşturma metodunda metil alkol ve etil alkol gibi sıvılarla mikroemülsiyonlar oluşturularak, özellikle viskozitede önemli azalmalar olmaktadır. Piroliz yönteminde ise bitkisel yağlar oksijensiz ortamda ısıl bozunmaya tabii tutularak alkanlar, alkenler, alkadienler, karboksilikasitler, aromalar ve

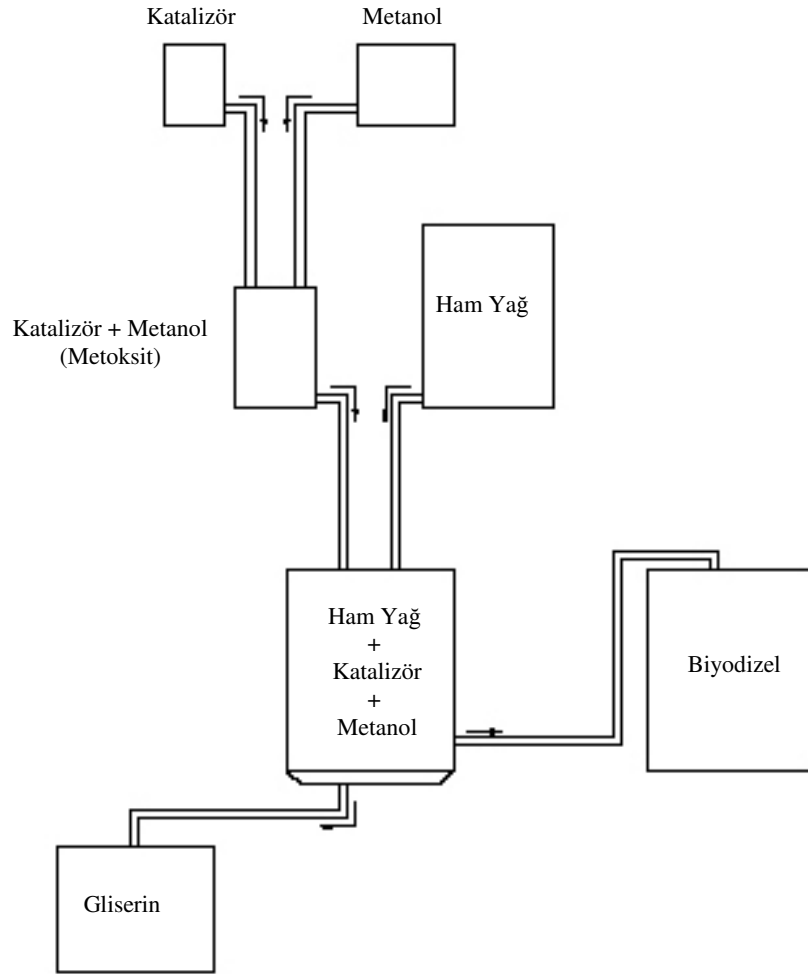
küçük miktarda gazlar ortaya çıkarılmaktadır. Bu yöntem ile ortaya çıkan ağır hidrokarbonların kimyasal bileşimlerinin, petroldeki hidrokarbonlar ile benzer özelliklere sahip olduğu ortaya konmaktadır (Demirbaş 2003). Genel olarak kullanılan ve bu çalışmada da tercih edilen transesterifikasyon yöntemi aşağıda daha detaylı olarak açıklanmaktadır.

3.1.1. Transesterifikasyon yöntemi

Alkoliz reaksiyon olarak da bilinen transesterifikasyon işlemi bitkisel yağ ve bir alkolün, katalizör eşliğinde reaksiyona girerek yağ asidi alkol esterleri ve gliserin oluşturmasıdır. Oluşan alkol esterine biyodizel denilmektedir. Yöntemler arasında en çok bilinen ve kullanılan, bu çalışmada da tercih edilen yöntem bu yöntemdir. Transesterifikasyon işleminin genel şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Öncelikle alkol ve katalizör bir karışım tankında karıştırılır. Reaktöre ham yağ alınarak yaklaşık 55 °C’ ye ısıtılır. Isınan yağ üzerine hazırlanan alkol-katalizör karışımı dökülür ve karıştırılır. Beklemeye alınan karışımda yoğunluk farkları sebebi ile alkol esteri (biyodizel) üstte kalır, gliserin dibe çöker. Dibe çöken gliserin alt taraftan tahliye edilir. Ayrıştırılan biyodizel içinde belirli miktarlarda gliserin kalma ihtimaline karşı 30-35 °C sıcaklıkta ılık su ile yıkanır. Artık gliserin su ile temas ederek suya bulaşır, faz farkından dolayı dibe çöker ve daha sonra tahliye edilir. Bununla birlikte biyodizelin içinde kalması muhtemel az bir miktardaki su da ısıtma ile buharlaştırılarak biyodizelden uzaklaştırılır.

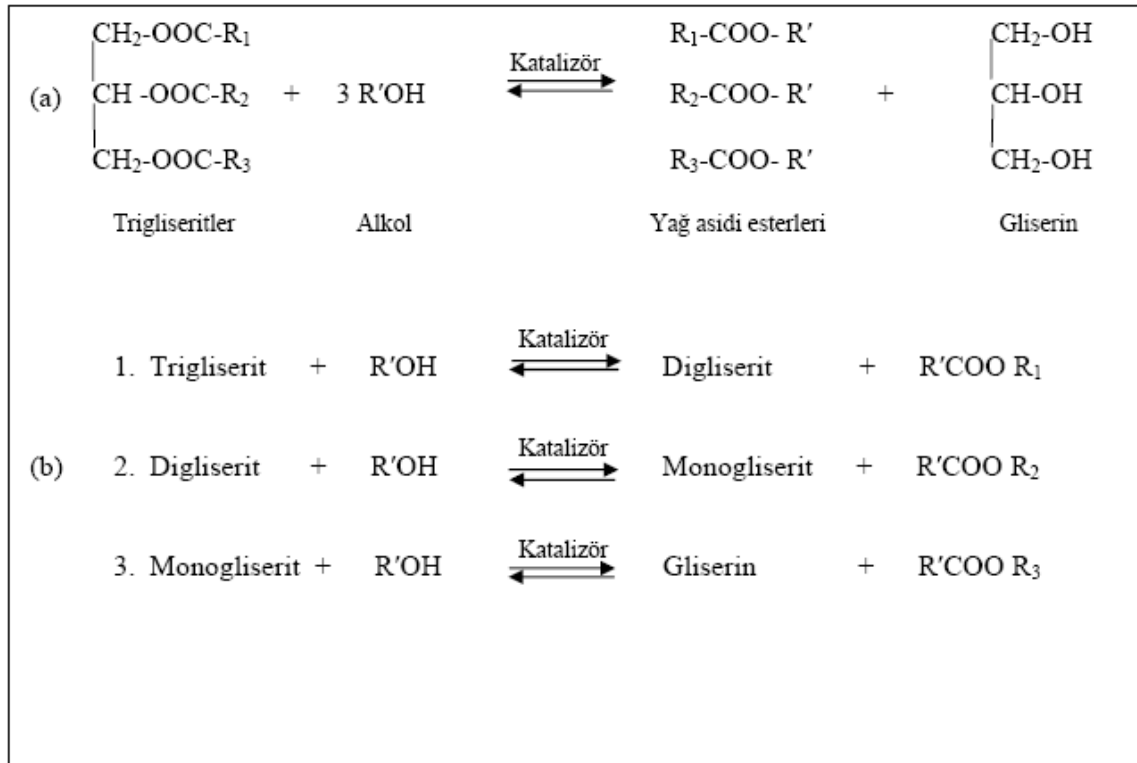
Genel transesterifikasyon reaksiyonu şeması ve reaksiyonun basamakları Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Öncelikle trigliseridler digliseridlere dönüşmekte, bunu sırasıyla digliseridlerin monogliseridlere ve monogliseridlerin de gliserole dönüşmesi takip etmektedir. Her basamakta gliseridlerden bir ester molekülü oluşmaktadır (Fukuda vd 2001).



Şekil 3.1 Transesterifikasyon işlemi genel şeması

Reaksiyonda kullanılabilen alkoller metil alkol, etil alkol, propanol ve butanol olabilmektedir. Bununla birlikte bunlardan pratikte en sık kullanılanları metil ve etil alkoldür. Etil alkol, tarımsal ürünlerden elde edilebilen yenilenebilir bir kaynak ve ekolojik denge içerisinde biyolojik olarak daha kabul edilebilir olması nedeni ile metil alkole karşı daha avantajlı olmasına rağmen, metil alkolün daha ucuz olması ve daha kısa alkol zincirlerine sahip olması gibi kimyasal ve fiziksel avantajları vardır.

Reaksiyonda kullanılan katalizörlerin görevi, reaksiyon hızını ve verimini arttırmaktır. Transesterifikasyon reaksiyonunda başlıca alkali, asidik ve enzimatik katalizörler kullanılmaktadır. Aşağıdaki kısımlarda bunlar ayrı ayrı açıklanacaktır.



Şekil 3.2 Trigliseritlerin alkol ile transesterifikasyonu (a) Genel Denklem, (b) Tersinir basamak reaksiyonları (R', R₁, R₂, R₃ alkil gruplarını temsil etmektedir) (Fukuda vd 2001)

3.1.1.1 Alkali katalizörler ile transesterifikasyon

Transesterifikasyonda kullanılan alkali katalizörler genel olarak NaOH, KOH, ve karbonatlardır. Alkali katalizörler, aynı miktarda asidik katalizör ile gerçekleşen reaksiyondan yaklaşık olarak 4000 kat daha hızlıdır. Bu nedenle serbest yağ asitlik değeri yüksek olmayan yağların kullanıldığı ticari uygulamalarda çoğunlukla alkali katalizörler kullanılmaktadır (Fukuda vd 2001). Alkali katalizörün kullanımında su ve bitkisel yağ içerisindeki serbest yağ asitlerinin miktarı çok önemlidir. Bitkisel yağ kesinlikle sudan arındırılmış olmalı ve su içermeyen saf alkoller kullanılmalıdır. Çünkü su reaksiyonu kısmen değiştirerek sabunlaşmaya neden olabilir. Sabun ise katalizörün reaksiyondaki katalitik etkisini azaltır ve viskozitenin yükselmesi ile jelleşmeye neden olur. Bu sebeple hem ürün verimi düşer, hem de gliserinin ayrıştırılması güçleşir. Serbest yağ asitleri de alkali katalizör ile reaksiyona girerek sabun ve su oluşumuna sebep olurlar. Bu nedenle

alkali katalizör eşliğinde gerçekleşen transesterifikasyon reaksiyonunun başarılı sonuçlanabilmesi ve ticari anlamda geçerli bir yöntem olabilmesi için bitkisel yağın serbest yağ asitleri miktarının ağırlıkça % 0,5'inin altında olması ve kullanılan alkolün de su içermiyor (mutlak) olması gerekir (Zhang vd 2003, Fukuda vd 2001).

Atık kızartma yağlarının hammadde olarak kullanıldığı uygulamalarda bu sınırlama özellikle ön plana çıkmaktadır. Genel olarak atık kızartma yağlarının serbest yağ asitleri miktarının ağırlıkça % 2'nin üzerine çıktığı belirlenmiştir. Bu durumda alkali katalizör kullanımından önce serbest yağ asidi oranlarının azaltılması gerekmektedir. Bunun için tavsiye edilen yöntemlerden birisi, yağın sülfirik asidin katalizörlüğü eşliğinde metil alkol ile esterleştirilmesidir. Bu yöntem ile yağın içindeki serbest yağ asitleri miktarı % 0,5 oranının altına indirilebilir (Zhang vd 2003, Shimada vd 2002).

Alkali katalizörle gerçekleştirilecek reaksiyonun verimine etki eden diğer bir önemli nokta alkol ve bitkisel yağın molar oranıdır. Stokiyometrik transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için her bir mol trigliserid molekülü için üç mol alkol gerekir (Fukuda vd 2001). Bu reaksiyon sonunda üç mol ester ile 1 mol gliserin oluşması beklenir. Bununla birlikte yüksek mol oranları ile daha kısa zamanda daha fazla ester dönüşüm verimi temin edilmektedir. Soya yağı, ayçiçek yağı, yer fıstığı yağı ve pamuk yağı gibi farklı bitkisel yağlar kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda en yüksek esterleşme miktarına (6:1) mol oranında ulaşılmıştır (Fukuda vd 2001). Endüstriyel uygulamalarda alkali katalizör olarak, ucuz olması nedeni ile çoğunlukla sodyumhidroksit ve potasyumhidroksit tercih edilmektedir.

3.1.1.2 Asidik katalizörler ile transesterifikasyon

Asidik katalizör ile gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu bitkisel yağ içerisinde bulunan serbest yağ asidi ve su miktarından etkilenmemektedir. Ancak asidik katalizörler ile transesterifikasyon alkali katalizörlere göre oldukça yavaş gerçekleşmektedir. Sülfirik asit, fosforik asit ve hidroklorik asitler asidik katalizör olarak kullanılan asitlerdendir (Fukuda vd 2001). Asidik katalizör kullanımı ile reaksiyon süresi

uzamasına rağmen, hammaddenin serbest yağ asidi miktarından etkilenmemesi, alkali katalizörlere göre su miktarına daha az duyarlı olması ve bu özellikleri sonucunda da ayrıca bir ön işlem gerektirmemesi asidik katalizör yönteminin en önemli avantajlarından. Bu avantajlar özellikle atık yemeklik yağların ve sabun stoklarının hammadde olarak kullanılması durumunda büyük önem taşımaktadır.

3.1.1.3 Enzimatik katalizörler ile transesterifikasyon

Bu yöntemde diğer iki yöntemden farklı olarak lipaz (lipase) adı verilen ve gliseritleri hidrolize etme kabiliyeti olan enzimler kullanılır. Öncelikle trigliseritler lipazlar ile hidroliz edilerek, gliseritlere ve serbest yağ asitlerine dönüştürülürler. Daha sonra da bu serbest yağ asitleri ve metil alkol ile metil ester meydana getirilir. Bu yöntem kullanımında alkali katalizör kullanımından dolayı oluşan birçok sorun oluşmaz. Bununla birlikte bu yöntem alkali ve asidik katalizörlerle gerçekleştirilen yöntemlere göre çok daha yüksek maliyetlidir, bu yüzden de ticari amaçla uygulanması zor görünmektedir (Fukuda vd 2001).

3.2. Dizel Motorlarda Biyodizel Kullanımı

Biyodizel, saf olarak (%100) veya belirli oranlarda (%5, %20, %40, %50 gibi) petrol kökenli dizelle karıştırılarak yakıt olarak dizel motorlarda kullanılabilir. Biyodizel-dizel karışımı ile oluşturulan yakıt, içerdiği biyodizel oranına göre B5, B20, B40, B50, B100 olarak adlandırılır. Biyodizel kimyasal yapısı nedeni ile kauçuk malzemelerde bozunmaya neden olabilmektedir. Bu sebeple, bu tür malzemenin kullanıldığı genel olarak 1996 yılından önce üretilen dizel motorlarda biyodizelin saf olarak kullanılması önerilmemektedir. Saf biyodizel ve dizel-biyodizel karışımları genel olarak 1996 model ve üzeri dizel motorlarda, motor üzerinde hiçbir değişikliğe gerek kalmadan kullanılabilir. Bununla birlikte yine de üretici firmanın tavsiyeleri dikkate alınmalıdır.

Bilindiği gibi bitkiler yetişirken fotosentez ile atmosferden CO₂ gazını alarak O₂ verirler. Biyodizel, bitkisel yağlardan üretildiği için yanması sonucu oluşan CO₂ gazları atmosferde fazladan CO₂ oluşturmamaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların kullanımında ise bu

yakıtların yanması sonucu oluşan CO₂ gazlarının %100'ü atmosferde CO₂ konsantrasyonunu artırır.

Yapılan araştırmalarda petrol kaynaklı dizel yerine B100 biyodizelin kullanılması halinde atmosfere eklenen CO₂ miktarında %78, B20 biyodizel yakıtının kullanılması halinde ise %15,66 oranında azalma olacağı belirlenmiştir (U.S. DOE 2004).

