

**KATI HETEROJEN KATALİZÖR SİSTEMİNDE  
TRANSESTERLEŞME TEPKİMESİNİN İNCELENMESİ**

**Fatih BAĞCI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYA**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2013  
ANKARA**

Fatih BAĞCI tarafından hazırlanan “KATI HETEROJEN KATALİZÖR SİSTEMİNDE TRANSESTERLEŞME TEPKİMESİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Nebahat DEĞİRMENBAŞI AKGÜL .....  
Tez Danışmanı, Kimya Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Kimya Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Naki ÇOLAK .....  
Kimya Anabilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Doç. Dr. Nebahat DEĞİRMENBAŞI AKGÜL .....  
Kimya Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Zeynel SEFEROĞLU .....  
Kimya Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 24/06/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU .....  
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fatih BAĞCI

# KATI HETEROJEN KATALİZÖR SİSTEMİNDE TRANSESTERLEŞME TEPKİMESİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek lisans tezi)

Fatih BAĞCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2013

## ÖZET

Günümüzde çoğu ülkede enerji için ağırlıklı olarak kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar kullanılmaktadır. Enerjiye olan ihtiyacın artması, fosil kaynaklı yakıtların hızla tüketilmesine ve çevre kirliliğinin anormal şekilde artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple yenilenebilir enerjiye olan gereksinim artmıştır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji türlerinden biri olan yağ asidi metil esterlerin, transesterleşme tepkimesi ile sentezi yapıldı. Farklı oranlarda  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü sentezlendi. Bu katalizörler kanola yağı, soya yağı ve fındık yağının çeşitli alkol türleri ile transesterleşme tepkimesinde kullanıldı. Çeşitli alkoller, çeşitli yağlar, alkol/yağ oranı, katalizör miktarı ve tepkime süresi gibi değerler değiştirilerek transesterleşme tepkimesi için optimum koşullar bulundu. Elde edilen yağ asidi metil esterlerin yapısı ATR-IR ve  $^1\text{H-NMR}$  spektroskopisi ile karakterize edildi.

Bilim Kodu : 201.1.112

Anahtar Kelimeler : Yenilenebilir Enerji, Transesterleşme, Lityum Nitrat,  
Kalsiyum Oksit

Sayfa Adedi : 96

Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Nebahat Değirmenbaşı AKGÜL

**STUDY OF HETEROGENEOUS SOLID CATALYST SYSTEM  
TRANSESTERIFICATION REACTION**

**(M.Sc. Thesis)**

**Fatih BAĞCI**

**GAZİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**June 2013**

**ABSTRACT**

Nowadays, in most countries, fossil fuels as petroleum, coal, natural gas are mainly used for energy. Rising of energy demand has caused to exhausting of fossil based fuels rapidly and increasing of environmental pollution anormally. With this reason renewable energy demand has gone up. In this study, fatty acid methyl esters which are one of renewable energy kinds were synthesized with transesterification reaction.  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  catalyts were synthesized in different rates. These catalyts were tested with canola oil, soybean oil, nut oil and some alcohol kinds in that reaction. The optimum conditions were found for transesterification reaction with changing values as various alcohols, various oils, alcohol/oil ratio, amount of catalyst and reaction time. The structure of fatty acid methyl esters were characterized by ATR-IR and  $^1\text{H-NMR}$  spectroscopy.

**Science Code : 201.1.112**

**Key Words : Renewable Energy, Transesterification, Litium Nitrate, Calcium Oxide**

**Page Number : 96**

**Adviser : Assoc. Prof. Dr. Nebahat Değirmenbaşı AKGÜL**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni destekleyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Nebahat DEĞİRMENBAŞI AKGÜL'e, laboratuvar çalıőmalarımdaki desteğinden dolayı arkadaşım Samet COŐKUN'a, manevi ve maddi desteğini gördüğüm ailem ve çalıőmalarımın tüm aşamasında bana olan yardımı ve sevgisi için biricik eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

**İÇİNDEKİLER****Sayfa**

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımını .....	5
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması .....	5
2.2.1. Güneş enerjisi.....	6
2.2.2. Hidroelektrik enerji .....	9
2.2.3. Jeotermal enerji .....	11
2.2.4. Rüzgar enerjisi.....	14
2.2.5. Biyokütle enerjisi .....	16
2.3. Biyoyakıt ve Türleri .....	23
2.3.1. Biyoetanol .....	23
2.3.2. Yağ asidi metil esterleri (YAME-Biyodizel) .....	24
2.4. Transesterleşme Tepkimesi.....	31
2.5. Katalizörler.....	35
2.5.1. Homojen katalizörler .....	35

	<b>Sayfa</b>
2.5.2. Heterojen katalizörler .....	38
2.5.3. Enzimatik katalizörler .....	39
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	49
4.1. Kullanılan Kimyasal Malzemeler .....	49
4.1.1. Lityum nitrat .....	49
4.1.2. Metanol .....	49
4.1.3. Etanol .....	49
4.1.4. Propanol .....	50
4.1.5. Kanola yağı .....	50
4.2. Kullanılan Cihazlar .....	51
4.2.1. Gaz kromatografisi .....	51
4.2.2. ATR-IR spektroskopisi .....	51
4.2.3. <sup>1</sup> H-NMR spektroskopisi .....	51
4.2.4. Terazî .....	51
4.2.5. Manyetik karıştırıcı .....	51
4.3. Deneylerin Yapılışı .....	51
4.3.1. Katalizörün hazırlanışı .....	52
4.3.2. Transesterleşme tepkimesi .....	53
4.3.3. Ayırma .....	53
4.3.4. Alkolün uzaklaştırılması .....	53
4.3.5. Yağ asidi alkil esterlerin yıkanması .....	53

	<b>Sayfa</b>
4.3.6. Yağ asidi alkil esterlerin verimi.....	54
4.3.7. Alkali tuz/ CaO oranı .....	54
4.3.8. Alkol/yağ oranı .....	54
4.3.9. Sürenin etkisi .....	54
4.3.10. Alkolün etkisi.....	54
4.3.11. Yağın etkisi .....	55
4.3.12. Katalizör miktarının etkisi .....	55
4.3.13. Kalsinasyon sıcaklığının etkisi .....	55
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	56
5.1. LiNO <sub>3</sub> /CaO ve Alkol/yağ Oranının Etkisi .....	56
5.2. Katalizör Miktarının Etkisi .....	60
5.3. Tepkime Süresinin Etkisi .....	62
5.4. Çeşitli Yağların Verim Üzerine Etkisi .....	63
5.4.1. Yağ türünün (metanolde) verim üzerine etkisi.....	63
5.4.2. Yağ türünün (etanolde) verim üzerine etkisi.....	64
5.4.3. Yağ türünün (propanolde) verim üzerine etkisi .....	66
5.4.4. Yağ türlerinin (farklı alkol çeşitlerinde) verim üzerine etkisinin karşılaştırılması .....	67
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	68
KAYNAKLAR .....	77
EKLER .....	83
EK-1 Transesterleşme Tepkimesi İçin Gerekli Hesaplamalar .....	84
ÖZGEÇMİŞ.....	86

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kanola yağının özellikleri .....	50
Çizelge 5.1. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (3:1 alkol/yağ oranında).....	57
Çizelge 5.2. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (9:1 alkol/yağ oranında).....	58
Çizelge 5.3. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (12:1 alkol/yağ oranında).....	59
Çizelge 5.4. Katalizör miktarının verim üzerine etkisi.....	61
Çizelge 5.5. Tepkime süresinin verim üzerine etkisi .....	62
Çizelge 5.6. Farklı yağ türlerinin (metanolde) verim üzerine etkisi .....	64
Çizelge 5.7. Farklı yağ türlerinin (Etanolde) verim üzerine etkisi .....	65
Çizelge 5.8. Farklı yağ türlerinin (Propanolde) verim üzerine etkisi .....	66
Çizelge 6.1. LiNO <sub>3</sub> /CaO katalizörünün transesterleşme tepkimesindeki etkinliğinin karşılaştırılması .....	74

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının dünyadaki kullanım miktarları .....	6
Şekil 2.2. Dünyada güneş enerjisi kurulu gücünün gelişimi .....	8
Şekil 2.3. Dünyada yararlanılan jeotermal enerji türleri ve yüzdeleri.....	12
Şekil 2.4. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi .....	14
Şekil 2.5. Metanoliz reaksiyonu.....	33
Şekil 2.6. Asidoliz reaksiyonu.....	34
Şekil 2.7. İnteresterleşme reaksiyonu .....	34
Şekil 2.8. İnteresterleşme reaksiyonu .....	34
Şekil 2.9. Asit katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması .....	36
Şekil 2.10. Baz katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması .....	37
Şekil 2.11. CaO katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması.....	38
Şekil 4.3. Katalizör hazırlama, transesterleşme tepkimesi süreci .....	52
Şekil 5.1. Transesterleşme Tepkimesi .....	56
Şekil 5.2. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (3:1 alkol/yağ oranında)	57
Şekil 5.3. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (9:1 alkol/yağ oranında)	59
Şekil 5.4. LiNO <sub>3</sub> /CaO oranının verim üzerine etkisi (12:1 alkol/yağ oranında)	60
Şekil 5.5. Katalizör miktarının verim üzerine etkisi .....	61
Şekil 5.6. Tepkime süresinin verim üzerine etkisi .....	63
Şekil 5.7. Farklı yağ türlerinin (Metanolde) verim üzerine etkisi .....	64
Şekil 5.8. Farklı yağ türlerinin (Etanolde) verim üzerine etkisi.....	65
Şekil 5.9. Farklı yağ türlerinin (Propanolde) verim üzerine etkisi.....	66
Şekil 5.10. Farklı yağ türlerinin (farklı alkol çeşitlerinde) verim üzerine etkisi	67

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 6.1. Kanola yağının ATR-IR spektrumu.....	69
Şekil 6.2. Yağ asidi metil esterlerin (YAME-Biyodizel) ATR-IR spektrumu....	70
Şekil 6.3. Kanola yağının <sup>1</sup> H-NMR spektrumu.....	71
Şekil 6.4. Yağ asidi metil esterlerin (YAME-Biyodizel) <sup>1</sup> H-NMR spektrumu ..	72
Şekil 6.5. Kanola yağı ve yağ asidi metil esterlerin (YAME-Biyodizel) <sup>1</sup> H- NMR spektrumlarının karşılaştırılması .....	73

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$m^2$	Metre kare
<b>kj</b>	Kilojul
<b>kWh</b>	Kilowatt saat
<b>GW</b>	Gigawatt
<b>MW</b>	Megawatt
<b>TWh</b>	Terawatt saat
<b>MJ</b>	Megajul
$m^3$	Metre küp
<b>s</b>	Saniye
<b>mg</b>	Miligram
$cm^3$	Santimetre küp
<b>nm</b>	Nanometre
<b>mL</b>	Mililitre
<b>rpm</b>	Dakikadaki devir sayısı
<b>Kcal</b>	Kilokalori

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>ASTM</b>	American society for testing and materials
<b>TS</b>	Türk Standartı
<b>ISO</b>	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
<b>ÖTV</b>	Özel tüketim vergisi
<b>X-RAY</b>	Elektromagnetik radyasyon
<b>AOCS</b>	Amerikan yağ kimyagerleri birliği
<b>BET</b>	Brunaver, Emmett ve Taller
<b>GC</b>	Gaz Kromatografisi
<b>YAME</b>	Yağ asidi metil esterleri
<b>ABD</b>	Amerika Birleşik Devletleri
<b>USD</b>	United States Dollar

## 1. GİRİŞ

Tüm dünya ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir. Fosil yakıt atıklarının neden olduğu çevre sorunları; küresel ısınma, asit yağmurları ve nükleer radyasyon gibi insan hayatını birinci derecede olumsuz etkileyen faktörlerdir. Ancak enerji, insan için o kadar vazgeçilmez bir madde olmuştur ki, insan onu kaybetmekten korkar hale gelmiştir. Bu durum enerji uğruna savaş dahil her türlü riskin göze alınmasına sebep olduğundan, enerji tüketiminin çevreye verdiği zararların uzunca bir süre göz ardı veya ihmal edilmesine neden olmuştur.

Fosil yakıtlar mineral yakıtlar olarak da bilinen hidrokarbon içeren kömür, petrol, doğalgaz gibi doğal enerji kaynaklarının birçoğunun bir süre sonunda tükeneceği beklenmektedir. Bu kaynaklar gün geçtikçe artan ihtiyacı karşılamakta yetersiz kalmakta ve çevre kirliliğinin giderek artmasına neden olmaktadır. Bu problemlerden dolayı tüm dünya ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yönelmektedir ve özellikle ekonomisi iyi olan ülkeler bu konu üzerindeki araştırma geliştirme çalışmalarını gittikçe arttırmaktadırlar. Ancak alternatif olarak kullanacakları yakıtın hangi türde olacağını ve rezervinin ihtiyacı karşılamada ne kadar yeterli olacağını hesaplamak durumundadırlar. Bunun yanı sıra, yakıtın ekonomik olması, fiziksel ve kimyasal özellikleri, yakıtın yanması sonucu oluşan ürünlerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri de belirlenmelidir.

Pratik olarak sınırsız varsayılan, sürekli ve tekrar tekrar kullanılabilen enerjiler (bitkilerden üretilen biyokütle enerjisi gibi) konusundaki araştırmalar iyice artmıştır. Enerji kaynağı olarak ön plana çıkan yenilenebilir enerji kaynakları içinde en büyük potansiyel sahibi "Biyokütle" dir. Ana bileşeni karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli bütün maddelere "Biyokütle Enerji Kaynağı" ve bunlardan elde edilen enerjiye ise "Biyokütle Enerjisi" denir.

Günümüzün en önemli çevre sorunlarından birisi olan küresel ısınmayla yaşadığımız çevresel zorunlulukların da artmasıyla tüm dünyada enerji tarımı önem kazanmış ve bu konuda ülkeler ciddi planlı çalışmalar yaparak “Enerji Tarımı” kapasitelerini yükseltmenin yollarını aramaya başlamışlardır. Petrolde dışa bağımlı, toprak büyüklüğü ve tarımsal potansiyelleri yüksek olan ülkeler tüketme yerine üretmek büyüme tercih etmişler ve hızla “Biyokütle Enerji” kaynaklarına yönelmişlerdir.

Soya, kolza, ayçiçeği, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinden, karbonhidratça zengin bitkilerden, çeşitli bitkisel atıklardan ve endüstriyel atıklar biyokütle enerji kaynağı olarak kullanılır. Biyoyakıtlar ve Biyodizel de biyokütle kökenli olup yeni ve yenilenebilir enerji türlerindedir.

Biyodizel Türkiye’de uygulamaya alınabilecek en önemli alternatif yakıt seçeneklerinden biridir. Biyodizel kullanımı ile petrol tüketiminde ve egzoz gazı kirliliğinde önemli bir azalma gerçekleşecektir. Türkiye bir tarım ülkesi olduğu için biyodizel eldesi için yeterli alt yapıya sahiptir. Biyodizel eldesi için gerekli olan bitkileri kolayca yetiştirebilir ve bu bitkiler biyodizel eldesi için kullanılabilir. Türkiye’de kanola, ayçiçeği, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinin enerji amaçlı tarımı mümkündür. Alınan son tasarruf önlemleriyle soya ve kanola ekimine destek verilmiştir.

Genel olarak orta uzunlukta yağ asidi zincirlerini içeren bir monoalkil ester olan biyodizel; ayçiçeği, soya, kanola, mısır yağları gibi bitkisel yağların bir katalizör eşliğinde, uygun bir alkol ile transesterleşme tepkimesi sonucu elde edilir. Transesterleşme tepkimesi; tepkime şartlarına, alkol/yağ oranına, alkolün türüne, katalizörün miktarı ve cinsine, tepkime sıcaklığına ve süresine ve aynı zamanda tepkimeye giren maddelerin saflık derecesine önemli bir şekilde bağlıdır. Biyodizel eldesinde ürün verimini etkileyen en önemli etken, transesterleşme tepkimesinde kullanılan katalizörler; homojen katalizörler (asit ve alkali olmak üzere), heterojen katalizörler ve enzimatik katalizörler olmak üzere başlıca üç sınıfa ayrılmaktadır [1].

Homojen asit katalizörler olarak sülfirik, fosforik, hidroklorik ve organik sülfonik asitler kullanılır. Asit katalizörlü transesterleşme tepkimesi, alkali katalizör kullanılanlara göre çok daha yavaştır [2].

Homojen alkali katalizörler olarak NaOH, KOH, karbonatlar ve alkoksitler (sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum bütoksit gibi) transesterleşme tepkimesinde kullanılır. Alkali katalizörlü transesterleşme tepkimesi, asit katalizörlü olanlara göre daha avantajlı olduğundan ticari olarak en çok kullanılan yöntemdir. Alkali katalizörlü tepkimelerin su ve serbest yağ asidi içeriğinin kontrolü çok önemlidir, çünkü ortamda bulunan su ve serbest yağ asidi sabunlaşma tepkimesi sonucu sabun oluşmasına neden olabilir [3].

Heterojen ve enzimatik katalizörlerin kullanılması, bahsedilen problemlerin çözümü için alternatif olarak son yıllarda geliştirilmektedir. Ancak ticari olarak bu süreçlerin gündeme gelebilmesi için katı katalizörlerle biyodizel eldesi konusunda literatürdeki boşluğun giderilmesi amacıyla araştırmaların yapılması gerekmektedir.

Heterojen katalizörler olarak zeolit, asitliği arttırılmış kaolinit, sülfatlanmış  $\text{SnO}_2$  gibi katı asitler kullanıldığı gibi bazik katı oksit ve hidroksitler de kullanılmaktadır. Bu katalizörler tepkime ortamından kolaylıkla ayrılabilindiğinden biyodizelin saf olarak eldesi mümkündür.

Enzim katalizörlü transesterleşme tepkimesinde ise; yağları yağ asitlerine parçalayan lipaz enzimi kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmada  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kullanılarak transesterleşme tepkimesi ile yağ asidi metil esterleri (YAME-Biyodizel) elde edilmiştir. Ayrıca, kullanılan katalizör için optimum tepkime koşulların belirlenmesi için, alkol/yağ oranının, farklı yağların, farklı alkollerin, katalizör miktarının ve tepkime süresinin transesterleşme tepkimesi üzerine etkileri incelenmiştir. Optimum tepkime

koşulları belirlendikten sonra elde edilen yağ asidi metil esterlerin yapısı ATR-IR ve <sup>1</sup>H-NMR spektroskopisi ile karakterize edilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışmanın literatüre farklı heterojen katalizörün sentezi ve bu katalizörün transesterleşme tepkimesinde, optimum deney koşulları belirlenerek, yağ asidi metil esterlerin eldesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

## **2. GENEL BİLGİLER**

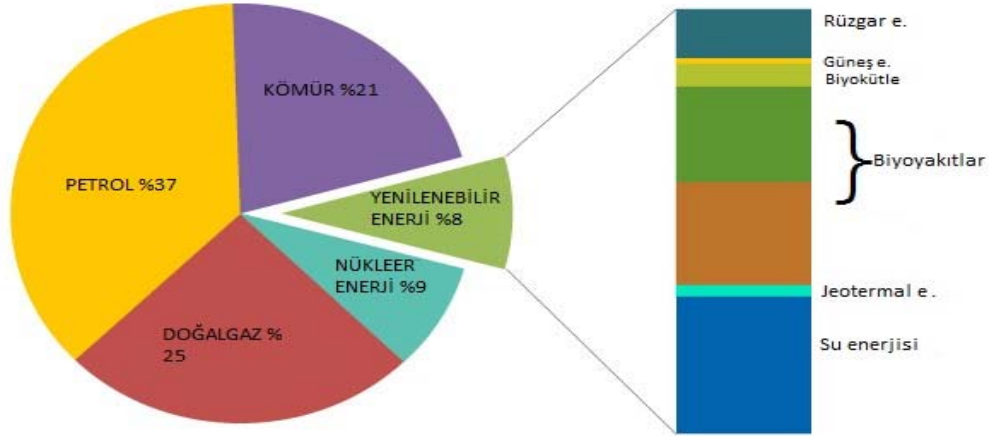
### **2.1. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımını**

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil enerji kaynaklarına göre, insan ve çevresi açısından daha az zararlı olan güneş, hidrolik, rüzgar, jeotermal, biyokütle ve deniz enerjileri gibi doğal enerji kaynaklarıdır. Fosil yakıtların çevreye olan olumsuz etkileri ve fosil yakıt rezervlerinin tükenmekte olması, sürdürülebilir enerji kavramını gündeme getirmiştir. Sürdürülebilir enerji kavramı, tüm birincil enerji kaynaklarından yapılan enerji, üretiminin yüksek verimle ve temiz teknolojilerle gerçekleştirilmesini, fosil yakıtların çevre dostu yeni teknolojilerle değerlendirilmesini, tükenir fosil kaynakların yerine olabildiğince tükenmez (yenilenebilir) enerji kaynaklarının yerleştirilmesini, bir çevrimde atık biçimde ortaya çıkan enerjinin, bir başka çevrimde girdi olarak kullanılmasını kapsayan bunu ekonomik büyüme ile bütünleştiren bir kavramdır.

Endüstri devriminin başlangıcından bugüne, giderek artan ve aşırı boyutlara ulaşan, artışı tükenme pahasına sürdürülen fosil yakıt kullanımı, enerji-çevre sorunlarının oluşmasının temel nedenidir [5].

### **2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması**

Yenilenebilir enerji kaynaklarını güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji ve biyokütle enerjisi olarak sınıflandırabiliriz. Bu enerji kaynaklarının dünyada ki genel kullanım miktarları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Enerji kaynaklarının dünyadaki kullanım miktarları

### 2.2.1. Güneş enerjisi

Güneş çekirdeğindeki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklinde tanımlanan füzyon süreci sonucunda açığa çıkan ışınım enerjisi, güneş enerjisidir. Dünyada 330000 kat daha büyük olan güneş, doğal bir füzyon reaktörüdür. Güneş dünyamız için temiz ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. Sadece çöllerin kapladığı bölgelere gelen yıllık güneş radyasyonunun, günümüzde tüketilen her çeşit enerjinin yüzlerce katı olduğu ileri sürülmektedir [6].

Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiştir, güneş enerjisi çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilmiştir.

Güneş enerjisi günümüzde;

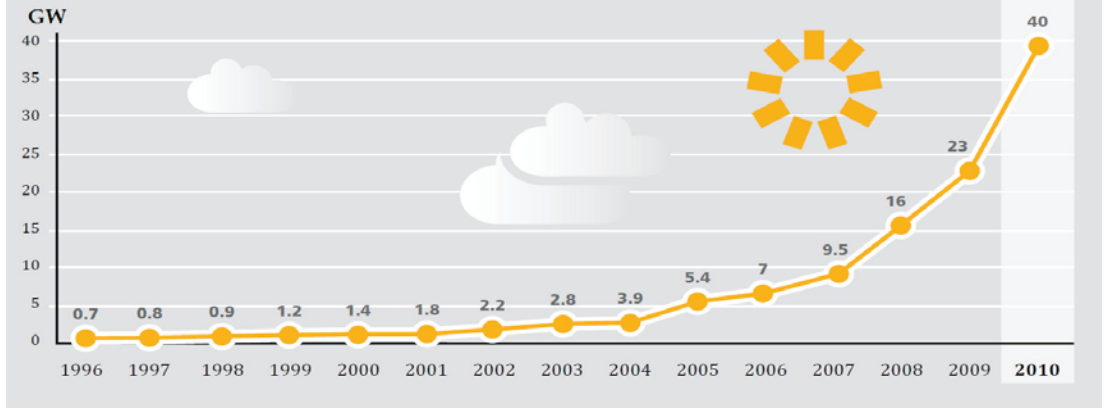
- Konut ve iş yerlerinin ısıtma ve soğutmasında,
- Yemek pişirmede,
- Yüzme havuzu ısıtılmasında,
- Sıcak su temin edilmesi ve tarımsal teknolojide,

- Sera ısıtması ve tarım ürünlerinin kurutulmasında,
- Sanayide (güneş ocakları, güneş fırınları, pişiricileri, deniz suyundan tuz ve tatlı su üretilmesi),
- Güneş pompaları, güneş pilleri, güneş havuzları, ısı borusu uygulamalarında,
- Ulaşım-iletişim araçlarında,
- Sinyalizasyon ve otomasyonda, elektrik üretiminde kontrollü olarak kullanılmaktadır [7].

### Güneş enerjisinden yararlanarak enerji üretimi

Güneş enerjisinden faydalanarak en uygun enerji üretim şekli Güneş kolektörleri vasıtasıyla düşük sıcaklıklarda sıcak su elde edilmesinin kullanımudur. Dünya ölçeğinde yaklaşık olarak 140 milyon m<sup>2</sup> kolektör bulunduğu ve her yıl ortalama olarak 10 milyon m<sup>2</sup> yeni kolektör yapıldığı düşünülmektedir. Bu kolektörlerin toplam ısı gücü 100 GW dır. Bu miktarın ise yeryüzündeki toplam rüzgâr gücünün kapasitesinden daha fazla olduğu düşünülmektedir.

Güneş kolektörlerinin en fazla bulunduğu ülke, 22 milyon m<sup>2</sup>'lik kolektör alanına sahip olan Çin'dir. ABD, Kanada ve Avustralya'nın güneş enerjisinden yararlanması, daha çok yüzme havuzlarının ısıtılması şeklinde gerçekleşmekte ve 18 GW seviyesinde ısı gücüne erişildiği düşünülmektedir. Avrupa ülkelerinin güneş kolektörlerinden yılda ortalama olarak 10 GW ısı ve Japonya'nın 9 GW ısı elde ettikleri bilinmektedir. Dünyada güneş enerjisi kurulu gücünün gelişimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir [8].