Biyodizel, ağırlıkça yaklaşık olarak % 10-11 oksijen içerdiğinden yakıtın zengin olduğu bölgede tam yanmanın oluşmasını temin ederek yanma sonucu oluşan is (karbon), karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarını azaltmaktadır Bununla birlikte NO_x emisyonunda bir miktar artış gözlenmektedir (U.S. DOE 2004, EPA 2002).

Dizel motorlarda biyodizel yakıtların kullanımı, genel olarak performans değerlerinde önemli değişimler olmadan, emisyon değerleri açısından olumlu sonuçlar vermektedir. anakcı ve Gerpen (2001) tarafından yapılan çalışmalarda, biyodizel kullanımı ile özgül yakıt tketimeinin ve termik verimin arttığı, CO, duman, yanmamış hidrokarbon emisyonlarında dizele göre azalmalar olduğu, NO_x emisyonlarında artış meydana geldiği, CO₂ emisyonlarının ise biyodizel karışım oranına göre artış veya azalış yönünde küçük değişimler kaydettiği belirtilmektedir. Gonzalez Gomez vd (2000) tarafından yüksek motor devirlerinde yapılan çalışmalarda da benzer olarak biyodizel kullanımı ile CO, duman, CO₂ emisyonlarında dizele göre azalmalar olduğu, NO_x ve O₂ emisyonlarında artış meydana geldiği görülmüştür. Ulusoy ve Tekin (2005)'in çalışmalarında biyodizel kullanımı ile güçte küçük bir azalma olurken, CO, partikül, yanmamış hidrokarbon emisyonları dizel yakıtı kullanımına göre azalmakta, NO_x ve CO₂ emisyonlarında artış meydana gelmektedir. Beggs (2001) tarafından, binek bir dizel araçla yapılan çalışmalarda ise g ve CO emisyonlarında dikkate değer bir değişiklik meydana gelmeden, duman emisyonlarının önemli miktarda azaldığı ancak doymamış hidrokarbon, CO₂ ve NO_x emisyonlarının küçük miktarlarda da olsa arttığı gözlenmiştir.

Biyodizel yakıtların emisyonları ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, biyodizel kullanımı ile genel olarak g, moment, yakıt tketimei gibi performans değerlerinde önemli

değişimler oluşmadan, CO, duman, yanmamış hidrokarbon emisyonlarında önemli miktarlarda azalmalar olabileceğini, ancak bunun yanında, NO_x ve CO₂ emisyonlarında ise bu azalmalara oranla daha küçük olsa da artış yönünde değişiklikler olabileceğini, O₂ emisyonunun artabileceğini ortaya koymaktadır.

Biyodizelin dizel motor ve yakıt sistemlerinde hemen hemen hiç bir değişiklik gerektirmeden kullanılması önemli bir avantajdır. Dizel yakıt satılan tanklara depolanabildiği gibi yine aynı pompadan satışı yapılabilmekte, dizel yakıt kullanan aracın yakıt tankına da rahatlıkla konulabilmektedir. Biyodizel taşımada ve depolamada normal dizel No.2 yakıttan daha emniyetlidir. Biyodizel normal çevre sıcaklığında zararlı buhar üretmez ve biyodizelin alevlenme noktası dizel yakıttan daha yüksektir. Biyodizelin ısı değeri motorinin ısı değeri yaklaşık %10 altındadır. Biyodizelin kaynağına ve uygulanan işlemlere bağlı olarak setan sayısı motorinin setan sayısının altında veya üstünde olabilmektedir. Dizel No.2 yakıtına göre çok daha iyi bir yağlama özelliğine sahip olan biyodizel motor aşınmalarını azaltır, motoru korur ve ömrünü uzatır. (U.S. DOE 2004)

3.3. Biyodizel Üretimi İçin Kaynaklar

Biyodizel ham bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan, kullanılmış atık kızartma yağlarından üretilebilmektedir. Ayrıca ham bitkisel yağların yemeklik yağ haline getirilmesi işlemi sonunda oluşan sabun stokları da biyodizel üretiminde kullanılabilir. Biyodizel üretiminde kullanılacak ham yağın, genel olarak yemeklik yağlar gibi rafinasyon, koku ve renk alma aşamalarından geçmesine gerek olmaması, biyodizel üretiminde maliyetleri azaltmaktadır.

Dünyada farklı toprak ve iklim şartlarında yetiştirilebilen bilinen 50'nin üzerinde yağ bitkisi bulunmaktadır. Biyodizel üretiminde kullanılacak bitkisel yağların yağ asitleri oranları, doymuş veya doymamış olmaları ürün kalitesini yakından etkilemektedir (Öğüt ve Oğuz 2005).

Bu çalışmada üç farklı kaynaktan biyodizel üretimi yapılmıştır. Bunlar kanola yağı, pamuk yağı ve kullanılmış kızartma yağıdır. Bu yüzden sadece bu yağlar ile ilgili bilgiler aşağıda verilmektedir.

3.3.1. Kanola

Kanola tohumunda %22-49 oranında yağ bulunduğu için bitkisel yağ üretimi açısından oldukça önemli bir bitkidir (Nas vd 2001). Kanola bitkisi kışlık ve yazlık olarak yetiştirilebilmektedir. Ülkemizde halihazırda kanola ekimi yaygın olarak yapılamamakla birlikte, genellikle kışlık kanola tarımı yapılmaktadır. Bununla birlikte devlet destekleri ile kanola tarımı yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır.

Kışlık kanola kışa girerken kuvvetli bir kök oluşturması ve rozetleşmesini tamamlamasını temin etmek için ekim ayı başında tavlı toprağa ekilmeli ve çıkışı sağlanmalıdır. Bu durumda kar altında -15 °C'ye kadar dayanabilmektedir. Ekim zamanında çimlenmenin iyi olabilmesi için toprak ısı en az 10-12°C olmalıdır. Kanola ekimi Trakya-Marmara, Ege, Güneydoğu Anadolu, Marmara, Orta Anadolu ve Karadeniz Bölgelerinde 15 Eylül-15 Ekim tarihinde yapılmalıdır. Kanola ülkemize Balkanlardan gelen göçmenler tarafından kolza adı ile 1960'lı yıllarda getirilmiş olup ilk olarak Trakya'da ekilmiştir. Fakat getirilen kolzanın yağında insan sağlığına zararlı erüsik asit, küspesinde de hayvan sağlığına zararlı Glukosinolat bulunması nedeniyle 1979 yılında ekimi yasaklanmıştır (Süzer 2004).

Zamanla kolza ıslah edilerek bu tür zararlı maddeleri içermeyen çeşitleri geliştirilmiş, bu çeşitlerin ilk önce Kanada'da ıslah edilmesi nedeniyle "canadian-oil" den gelen kanola adı verilmiştir. Kanola yağının yüksek erüsik asitli, düşük erüsik asitli ve sıfır erüsik asitli olmak üzere üç genel tipi tanımlanmaktadır (Nas vd 2001). Yenilebilir kanola yağında erüsik asit varlığı istenmemektedir.

Bir hektar araziden 2700-3000 kg civarında kanola tohumu alınabilmektedir. Tohumlardan yağ çıkarıldıktan sonra kalan kanola küspesi, % 30'un üzerinde protein

içerdiğinden iyi bir hayvan yemi olarak kullanılabilir (Öğüt ve Oğuz 2005). Buna ek olarak kışlık kanola bitkisi nisan ayından hasadının yapılacağı temmuz ayına kadar dört ay boyunca çiçekli olmasından dolayı arıcılık ve bal sektörü için de önemli bir bitkidir (Süzer 2004).

Kanola değerli küspesi ve hektar başına 1000 kg'ı aşan yağ verimi ile dünya yağ piyasasında ticari açıdan çok önemli bir yere sahip olmakla birlikte, içerdiği doymuş ve doymamış yağ asitlerinin oranları ve yapıları itibarı ile biyodizel üretimine en uygun hammaddelerden biridir. Dünya biyodizel üretimi hammaddelerinin yaklaşık %84'lük bölümünü kanola yağı oluşturmaktadır (Körbitz 2002).

3.3.2. Pamuk tohumu (Çiğit)

Ham pamuk yağı kendine özgü tadı ve kokusu olan, oldukça koyu renkli (kırmızı-kahverengi) bir yağdır. Pamuk üretiminin bir yan ürünü olan pamuk tohumu yağı dünyada yemeklik olarak kullanılan çok önemli yağlardan birisidir. Ülkemizde pamuk yağı genellikle sabun sektöründe ve margarin hammaddesi olarak katı yağ üretiminde kullanılmaktadır. Pamuk tohumu ortalama %15-24 oranında yağ içermektedir (Nas vd 2001).

Dünya'da yıllık pamuk tohumu üretimi 3,5 milyon ton civarındadır (TAGEM 2004). Çıırılanan çekirdekli pamuktan yaklaşık %60'ı pamuk tohumu (çiğit) olarak ayrılmaktadır. Çiğidin %7- %8'i tohumluk olarak kullanılmakta, geri kalan kısımda yağ sanayiinde hammadde olarak işlenmektedir (Kolsarıcı vd 2005).

Pamuk tohumunda bulunan aflatoksin ve gossipol maddeleri yağın yemeklik olarak kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak pamuk tohumları değişik türlere göre %0,13 – 6,64 oranlarında gossipol içerebilmekle birlikte, ülkemizde yetiştirilen çeşitlerinde %1,12 – 1,29 oranlarında gossipol bulunmaktadır. Yemeklik yağda bulunması istenmeyen gossipol yağa koyu bulanık bir renk vermektedir (Nas vd 2001). Pamuk tohumu

yağından gossipolü uzaklaştırmak ve yemeklik olarak kullanılabilme amacı ile gerekli ağartma prosesleri yağın maliyetini arttırmaktadır.

3.3.3. Atık Yağlar

Özellikle büyükşehirlerde binlerce lokanta, fastfood ve restoran, onlarca hazır yemek hazırlama merkezi ve yüzlerce otel/motel bulunmaktadır. Bu yerlerde dikkate değer miktarlarda atık yağlar ortaya çıkmaktadır.

Türkiye’de yılda 1,5 milyon ton bitkisel yağ gıda amacı ile kullanıldığı bilinmektedir. Bu yağdan yaklaşık olarak 350 bin ton atık yağ oluştuğu tahmin edilmektedir. Bu yağların bir kısmı piyasada yağ toplama işi yapan birkaç firma tarafından toplanmaktadır. Toplanan atık yağlar genel olarak arap sabunu veya hayvan yemi üretiminde kullanılmakla beraber son yıllarda ülkemizde de biyodizel üretiminde kullanılmaya başlamıştır (Öztürk 2004). Fast-food kültürünün en yaygın olduğu ülkelerden biri olan Amerika Birleşik Devletleri’nde restoranlardan yıllık ortalama 1,1 milyon ton atık yağ toplanmaktadır (Çanakcı ve Gerpen 2001).

Bu atık yağlar, suya ve kanalizasyona döküldüğü zaman su yüzeyini kaplar, havadan suya oksijen transferini önler ve zamanla suda bozunarak sudaki oksijenin tükenmesini hızlandırır. Bununla birlikte atık su arıtma tesisinin işletme maliyetini artırır, su kanal borularına yapışarak boru kesitinin daralmasına ve tıkanmasına neden olur. Kullanılmış bitkisel yağlar atık su kirliliğinin %25’ini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Denize, akarsuya ve göle ulaşan atık bitkisel yağlar, canlılara zarar vermektedir. Bu yüzden gelişmiş ülkelerde kullanılmış bitkisel ve hayvansal yağların kanalizasyona ve yüzeysel sulara dökülmesi yasaktır (Öztürk, 2004). Bununla birlikte atık bitkisel yağlar, biyodizel üretimi açısından en ucuz ham maddelerden biridir. Bu atıkların sabun sanayi yanında alternatif dizel yakıtı olarak değerlendirilmesi, hem yağların geri kazanılması ve hem de daha düşük emisyonlu dizel yakıtı üretilmiş olması bakımından, çevre sağlığına iki yönden de katkıda bulunmaktadır.

3.4. Biyodizellerin Genel Özellikleri

Biyodizel yakıtlarda, dizel yakıt No.2’de aranan özelliklerin yanında sadece biyodizelle özgün bazı özelliklerin de bulunması gerekmektedir. Biyodizel için farklı standartlar oluşturulmakla birlikte, ASTM (American Society for Testing and Materials) ve EN standartları en yaygın olarak değerlendirilmeye alınan standartlardır. ASTM D 6751’e göre biyodizel yakıtların (B100) sağlaması gereken özellikler Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 ASTM Biyodizel yakıt özellikleri (ASTM D 6751)

Yakıt Özelliği	Sınır Değer
Alevlenme noktası (°C)	130
Su ve tortu miktarı (% hacimce)	0,050
Kinematik viskozite (mm ² /s 40 °C de)	1,9-6,0
Kül içeriği (% kütlece, mak.)	0,020
Toplam kükürt miktarı (% kütlece, mak.)	0,05
Bakır korozyonu (mak.)	No. 3
Setan sayısı (min.)	47
Karbon kalıntısı (% kütlece, mak.)	0,050
Asit numarası (mg KOH /g, mak.)	0,80
Serbest gliserin (% kütlece, mak.)	0,020
Toplam gliserin (% kütlece, mak.)	0,240
Fosfor içeriği (% kütlece, mak.)	0,0010

Bununla birlikte EN14214 biyodizel standardı daha kapsamlı ve ASTM 6751’den daha katı aralıklara sahiptir. EN 14214’e göre biyodizel yakıtların (B100) sağlaması gereken özellikler Çizelge 3.2’de gösterilmektedir. Biyodizelde önemli olan özellikler ile ilgili bilgiler aşağıda verilmektedir.

Çizelge 3.2 Biyodizel yakıt özellikleri (EN 14214)

Yakıt Özelliği	Değer
Yoğunluk (kg/m ³ 15°C de)	0,86 – 0,90
Viskozite (mm ² /s 40°C de)	3,50 – 5,00
Alevlenme noktası (°C, min.)	120
Toplam kükürt (mg/kg, mak.)	10,0
Setan sayısı (min)	51
Kül içeriği (%kütlece, mak.)	0,02
Su içeriği (mg/kg, mak.)	500
Bakır korozyonu (3 Saat, 50°C)	No: 1
Oksidasyon stabilitesi (h, min.)	6,0
Metanol içeriği (%kütlece, mak.)	0,20
Ester içeriği (%kütlece, min.)	96,5
Monogliserid (%kütlece, mak.)	0,80
Digliserid (%kütlece, mak.)	0,20
Trigliserid (%kütlece, mak.)	0,20
Serbest gliserin (%kütlece, mak.)	0,02
Toplam gliserin (%kütlece, mak.)	0,25
İyot sayısı (%kütlece, mak.)	120
Linolenik asit ME (%kütlece, mak.)	12,0
Çoklu doymamış metil ester (>=4db) (%kütlece, mak.)	1
Fosfor içeriği (mg/kg, mak.)	10,0
Alkali içerik (Na+K) (mg/kg, mak.)	5,0
Toprak alkali metaller (Ca + Mg) (mg/kg, mak.)	5,0

3.4.1. Biyodizel yakıt karakteristikleri

Biyodizellerin viskozite ve yoğunlukları hammadde ve yapılan işlemlere bağlı olmakla birlikte dizel yakıttan bir miktar daha yüksektir. Isıl değerleri ise içerisinde oksijen buldukları için yaklaşık %10 daha azdır. Setan sayıları hammadde olarak kullanılan yağın kompozisyonuna bağlı olarak değişebilmektedir.

Biyodizel yakıtlar içinde esterleştirme işlemi esnasında kullanılan katalizörlerden gelen ve uzaklaştırılmayan artık metallerin miktarı yakıtın kül miktarını artırır. Yakıt içinde bulunan çözünebilir metaller tortuya neden olurlar ve bu tortular iç parçaları aşındırarak zarar verir. Biyodizel hammaddeleri genel olarak çok düşük miktarda kükürt içerirler ancak biyodizel üretim prosesi esnasında proteinler, katalizör ve/veya nötralizasyon materyalleri kükürt oluşumuna neden olabilir (Gerpen vd 2004).