Şekil 2.2. Dünyada güneş enerjisi kurulu gücünün gelişimi

### Güneş enerjisinin avantaj ve dezavantajları

#### Olumlu yönleri;

- Tükenmeyen bir enerji kaynağıdır.
- Enerji bağımlılığını kaldırır.
- Ülkemizde kullanım alanı fazladır.
- Taşıma ve ulaştırma giderleri olmadan kullanılabilir.
- Atmosfere herhangi bir direkt kirlenici (zehirli gazlar, sera gazlar gibi) emisyonu bulunmamaktadır.

#### Olumsuz yönleri;

- Verimi düşüktür.
- Mevsimsel ve günlük kesiklik gösterir.
- Başlangıç maliyeti yüksektir.
- Tüketiciler için maliyeti yüksektir.
- Depolanması gerekebilir.

## 2.2.2. Hidroelektrik enerji

Hidroelektrik (hidrolik) enerjisi, hareket halindeki suların sağladığı güç anlamına gelir. Hidroelektrik enerjisi, doğal veya yapay baraj gölleri önüne ve su düşüş düzeyine göre bir hayli alçakta kurulmuş olan hidroelektrik santralleri yoluyla üretilmektedir. Bir başka ifadeyle; Hidroelektrik enerjisi, suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile sağlanan enerji olup, enerji miktarı düşüş yüksekliğine ve debi değişkenlerine bağlıdır. Belli bir düşüş düzeyiyle cebra boru ile türbine gelen suyun potansiyel enerjisi türbinde kinetik enerjiye, türbine bağlı jeneratörde ise; elektrik enerjisine dönüşmektedir. Türbine gelen suyun düşüş yüksekliği ve debisi, üretilecek gücü belirlemektedir.

Kömür ve petrole göre; hidroelektrik enerjisinin bazı ekonomik avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi; harcamanın bir kez yapılması ve üretimin tükendikçe çoğaltılabilmesi, yani yenilenebilmesidir. Beyaz kömür enerjisi olarak bilinen hidrolik enerjisi, yenilebilir enerji kaynaklar grubuna girmektedir [9].

### Su enerjisinden yararlanarak enerji üretimi

Hidrolik enerji elektrik üretiminde en önemli kaynaklardan biridir ve birçok ülkede enerji ihtiyacının %25 den fazlası bu kaynaklardan karşılanmaktadır. Hidrolik enerjinin en yaygın kullanım şekli nehirler üzerine barajlar inşa ederek büyük su rezervuarlarında suyu biriktirmek ve bu suyun potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek esasına dayanmaktadır [10].

Hidroelektrik enerjisinin alternatif bir kaynak oluşu, çevreye etkisinin alt düzeylerde olması, herhangi bir çevre kirliliğine yol açmaması, işletme ve bakım masraflarının az olması ve güvenilir bir enerji arzı sağlayan bir kaynak oluşu ile gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

Dünyanın teknik hidroelektrik kapasitesi 14,2 trilyon kwh/yıl olarak hesap edilmektedir. Ekonomik hidroelektrik kapasite ise 8,1 trilyon kwh/yıl dır.

Dünyadaki teknik kapasitenin %57 sinin ekonomik kapasite olduğu ve en büyük kapasitenin Asya kıtasında olduğu, Asya kıtasını sırasıyla Güney Amerika, Afrika, Kuzey Amerika, Avrupa ve Okyanusya kıtalarının izlediği görülmektedir.

### Su enerjisinin avantaj ve dezavantajları

Olumlu yönleri;

- Ekonomik ömrü uzun,
- Dünya genelinde yaygın,
- Çevre dostu,
- İşletme-bakım gideri düşük,
- Yakıt gideri olmayan,
- Geri ödeme süresi kısa (5–10 yıl),
- Yüksek verimli (% 90'nın üzerinde),
- Yöre halkına ekonomik ve sosyal katkılar sağlayan,

Olumsuz yönleri;

- Baraj yapımı veya yapay bir su kaynağının üretime uygun duruma getirilmesi bulunduğu çevreyi etkiler.
- Doğal ortam üzerinde bazı olumsuzluklar yaratabilir.
- Kullanılan düzeneklerin yatırım maliyetleri yüksektir.
- Kurulumu için büyük alan gerektirir.

### 2.2.3. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji yer kürenin daha sıcak olan merkezinden yüzeye doğru sürekli olarak akan yerkürenin iç ısısıdır. Dünya genelinde yeryüzüne ısı akışı ortalama  $82 \text{ miliwatt/m}^2$  olarak varsayılır. Yerkürenin yaklaşık 10 km derinliği içindeki kayaçların içerdiği ısının dünya enerji gereksinimini 6 milyon yıl karşılayacak büyüklükte olduğu tahmin edilmektedir. Bu enerjiyi kullanan ülke sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Yerkürenin içindeki bu enerji derinlerde iletim yoluyla kayaçlara, yer yüzeyine yaklaşıldıkça akışkanlar aracılığı ile taşınım yoluyla gerçekleşmektedir.

Jeotermal enerji iklimden bağımsızdır. Yer yüzeyine yakın olağan dışı sıcak bölgeler jeotermal alanları oluşturmaktadır. Jeotermal alanlardaki sıcak kayaç ve yüksek sıcaklıklı yer altı suyu diğer alanlara göre daha sığ derinliklerde bulunmaktadır [11].

#### Jeotermal enerjiden yararlanarak enerji üretimi

Jeotermal enerjiden yararlanarak enerji üretim şekilleri şunlardır:

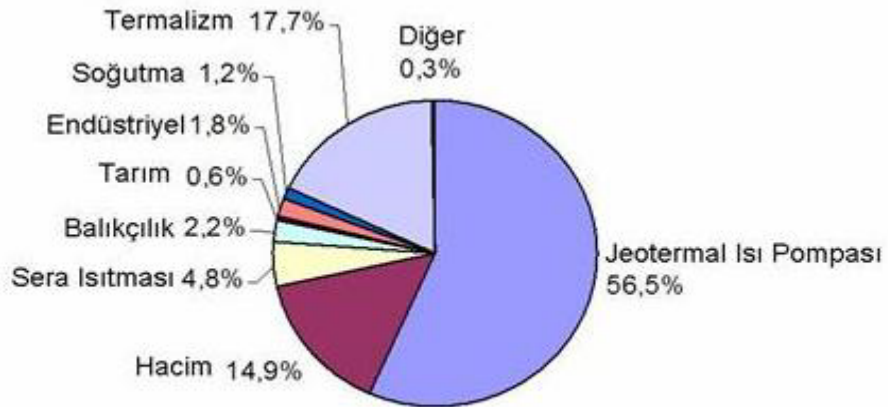
**Elektrik Üretiminde Kullanım:** Halen, hazne sıcaklığı genellikle  $150^\circ\text{C}$ 'den daha yüksek sıcaklıktaki jeotermal akışkandan elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca son zamanlarda geliştirilen, buharlaşma noktaları düşük (Freon, izobütan gibi) gazlar kullanılarak,  $60\text{-}90^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki suların da elektrik üretiminde yararlanılabilmektedir.

**Isıtmada kullanım:** Düşük sıcaklıklı hidrotermal sistemlerden elde edilen sular, doğrudan ısıtmada kullanılmaktadır. Halen bu iş için kullanılmakta olan sıcaklık aralığı  $30^\circ\text{C}\text{-}150^\circ\text{C}$  olmakla beraber, yeni geliştirilen ısı pompaları yardımıyla kullanılan akışkanın alt sıcaklık düzeyi  $5^\circ\text{C}$ 'a kadar düşürülebilmektedir.

Isıtmada kullanımda başlıca uygulama alanları:

- Seraların ısıtılması
- Bina, toprak, cadde gibi ısıtılması
- Havaalanı pistlerinin ısıtılması
- Tropikal bitki, balık, timsah yetiştirmede yüzme havuzu, fizik tedavi merkezleri ve diğer turistik tesislerde
- Kullanım yiyeceklerin kurutulmasında, kerestecilik ve ağaç kaplama işlerinde
- Kâğıt ve dokuma endüstrisinde ağartma maddesi olarak kullanım
- Şeker, ilaç, pastörize süt fabrikalarında
- Bira endüstrisinde: mayalama ve dam ısıtmada
- Soğutma tesislerinde
- Derilerin kurutulması ve işlenmesinde [12].

Dünyada yararlanılan jeotermal enerji türleri ve yüzdeleri Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Dünyada yararlanılan jeotermal enerji türleri ve yüzdeleri [13].

### Jeotermal enerjisinin avantaj ve dezavantajları

Olumlu yönleri;

- Yenilenebilir bir enerji olduğundan, bir başka deyişle, dünya var olduğu sürece, bulutlardan dünyamıza dökülen yağmur, kar gibi atmosferik olaylar da devam ettikçe, bu enerji türünün tükenmeyecek olması, fosil enerji kaynaklarının tükenme olasılığının tartışıldığı günümüzde daha güvenilir bir kaynaktır.
- Enerji tüketiminin artması eğilimi ve enerji dar boğazı birlikte düşünüldüğünde, enerji açığının karşılanması, petrole olan bağımlılığın azalması açısından büyük önemi vardır.
- Jeotermal enerjinin maliyeti, gerek elektrik üretiminde, gerekse ısıtma yönünden diğer enerjilerin maliyetine oranla %50-%80 kadar daha ucuzdur.
- Daha az ve genellikle kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalan ölçüde çevre sorunlarına neden olur. Yeni kuşak jeotermal elektrik santralleri ile jeotermal merkezi ısıtma sistemlerinde hiçbir atım yoktur. Yani tüm istenmeyenler sıfır olup bu enerji çevre dostudur.
- Nükleer enerjinin belirsizliği, çok masraflı olması, kuruluş giderlerinin büyük sermayeyi gerektirmesi, güneş enerjisinin yoğun ve ucuz olmayışı, iç ısıtmada kullanılabilmesi için evlerin yeniden planlanmasının gerekliliği karşısında jeotermal enerji bol, ucuz ve temizdir.
- Diğer enerji türlerine göre kendini kısa sürede amorti etmektedir.
- Ucuz elektrik üretiminin sağlanması, elektrik fiyatlarında istikrar sağlanması, fosil yakıtların fiyatlarındaki dalgalanmaların önlenmesi avantajlar sağlayacaktır [14].

Olumsuz yönleri;

- Yapılarında bulunan bazı zararlı bazı kimyasal maddeler nedeniyle re-enjeksiyon gerektirir.

- Tüketilen kısmın, aynı oranda ve kısa sürede tekrar oluşması olanaklı değildir.
- Jeotermal kaynaklardan çıkan akışkan genellikle aşındırıcı ve kirlilik oluşturan minerallerde içerebilir.
- Ön araştırma ve hazırlık maliyet yüksektir, sondaj için yeterli boş alan olması gerekir [15].

#### 2.2.4. Rüzgar enerjisi

Rüzgâr, güneş enerjisinin dünyanın fazlasıyla değişken olan yüzeyini eşit olarak ısıtmamasından kaynaklanan sıcaklık, yoğunluk ve basınç farklarından dolayı oluşan yatay hava hareketleri olarak tanımlanmaktadır. Güneş var oldukça rüzgârın ve bunun neticesinde de gücünün var olacağı söylenebilir [16].

Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi gigawatt cinsinden Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Dünyada rüzgâr enerjisi kurulu gücünün gelişimi

### Rüzgar enerjisinden yararlanarak enerji üretimi

Rüzgar enerjisi üretimi için kurulan rüzgar santralleri esen rüzgarın pervaneleri döndürmesiyle dönmeye başlayan şaftların bağlı jeneratör sayesinde hareket enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgar enerjisi türbinleri pervane, şaft ve jeneratörden oluşur. Günümüzde ülkemiz de dahil dünyanın birçok noktasında çok sayıda modern yapıda rüzgar tribünleri üretilmektedir.

Büyük boy bir rüzgar enerjisi tribünü yılda yaklaşık 5 milyon kWh elektrik ürettiği düşünülürse, 500 hanenin yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilen bir enerji kaynağı oldukça kullanışlı olacaktır.

Teknolojik gelişmeler her ne kadar nükleer santraller ve kömür santrallerini daha ekonomik enerji üretilebilir hale getirirse de hem çevreye saldıgı zehirli atıklar hem de olası kaza durumlarında yaratacağı trajik sonuçlarla rüzgar enerjisinden elektrik üretimine karşı direnemeyeceklerdir. Rüzgar enerjisi birçok coğrafi bölgede üretimi yapılabilir. Doğada rüzgarın tükenmesi imkansızdır. Kısaca rüzgar enerjisi en yenilenebilir bir enerji formlarından biridir [17].

### Rüzgar enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Olumlu yönleri;

- Diğer bazı enerji kaynaklarında olduğu gibi radyoaktif atık (hatta hiç bir atık) içermez, sera gazları, dolayısıyla da asit yağmurları oluşturmaz.
- Fosil yakıtlar üzerindeki baskıyı ve yükü azalttığı için bu kaynakların kullanılabilirlik ömrünü uzatmaktadır.
- Maliyeti düşük bir enerji kaynağıdır. Yenilenebilir yani tükenmeyen bir enerji kaynağı olduğundan, hammadde maliyeti sıfırdır.

Olumsuz yönleri;

- Rüzgârların düzenli olmaması sebebiyle, enerji üretiminde kesikli bir düzen görülür. Yani rüzgârın yeterli hızda veya esmediği dönemlerde enerji üretimi gerçekleştirilemez. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, üretilen elektriğin dev akülerde depolanması ve suyun elektroliz edilmesiyle elde edilen hidrojenin depolanarak, rüzgârın esmediği dönemlerde enerji ihtiyacının karşılanabilmesine yönelik önemli çalışmalar yürütülmektedir.
- Rüzgâr santralının büyüklüğüne göre değişmekle beraber, 2-3 km çapındaki bir alan içinde, radyo, tv ve diğer haberleşme dalgalarını olumsuz etkilemektedir.
- Yüksek hızla dönen rotorları (pervaneleri) ile kuşların ölümlerine sebep olmaktadır [18].

### **2.2.5. Biyokütle enerjisi**

Biyokütle enerjisi, güneş enerjisinin bitkiler tarafından dönüştürülmüş şekli olarak bilinir. Diğer bir ifadeyle biyokütle için “organik karbon” tanımı da yapılabilir. Biyokütle enerjisi uygulaması, fotosentezle güneş enerjisini depolayan bitkilerden bu enerjinin açığa çıkarılması esasına dayanmaktadır. Bir ton taş kömürü ısınmada ortalama 2,8 ton CO<sub>2</sub> salınmaktadır; bir ton odunsu biyokütle yakıldığında ise atmosfere ortalama 0,73 ton CO<sub>2</sub> salınmaktadır. Biyokütle enerjisinin fosil yakıtlar gibi organik atıklarının olmaması, atıkların değerlendirilmesini sağlaması, yeni enerji ve iş kaynakları sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır [19].

#### Biyokütle kullanımının tarihçesi

Biyogaz kullanımının tarihinin Asurlulara kadar indiği ve Asurlulardan sonra Perslerin banyo ısıtılmasında biyogazdan yararlandığı bilinmektedir. 17.yy'da organik maddelerin bozunumuyla gaz oluştuğu anlaşıldıktan sonra 18.yy'da

organik maddelerin bozulma hızıyla yanıcı gaz miktarı arasında bir paralellik olduğu ortaya konmuş ve sonra ilk kez 19.yy'da biyogaz üretimi gerçekleştirilmiştir. 20.yy'ın ilk çeyreğinde de biyogaz kullanımı dünya genelinde yaygınlaşmaya başlamıştır. 1920'li yıllarda biyogaz İngiltere'de farklı amaçlarla kullanılmaya başlanmıştır. 1930'lu yıllardan sonra ise her ülke kendi iklim ve sosyo-ekonomik şartlarına uygun biyogaz tesisleri geliştirme sürecine girmiştir. II. Dünya savaşı esnasında ise metan gazı otomobil yakıtı olarak kullanmaya başlamıştır. ABD'de daha 1974 yılında selüloz, atıklar ve organiklerin enerji ve yakıt üretiminde kullanımını destekleyen yasa çıkarıldıktan sonra, 1978 yılında etanol akaryakıtı kullanımına vergi indirimi sağlanmıştır. 1982 de Kanada'da 50 ülkenin katılımıyla düzenlenen konferansta diğer yenilenebilir enerji kaynakları yanında biyogaz, biyokütle ile etanol ve biyodizel enerjileri konularında eşgüdümlü çalışmalar başlatılmıştır [20].

### Türkiye'nin biyokütle potansiyeli

Türkiye'nin orman alanı %27 oranı ile 20,7 milyon hektar alan kapsamaktadır. Orman alanlarının tamamı verimli orman niteliğinde olmayıp, ürün verebilen orman alanı 9.9 milyon hektar (%48) dır. Geriye kalan 10,8 milyon hektar (%52) orman alanı ise verim gücü düşük ormanlardan ya da tamamen verimsiz bozuk, makilik ve çalılıklardan oluşmaktadır. Türkiye de orman varlığının %31'ine karşılık gelen 6,4 milyon hektarlık alan baltalık (normal, bozuk, çok bozuk) ormandır. Bunun 4 milyon hektarlık çok bozuk baltalık orman alanının enerji ormancılığına konu olabileceği söylenebilir.

Türk Orman Envanteri'ne göre ormanların ağaç serveti 1,2 milyar m<sup>3</sup>, yıllık artımı 34 milyon m<sup>3</sup>, yıllık kesilebilecek miktar ise 18 milyon m<sup>3</sup> olacaktır. 2020 yılında yıllık odun ürünü gereksinimi 43 milyon m<sup>3</sup> olacaktır. Eğer üretim tüketim arasındaki fark ithalat ile karşılanacaksa yaklaşık 6,4 milyar USD ödenmesi gerekecektir. Bu açığın kapatılmasında gerek devlet ormanlarında ağaçlandırılması gereken alanların uygun bir bölümünde modern enerji

ormanlarının kurulması ve gerekse vatandaşın kendi arazisinde kavak, söğüt, akasya, okaliptüs, kızılbaş gibi hızlı büyüyen ağaç türleri ile enerji ormanları kurmasının teşvik edilmesi ile enerji ormanlarında üretilen ek odun üretimi önemli bir rol oynayabilecektir [21].

### Biyokütle dönüşüm teknolojileri

Biyokütle yenilenebilir, her yerde yetiştirilebilen, sosyo-ekonomik gelişme sağlayan, çevre dostu, elektrik üretilen, taşıtlar için yakıt elde edilebilen stratejik bir enerji kaynağıdır. Biyokütle doğrudan yakılarak veya çeşitli süreçlerle yakıt kalitesi artırılıp, mevcut yakıtlara eşdeğer özelliklerde alternatif biyoyakıtlar (kolay taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir yakıtlar) üretilerek enerji teknolojisinde değerlendirilmektedir.

### Biyokütleden biyogaz üretimi

Biyokütle kaynaklardan biyogaz üretimi, doğrudan yakma dışında en basit ve en etkili değerlendirme yöntemidir. Başta Çin ve Hindistan olmak üzere Tayland, Filipinler, Kore, İsviçre, ABD ve Almanya gibi birçok ülkede uygulanmaktadır. Tarımsal faaliyetler sonucunda yetiştirilen veya atık olarak geriye kalan bitkiler, insanların atık olarak ortaya çıkarttığı organik çöpler, hayvan gübreleri, şeker ve gıda sanayinin faaliyetleri sonucu oluşan melas ve meyve posaları, arıtma çamurları, şeker endüstrisi atıkları, kağıt sanayi atıkları ve mezbahane atıkları gibi çeşitli organik maddelerin, havasız bir ortamda biyokimyasal dönüşümler sonucu bakteriler tarafından parçalanmasıyla, bileşiminde metan (CH<sub>4</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), amonyak (NH<sub>3</sub>), azot (N<sub>2</sub>), hidrojen (H<sub>2</sub>) ve su buharı bulunun biyogaz üretimi gerçekleştirilir [22].

Bataklık gazı, gübre gazı gibi isimlerle de tanınan biyogazın kimyasal bileşimi standart olmayıp, onu oluşturan organik maddelerin bileşimine göre değişiklik gösterebilen, renksiz ve yanıcı bir gazdır. Biyogaz, doğrudan yakılması

suretiyle ısınma veya ısıtmada, motor yakıtı olarak taşıtlarda, türbin yakıtı olarak elektrik üretiminde ve çeşitli kimyasal maddelerin üretiminde ham madde kaynağı olarak kullanılabilir.

Biyogaz üretiminin yapılacağı tesisin büyüklüğü kullanım amacına göre farklılık kazanmaktadır. Örneğin bir ailenin gereksinim duyduğu enerjiyi sağlamaya yönelik düzenlenen biyogaz tesisinin 12 m<sup>3</sup> büyüklüğünde olması genellikle yeterliyken, bir çiftliğin ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için tesis büyüklüğü 50-100 m<sup>3</sup>, köyün ihtiyacına yönelik tasarlanması durumunda hacminin 100-200 m<sup>3</sup> seviyesinde olması yeterliyken, büyük tipte tesis kurulması için hacminin 1000-10000 m<sup>3</sup> arasında bulunması gerekecektir.

Biyogaz üretimi gerçekleştirilecek tesisin yeri ve büyüklüğü belirlenirken ham madde kaynağına yakın olması gereklidir. Ham madde girişinin kolaylıkla yapılabilmesi, dayanıklı, kullanışlı, ucuz ve uzun ömürlü malzemedan imal edilmesine özen gösterilmesi, üreteç tipinin önceden belirlenmesi, kullanılacak biyokütlenin cinsi ve özelliklerine dikkat edilmesi, üreteç hacminin ve tesis kapasitesinin iyi tasarlanması ve sıcaklık ihtiyacı gibi konularına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Biyogaz üretimi genellikle iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi kesik besleme yöntemi olup, üreteç gerekli malzemeye doldurulduktan sonra alıkoyma-bekleme süresi kadar beklenip, bu süre sonunda içindeki malzemeler tamamen boşaltılır ve aynı işlem sürekli olarak tekrarlanarak üretimin devamlılığı sağlanmaktadır. İkincisi ise, sürekli besleme yöntemidir. Tesis organik maddelerle doldurulup, alıkoyma süresi kadar beklenmektedir. Biyogaz tankının sıcaklığına bağlı olarak günlük beslemelere geçilerek biyogaz Üretiminin devamlı bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanır [23].

### Biyogaz kullanım avantajları

Genellikle organik maddenin %40-%60 kadarı biyogaza dönüştürülür. Biyogazın genel bileşimi %60 CH<sub>4</sub> ve %40 CO<sub>2</sub>'den oluşmakta ve ısı değeri 17-25 MJ/m<sup>3</sup>tür. Geri kalan atık ise kokusuz, organik gübre olarak kullanmaya uygun bir katı veya sıvı atıktır. Elde edilen bu gübre organik tarım için değerli bir girdidir.

Biyogaz doğal gaza alternatif bir gaz yakıt olarak doğrudan yakma-ısınma ve ısıtmada, motor yakıtı olarak, türbin yakıtı olarak, elektrik enerjisi elde edilmesinde, yakıt pili yakıtı olarak, doğal gaz içine katkı olarak ve kimyasalların üretiminde kullanılmaktadır.

Biyogaz üretiminde kullanılabilen atıklar aşağıda sıralanmıştır.

- Hayvancılık atıkları,
- Zirai atıklar,
- Orman endüstrisi atıkları,
- Deri ve tekstil endüstrisi atıkları,
- Kâğıt endüstrisi atıkları,
- Gıda endüstrisi atıkları (çikolata, maya, süt, içecek üretimi),
- Sebze, meyve, tahıl ve yağ endüstrisi atıkları,
- Bahçe atıkları,
- Yemek atıkları,
- Hayvan gübreleri (büyükbaş hayvancılık, küçükbaş hayvancılık),
- Şeker endüstrisi atıkları,
- Evsel katı atıklar,
- Atık su arıtma tesisi atıkları

Biyogaz üretimi organik atıkların kontrollü olarak uygun koşullarda depolanmasını sağlar. Çiftlik kökenli organik atıkların (gübrelerin) kontrolsüz

depolanması yeraltı ve yerüstü sularının, toprağın ve havanın kirlenmesine neden olur. Gübrenin içeriğinde ki azotlu bileşenler toprakta depolanır, yıkanır ve gaz halde atmosfere karışır. Azot, nitrat iyonu formunda ( $\text{NO}_3^-$ ) yer altı suyuna karışarak, amonyak halinde ( $\text{NH}_3$ ) ve asit yağmurlarına (nitrik asit) neden olarak ve azot oksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ) yapısında ise sera etkisine neden olarak çevreyi kirletir. Azot oksitler karbondioksitten ( $\text{CO}_2$ ) 150 kat daha fazla ozon tabakası için zarar oluşturmaktadır. Organik atıklardan (gübrenin) yayılan metan gazı ( $\text{CH}_4$ ) da  $\text{CO}_2$  kadar zararlı bir sera gazıdır. Biyogaz üretimi ile çevreye zararlı bütün bu kimyasallardan uzaklaşarak doğal gaz benzeri değerli bir enerji kaynağına ve tarım için çok değerli organik gübreye erişilmektedir [24].

### Çöp gazı

Bir tür biyogaz materyali olan çöpün, çöp termik santralleriyle enerji üretiminde kullanılması, özellikle kentsel çöpün ortadan kaldırılmasını da sağlamaktadır. Böylelikle çöp yığınlarında açılan özel sondaj kuyuları ile metan gazı elde edilmektedir. Doğal biçimde, çöplerin fermentasyona uğraması sonucunda oluşan metan gazı, çöp yığınlarından sızmana durumunda patlamalara neden olduğu gibi, atmosfere dağılması durumunda da sera etkisine yol açmaktadır. Metan sondaj kuyuları ile alınan gaz, çevre sorunu oluşturmadan gaz türbinli bir santralde yakıt olarak değerlendirilebilmektedir.

### Türkiye'de biyogaz

Biyogaz üretim potansiyeli olan atık maddeler; kırsal atıklar, yüksek kirlilik içeren endüstriyel atıklar, atık su arıtma tesislerinden biyolojik arıtma süreci sonunda elde edilen çamurlar, katı atıkların organik özellik taşıyan bileşenleri ve bu atıklara benzer özellikteki diğer atıklar şeklinde sıralanabilir.