Biyodizel yakıtlarda bulutlanma noktası dizel yakıtlara 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 ya 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 filtrelenmesi de önemli bir noktadır (Gerpen vd 2004).

Aşağıda özellikle biyodizele özgün bazı özellikler hakkında açıklayıcı bilgiler verilmektedir.

3.4.1.1. Asit numarası

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 (Gerpen vd 2004).

3.4.1.2. Serbest gliserin

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 (Gerpen vd 2004).

3.4.1.3. Toplam gliserin

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 (Gerpen vd 2004).

3.4.1.4. Fosfor içeriği

Biyodizel yakıtlarda fosfor içeriği, proses sırasında bitkisel yağlardan ve hayvansal yağlar içerisindeki zar ve proteinlerden gelen fosfolipidlerin tam olarak rafine edilememesi sonucu oluşan ve yakıtın yapısında istenmeyen bir özelliktir (Gerpen vd 2004).

4. DENEY DÜZENEGİ VE METODLARI

4.1. Biyodizel Üretim Düzenegi ve Biyodizel Üretimi

Biyodizel üretiminde hammadde olarak Abalıoğlu Yem Fabrikasından (Denizli) temin edilen nötr pamuk yağı, Bunge Gıda (İstanbul) firmasından temin edilen ham kanola yağı ve Denizli’de bir restorandan temin edilen atık yağ kullanılmıştır.

Biyodizel üretimi için alkol olarak %99 saflıkta metil alkol ve alkali katalizör olarak da NaOH kullanılmıştır. Bitkisel yağın hacimce %20’si kadar metil alkol kullanılmıştır. Bu oran metil alkolün bitkisel yağ trigliseridlerine molar oranı olarak yaklaşık 6:1’e tekabül etmektedir ve yüksek esterleşme miktarına ulaşılması için uygun bir orandır (Fukuda vd 2001). Reaksiyonda katalizör kullanılmasının amacı bitkisel yağ içerisindeki yağ asitlerini nötralize etmek ve reaksiyon hızını artırmaktır. Dolayısıyla transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılacak katalizörün miktarı, hammadde olarak seçilen yağın içerisindeki yağ asidi miktarı ile ilişkili olup, her yağda farklılık göstermektedir. Reaksiyon için gerekli katalizör miktarını belirlemek için titrasyon yapılmıştır. Titrasyon ile ilgili açıklamalar aşağıda verilmektedir.

4.1.1 Titrasyon

Titrasyon esas olarak yağ ile katalizör arasında gerçekleşen bir reaksiyondur. Biyodizel üretiminde kullanılacak katalizör miktarının belirlenmesinde, Tickell (2003)’in tavsiye ettiği titrasyon metodu takip edilmiştir. Rafine edilmiş yemeklik yağlardan biyodizel üretiminde kullanılacak katalizör miktarı 1 litre yağ için 3,5 g’dır. Bununla birlikte ham bitkisel yağlar ve atık bitkisel yağların kullanılması durumunda, 3,5 g katalizöre ilave edilmesi gereken miktar titrasyon ile tespit edilmektedir. Titrasyon işleminde alkol olarak metil alkol yerine, bitkisel yağ ile reaksiyona girmemesi sebebi ile isopropil alkol

kullanılmaktadır. Öncelikle, 1 ml biyodizel hammaddesi olarak kullanılacak bitkisel yağın, 10 ml isopropil alkol karışımı içerisinde çözünmesi sureti ile yağ-isopropil alkol karışımı elde edilir, daha sonra 1 g katalizör olarak kullanılacak sodyumhidroksit, 1 litre saf su içerisinde çözünmesi suretiyle NaOH-su karışımı hazırlanır.

Yağ-isopropilalkol karışımının pH değeri ölçülerek, karışımın içine 1 ml NaOH-su karışımı ilave edilir ve pH değeri tekrar ölçülür. pH değerinde 8-9 arasında bir değere ulaşıncaya kadar birer mililitre NaOH-su karışımı ilave edilmeye devam edilir. Bir litre bitkisel yağdan biyodizel üretimi sırasında katalizör olarak kullanılacak NaOH miktarı, k(g)

$$k (g)= (3.5 + x) \quad (1)$$

formülü ile bulunur. Formüldeki x değeri kaç defa 1 ml NaOH-su karışımının eklendiğinin ifadesidir (Tickell, 2003). Bu yöntem çerçevesinde, yağ numuneleri ile gerçekleştirilen titrasyon işlemi sonucunda, biyodizel üretimi esnasında 1 litre yağ için kullanılması gereken NaOH miktarları, nötr pamuk yağ için 3,5 g, ham kanola yağı için 4,5 g ve atık yağ için 6,5 g olarak hesaplanmıştır.

Biyodizel üretiminde kullanılan yağlardan her biri için öncelikli olarak 700 ml'lik numuneler ile cam malzemelerde deneme üretimleri yapılmış olup tespit edilen miktarlar ve parametreler ile ilgili bir problem olup olmadığı kontrol edilmiş, daha sonra büyük ölçekli biyodizel üretimi paslanmaz çelikten imal edilmiş bir reaktörde yapılmıştır. Numune üretimleri ve reaktörde gerçekleştirilen ana üretimlerde kullanılan bitkisel yağ, metil alkol ve NaOH miktarları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

4.1.2. Numune üretimleri

Küçük ölçekli biyodizel üretiminde ısıtmalı manyetik karıştırıcı, termometre, pH metre, hassas terazi ve ayırma hunisi gibi cam malzemeler kullanılmıştır. Numune üretimleri, nötr pamuk yağı, ham kanola yağı ve atık yağdan 700 ml lik örnekler ile gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle yağın hacimce %20'si oranında metil alkol ile titrasyon sonucunda bulunan miktarlarda NaOH (Çizelge 4.1), manyetik karıştırıcıda karıştırılarak, “metoksit” karışımı meydana getirilmiştir (Şekil 4.1).

Çizelge 4.1 Numune üretimlerinde ve reaktörde üretimlerde kullanılan yağ, metil alkol, NaOH miktarları

	Ham Kanola Yağı		Atık Yağ		Nötr Pamuk Yağı	
	Numune Üretimleri	Reaktörde Üretim	Numune Üretimleri	Reaktörde Üretim	Numune Üretimleri	Reaktörde Üretim
Bitkisel Yağ (l.)	0,70	10,00	0,70	9,30	0,70	10,00
Metil Alkol (l.)	0,14	2,00	0,14	1,86	0,14	2,00
NaOH (g)	3,15	45,00	4,55	60,45	2,45	35,00



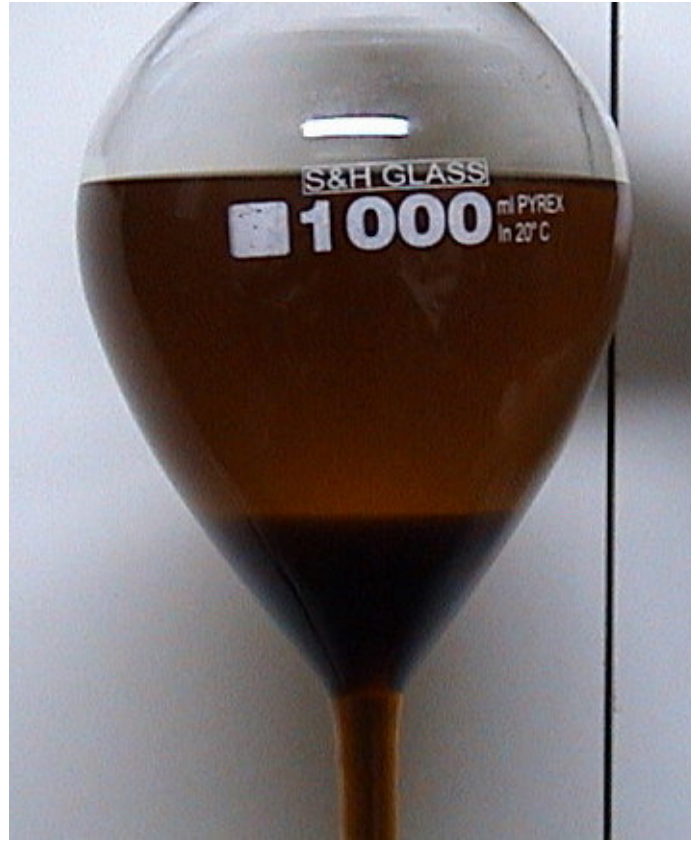
Şekil 4.1 Manyetik karıştırıcıda metoksit karışımı oluşturma

50-55 °C sıcaklığa ısıtılmış olan yağ numunesi, hazırlanan metoksit karışımı ile cam balon içerisinde karıştırılmış ve ısıtmalı manyetik karıştırıcı vasıtasıyla; 1 saat 50-55 °C sıcaklıkta ısıtma ve karıştırma, daha sonra da ısıtıcı kapatılarak 1 saat sadece karıştırma işlemi yapılarak transesterifikasyon reaksiyonuna tabi tutulmuştur (Şekil 4.2). Sıcaklık transesterifikasyon reaksiyonunu kolaylaştırmaktadır, ancak metil alkolün yaklaşık 67 °C civarında buharlaşmaya başlıyor olması nedeni ile sıcaklığın bu mertebelere ulaşmasına müsaade edilmemiştir.

Karıştırma işlemi son bulduğunda, biyodizel ve gliserin faz ayrışmasının gerçekleşmesi için karışım ayırma hunisine alınmıştır. Numuneler, tam faz ayrışmasının gerçekleşmesi için en az sekiz saat ayırma hunisinde bekletilmiştir. Şekil 4.3'den de açıkça görüleceği üzere, faz ayrışmasının gerçekleşmesi ile biyodizel üretiminde bir yan ürün olan, yoğunluğu yüksek gliserin dibe çökmüş, daha düşük yoğunluklu biyodizel ise gliserinin üzerinde belirgin bir çizgi ile ayrılmıştır.

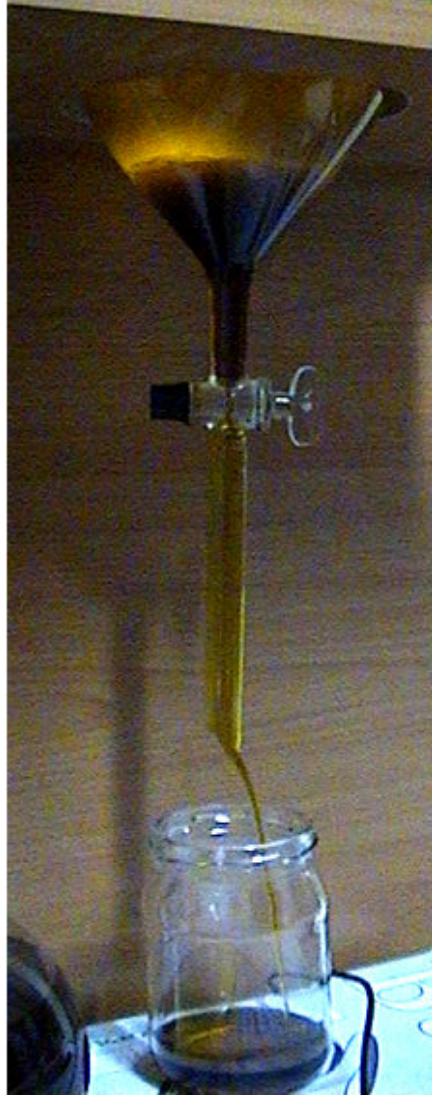


Şekil 4.2 Manyetik karıştırıcıda ısıtma ve karıştırma

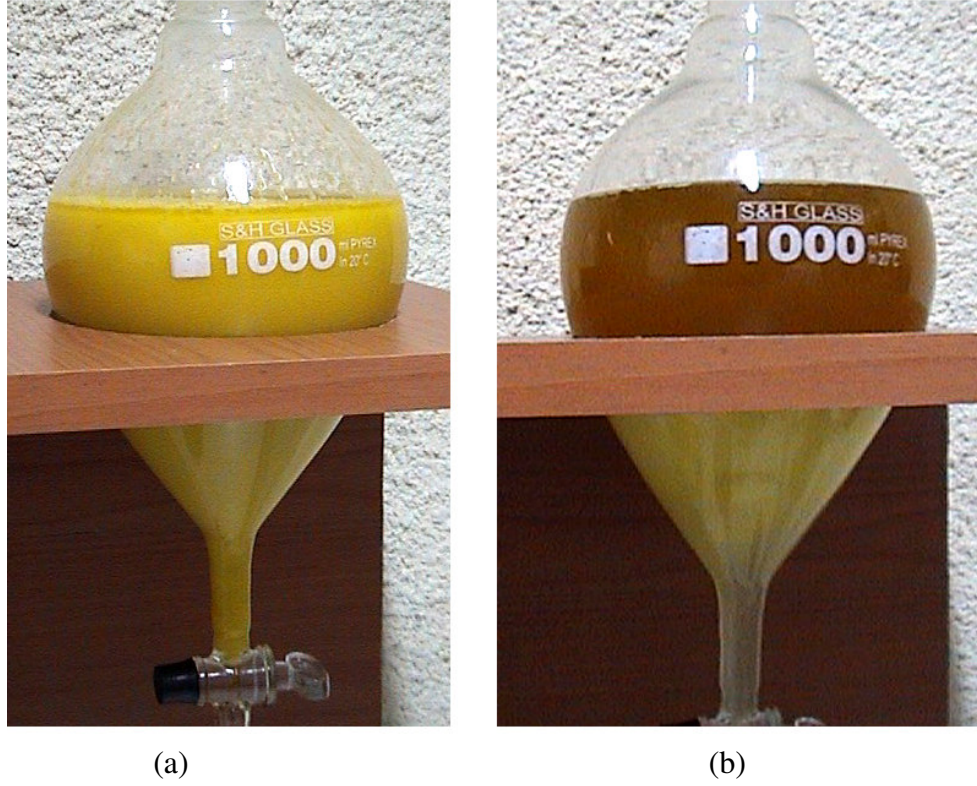


Şekil 4.3 Biyodizel ve gliserin faz ayrımı

Dibe çöken gliserinin alınmasından (Şekil 4.4) sonra, biyodizelin içerisinde kalması muhtemel gliserin ve reaksiyona girmemiş alkol, katalizör gibi kalıntıları temizlemek için, biyodizel, hacimce %30'u kadar 30-35 °C sıcaklıkta ılık saf su ile üç sefer yıkama işlemine tabi tutulmaktadır. Yıkama neticesinde suyun kalıntılarla birlikte çökmesini hızlandırmak amacı ile birinci yıkamada kullanılan yağ miktarının %0,25'i oranında fosforik asit yıkama suyuna ilave edilebilmektedir. Yıkama işlemi ayırma hunisinde, biyodizele 200 ml saf su ilave edilip, çalkalanması suretiyle yapılmış, birinci yıkamada saf suya 1,75 ml fosforik asit ilave edilmiştir. Her yıkamadan sonra karışım, biyodizel içindeki kalıntıların su ile birlikte dibe çökmesi için tekrar askıya alınmış ve en az sekiz saat bekletilmiştir (Şekil 4.5).