Bu atıkların biyogaz üretimi için kullanılmasıyla bir yönüyle atık bertarafı gerçekleştirilirken, diğer yönüyle de enerji elde edilmiş olunur. Ayrıca, organik bir kaynak niteliğindeki atıklardan gübrenin tezek olarak yakılması ekonomi için büyük zarardır. Tezeğin biyogaza dönüştürülmesi ile elde edilecek enerjinin yanı sıra oluşan kaliteli organik gübre de önemli derece ekonomik değere sahiptir. Bu bağlamda biyogaz tesislerinin yaygınlaştırılması önemlidir. Biyogaz tesislerinin yanı sıra, şebeke ile bağlantılı çalışan “çöp termik santralleri” ile elektrik üretimi sağlanabilmektedir. Kuzey Avrupa ülkelerinde biyogaz materyalle ve biyogazla çalışan otoprodüktör ve kojenerasyon tesisleri bulunmaktadır. Dünya ölçeğinde biyokütleden elde edilen enerjinin toplam enerji üretimindeki oranı %14 civarındadır. Gelişmekte olan bazı ülkelerde bu oranın %40'lara varmakta olduğu ifade edilmektedir. Çin, Meksika, Brezilya, Rusya, ABD ve Batı Avrupa ülkelerinde biyokütleden elde edilen elektrik (biyoelektrik) giderek artan oranlarda kullanılmaktadır.

Dünyadaki arıtma tesisleri bünyesinde biyogaz üretimi de yaygındır. Türkiye'deki arıtma tesislerinde biyogaz üretimine ilişkin en güzel örnek, Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (ASKİ) Atık Su Arıtma Tesisidir. 4 milyon nüfusa hizmet vermek üzere 2000 yılında işletmeye açılan tesis, Avrupa'nın en iyi tesislerinden biri olup, 2025 yılına kadar 6 milyon nüfusa hizmet verecek kapasiteye genişletilecektir. Arıtma tesisi anaerobik çamur stabilizasyonlu aktif çamur tekniği ve bant filtreli mekanik çamur suyu alma tekniği ile çalışılmaktadır. Tesiste özümleme tanklarından çıkan biyogaz, her biri 4000 m<sup>3</sup> iki silindirik gaz tankında depolanmaktadır. Blok tipte ısı güç istasyonunda bulunan her biri 1650 kW kapasiteli iki elektrik jeneratörü, biyogazı elektrik enerjisine çevirmektedir. Elde edilen elektrik enerjisi, tesisin yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık %80'ini karşılamaktadır [25].

### 2.3. Biyoyakıt ve Türleri

Biyoyakıtlar petrol ürünlerine alternatif olan, daha temiz çevre ve iklimlerin korunmasına katkıda bulunan ve tarımsal iş hacminde genişleme yaratacak yenilenebilir enerji seçenekleridir. Şeker pancarı başta olmak üzere mısır, buğday, patates, odun gibi şekerli, nişastalı ve selülozik bitkilerden elde edilen biyoetanol, yağlı tohumlu bitkilerden elde edilen biyodizel, genellikle tarımsal atıklar ve kentsel atıklardan elde edilen biyogaz, şeker pancarı, tatlı sorgum vb. bitkilerden elde edilen biyohidrojen enerji piyasası oluşumunda önemli paya sahip olabilecek potansiyelde biyoyakıtlardır.

Bugün pek çok ülkede çevre ve enerji politikalarının gerekliliği olarak teşvik edilen biyoyakıtların belli hedefler doğrultusunda gıda ve yem ihtiyacı gözetilerek gelecekte de üretilmeleri ve kullanımlarının artırılması yönündeki çalışmalar sürdürülmektedir. Biyoyakıtlar fosil yakıtlara nazaran daha az karbondioksit vererek yanmasının yanı sıra tarımsal ürünün yetiştirilmesi sırasında da CO<sub>2</sub> absorbe edilir.

Biyoyakıtlar çevre için doğal karbon döngüsüne sahiptirler. Bu nedenle özellikle AB'de Kyoto Protokolünün gereklerinin yerine getirilmesi hususundaki çalışmalar kapsamında öncelikli olarak ele alınmaktadır [26].

#### 2.3.1. Biyoetanol

Biyoetanol, şeker pancarı, şeker kamışı, mısır, buğday, tatlı sorgum, patates, odunsular, tarımsal atıklar, selüloz içerikli belediye atıkları gibi şekerli, nişastalı ve selüloz içerikli bitki ve artıklardan elde edilebilen ve genellikle ulaştırma yakıtı olarak benzinle harmanlanarak kullanılabilen bir biyoyakıttır.

Harmanlama oranına göre E2 (%2 biyoetanol +%98 benzin), E5, E10, E85 olarak adlandırılabilir. Benzine karıştırılan etanol, benzinin emisyon kalitesini iyileştirdiği gibi yapısında bulunan oksijen, benzinin daha verimli ve temiz

yanmasına yardımcı olur. Ayrıca, araçlarda kullanıldığında CO<sub>2</sub> dahil, bütün emisyonların azaldığı da kaydedilmiştir. Daha çok benzinle harmanlanmasına rağmen biyoetanol son yıllarda motorinle de harmanlanarak kullanılabilir. E-Dizel olarak adlandırılan karışımda motorinin içerisinde genellikle %15 oranında biyoetanol bulunmaktadır. Biyoetanol sadece ulaştırma sektöründe değil elektrik üretiminde, kojenerasyon uygulamalarında, küçük ev aletlerinde ve kimyasal madde üretiminde de kullanılabilir.

Biyoetanolda en büyük aktör ABD (mısır bazlı) olmasına rağmen Brezilya 2009'da üretimini %50 arttırmıştır. Brezilya'da dizel olmayan araçların %40'ında biyoetanol kullanılmaktadır.

Resmi gazetede yayınlanan 27 Eylül 2011 tarih ve 28067 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı ile yerli tarım ürünlerinden üretilmiş etanol içeriğinin;

1/1/2013 tarihi itibarıyla en az %2 (V/V)

1/1/2014 tarihi itibarıyla en az %3 (V/V) olma zorunluluğu getirilmiştir.

### **2.3.2. Yağ asidi metil esterleri (YAME-Biyodizel)**

Yağ asidi metil esterleri (Biyodizel), kolza (Kanola), ayçiçeği, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinden elde edilen yağların veya hayvansal yağların bir katalizör eşliğinde bir alkol reaksiyonu sonucunda oluşan ve alternatif yakıt olarak kullanılan bir üründür. Evsel kızartma yağları ve hayvansal yağlar da biyodizel hammaddesi olarak kullanılabilir.

Biyodizel (Biyomotorin), dizel ile her oranda karışabilir. Bu yüzden çoğu ülkede saf biyodizel kullanımından ziyade biyodizel-dizel karışımı kullanılmaktadır. Biyodizel karışımları BXX olarak gösterilir. Buradaki "XX"

karışımında bulunan biyodizel yüzdesini gösterir. Örneğin B5 karışımı; %5 biyodizel, %95 dizel yakıttan oluşur.

Biyodizel, kısa zincirli hidrokarbon zincirlerinden ve oksijenden oluşur. Dizel motor yanma verimini ve emisyon oluşumunu olumsuz etkileyen kükürdü, aromatik hidrokarbonları, metalleri ve ham petrol atıklarını içermez. Biyodizelin ısıl değeri, yoğunluğu ve viskozite değeri dizel yakıt değerlerine çok yakındır. Ayrıca dizel yakıtına göre yağlama özelliğinin daha iyi, setan sayısının daha yüksek ve daha az toksik olması da önemli özellikleri arasındadır.

Biyodizeli oluşturan C16-C18 metil esterleri doğada kolayca ve hızla parçalanarak bozunur. 10,000 mg/L'ye kadar herhangi bir olumsuz mikrobiyolojik etki göstermezler. Suya bırakıldığında biyodizelin 28 günde %95'i, motorinin ise %40'ı bozunabilmektedir. Biyodizelin doğada bozunabilme özelliği dekstroza (şeker) benzemektedir.

Biyodizelin olumsuz bir toksik etkisine rastlanmamıştır. Ağızdan alınması durumunda öldürücü doz 17,4 g biyodizel/kg vücut ağırlığı şeklindeyken sofrata tuzunda için bu değer 1,75 g tuz/vücut ağırlığıdır. Yani tuz biyodizelden 10 kat daha fazla öldürücü etkiye sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testlerinde biyodizelin cilde %4'l k sabun  z ltisinden daha az toksik etkisi olduğu gözlenmiştir [27].

Depolama kararlığı, bir yakıtın uzun süre depolandığı esnada kimyasal değişimlere direnebilme yeteneği olarak adlandırılabilir. Hava ile temas (oksidatif stabilite) ve su (hidrolik stabilite) depolama kararlılığını etkileyen ana faktörlerdir. Oksidatif stabilite sorunu, biyodizeli esas olarak uzun süre depolanması sırasında etkiler.

Havanın, ısının, metal kalıntılarının, antioksidanların, peroksitlerin bulunması hem de depolama tankının niteliği bu durumu etkileyen parametrelerdir.

Biyodizel depolanırken aşırı sıcak ortamdan kaçınılmalı; temiz, kuru ve karanlık bir ortamda depolanmalıdır. Depolamada bazı elastomerlerin, doğal ve bütül kauçukların kullanımı sakıncalıdır, biyodizel bunları parçalamaktadır.

Biyodizel ve biyodizel-dizel karışımları, dizelden daha yüksek akma ve bulutlanma noktasına sahiptir. Bu durum, bu yakıtların soğukta kullanımında sorun teşkil etmektedir. Uygun katkı maddeleri kullanımı ile biyodizelin akma ve bulutlanma noktaları düşürülebilmektedir. Biyodizel-dizel karışımları +4°C üzerinde harmanlama ile hazırlanmalıdır. Harmanlama işleminin, +4°C altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirileceği durumlarda, biyodizelin dizel üzerine eklenmesi, +4°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirileceği durumlarda ise karışımda daha fazla olan kısım üzerine eklenmesi önerilmektedir. Harmanlama işlemi yapılırken, soğumaya bağlı kristal yapılar oluşursa, bulutlanma noktası üzerine ısıtılması ve karıştırılması gerekmektedir.

Biyodizel saf ve dizel-biyodizel karışımları şeklinde yakıt olarak kullanılmaktadır.

Bu yakıtlar aşağıdaki gibi adlandırılmaktadır [28].

B5 : % 5 biyodizel + % 95 dizel  
 B20 : % 20 biyodizel + % 80 dizel  
 B50 : % 50 biyodizel + % 50 dizel  
 B100 : % 100 biyodizel

**Biyodizelin Avantajları:**

Biyodizelin alevlenme noktası, dizelden daha yüksektir (>110°C). Bu özellik biyodizelin kullanım, taşıma ve depolanmasında daha güvenli bir yakıt olmasını sağlar. Biyodizel, petrol kaynaklı dizel ile her oranda tam olarak karıştırılabilmektedir. Bu özellik petrol kaynaklı dizelin kalitesini yükseltir,

çevreye zararlı gazların emisyon değerlerini düşürür, motordaki yağlanma derecesini artırır ve motor gücünü azaltan birikintileri çözer.

Biyodizelin setan sayısı dizelin setan sayısından daha yüksek olduğu için motor daha az vurunutulu ve daha az hararetle çalışır. Fosil yakıtların ekonomiler üzerinde oluşturduğu baskı ve olumsuz etkilerin yanında bir büyük problem de fosil esaslı yakıtların sebebiyet verdiği küresel ısınmadır. İçten yanmalı motorlarla her yıl yaklaşık 420 milyon ton CO<sub>2</sub> atmosfere gönderilmekte ve yeryüzünde aşırı ısınmaya yol açan sera etkisine neden olmaktadır. Biyodizel kullanımında CO emisyonu %50, partikül madde %30 azalmaktadır. Biyodizel kullanımıyla asit yağmurlarının ana nedeni olan egzoz emisyonundaki SO ve sülfatlar tamamen ortadan kalkmaktadır.

Biyodizelin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Yenilenebilir hammaddelerden elde edilebilir.
- Alternatif bir enerji kaynağıdır.
- Çevre dostudur.
- Anti-toksik etkilidir.
- Atık bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilebilir.
- Biyolojik olarak hızlı ve kolay bozunabilir.
- Mevcut dizel motorlarda herhangi bir tasarım değişikliği yapmadan kullanılabilir.
- Petrol dizel ile her oranda karıştırılarak ya da saf olarak kullanılabilir.
- Biyodizel petrol dizeline oranla daha iyi bir yağlayıcı olduğundan motorun ömrünü uzatır. Yakıt tüketimi, otomatik tutuşma, güç çıktısı ve motor gücü biyodizel kullanımından olumsuz etkilenmez.
  - Yanmamış hidrokarbon oranı, petrol dizeline göre %90, kanserojen etkisi olan aromatik hidrokarbonlara göre ise %75-%90 oranında daha azdır.

- Zararlı gaz emisyonları bakımından fakirdir. Çünkü çok az kükürt içermektedir. Kansere sebep olan bileşimler bakımından da fakirdir.
- Atmosferde sera gazı bileşenlerinde önemli ölçüde azalma sağlayan tek alternatif yenilenebilir dizel yakıttır. Biyodizel kullanılması; karbon monoksit, zarar verici dizel parçacık, kükürt dioksit ve karbon dioksit emisyonlarını azaltır.
- Isıtma sistemleri ve jeneratörlerde kullanmak için uygundur.
- Kara ve deniz taşımacılığında kullanılabilir.
- Stratejik özelliklere sahiptir.
- Yakıt olarak kullanımı fosil yakıtlara olan ihtiyacı azaltır.
- Tarımsal ürünlere ikinci bir artı değer kazandırır.
- Biyokütle çeşitli enerji formlarına dönüştürülebilir.
- Biyokütle bitkileri büyüme esnasında karbon dioksiti kullanırken oksijeni atmosfere verirler [29].

### Dünyada biyodizel üretimi

1990'lı yıllarda AB ülkelerinde üretilerek kullanılmaya başlayan biyodizel sektörünün dünyadaki en büyük aktörü AB ülkeleri olup, hammadde olarak genellikle kanola (kolza) bitkisi kullanılmaktadır. AB'ndeki en büyük biyodizel üreticisi ülke Almanya'dır. Bunu Fransa ve İtalya izlemektedir.

Genetik bilimdeki gelişmeler bitkilerin yetişme şartları açısından daha zor iklim şartlarında bile yetiştirilebilmelerini mümkün hale getirmeye başlamıştır. Biyokütle üretiminde değerlendirilebilecek bitkilerin daha geniş alanlarda yetiştirilmesi sonucu, daha fazla ürün elde edilmektedir.

"1898 yılında Paris Dünya Fuarında yarfıstığı yağını yakıt olarak kullanan motor sergilenmiş" olmasına rağmen uzun yıllar bu gelişme hayata geçirilememiş ve ancak 1980'li yıllardan itibaren bitkisel kökenli akaryakıt kullanımı başlamıştır. Ancak üretilen biyodizelin kalitesinin yeteri kadar iyi

olmaması nedeniyle, bu yakıtı kullanan araçlar istenen performansa ulaşamadıklarından biyodizelin o yıllarda kötü isim yapmasına neden olmuştur. Ancak daha sonraları biyodizelin üretimine bir standart getirilmesiyle birlikte güvenle kullanılabilen bir akaryakıt halini almıştır.

Gün geçtikçe artan sayıda ülke biyodizel kullanmakta ve tüketim miktarını arttırmaktadır. Almanya, Avusturya, Çek Cumhuriyeti, Fransa, Belçika ve İtalya gibi ülkeler bu yakıtı ilgi göstermekte ve düşük oranlarda da olsa yararlanmaktadırlar.

Avrupa Birliği ülkelerinden İtalya, Fransa ve Almanya'da pilot uygulamalar şeklinde bile olsa, biyodizelin taşıtlarda kullanıldığı ve petrol türevlerinin neden olduğu çevre sorunlarının önlenmesi amacıyla taşıtlarda biyokütle orijinli yakıtların, motorinin yerine kullanılabilirliği test edilmektedir.

Bitkisel yağlardan üretilen biyoyakıtların Avrupa Birliğince desteklendiği ve doğrudan veya dizel-biyodizel karışımları olarak kullanılmakta olduğu bilinmektedir.

Günümüzde Avrupa Birliği'nde ve birçok ülkede normal dizel yakıtı belirli bir oranda biyodizel karıştırılması zorunluluğu getirilmiş ayrıca karışım oranları arttırılma eğilimindedir. Avrupa Birliği'nin biyodizel kullanımı 2005 yılında %2 seviyesinde gerçekleşmesine rağmen bu oranı 2030 yılına kadar % 30'a yükseltmeyi hedeflemiştir. Dünya etanol üretiminin %40'ını gerçekleştiren ABD ve %37'sine sahip olan Brezilya bu konuda tartışmasız öncü ülkeler konumundadır. Çin, Tayland, Malezya, Hindistan ve Filipinler gibi Asya ülkeleri de şeker kamışı, palmiye yağı ve hayvansal yağlardan ürettikleri biyodizeli her geçen gün motorlu araçlarda daha fazla kullanarak bir taraftan enerji gereksinimini sağlamayı, diğer taraftan tarım sektörünü kalkındırmayı planlamaktadırlar. Biyodizelin %5-20 arasında motorine karıştırılarak kullanılması birçok ülkede zorunlu hale getirildiği gibi Almanya'da benzin istasyonlarında biyodizel satılmaktadır. Biyodizel üretiminde aktif olan

Almanya, Avusturya, İtalya ve Fransa gibi ülkeler, biyodizel üretimini desteklemek amacıyla vergiden muaf tutmaktadır.

Biyodizel üretiminde ikinci jenerasyon olarak isimlendirilen, böylece petrol kökenli dizele %5-50 oranında karıştırılmasını mümkün hale getiren yeni teknolojiyle üretim gerçekleştirilmektedir. Bu üretim yöntemi, bitkisel yağlar ile hidrojenin petrol rafinerilerinde işlemden geçirilmesine dayanmaktadır. Sayıları 20'yi aşan bitki türünden biyodizel üretilmesine rağmen, bütün üretimin yaklaşık %50'si palmiye yağı ile soya yağından elde edilmektedir.

Biyodizel endüstrisinin oluşmasını sağlayan Avrupa ülkelerinin yanında son yıllarda ABD'de büyük gelişmeler olmaktadır. Griffin Industries firması tarafından Kentucky'de kurulan dünyanın en modern tesisi, MFS-Biyodizel Tesisi, bu oluşumda önemli bir yere sahiptir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde "National Clean Cities" (Ulusal Temiz Kentler) programı kapsamında kullanılan biyodizel, kolza, ayçiçeği, soya ve kullanılmış kızartma atık yağlarından, Twin Rivers Technology, Procter and Gamble, Pasific Biodisel, Columbus Foods gibi firmalarca üretilmektedir. Eyaletler bazında değişiklik gösteren teşvikler ile üretim maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmakta ve özellikle toplu taşıma hizmeti veren taşıt filolarının alternatif yakıtlarla çalışması için yasal düzenlemeler yapılmaktadır. 2001 yılında 20 milyon galon olan biyodizel üretimi 2004 yılında yaklaşık 3 kat artarak 60 milyon galona ulaşmıştır. 300'ün üstünde istasyonda satışa sunulmuştur. Ülke genelinde biyodizel kullanımında vergi indirimi uygulaması olmayıp, belirli bazı düzenlemeler getirilmiş ve şehir içi otobüslerde, deniz taşıtlarında ve askeri taşıtlarda biyodizel ve/veya karışımları kullanılmaktadır. Medford Phoenix'de okul araçlarında ve Cincinnati'de şehir otobüslerinde %20 oranında biyodizel kullanılmaktadır [30].

### Türkiye'de biyodizel üretimi

Türkiye motor biyoyakıtları için yasal zeminini hazırlanmıştır. Biyodizel hem yakıt harmanlama bileşeni hem bir akaryakıt tanımı almıştır. Bir başka deyişle biyodizel (otobiyodizel ve yakıtbiyodizel), benzin ve motorin yanı sıra, üçüncü akaryakıt sektörü ögesidir.

Resmi gazetede yayınlanan 25 Şubat 2011 tarih ve 27857 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı ile Oto Biyodizel ve Yakıt Biyodizeline 0,91 TL/L ÖTV uygulaması getirilmiştir.

Resmi gazetede yayınlanan 27 Eylül 2011 tarih ve 28067 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı ile yerli tarım ürünlerinden üretilmiş yağ asidi metil esterleri (YAME-Biyodizel) içeriğinin;

1/1/2014 tarihi itibariyle en az %1 (V/V)

1/1/2015 tarihi itibariyle en az %2 (V/V)

1/1/2016 tarihi itibariyle en az %3 (V/V) olma zorunluluğu getirilmiştir.

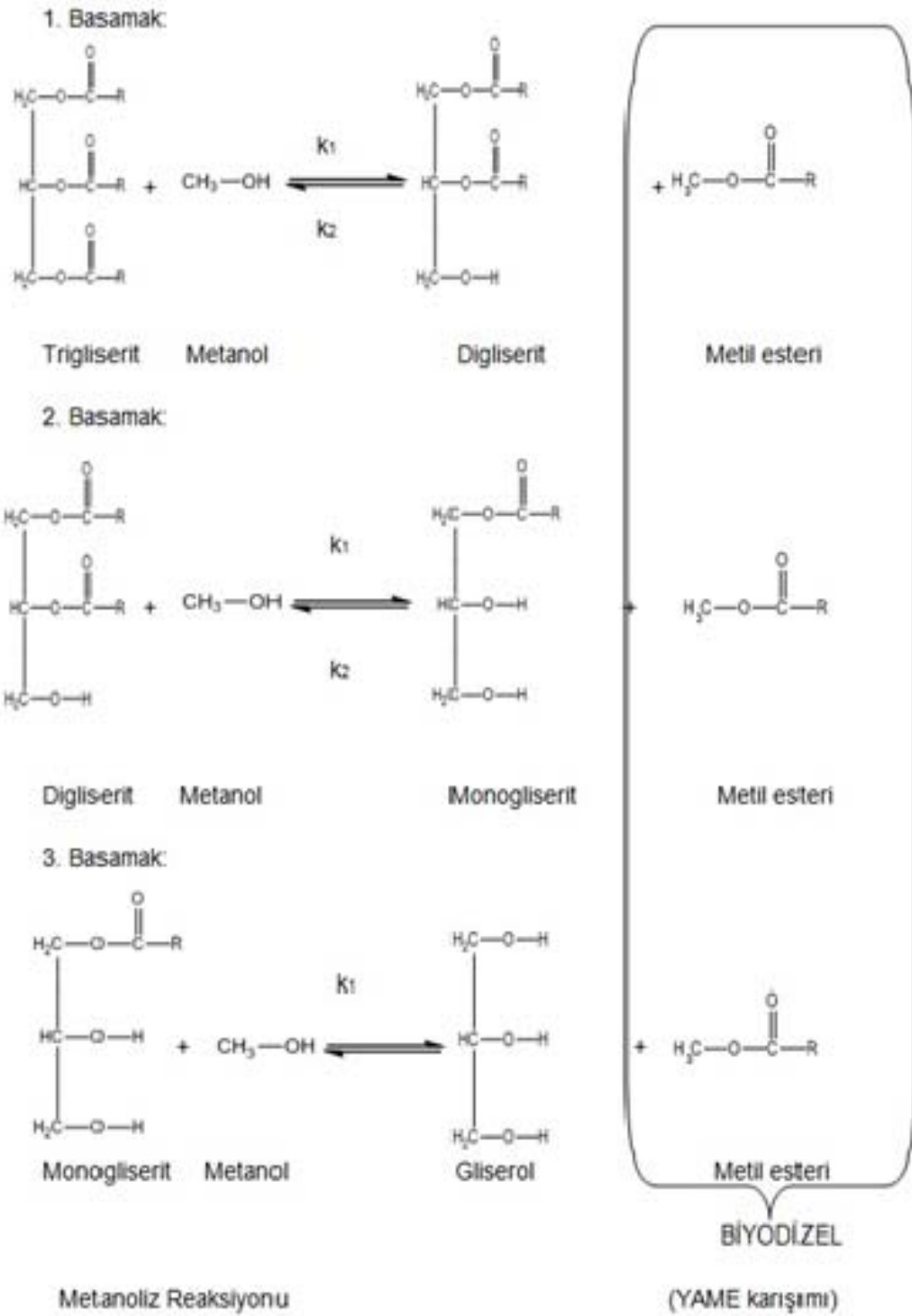
Yerli kaynaklardan üretilen biyoetanolün benzine %2 oranında katılmasında motor biyoyakıtı ÖTV'den muaf tutulmuştur. Benzer uygulama otobiyodizel için de beklenmektedir.

#### **2.4. Transesterleşme Tepkimesi**

Bitkisel yağlar yapısında %97 oranında trigliserit içermektedirler. Yağların yapısındaki bu trigliseritlerin alkol ile katalizör eşliğinde gliserol ve yeni esterler oluşturduğu reaksiyon transesterleşme reaksiyonudur. Bu yöntemde ortamda su olmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü ortamda su bulunması durumunda trigliserit esterleşme yerine hidroliz reaksiyonu verir.

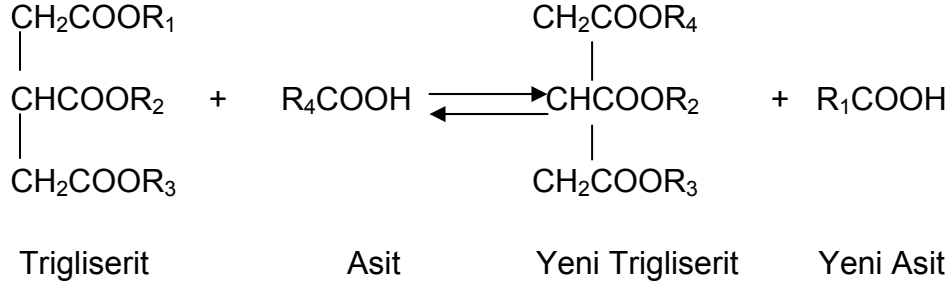
Transesterleşmenin; alkoliz, asidoliz, interesterleşme ve intraesterleşme olmak üzere dört şekli vardır [31].