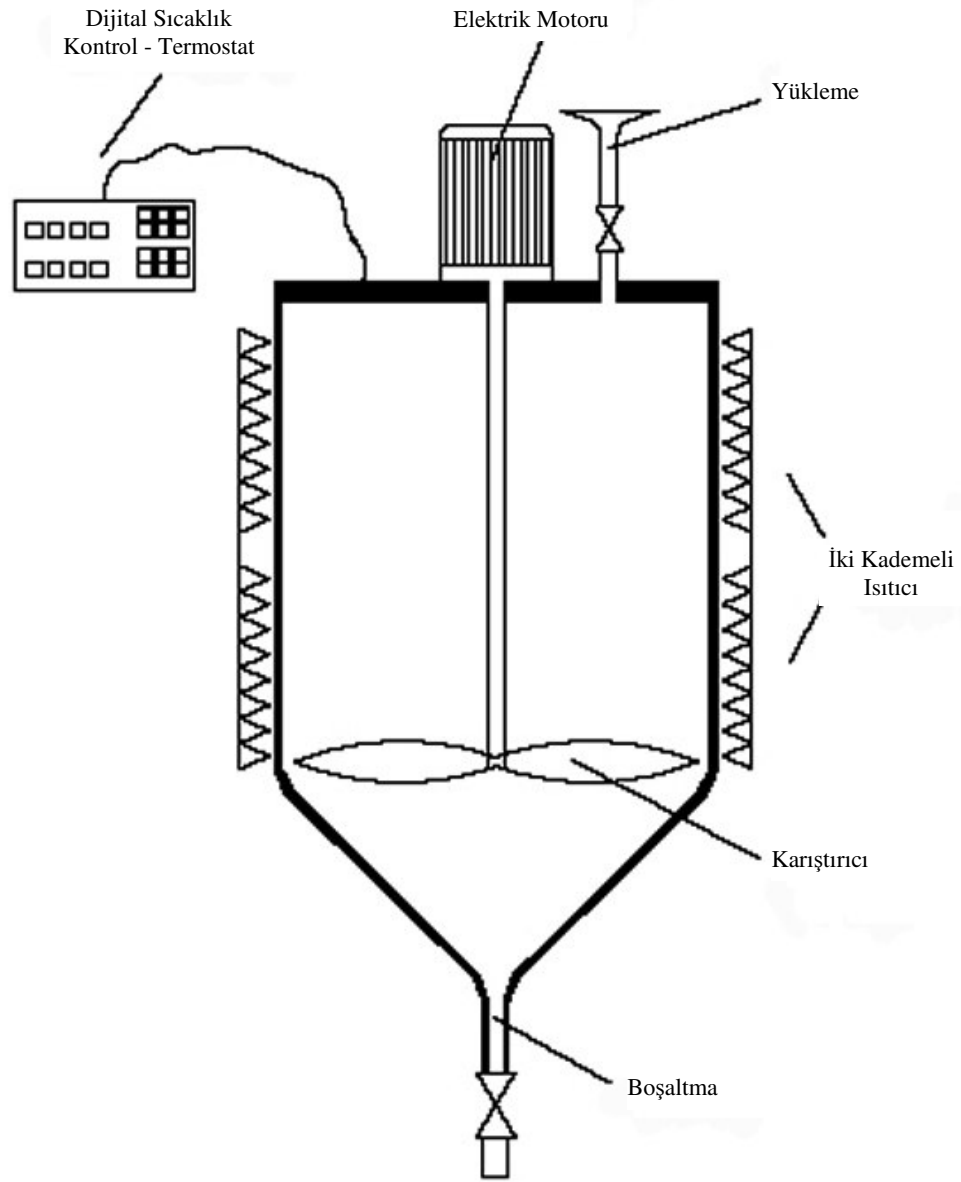
Şekil 4.4 Gliserinin alınması



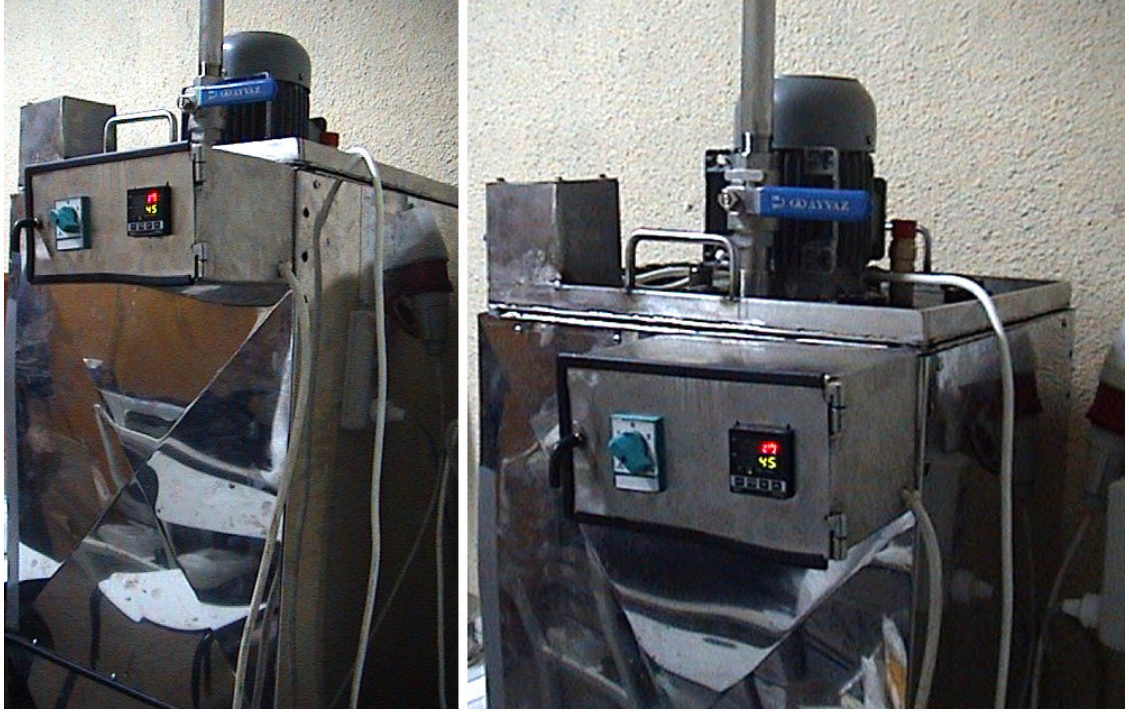
Şekil 4.5 Yıkama işlemine tabi tutulan biyodizel (a) Su ile çalkalanması ile karıştırma (b) Askıda suyun, kalıntılarla ayrılmaya başlaması

4.1.3. Reaktörde ana üretim

Numune üretimlerinin tamamlanmasından sonra, performans ve emisyon testlerinde kullanılacak miktarlarda biyodizelleri hazırlamak üzere, paslanmaz çelikten imal edilmiş olan reaktör kullanılmıştır. Reaktör 28 litrelik bir iç hacme sahip olup (Şekil 4.6-4.7), üretim haznesi ceketten çift kademeli elektrikli ısıtma özelliğine sahiptir. Dijital termostat ile karışım istenilen sıcaklıkta tutulabilmektedir. Reaktör içerisindeki karıştırıcı, elektrik motoru vasıtasıyla dakikada 900 dev/dak'lık dönme sayısı ile etkin bir karıştırma sağlayabilmektedir.

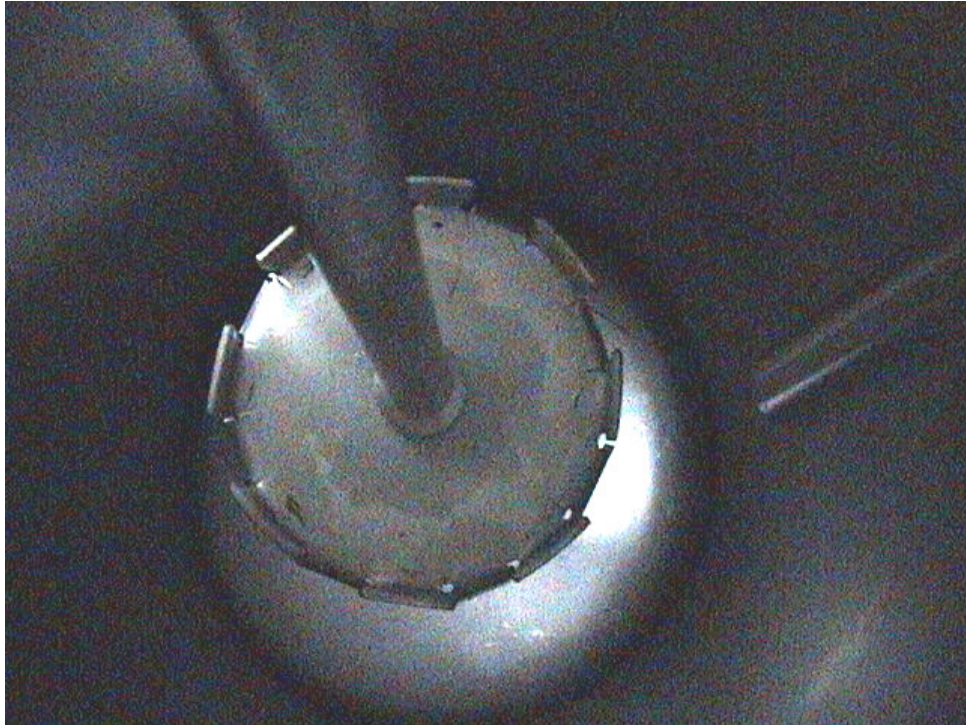


Şekil 4.6 Biyodizel reaktörü



(a)

(b)



(c)

Şekil 4.7 Biyodizel reaktörü (a), (b) Reaktörün dış görünümü, (c) Reaktör karıştırıcısının üstten görünümü

Biyodizel üretilecek bitkisel yağlar öncelikle kağıt filtreden geçirilerek içindeki yabancı maddelerden arındırılmış, daha sonra reaktöre doldurularak reaktörün sadece ısıtma ünitesinin açılması ile reaksiyon sıcaklığı olan 50-55 °C seviyelerine ısıtılmıştır. Bu ısıtma süreci içerisinde de sodyumhidroksit, cam balon içerisinde manyetik karıştırıcıda metil alkol içinde çözünerek gerekli metoksit karışımı oluşturulmuştur. Kullanılan bitkisel yağ, metil alkol ve NaOH miktarları daha önceki bölümde Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Metoksit karışımının, reaktörde uygun sıcaklığa kadar ısıtılmış bitkisel yağa ilave edilmesi ile reaksiyon başlatılmış, reaktörün ısıtma ve karıştırma bölümlerinin her ikisi de açılarak, karışım ısıtma ile birlikte 1 saat, 900 dev/dak.’lık karıştırma hızı ile yaklaşık 55 °C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Bir saatin bitiminde ısıtıcı kapatılarak 1 saat sadece karıştırma işlemi sürdürülmüş, bu karıştırma süreci içerisinde ısıtmanın kapatılması ile sıcaklığın 52-54 °C seviyelerine indiği gözlenmiştir.

Sadece karıştırma işleminin tamamlandığı ikinci saatin sonunda, karışım faz ayrımının gerçekleşmesi için 1 gün beklemeye bırakılmıştır. Bir günlük bekleme neticesinde faz ayrışmasının gerçekleşmesi ile dibe çöken gliserin, reaktörün altında yer alan vananın açılması ile tahliye edilmiştir.

Gliserinin tahliye edilmesinden sonra, reaktörde kalan biyodizel üç sefer yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Yıkama işlemlerinde yaklaşık %30 oranında saf su kullanılmıştır. İlk yıkamada her bir litre yağ için 2,5 ml fosforik asit saf suya ilave edilmiştir. Biyodizel içerisinde kalması muhtemel alkol, katalizör ve gliserin gibi kalıntıların su ile reaksiyona girerek sabunlaşmasını kolaylaştırmak amacı ile, her yıkamada suyun reaktöre ilavesinden sonra 15 dakika kadar karıştırıcı çalıştırılarak, su ve biyodizelin karışması sağlanmış, daha sonra suyun kalıntılarla birlikte dibe çökmesi için karışım beklemeye bırakılmıştır. Çalışmalarda hammadde olarak kullanılan her üç yağdan üretilen biyodizelde de üç yıkama yeterli olmuş, üçüncü yıkama sonunda reaktörde dibe çöken su alındığında, suyun yıkama öncesi saydamlığında olduğu gözlemlenmiştir.

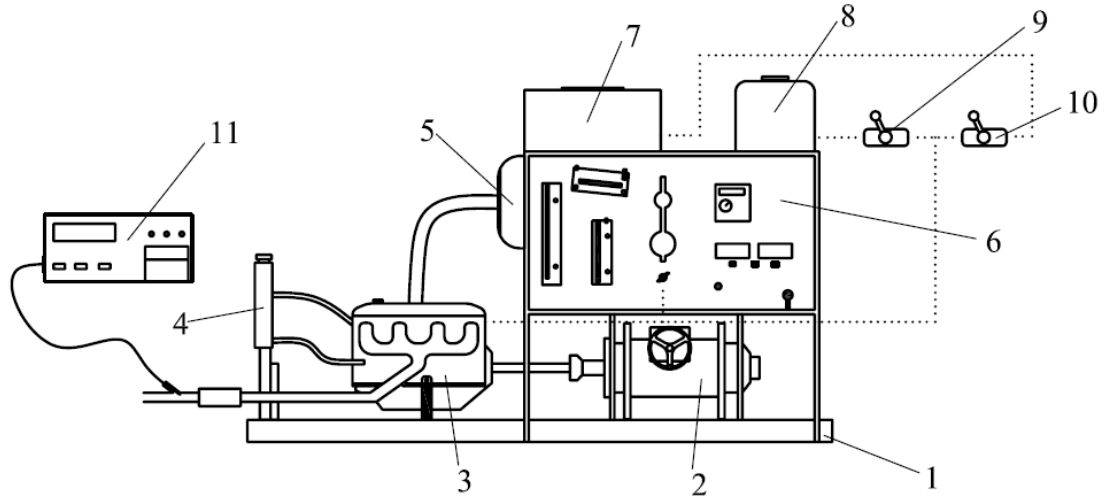
Yıkama işlemi neticesinde reaktörden alınan biyodizelin içerisinde, transesterifikasyon reaksiyonunun etkinliğini arttırmak için fazladan kullanılan metil alkol ile yıkama işlemi esnasında kullanılan suyun bir miktarı karışmış bulunmaktadır. Biyodizel yakıt içerisinde bunların bulunması, yakıtın yakılması sırasında motorda hasara sebep olabileceğinden, biyodizel içerisinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu nedenle üretilen biyodizel yakıtlar, 100 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak, içinde kalan metil alkol ve suyun buharlaştırılması suretiyle bu kalıntılardan da arındırılmış ve tekrar kağıt filtreler vasıtasıyla filtrelenerek motor performans ve emisyon testlerinde kullanılmak üzere depolanmıştır.

Biyodizel üretimi çalışmalarında her bir litre yağdan elde edilen biyodizel ve gliserin miktarları ile ilgili hesaplamalar sonucunda, 1000 ml yağ ve 200 ml katalizörlü metil alkol karışımından ham kanola, atık ve nötr pamuk yağından sırasıyla 943 ml kanola yağı metil esteri ve 159 ml gliserin, 876 ml atık yağ metil esteri ve 178 ml gliserin, 985 ml pamuk yağı metil esteri ve 105 ml gliserin elde edildiği tespit edilmiştir.

4.2. Motor Test Düzeneği ve Yöntemi

Deneyel çalışmalarda kullanılan motor test düzeneğinde, ön yanma odalı dört silindirli bir turbo dizel motor ve 9000 dev/dak.'da 112 kW (150 bhp) güç absorbe edebilen bir hidrokinetik dinamometre kullanılmıştır. Şekil 4.8 ve 4.9'da deney sistemi, Çizelge 4.2'de ise deney motoruna ait teknik özellikler görülmektedir.

Deney sistemi kontrol panelinde bulunan motor hızı ve dinamometreye etki eden kuvveti görüntüleyen dijital göstergeler, 50-100 ml'lik yakıt tüketimi ölçme büretleri, hava akış manometresi ve motor yük kontrol kolu bulunmaktadır. Ayrıca deney sistemine yerleştirilmiş olan K tipi ısı elemanlar vasıtası ile kontrol panelinde bulunan göstergeden hava girişi, yakıt, motor soğutma suyu girişi-çıkışı, yağlama yağı, egzoz sıcaklıkları ölçülebilmektedir.



Şekil 4.8 Deney sisteminin şematik resmi (Cussons P8601 Motor Test Düzeneği) 1-Deney düzeneği şasisi, 2-Hidrokinetik dinamometre, 3-Deney motoru 4-Soğutma sistemi, 5-Hava giriş tankı, 6-Kontrol paneli, 7-Dizel yakıt tankı, 8-Alternatif yakıt tankı (biyodizel), 9-Biyodizel yakıt hattı kontrol valfi, 10-Dizel yakıt hattı kontrol valfi, 11- Egzoz gaz ölçüm cihazı



Şekil 4.9 Deney sisteminin fotoğrafı

Çizelge 4.2 Deney motorunun teknik özellikleri

Motor Tipi	Ford XLD 418T, IDI (Ön yanma odalı), 4 Zamanlı, Turboşarjlı, Su Soğutmalı, Dizel
Silindir Sayısı	4
Silindir Çapı	82,5 mm
Silindir Stroğu	82,0 mm
Silindir Hacmi	1,753 litre
Sıkıştırma Oranı	21,5/1
Maksimum Güç	55 kW (4500 dev/dak.)
Maksimum Tork	152 Nm (2200 dev/dak.)
Enjeksiyon Pompa Tipi	Distribütör tipi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, deney sisteminde dizel yakıt tankının bağlı bulunduğu genel yakıt hattına biyodizel yakıtı için alternatif yakıt tankı eklenilerek valfler aracılığı ile yakıt sistemine entegre edilmiştir. Böylece istenildiğinde biyodizel çalışmasına geçebilmek için deney düzeneğinin yakıt tankı kullanılmayarak sistemde alternatif yakıt tankı aktif hale getirilebilmektedir.

Deneyisel çalışmalarda, yakıt olarak %100 dizel yakıtı No.2 (D100) ile, atık yağdan (W), nötr pamuk yağından (C) ve ham kanola yağından (R) üretilen biyodizellerin, dizel No.2 yakıtına %20 oranında karıştırılması sureti ile elde edilen karışımları (sırası ile W20, C20, R20) kullanılmıştır. Hem %20 biyodizel karışımları çalışmalarında hem de %100 dizel yakıtı çalışmalarında öncelikle motor dizel yakıt ile çalıştırılmış olup, motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı yaklaşık 80°C’ye gelinceye kadar beklenmiş, kararlı durum sağlandıktan sonra ölçümlere başlanılmıştır. Deneylerde motor tam yükte, hızı 3000 dev/dak.’ya çıkartılmıştır ve motor hızı sırasıyla 2500, 2200, 2000, 1500 dev/dak.’lara düşürülerek, tüm devirlerde motorun çalışmasının kararlı hale gelmesi için birkaç dakika beklendikten sonra ölçümler alınmıştır. Deney sonunda motor hızı 1500 dev/dak.’dan tekrar 3000 dev/dak.’ya çıkartılarak alınan ölçümler kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmalarda motor hızı (dev/dak.), dinamometreye etki eden kuvvet (N), 50/150 ml yakıt tüketimi için geçen süre (s), egzoz sıcaklığı ve yağlama yağı sıcaklıkları (°C) olarak ölçülmüştür.

Emisyon ölçümleri için motor test düzeneğine entegre olarak bağlanan Bosch 170 Duman Ölçer ile duman koyuluğu (1/m), Sun 1200 MGA Infrared Gaz Analizörü ile CO miktarı (ppm), CO₂ miktarı (%) olarak, kimyasal hücreli O₂ Analizörü ile O₂ miktarı (%) olarak ölçülmüştür. Cihazlar Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Emisyon cihazları

4.2.1. Motor performans hesaplamaları

4.2.1.1. Moment ve güç :

Moment ve güç değerleri, deney sisteminde yer alan dinamometreye etki eden kuvvetin (N) ölçülmesi ile, bu kuvvetten hareket edilerek hesaplanmıştır. Dinamometre kuvvet sensörü, motor miline 0,2865 m uzunluğunda kuvvet kolu uzaklığındadır. Dolayısı ile moment (T);

$$T = F \cdot L \quad (4.1)$$

şeklinde (Nm) olarak hesaplanmıştır. Formülde F, dinamometreye etki eden kuvvet (N), L, kuvvet kolu uzunluğudur (m).

Güç (P) ise

$$P = T \times \omega \quad (4.2)$$

Formülü ile hesaplanmıştır. Formülde T moment (Nm), ω açısal hızdır (rad/s).

4.2.1.2. Özgül yakıt tüketimi ve termik verim

Yakıt tüketimi, deney düzeneğinde bulunan 50 ve 100 ml lik ölçme bütretleri ile hacimsel debi (Q) olarak ölçülmüştür. Aşağıda gösterildiği üzere, ölçülen hacimsel debi değerleri, yakıtların yoğunlukları (ρ) ile çarpılarak kütleli debiye (\dot{m}) dönüştürülüp, güç değerlerine oranlanarak özgül yakıt tüketimi (ÖYT) değerleri elde edilmiştir.

$$\text{ÖYT} = 3600 \cdot \dot{m} \text{ (g/s)} / P \text{ (kW)} \quad (4.3)$$

şeklinde (g/kW h) cinsinden hesaplanmıştır. Formülde \dot{m} kütleli debidir.

Termik verim (η) aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{P}{\dot{m} \cdot Hu} = \frac{1}{\text{ÖYT} \cdot Hu} \quad (4.4)$$

Formülde Hu yakıtın alt ısı değeri.

Genel olarak, yakıt yönünden fakir karışımların yakıldığı dizel motorlarda yanma veriminin %98'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Heywood 1988). Yaklaşık %2 gibi bir kayıp özellikle CO, H₂, hidrokarbonlar, is ve partikül maddeler gibi yanması tamamlanmamış emisyonlar ile açıklanmaktadır. Yanma veriminin hassas bir şekilde hesaplanabilmesi için gerekli emisyon ölçümlerinin tam yapılamamış olmasından dolayı, yanma verimi üzerine bir çalışma yapılmamıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada yapılan deneylerde ölçülen hava ve yakıt miktarları yakıtça fakir karışımların yakıldığını göstermektedir.

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

5.1. Biyodizel Özellikleri

Üretilen biyodizellerin standartlarda geçen bütün özelliklerinin tespit edilmesi bölüm imkanları ile gerçekleştirilememiştir. Bununla birlikte eldeki imkanlar ölçüsünde bazı özellikler tespit edilmiştir. Daha sonraki kısımlarda gösterilen dizel motorda elde edilen motor performans ve emisyonları ile ilgili sonuçlar üretilen biyodizellerin kaliteleri konusunda olumlu bir fikir vermektedir.

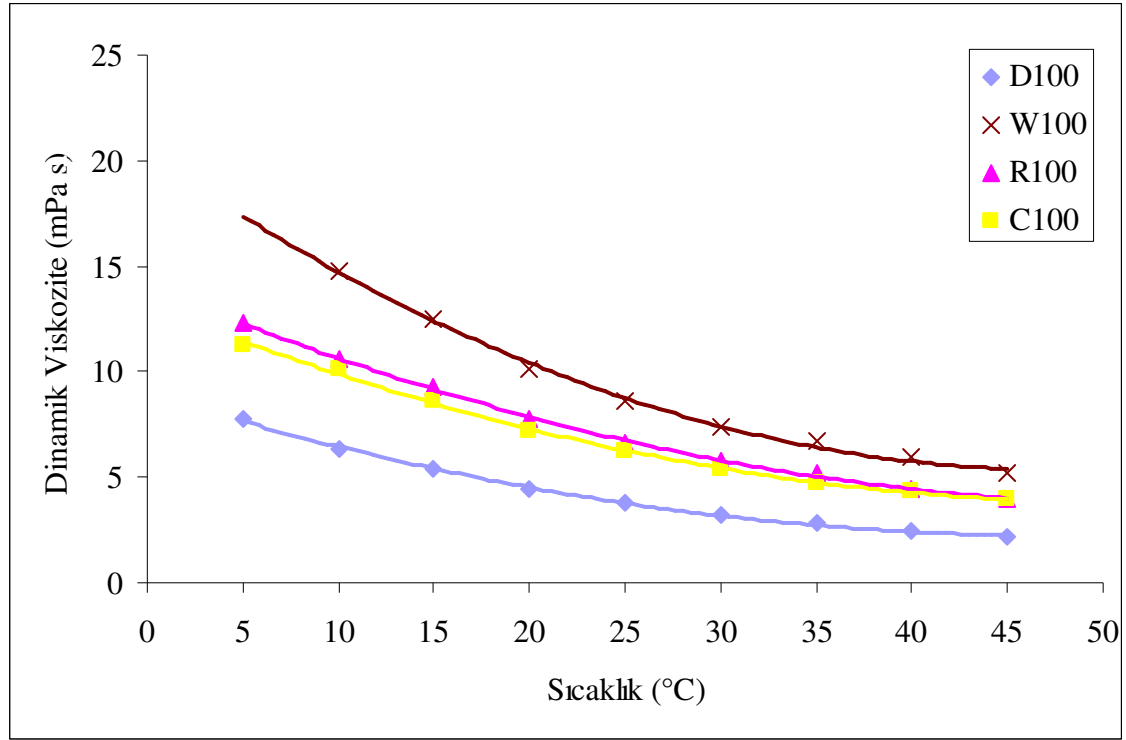
Biyodizellerin yoğunlukları piknometre ve dinamik viskoziteleri Brookfield RVDVII+ tip dönel viskozimetre ile ölçülmüştür. Biyodizellerin 15°C’de yoğunlukları ve 40°C kinematik viskoziteleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bununla birlikte 5 - 45°C sıcaklıklar arası dinamik viskozite değişimleri Şekil 5.1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1 Dizel yakıtı ve biyodizel yakıtların yoğunlukları ve kinematik viskoziteleri

	Dizel Yakıtı (D100)	Atık Yağ Biyodizel (W100)	Kanola Yağı Biyodizel (R100)	Pamuk Yağı Biyodizel (C100)
Yoğunluk (kg/m ³) (15 °C)	825,24	875,29	887,96	879,82
Kinematik Viskozite (mm ² /s) (40 °C)	2,96	6,77	5,06	5,17

Şekil 5.1’de de görüldüğü üzere biyodizel yakıtların dinamik viskozite değerleri dizel yakıtına göre daha yüksektir ve bu fark sıcaklık düştükçe daha da artmaktadır. Biyodizeller içinde viskozitesi en yüksek olan beklendiği gibi W100 olmuştur. Genel olarak W100 viskozite değerleri D100’ün viskozitesinin iki katından daha fazladır. Düşük sıcaklıklarda aradaki fark artmaktadır. Bu da düşük sıcaklıkların yaşandığı iklim bölgelerinde atık yağdan üretilen biyodizellerin kullanımındaki zorlukları ortaya koymaktadır. R100 ve C100 yakıtları viskozite açısından birbirine çok yakın özellikler göstermekle birlikte, C100’ün

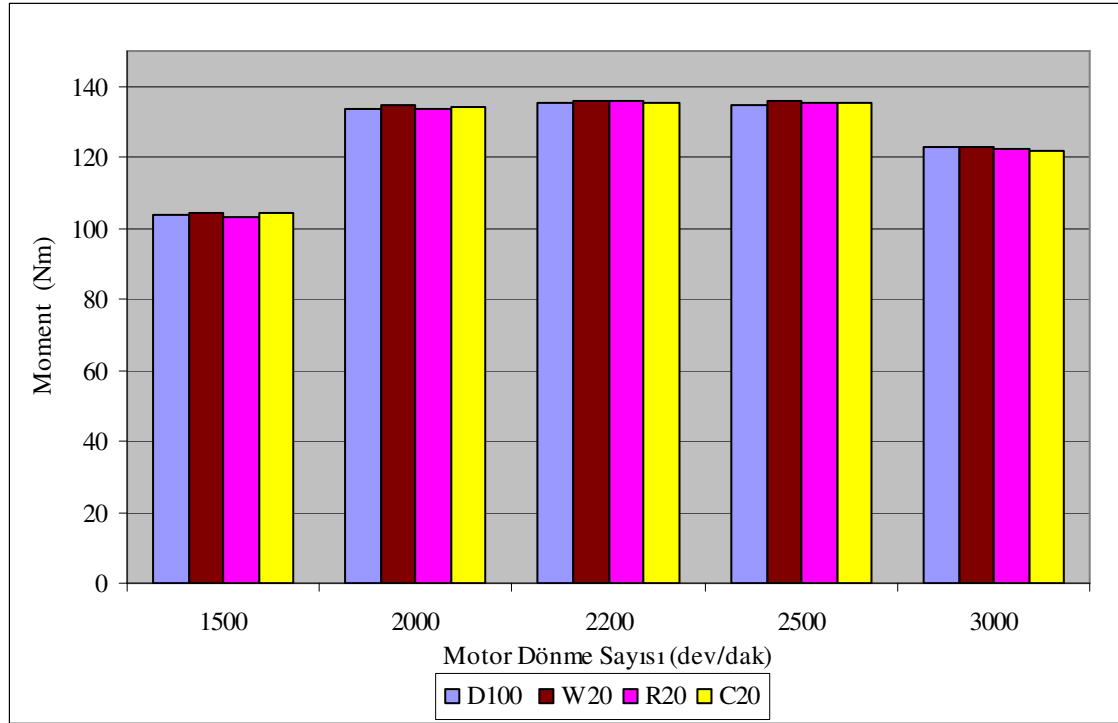
viskozitesi dizel No.2'ye daha yakındır. Bu iki biyodizelin D100 yakıtı göre viskozitelerinin yükselme oranı 40 °C'de %50 seviyelerinde iken, 5 °C'de %80 seviyelerine ulaşmıştır.



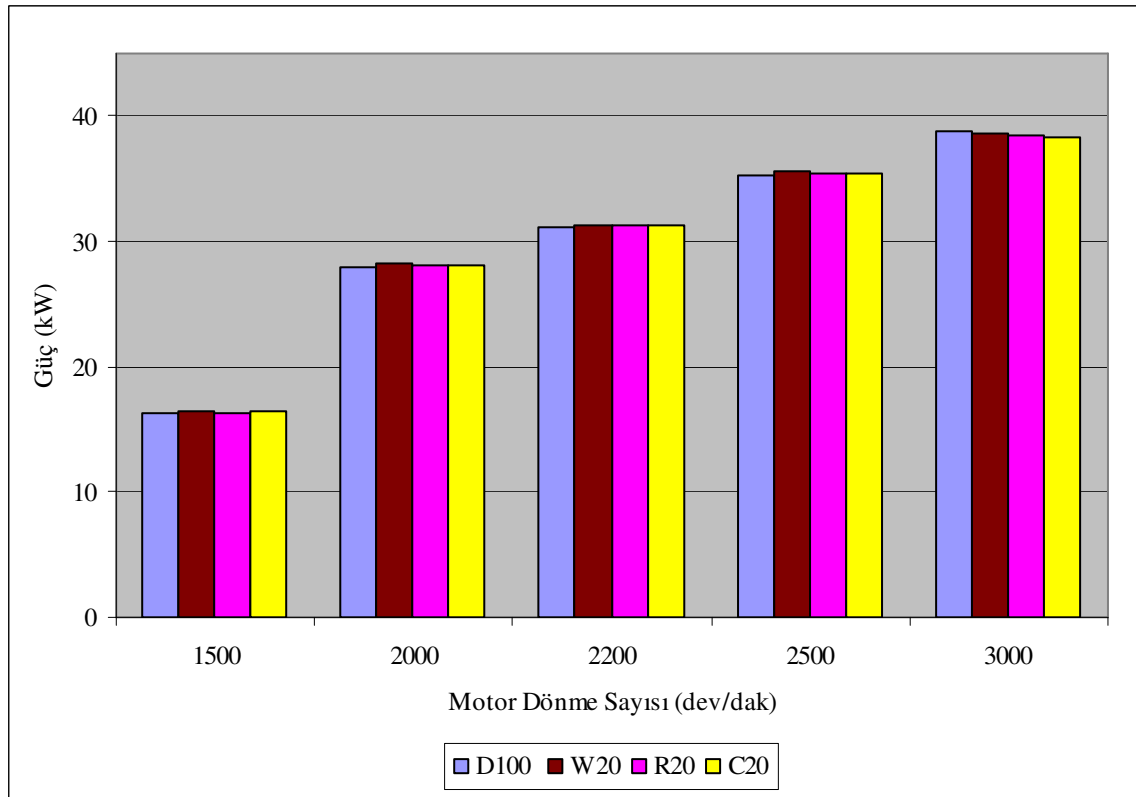
Şekil 5.1 Biyodizel yakıtlar ve dizel yakıtının dinamik viskozitesinin sıcaklıkla değişimi

5.2. Motor Performans Ölçüm Sonuçları

Dizel yakıt No.2 ve üç biyodizelin (W100, C100 ve R100) hacimsel olarak %20 oranında dizel yakıt No.2'ye karıştırılarak dizel motorda test edilmesi sonucunda elde edilen moment ve güç değerleri motor dönme sayısına bağlı olarak Şekil 5.2 ve 5.3'de gösterilmiştir. Bu şekillerde ve bundan sonraki şekillerde %20 biyodizel karışımları W20, C20 ve R20 olarak gösterilmektedir. Dizel yakıt No.2'ye %20 oranında farklı biyodizellerin (W100, R100 ve C100) ilavesinin motor moment ve buna bağlı olarak gücünde dikkate değer bir değişmeye sebep olmadığı görülmektedir. Biyodizel karışımları ile elde edilen değerler dizel yakıtı ile elde edilen değerlere çok yakındır ve genel olarak değişim \pm %1'i aşmamaktadır.