- Alkoliz reaksiyonunda; bir mol trigliserit ile üç mol alkol reaksiyona girerek üç mol ester ve bir mol gliserol oluşturur. Bu reaksiyon genelde kullanıldığı alkole göre adlandırılır: Etanol kullanılırsa “etanoliz”, metanol kullanılırsa “metanoliz” denilir. Şekil 2.5’te metanoliz reaksiyonu görülmektedir.



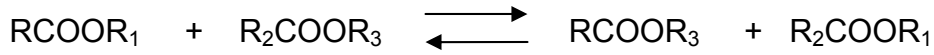
Şekil 2.5. Metanoliz reaksiyonu

Asidoliz reaksiyonu ise trigliseritlerin organik asitlerle reaksiyonudur. Bu reaksiyonun sonucunda yeni bir trigliserit ve asit oluşur. Şekil 2.6'da asidoliz reaksiyonu görülmektedir.



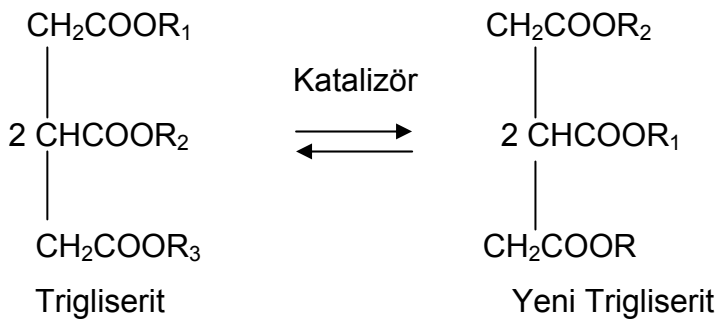
Şekil 2.6. Asidoliz reaksiyonu

İnteresterleşme reaksiyonunda; iki ester molekülü arasında açıl grupları yer değiştirerek yeni bir ester oluştururlar. Şekil 2.7'de interesterleşme reaksiyonu görülmektedir.



Şekil 2.7. İnteresterleşme reaksiyonu

İntraesterleşme reaksiyonunda; bir trigliseritin kendi içinde açıl gruplarının yer değiştirerek yeni trigliseritler oluşturduğu reaksiyonlara intraesterleşme reaksiyonları denir. Şekil 2.8'de intraesterleşme reaksiyonu görülmektedir.



Şekil 2.8. İntraesterleşme reaksiyonu

## 2.5. Katalizörler

Kimyasal bir reaksiyonun başlaması için gerekli olan aktivasyon enerjisini düşüren, kimyasal bir tepkimenin hızını arttıran fakat tepkime sırasında tepkimeye girmeyen, tepkime sonunda herhangi bir değişikliğe uğramadan geri kazanılabilen ve çoğu zaman fiziksel yapısı değiştiği halde kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik meydana gelmeyen maddeler “Katalizör” adını alır.

Biyodizel üretiminde homojen (asit ve alkali katalizör), heterojen ve enzimatik katalizörler kullanılmaktadır. Bu katalizörlerden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

### 2.5.1. Homojen katalizörler

Homojen katalizörler reaktif ve ürünler ile aynı fazdadır. Aynı fazda olması nedeni ile her an katalizör ve reaktif molekülleri birbirleri ile çarpışabilmektedir. Katalizörden dolayı reaksiyonu sınırlayıcı bir etken bulunmamaktadır. Asidik ve alkali olmak üzere ikiye ayrılırlar:

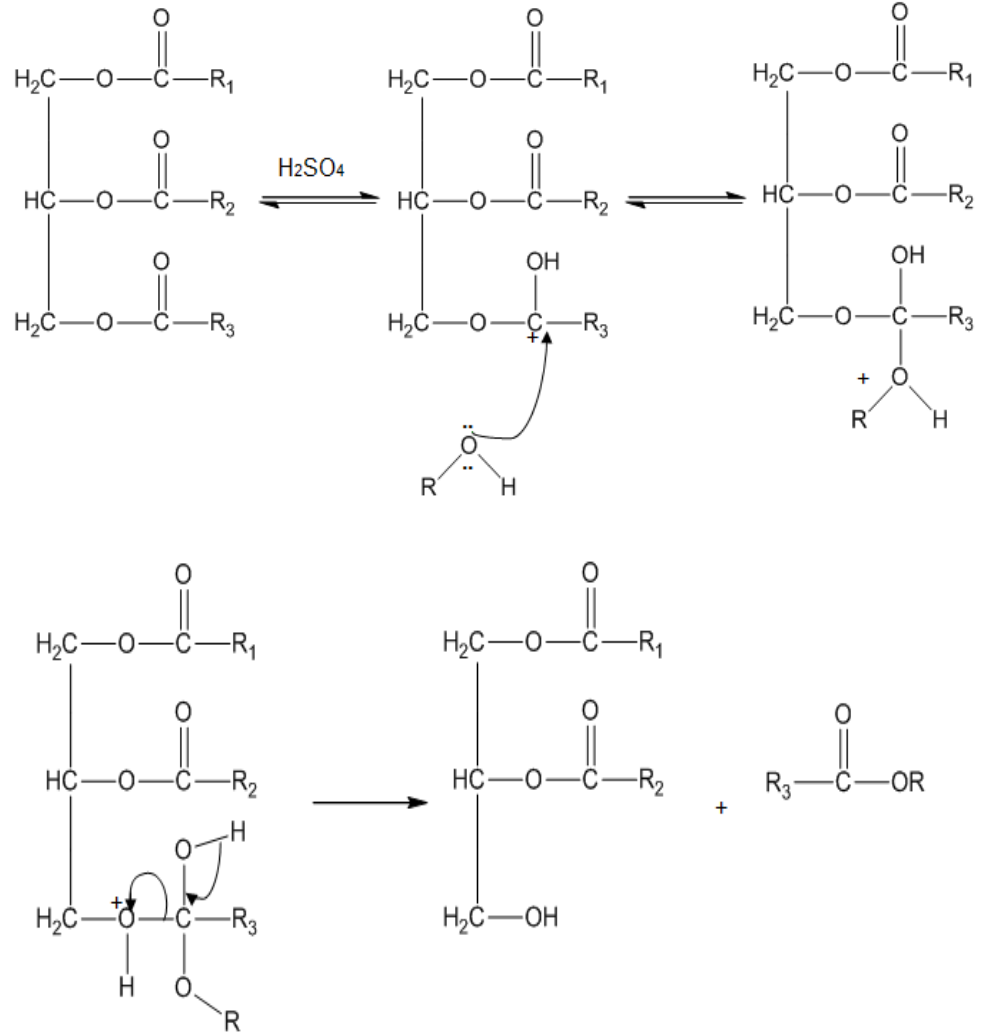
#### Asidik katalizörler

Asit katalizörler olarak sülfürik, fosforik, hidroklorik ve organik sülfonik asitler kullanılır. Asit katalizör kullanılan reaksiyonlarda sabun oluşumu engellenebilmektedir. Ayrıca asit katalizörler ortamda bulunan serbest yağ asitlerini de katalizleyerek yağ asidi metil esterleri oluşturabilir ve bu durum verimin artmasını sağlar.

Asit katalizörlü yapılan transesterleşme tepkime süresi çok uzundur. Baz katalizöre göre tepkime hızı yaklaşık 4000 kat kadar yavaştır. Ayrıca baz katalizör için oda sıcaklığı bile yeterliyken asit katalizörlü tepkimelerde ısı

daha yüksek olmak zorundadır. Kullanılan alkol miktarı da asit katalizörde daha fazla olmaktadır.

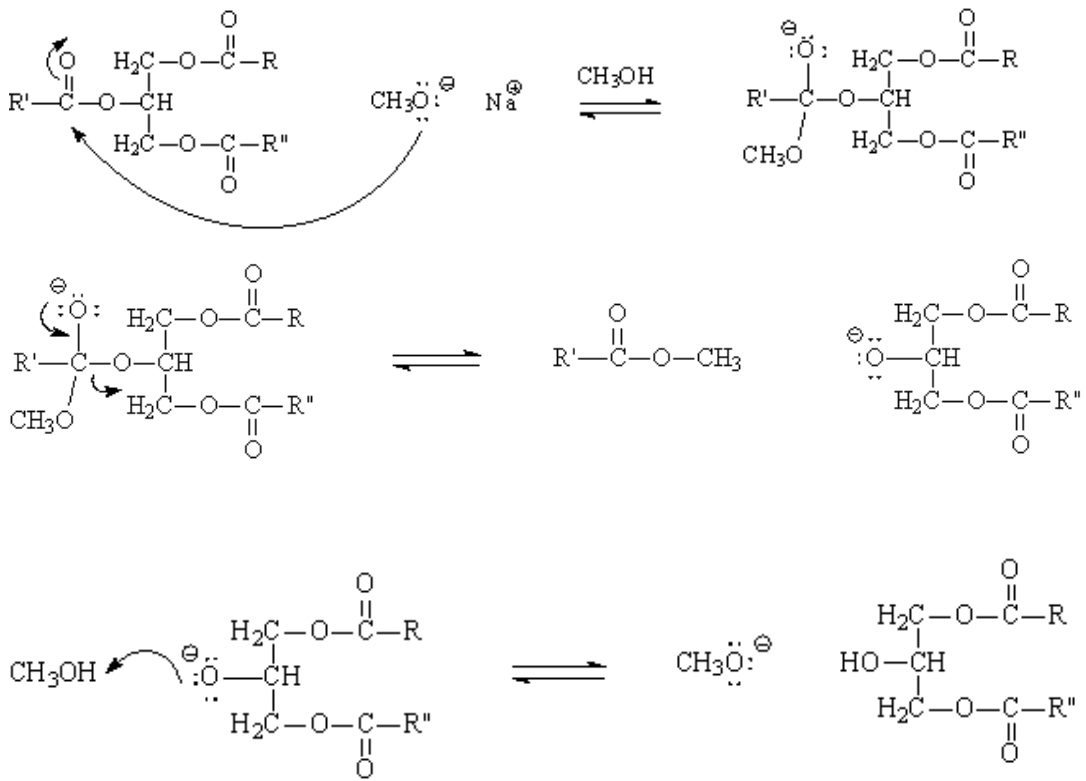
Homojen asit katalizörler kullanıldığında, reaksiyon bitiminde, transesterleşmeyi sonlandırmak için nötrleştirme gibi ek bir basamak daha gerekli iken heterojen asit katalizörlerde böyle bir durum söz konusu değildir. Homojen asit katalizörler uzun süreli kullanımlarda, sistemlerde korozyona neden olabilirler. Şekil 2.9'da asit katalizli ester değişim reaksiyonunun mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Asit katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması

### Alkali (Bazik) katalizörler

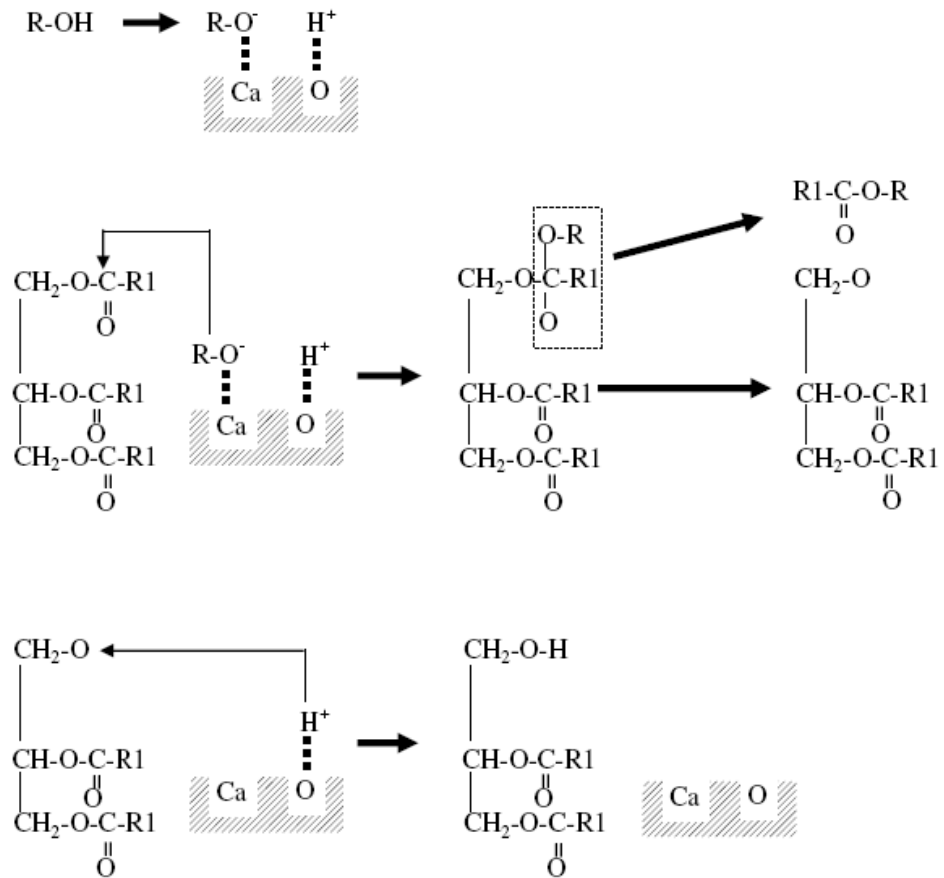
Alkali katalizör olarak NaOH, KOH, karbonatlar ve alkoksitler (sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum bütoksit gibi) biyodizel üretiminde kullanılır. Alkali katalizörlü transesterleşme, asit katalizörlü olanlara göre daha avantajlı olduğundan ticari olarak en çok kullanılan yöntemdir. Alkali katalizörlü reaksiyonların su ve serbest yağ asidi içeriğinin kontrolü çok önemlidir; çünkü ortamda bulunan su ve serbest yağ asidi sabunlaşma reaksiyonu sonucu sabun oluşmasına neden olur. Şekil 2.10'da baz katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.10. Baz katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması

## 2.5.2. Heterojen katalizörler

Heterojen katalizörler reaktif ve ürünlerle farklı fazda olabilir ve genellikle katıdır. Bu farklılık reaksiyon hızını sınırlandırmakta ve reaktiflerin birbiri ile etkileşme sayısına ve bu sayı, etkileşmesinin gerçekleştiği temas yüzeyine bağlıdır. Reaksiyon katalizörün yüzeyinde yürüdüğünden dolayı birim kütlelerindeki yüzeyi artırmak için küçük boyutlara getirilmesi daha uygundur. Şekil 2.11’de CaO katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.11. CaO katalizli transesterleşme tepkimesinin mekanizması [32].