Şekil 5.2. Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının moment değerleri

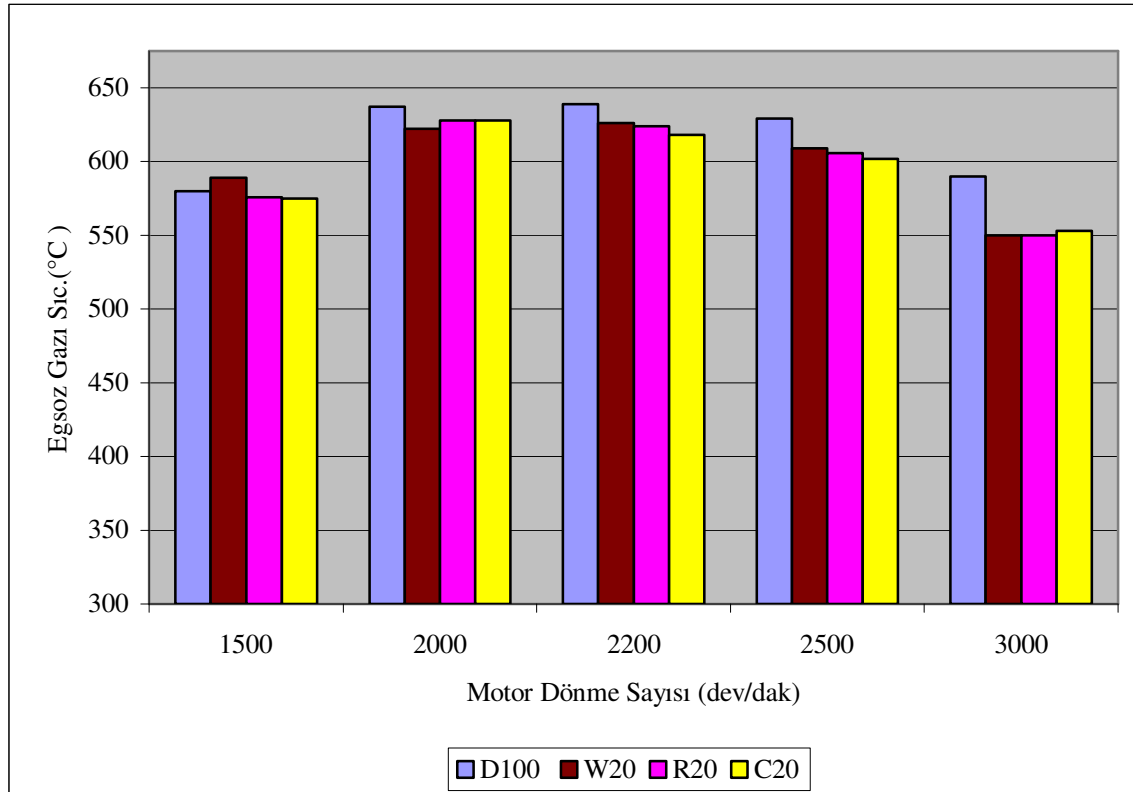


Şekil 5.3 Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının güç değerleri

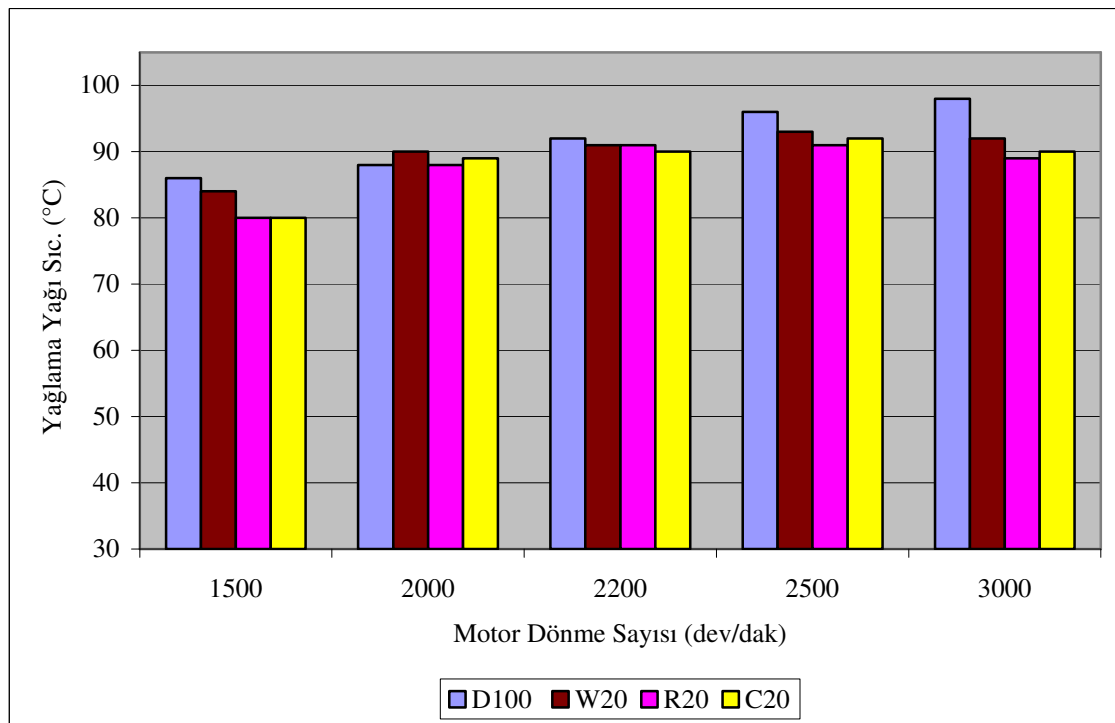
Biyodizel, ısıl değeri dizel yakıtına nazaran daha düşük olmasına rağmen, içerdiği oksijen miktarı nedeni ile silindir içinde bir miktar daha iyi yanma sağlayarak, güç ve moment değerleri bakımından dizel yakıtı ile yaklaşık sonuçları vermiştir. Bununla birlikte dördüncü bölümün sonunda belirtildiği gibi yakıtça fakir karışımların yakıldığı dizel motorlarda yanma verimi %98'in üzerinde olmaktadır. Bu yüzden biyodizel kullanımı ile yanma verimindeki artış %2'den aşağıdadır denilebilir. Özaktaş (2000) tarafından yapılan çalışmada da, %20 atık yağdan üretilmiş olan biyodizel-dizel yakıtı karışımı ve %100 dizel yakıtı karşılaştırılmış ve güç değerlerinde önemli bir değişme olmadığı tespit edilmiştir.

Motorlarda meydana gelen yanma sonucu gazlarının, egzozdan çevreye çok yüksek sıcaklıklarda atılması istenmemektedir. Yüksek egzoz gazı sıcaklıkları, silindir içerisinde yanma zamanında yanmanın tümüyle gerçekleşemediğinin ve egzoz sübapları açıldığında halen yanmanın devam ettiğinin bir göstergesidir. Şekil 5.4'de görüldüğü üzere biyodizel karışımlarının yanması sonucu oluşan egzoz gazlarının sıcaklığı, dizel yakıtının yanması sonucu oluşan egzoz gazı sıcaklığına göre daha düşüktür. Sadece W20 karışımında ve 1500 dev/dak hızda, Al-Widyan vd (2002) tarafından 800-1800 dev/dak hız aralığında yapılan çalışmaya benzer olarak %1,5'lik bir artış meydana gelmiştir. Diğer tüm biyodizel karışımları ve tüm motor hızlarında egzoz gazı sıcaklığı %1 ila %6 oranlarında düşmüştür. Bu sonuç, biyodizel karışımlarının, dizel yakıtına göre daha iyi bir yanma meydana getirdiğine işaret etmektedir.

Şekil 5.5'de biyodizel karışımları ve dizel yakıtının kullanımı, yağlama yağı sıcaklığı bakımından karşılaştırılmıştır. Biyodizel karışımlarının kullanımında yağ sıcaklığı dizel yakıtına göre, sadece 2000 dev/dak motor hızında W20 yakıtında %2, C20 yakıtında %1 gibi küçük bir oranda artmış, R20 yakıtında değişmemiştir. Diğer tüm motor hızlarında yağlama yağı sıcaklığı, %20 biyodizel karışımı kullanımı ile dizel yakıtının kullanımına göre %1 ila %9 düşmüştür. Yağlama yağı sıcaklığının yükselmesinin, yağın viskozitesini düşürerek motor içerisindeki yağlama kabiliyetini azalttığı göz önünde bulundurulursa, %20 biyodizel kullanımı, dizel yakıtının kullanımına nazaran yağlama yağı için de olumlu sonuçlar ortaya koymaktadır.

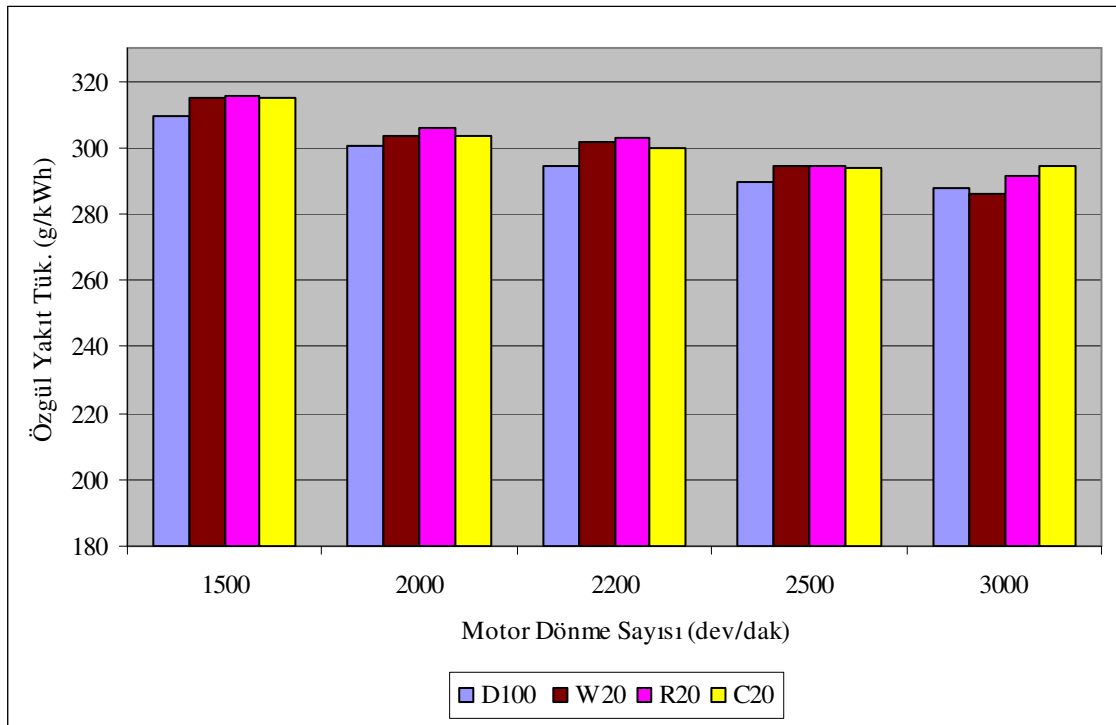


Şekil 5.4 Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının yanma sonucu egzoz gazı sıcaklıkları



Şekil 5.5 Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında yağlama yağı sıcaklıkları

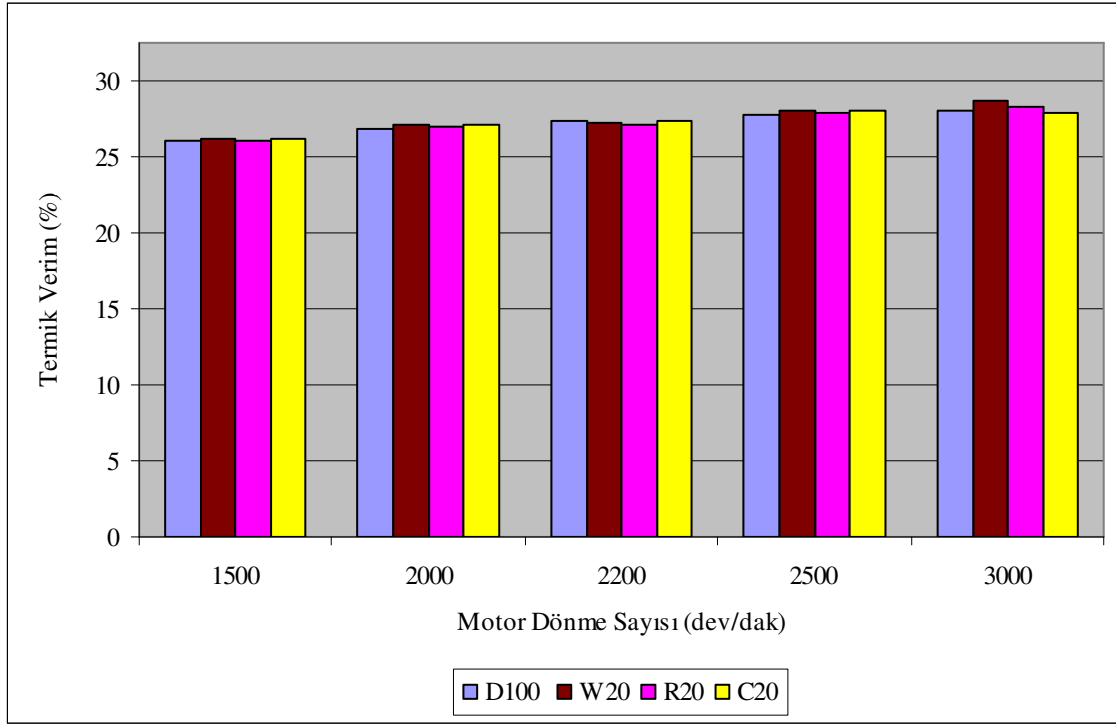
Farklı motor hızlarında, biyodizel karışımları ve dizel yakıtının kullanılması sonucu elde edilen özgül yakıt tüketimi değerleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Biyodizel karışımlarının kullanımında, dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketimi %1 ila %2 oranında artış göstermiştir. Biyodizel yakıtların, dizel yakıtına göre daha düşük ısı değere sahip olması nedeni ile özgül yakıt tüketiminde bir artış olması beklenen bir durumdur. Bununla birlikte artışın çok az bir oranda olması biyodizel kullanımı için olumlu bir sonuçtur. Çanakcı ve Van Gerpen (2001) tarafından soya yağı ve atık yağdan üretilen biyodizeller ile yapılan çalışmalarda da, %20 biyodizel karışımlarının kullanımı ile özgül yakıt tüketiminde yaklaşık %2.5 oranında artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.6 Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında özgül yakıt tüketimi

Biyodizel karışımı ve dizel yakıtının farklı motor hızlarında yapılan testleri neticesinde elde edilen termik verim (η) değerleri Şekil 5.7'de karşılaştırılmıştır. Biyodizel karışımlarının kullanılmasında elde edilen termik verim değerleri, Çanakcı ve Van Gerpen (2001) tarafından yapılan çalışmalara benzer olarak dizel yakıtının değerlerine çok yakın olmaktadır. Artış ve azalış yönündeki değişimlerin miktarı %2'yi aşmamaktadır. Biyodizel

yakıtlar, dizel yakıtına nazaran daha düşük ısıl değere sahip olmasına rağmen, yanmadaki iyileşme ile motor biyodizel yakıtın kimyasal enerjisini, dizel yakıtın enerjisi ile yaklaşık aynı verimlilikte mekanik enerjiye dönüştürebilmektedir.

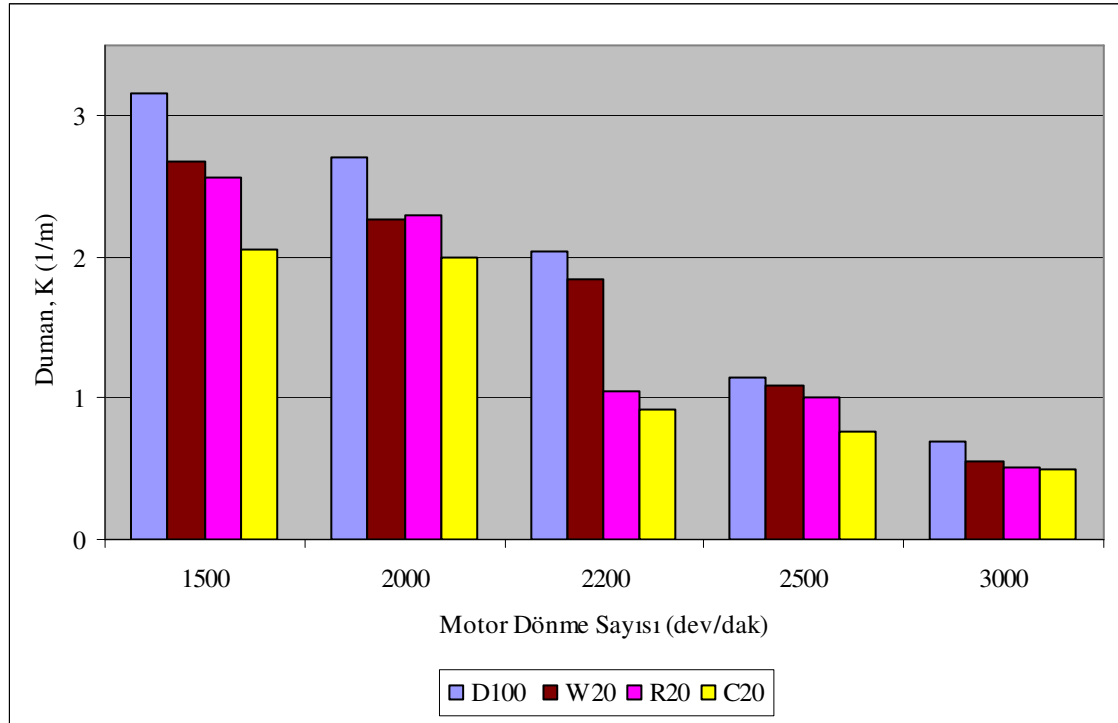


Şekil 5.7 Dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının kullanılmasında termik verim

5.3. Motor Emisyonları Ölçüm Sonuçları

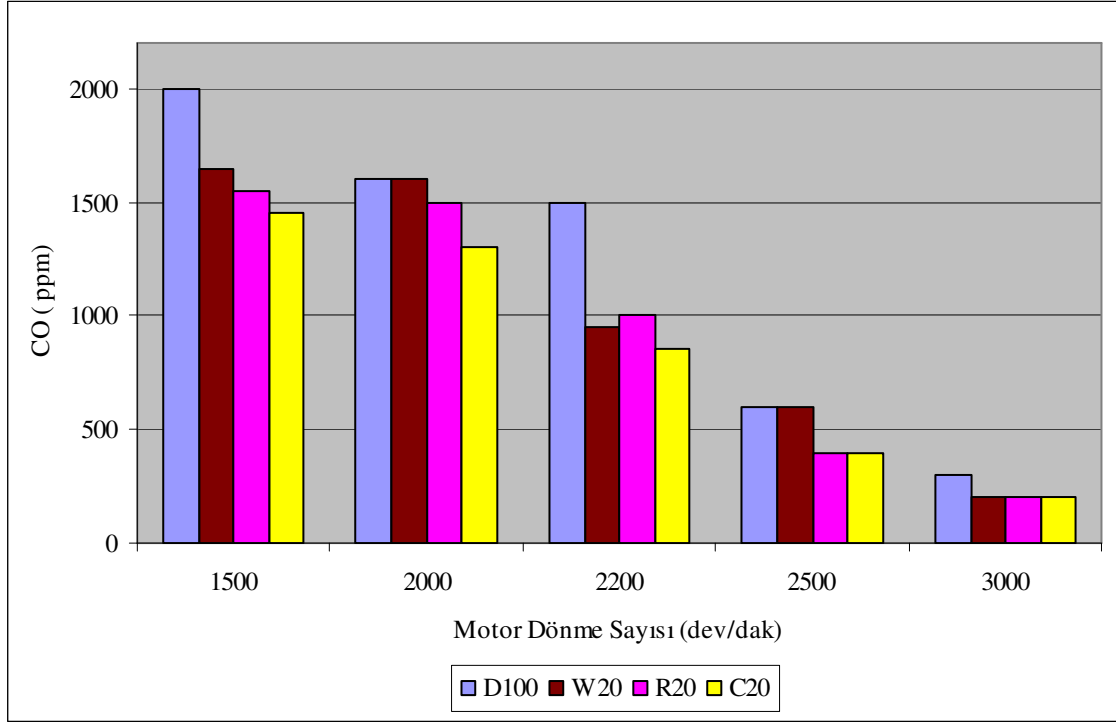
W20, C20 ve R20 karışımları kullanımında, farklı motor hızlarında ölçülen duman koyuluğu değerleri, dizel yakıtı kullanımında ölçülen değerler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Duman (is-karbon) koyuluğunun azalması yanma veriminin bir miktar arttığının göstergesi olmakla birlikte, esasen hava kirliliğinin azalması yönünde önem taşımaktadır. Farklı motor dönme sayılarında biyodizel kullanımı ile duman emisyonlarında, dizel yakıtı kullanımına göre %5 ila %50 oranında değişen önemli düşüşler meydana gelmiştir. Motor devir sayısı arttıkça hava yakıt oranı daha da artarak duman koyuluğu azalmaktadır. Çanakçı ve Van Gerpen (2001)'in çalışmalarında ve Makarevicene ve Janulis (2003) tarafından kanola yağı metil ve etil esterleri ile gerçekleştirilen

çalışmalarda da benzer şekilde duman emisyonunda önemli miktarlarda azalma meydana gelmiştir.



Şekil 5.8 Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen duman emisyonları

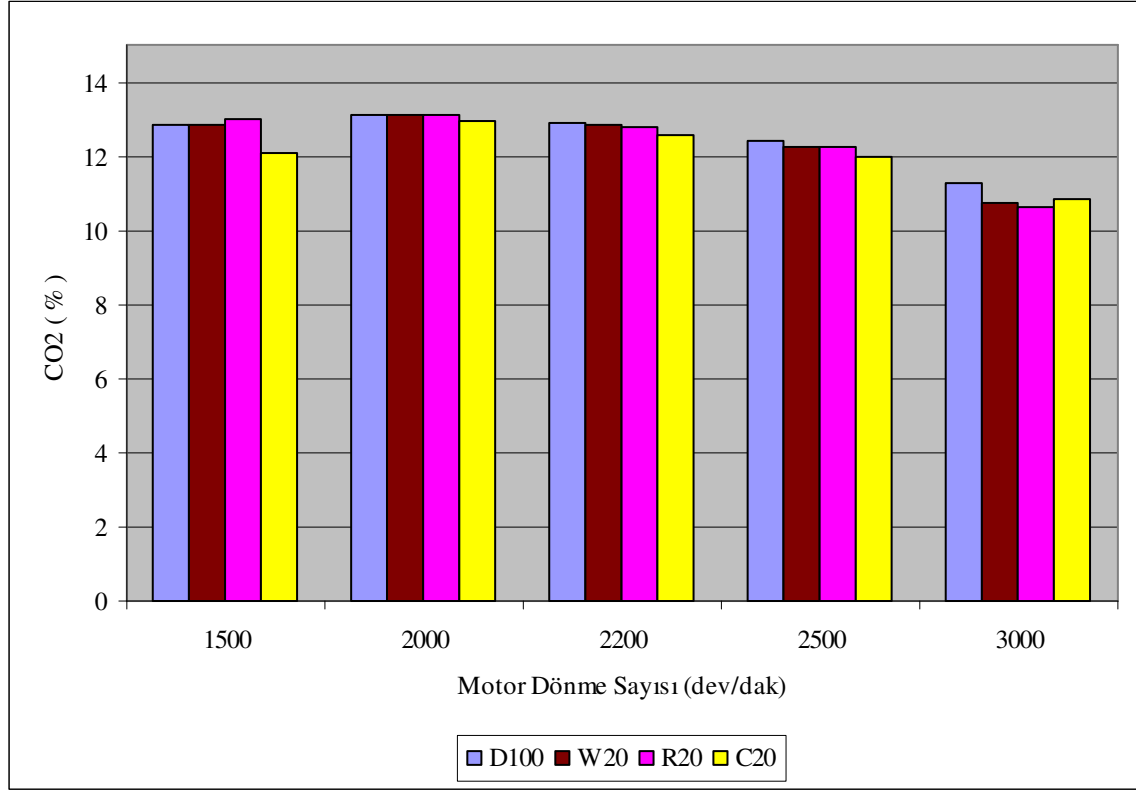
CO emisyonları, W20 karışımı ile 2000 ve 2500 dev/dak hızlarda, dizel yakıtı ile aynı değerde ölçülmesine rağmen, diğer biyodizel karışımlarında ve motor hızlarında CO emisyonları miktarında %7 ila %43 oranları arasında değişen önemli azalmalar meydana gelmiştir (Şekil 5.9). Biyodizel kullanımı ile CO emisyonlarında, Kalligeros vd. (2003) tarafından ayçiçek yağı ve zeytin yağı metil esterleri ile yapılan çalışmada yaklaşık aynı oranlarda, Makareviciene ve Janulis (2003) ile Çanakçı ve Van Gerpen (2001) tarafından yapılan çalışmalarda daha küçük oranlarda olsa da önemli azalmalar olduğu görülmüştür. CO emisyonunda duman koyuluğundaki duruma benzer bir durum bulunmaktadır. İkinci bölümde açıklandığı gibi, dizel motorlarda yanma difüzyon alevi şeklinde gerçekleştiği için yakıt demetinin merkezinde zengin bir bölge olmaktadır. Biyodizel karışımları içerisindeki oksijen içeriği yanmanın zengin olduğu bölgede yanmanın daha verimli olmasını temin ederek CO emisyonlarını düşürmektedir.



Şekil 5.9 Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen CO emisyonları

DeneySEL çalışmalarda hem dizel hem biyodizel karışımlarının hidrokarbon değerleri ölçülmüş olmasına rağmen çok küçük değerlerde (5ppm in altında) olduğu için bunların karşılaştırılması burada yapılmamıştır.

Şekil 5.10'da gösterildiği üzere, biyodizel karışımları kullanımı ile, dizel yakıtı kullanımına göre CO₂ emisyonlarında meydana gelen değişim değerleri oldukça düşüktür. CO₂ emisyonları, sadece R20 yakıtı ile 1500 dev/dak motor hızında yapılan ölçümlerde %1 gibi küçük bir oranda artar iken diğer ölçümlerin tümünde %1 ila %5 oranları arasında azalmıştır. Çanakçı ve Van Gerpen (2001) tarafından yapılan çalışmada 1400 dev/dak motor hızında CO₂ emisyonlarında %0.04-0.06 oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Biyodizel ilavesi ile yanmadaki iyileşme CO'nin bir kısmının CO₂'e dönüşmesini sağlar ve CO₂ oranında bir artış olur. Bununla birlikte dizel motorlarda CO emisyonu, CO₂'e göre oldukça küçük oranda olmasından dolayı beklenen artışın küçük oranda olacağı bilinmektedir. CO'deki azalma ile birlikte CO₂'de de düşme, biyodizel içerisindeki karbon oranının dizel yakıtı göre bir miktar az olması ile açıklanabilir.

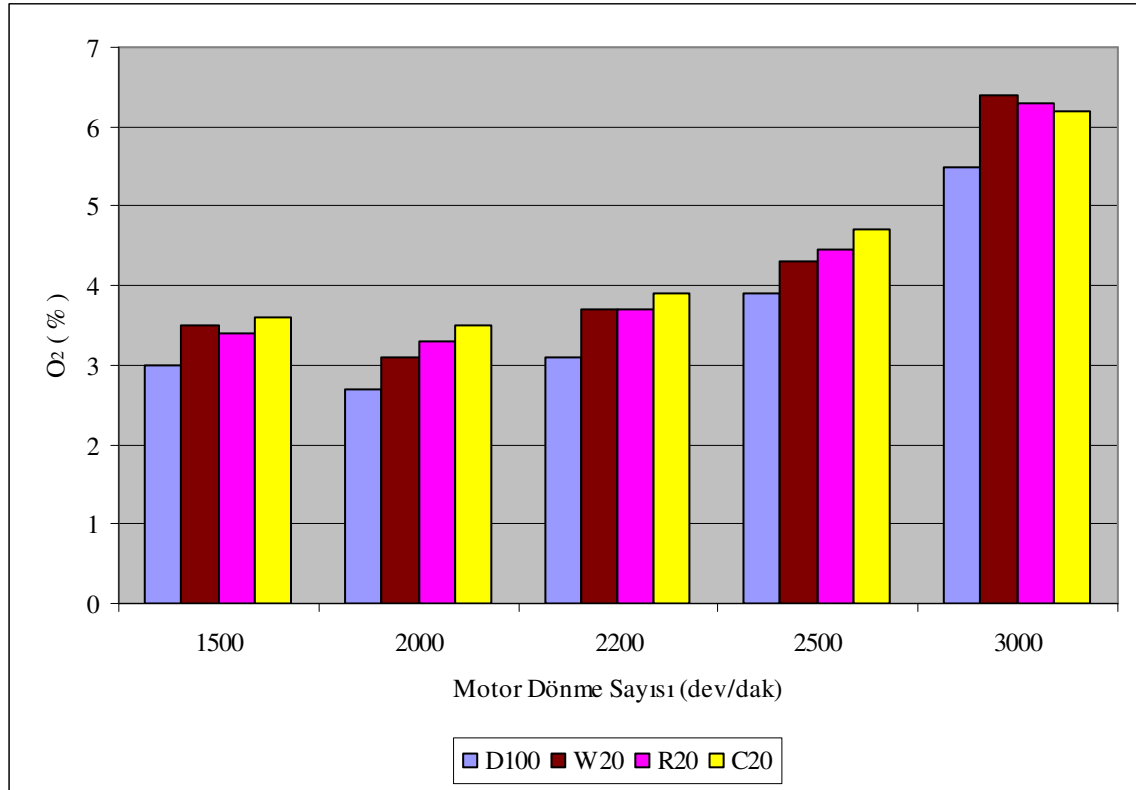


Şekil 5.10 Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen CO₂ emisyonları

Biyodizel karışımları kullanımı ile, dizel yakıtı kullanımına göre, O₂ emisyonlarında Al-Widyan vd (2002) tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara benzer olarak artış yönünde önemli büyüklüklerde değişimler meydana gelmektedir. Şekil 5.11’de gösterildiği gibi, biyodizel yakıtların, dizel yakıtına nazaran daha yüksek miktarda oksijen içermesinin doğal bir sonucu olarak, O₂ emisyonlarında %10 ila %29 oranları arasında değişen bir artış olmaktadır.

Çanakcı ve Van Gerpen (2001)’in çalışmaları ve Gonzalez Gomez vd. (2000) tarafından atık yağdan üretilen biyodizel yakıtlar ile yapılan çalışmalar da göstermektedir ki biyodizel kullanımı ile yanma prosesindeki iyileşme CO ve duman emisyonlarını olumlu yönde etkilerken, NO_x emisyonlarını ters yönde etkileyerek, artmasına neden olmaktadır. Ayrıca biyodizel yakıtların dizel yakıtı göre daha yüksek miktarda oksijen içermesi, yanma sıcaklığının yükselmesine, ortamda azotla okside olabilecek oksijen miktarının yüksek olmasına yol açması nedeni ile NO_x emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca

biyodizel içerisinde dizel yakıtı göre daha az oranda kükürt bulunmasından dolayı SO_2 emisyonlarında dikkate değer azalma olmaktadır.



Şekil 5.11 Biyodizel karışımları ve dizel yakıtı kullanımında ölçülen O_2 emisyonları

6. SONUÇLAR

Ham ve atık bitkisel yağlardan üretilebilen biyodizel yakıtlar, dizel No.2 yakıtına alternatif yenilenebilir yakıtlardır. Yenilenebilir olmaları yanında, dizel motorların zararlı egzoz emisyonlarında da azalma sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada, atık bitkisel yağ, ham kanola yağı ve nötr pamuk yağından metil alkol ve sodyum hidroksit kullanılarak standart alkali transesterifikasyon metodu uygulanması suretiyle sırası ile %87,6, %94,2 ve %98,5 verimle metil esterler elde edilmiştir. Üretilen biyodizellerin standartlarda aranan özelliklerin tamamının tespit ettirilmesi için gerekli maddi destek bulunamamıştır. Bununla birlikte bölüm imkanları ile, önemli özelliklerden olan yoğunluk ve viskozite değerlerinin ölçümleri yapılmıştır. Her üç biyodizelin 15 °C' deki yoğunlukları EN 14214 standardında verilen aralıktadır. Bununla birlikte bu biyodizellerin 40°C'deki viskoziteleri EN 14214 standartlarında verilen üst sınırı bir miktar aşmaktadır. Üretilen biyodizel yakıtların viskoziteleri incelendiğinde, her üç biyodizel yakıtının da viskozitesinin dizel yakıtına göre yüksek olduğu, biyodizeller arasında ise atık yağdan üretilenin en yüksek viskozite değerine sahip olduğu görülmüştür. Sıcaklık düştükçe viskoziteler arasındaki farklar artmaktadır. Bu sonuç kış şartlarında özellikle %100 oranında biyodizel yakıt kullanımında katkı maddelerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Üretilen biyodizel yakıtlar %20 hacimsel oranında dizel No.2 yakıt ile karıştırılarak ön yanma odalı dizel bir motorda performans ve emisyon değerleri bakımından dizel No.2 yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Performans ölçümleri biyodizel yakıtlar açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Dizel No.2 yakıtına %20 oranında biyodizel yakıtı karıştırılarak yapılan motor test çalışmaları neticesinde elde edilen moment, güç ve termik verim değerlerinin, dizel No.2 yakıtı ile ölçülen değerlere çok yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. Biyodizel

karişimlerinin kullanılması ile özgül yakıt tüketimi, dizel yakıtına göre az bir miktarda artmış, egzoz gazı ve yağlama yağı sıcaklıkları ise azalmıştır.

Deneylerde egzoz gazında CO, CO₂, O₂, hidrokarbon ve duman emisyonları ölçülmüştür. Emisyon ölçümleri sonuçlarında, duman ve CO emisyonu değerlerinde %20 biyodizel kullanımı ile dizel yakıtına göre önemli miktarlarda azalma meydana gelmiştir. CO₂ emisyonlarında ise genel olarak azalma yönünde küçük değişimler görülmüştür. Biyodizelin oksijen içeriğinin fazla olması doğal olarak O₂ emisyonlarında bir miktar artışa neden olmuştur. Dizel yakıt ve biyodizel karişımlarının hidrokarbon emisyonları çok küçük değerlerde (5ppm) olduğu için karişılaştırma yapılamamıştır. Ayrıca dizel motorlarda önemli emisyonlardan olan SO₂ ve NO_x ölçümü cihaz olmadığı için gerçekleştirilememiştir. Bununla birlikte biyodizel içinde dizel yakıtına göre çok az oranda kükürt olmasından dolayı SO₂ emisyonlarında kesin olarak azalma beklenmektedir. NO_x emisyonunun genel olarak motor tipine, biyodizel özelliklerine ve çalışma şartlarına bağlı olmakla birlikte biyodizel kullanımı ile bir miktar artması beklenmektedir. Yanmanın iyileşmesi ile CO ve is miktarlarının azalmasına sebep olan yakıt içerisinde yaklaşık %10 mertebelerindeki oksijen, NO_x emisyonlarının artmasının da en önemli etkenidir.

Elde edilen sonuçlar standart alkali transesterifikasyon metodu ile atık bitkisel yağ, ham kanola yağı ve nötr pamuk yağından üretilen biyodizellerin dizel No.2 yakıtına iyi bir alternatif yakıt olabileceğini göstermektedir. %20 biyodizel-dizel yakıtı karişımının motorda hiçbir değişiklik yapılmadan kullanılabiliceği, performans ve emisyon değerleri açısından kısa süreli denemeler ile ortaya konmuştur. Bununla birlikte biyodizel özelliklerinin iyileştirilmesi ve uzun süreli denemeler ile motorda performans ve emisyon ölçümleri yapılarak, biyodizel kullanımının motor malzemeleri üzerine etkileri incelenmelidir.

KAYNAKLAR

- Agarwal, A.K. ve Das, L.M. (2001). Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines. **J Eng Gas Turbine Power Trans ASME**, 123: 440–447.
- Alcantara, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M.J., Navarro, A. (2000). Catalytic production of biodiesel from soybean oil, used frying oil and tallow. **Biomass Bioenergy**, 18: 515–527.
- Altın, R., Çetinkaya, S., Yücesu, H.S. (2001). The potential of using vegetable oil fuels as fuel for Diesel engines. **Energy Conversion & Management**, 42: 529–538.
- Al-Widyan M.I. ve Al-Shyoukh A.O. (2002) Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. **Bioresource Technology**, 85: 253–256.
- Al-Widyan, M.I., Tashtoush, G., Abu-Qudais, M. (2002). Utilization of ethyl ester of waste vegetable oils as fuel in diesel engines. **Fuel Processing Technology**, 76: 91-103
- ASTM 6751 (2003). Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 975 (2004). Standard specification for diesel fuel oils. ASTM, West Conshohocken, PA.
- Beggs, R.E. (2001) Renewable Oil Fuels and Diesel Engines as Components of Sustainable System Design. Master of Science Thesis, **B.E.S, University of Waterloo**, Ontario, s. 124-126.
- Crabbe, E., Nolasco-Hipolito C., Kobayashi G., Sonomoto K., Ishizki, A. (2001). Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. **Process Biochemistry**, 37:65–71.
- Çanakcı, M. ve Gerpen, J.H.V. (2001). Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. **2001 ASAE Annual International Meeting**, Sacramento, U.S.A. Paper No : 016050, s.3.
- Demirbaş A. (2003). Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey. **Energy Conversion and Management**, 44: 2093–2109.

- Demirbaş, A. (2002) Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. **Energy Conversation and Management**, 43: 2349-2356.
- DİE (Devlet İstatistik Enstitüsü) (2004). Devlet İstatistik Enstitüsü VII. Genel Tarım Sayımı, 28 Mayıs – 30 Eylül 2001.
<http://www.die.gov.tr/TURKISH/SONIST/TARIM/290502/290502y.html>
- Dorado M.P., Ballesteros E., Arnal J.M., Gomez J., Lopez F.J. (2003). Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. **Fuel**, 82:1311–1315.
- EN 14214 (2003). Automotive fuels-fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines-requirements and test methods. European Standard.
- EPA (Environmental Protection Agency) (2002) “Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions, Draft Technical Report”, **EPA, EPA420-P-02-001**, s. ii
www.epa.gov/OMS/models/biodsl.htm.
- ETKB (TC. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı) (2004).
<http://www.enerji.gov.tr/enerjiuretimi.htm>, <http://www.enerji.gov.tr/enerjituketimi.htm>.
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization) (2005). <http://faostat.fao.org>.
- Fukuda,H., Kondo,A., Noda,H. (2001). Review: Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, Vol.:92 No:5: 405-416.
- Gerpen, J.V., Shanks,B., Pruszko,R., Clements,D., Knothe,G. (2004). “Biodiesel Production Technology, August 2002–January 2004 Subcontractor Report” **NREL National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-36244**, Colorado, s.22-27.
www.nrel.gov/docs/fy04osti/36244.pdf
- Gonzalez Gomez, G., Hildige, R.H., Leathy, J.J., O'Reilly, T., Supple, B., Malone, M. (2000). Emission and performance characteristics of a 2 litre Toyota diesel van operating on esterified waste Cooking oil and mineral diesel fuel. **Environmental Monitoring and Assessment**, 65: 13–20.
- Graboski M.S. ve McCormick R.L. (1998). Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in disesel engines. **Prog. Energy. Combst. Sci.**, 24: 125-164.
- Graboski, M.S., Mc Cormick, R.L., Alleman, T.L., Herring, A.M. (2003). The effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC Series 60 Diesel engine, Final Report February 2003, **National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-31461.**, Golden, CO, USA.
- Haas, M.J. ve Bloomer, S., Scott, K. (2000). Simple, high-efficiency synthesis of fatty acid methyl esters from soapstock. **JAOCs**, 77: 373–379.

- Haas, M.J., Foglia, T.A. (2002). Cheaper feedstocks for biodiesel. **Industrial Bioprocess**, 24: 4–5.
- Haas, M.J., Michalski, P.J., Runyon, S., Nunez, A., Scott, K.M. (2003). Production of FAME from acid oil, a by-product of vegetable oil refining. **JAOCs**, 80: 97–102.
- Haas, M.J., Scott, K.M., Alleman, T.L., Mc Cormick, R.L. (2001). Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: a high quality renewable fuel produced from a waste feedstock. **Energy Fuels**, 15: 1207– 1212.
- Heywood, J. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals, **Mc Graw-Hill**, Newyork, s. 491-558, 81-83, 145-154.
- Hofman V. ve Solseng E. (2002). “Biodiesel fuel use in an unmodified diesel engine” An ASAE/CSAE Meeting Presentation, Paper No: MBSK 02-109.
- Kalligeros, S., Zannikos, F., Stournas, S., Lois, E., Anostopoulos, G., Teas, Ch., Sakellaropoulos, F. (2003). An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine. **Biomass and Bioenergy**, 24: 141 – 149.
- Karaosmanoglu, F. (1999). Vegetable oil fuels: a review. **Energy Sources**, 21:221–231.
- Knothe G., Dunn, R.O., Bagby, M.O. (1996). Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels. The Official Site of The National Biodiesel Board, http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19961201_gen-162.pdf
- Kolsarıcı,Ö., Başalma,D., İşler,N., Arıoğlu,H., Gür,A., Olhan,E., Sağlam,C. (2005). Yağ Bitkileri Üretimi. www.zmo.org.tr/etkinlikler/6tk05/020ozerkolsarici.pdf
- Körbitz,W. (1999) Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect. **Renewable Energy**, 16: 1078-1083.
- Körbitz,W. (2002). “New Trends in Developing Biodiesel World-Wide”, **Evaluating & Exploiting the Commercial Uses of Ethanol, Fuel Alcohol & Biodiesel**, Singapore, s. 5, <http://www.novem.nl/default.asp?menuId=10&documentId=26427>
- Ma, F. ve Hanna, M.F. (1999). Biodiesel production: A review. **Bioresource Technology**, 70:1–15.
- Makareviciene, V. ve Janulis, P., (2003). Environmental effect of rapeseed oil ethyl ester. **Renewable Energy**, 28: 2395–2403.
- Monyem A. ve Van Gerpen J. (2001). The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. **Biomass and Bioenergy**, 20: 317-325.

- Nas, S., Gökalp, H.Y., Ünsal, M. (2001). Bitkisel Yağ Teknolojisi, **Mühendislik Fakültesi Matbaası**, Denizli, s. 43-58.
- Öğüt, H.ve Oğuz, H. (2005). Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel, **Nobel Yayın Dağıtım**, Ankara, s.43-98
- Özaktaş, T. (2000). Compression Ignition Engine Fuel Properties of a Used Sunflower Oil– Diesel Fuel Blend. **Energy Sources**, 22: 377-382.
- Özaktaş, T., Cigizoglu, K.B., Karaosmanoglu, F. (1997) Alternative diesel fuel study on four different types of vegetable oils of Turkish origin. **Energy Sources**, 19 :173–181.
- Öztürk,M. (2004). Kullanılmış Bitkisel ve Hayvansal Yağlar, Çevre ve Orman Bakanlığı. www.cevreorman.gov.tr/belgeler/yaglar.pdf
- Pramanik, K. (2003). Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Renewable Energy**, 28: 239–248.
- Raneses, A.R., Glaser, L.K., Price, J.M., Duffield, J.A. (1999). Potential biodiesel markets and their economic effects on the agricultural sector of the United States. **Industrial Crops and Products**, 9: 151-162.
- Safgönül,B., Ergeneman,M., Aslan,H.E., Soruşbay,C. (1995). İçten Yanmalı Motorlar, **Birsen Yayınevi**, İTÜ Makine Fakültesi s. 50-57.
- Schumacher L.G., Borgelt S.C., Hires W.G. (1993). Fueling used diesel engines with methyl-esters soybean oil, **ASAE**, 11: 37-40.
- Shimada, Y., Watanabe, Y., Sugihara, A., Tominaga, Y. (2002). Enzymatic alcoholysis for biodiesel fuel production and application of the reaction to oil processing. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 17: 133–142.
- Staudt, W. (2003). Motorlu Taşıt Tekniği , Kulaksız, Ö., Çakır, Ö., **Milli Eğitim Basımevi**, s. 120-121.
- Süzer, S. (2004). Kanola Tarımı ve Biomotorin Üretimi, Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü, www.ziraatci.com/editor/editsayfa.asp?editid=119&katid=1&kategori=Tarla%20Bitkileri
- TAGEM (Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü) (2004). Türkiye’de Yağlı Tohumlar Üretimi ve Araştırmaları, 1 Haziran 2004, Samsun, Dr. Servet KEFİ, www.tagem.gov.tr/yeni%20web/HABERLER/kolza/3.pdf
- Tickell, J. (2003) From the fryer to the tank-The complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel. **Roman, K., Joshua Tickell Publications**, s. 66-67.

- Tomasevic, A.V. ve Siler-Marinkovic, S.S. (2003). Methanolysis of used frying oil. **Fuel Process Technology**, 81:1–6.
- U.S. DOE (Department of Energy) (2004), “Biodiesel Basics, Biodiesel Handling And Use Guidelines” DOE, DOE/GO-102004-1999 September 2004, s.4.
- Ulusoy, Y. ve Tekin, Y. (2005). Kullanılmış Yağ Metil Esterinin Türkiye Şartlarında Dizel Motorlu Bir Araçta Kullanımı Ve Emisyon Sonuçları. <http://www20.uludag.edu.tr/~yahyau/calismalar.htm>.
- 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: 2373–2386.
- Usta, N., Öztürk, E., Can, Ö., Conkur, E.S., Nas, S., Çon, A.H., Can, A.Ç., Topcu, M. (2005). Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine. **Energy Conversion and Management**, 46: 741-755.
- Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, 89:1-16

ÖZGEÇMİŞ

Yazar İsmail TİLLEM, 16/07/1978, Denizli doğumlu olup, ilk ve orta öğrenimini yine Denizli’de yerine getirmiştir. 1992 yılında “Denizli Lisesi”nde başladığı lise öğrenimini, 1995 yılında tamamlamıştır. Lisans eğitimini “İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü”nde 1995 ve 2000 yılları arasında gerçekleştirmiştir.

Lisans eğitiminin tamamlanmasından sonra “Kaplan International Educational Center, Los Angeles/ABD”de altı aylık “İngilizce” dil eğitimi alarak, 2001 yılı Güz Dönemi’nde “Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı”nda tezli “Yüksek Lisans Programı” öğrenimine başlamıştır.