Son yıllarda biyodizel eldesinde kullanılmak üzere heterojen katalizör geliştirme çalışmaları oldukça hız kazanmıştır. Sentez sonrası ayırma, saflaştırma işlemlerinin olmaması, serbest yağ asitlerinin nötralizasyon

adımını elimine etmesi, trigliseritlerin sabunlaşmasının görülmemesi, metil esterler ve gliserinde katalitik artık bırakmaması ve üretimi daha ekonomik hale getiriyor olması, bu artışın en önemli sebepleridir. Aynı zamanda heterojen katalizörler yüksek ürün dönüşümü elde edilebilir ve çevre dostu katalizörlerdir.

### **2.5.3. Enzimatik katalizörler**

Enzimatik katalizör olarak genellikle yağları yağ asidine parçalayan “Lipaz” enzimi kullanılmaktadır. Lipazların kullanımında yüksek dönüşümler elde edilebilir ve bu katalizörlerin üründen ayırma işlemi de kolaydır. Ancak yağ molekül hacminin büyük olmasından dolayı lipazların ilk aktiviteleri biraz daha düşüktür. Katalizör olarak kullanılan pek çok enzim üniform halde olmaması ve doğal katalizörlere göre daha pahalı olmaları nedeniyle ticari proseslerde tercih edilmemektedir [33].

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Xie, Huang ve arkadaşının yaptıkları çalışmada, katı baz katalizör kullanmışlardır. Katı baz katalizörü KOH'i (sulu çözeltisi ile) ıslak emdirme yöntemi ile NaX zeolitine yükleyerek hazırlamışlardır. Hazırlanan yüklenmiş NaX zeolitini kullanarak, 10/1 alkol/yağ oranı, kütlece %3 katalizör miktarı ve 65°C'de 8 saatlik tepkime sonucunda %85,6 verimle elde etmişlerdir [34].

Bo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, palmiye yağı, metanol ve KF/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizörü kullanılarak 65°C'de 3 saatte transesterleşme tepkimesi gerçekleştirilmiştir ve en yüksek yağ asidi metil ester verimi (alkol/yağ molar oranı 12/1'de) %90 elde etmişlerdir [35].

Transesterleşme tepkimesi ile KF/ZnO heterojen katalizörü kullanılarak soya yağından yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir. ZnO bileşiğine kütlece %15 potasyum bileşikler eklenerek 873 K'de heterojen katalizör sentezlenmiştir [36].

Kanola yağı ile potasyum eklenmiş titanyumdioksit katalizörlüğünde transesterleşme tepkimesi ile yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir. Metil esterlerin tam dönüşümü %20 potasyum eklenmiş katalizör eşliğinde deneyden önce herhangi bir ön hazırlık gerekmeden normal hava koşulları altında gerçekleşmiştir. Reaksiyon süresi 5 saat olarak belirlemişlerdir [37].

Li ve Xie, soya yağı ve metanolü kullanarak, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (kütlece %6,75 Eu) katalizörü ile 6/1 alkol/yağ oranında, %10 katalizör miktarında 70°C'de transesterleşme tepkimesini gerçekleştirmişler; ilk 2 saatte soya yağı veriminin çok düşük olduğunu (%3), 2. saatten sonra verimin hızla arttığını ve 8 saatte verimin %83 olduğunu tespit etmişlerdir [38].

Wu ve arkadaşları asidik ortamda (iyonik sıvılar) oleik asidin metanol ile transesterleşme tepkimesini gerçekleştirmiştir. Elde edilen biyodizel basit yollarla ayrılarak, iyonik sıvı tekrar kullanılmıştır [39].

Guo ve arkadaşları asitlendirilmiş soya sabun stoklarından biyodizel elde etmişlerdir. Esterleşmede kütlece %7 lignin kaynaklı karbon katalizörü kullanıldığında %97'nin üstünde bir serbest yağ asidi dönüşümünü, metanol:yağ molar oranı 1:9, tepkime sıcaklığı 70°C ve 5 saatlik süre koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Katalitik aktivite olarak sülfirik asit ve lignin kaynaklı karbon katalizörü karşılaştırıldığında, lignin kaynaklı karbon katalizörün 3,5 kat daha yüksek bir performans gösterdiği görülmüştür. Ek olarak lignin kaynaklı karbon katalizörün %80'in üstünde bir verimle üç kez yeniden kullanılabilirdiği belirlenmiştir [40].

Kouame ve arkadaşları Jatropha yağı ve sodyum hidroksit katalizörü kullanarak metanol ile transesterleşme tepkimesinde yağ asidi metil esterlerini elde etmişlerdir [41].

Evangelista ve arkadaşları bu çalışmada potasyum iyodür ile alümina üzerine eklenmiş katalizör sentezlemişlerdir ve pirinç kepeği yağı ile metanolün transesterleşme tepkimesini gerçekleştirmiştir. Tepkime geri soğutucu altında 15:1 metanol:yağ molar oranı ile gerçekleşmiştir. KI/alümina katalizörünü 3 saat ve 773 K sıcaklığında kalsine ederek hazırlamışlardır. Kütlece %5'lik katalizör kullanıldığında, %95 verimle yağ asidi metil ester elde etmişlerdir [42].

Leclercq ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, farklı metanol oranlarında baryum hidroksit, magnezyum oksit ve magnezyum alüminyum oksit karışımları kullanarak %80 verimle yağ asidi metil ester elde etmişlerdir [43].

Kawashima ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, heterojen katalizör olarak CaO kullanmışlar ve 60°C'de 3 saatlik tepkime süresi sonucunda yağ asidi metil ester verimini yaklaşık %90 olarak elde etmişlerdir [44].

Wang ve arkadaşları bu çalışmada soya fasulyesi yağından lityum ortosilikat ( $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ) katalizörü kullanarak transesterleşme tepkimesi ile biyodizel sentezlemişlerdir. Optimum tepkime koşulları altında metanol/yağ molar oranı 18:1, kütlece %6 katalizör miktarı, 65°C tepkime sıcaklığı ve 2 saatlik tepkime süresi için %98 verimle yağ asidi metil esterler elde etmişlerdir. Bu makalede metanol/yağ oranı, katalizör miktarı, tepkime süresi ve tepkime sıcaklığının verim üzerindeki etkisi belirtilmiştir. Kullanılan katı katalizörün oldukça aktif, havaya duyarlı ve aktivitesini kaybetmeden tekrar kullanılabilceğini belirtmişlerdir [45].

Ebiura ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, trioleinin metil alkol ile transesterleşme tepkimesi alümina destek maddesi üzerine eklenen farklı alkali metal tuzlarının katalizörlüğünde gerçekleştirilmiştir. Trioleinin metanol ile transesterleşme tepkimesinde, 423 K'de katalizör olmadan %93 verimle yağ asidi metil esterler elde edilmiştir. Alkali metal tuzu içermeyen alümina katalizörlüğündeki tepkime 333 K'de 1 saat sonunda metil oleat eldesi olmamıştır. 12 saat 423 K'de %7 metil oleat eldesi gerçekleşmiştir. Bu nedenle, katalitik aktivitenin alümina üzerine ilave edilen alkali metal tuzları ile sağlandığı anlaşılmıştır. Bu katalizörlerden, alümina üzerine ilave edilen  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , KF,  $\text{LiNO}_3$  ve NaOH katalizörleri ile 333 K'de 1 saat sonunda yüksek verimlerde metil oleat elde edilmiştir.  $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  katalizörü ile %93 metil oleat verimi elde edilirken,  $\text{KOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$  katalizörü diğerlerine göre daha düşük aktivite göstermiştir [46].

Majewski ve arkadaşları bu çalışmada difenilamonyum tuzlarını trigliseritlerin transesterleşme tepkimesinde katalizör olarak kullanmışlardır. Atmosfer

basıncı altında yapılan ve mikrodalga kullanılarak yapılan tepkimeler araştırılmış ve karşılaştırılmıştır [47].

Felizardo ve arkadaşları, atık kızartma yağlarından metil esterlerin eldesi üzerinde çalışmışlardır. Atık kızartma yağı, metil alkol ve NaOH'in katalizör olarak kullanıldığı transesterleşme tepkimelerini bir saatte gerçekleştirmiştir. Biyodizel eldesi için en iyi koşulları belirlemek amacıyla yapılan deneylerde metanol/yağ oranları (molar) 3,6 ile 5,4 arasında ve katalizör/yağ oranları (kütlece) %0,2 ile %1,0 arasında seçilmiştir. Metil esterlerin 4,8 metanol/yağ oranında ve %0,6 katalizör/yağ oranında en yüksek verimle elde edildiği gözlenmiştir. Sonuç olarak metanol veya katalizör miktarlarındaki artışın metil ester fazının ayrılmasını basitleştirdiği, viskoziteyi düşürdüğü ve saflığı %98'in üzerine çıkardığı bulunmuştur [48].

Hanh ve arkadaşları, farklı alkollerle (örneğin, metanol, etanol, bütanol, propanol, hekzanol, oktanol, dekanol) çalışmalar yapmışlardır. 6:1 alkol/yağ molar oranında, NaOH ve KOH baz katalizörleri ile ultrasonik banyoda yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda alkol içeriğindeki karbon sayısı arttıkça yağ asidi metil ester veriminin azaldığını ifade etmişlerdir [49].

Noiroj ve arkadaşları, heterojen katalizör hazırlamak için KOH'i,  $Al_2O_3$  ve NaY zeoliti üzerine eklemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada;  $Al_2O_3$  ile hazırlanan heterojen katalizörden (kütlece %25 KOH), 15:1 alkol/yağ oranında ve 60°C üzerindeki sıcaklıkta 2 saatlik tepkime süresinde %91 verimle yağ asidi metil esterler elde edilmiştir. Hazırlanan KOH/NaY katalizöründe ise; kütlece %10 KOH eklenmesi, 3 saatlik süre ve alkol/yağ oranı 15:1 olacak şekilde 60°C'ta aynı verim elde edilmiştir [50].

Trakarnpruk ve Porntangjitlikit yapmış oldukları çalışmada, kalsine edilmiş magnezyum alüminyum (Mg-Al) hidrotalsit üzerine potasyum bileşiklerini ekleyerek yağ asidi metil ester verimini araştırmışlar ve deneylerde %96,5 verimle elde etmişlerdir [51].

Georgogianni ve arkadaşları, soya yağının metanol ile transesterleşmesini farklı heterojen katalizörler varlığında düşük ultrasonik frekans ve mekanik karıştırıcı kullanarak çalışmışlardır. Katalizörlerin seçimi gözenekli yapı ve yüzey bazikliği göz önüne alınarak yapılmıştır. Deney sonuçları katalizörlerin aktivitelerinin bazlık kuvvetleri ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Mg-Al hidrotalsit %97'lik yağ asidi metil ester verimi ile en yüksek aktiviteyi göstermiştir. ZrO<sub>2</sub>'nin aktivitesinin ise ortama potasyum iyonları eklendikçe yani bazlık arttıkça arttığı gözlenmiştir. Ultrasonik karıştırıcıda tepkime 5 saatte tamamlanırken manyetik karıştırıcıda 24 saatte tamamlanmıştır [52].

Enciner ve arkadaşları, Cynara yağının transesterleşmesini etanol ile yapmışlardır. Farklı alkol/yağ oranlarında (3:1, 6:1, 9:1, 12:1, 15:1) yapılan deneysel çalışmaların sonucunda 6:1 oranının altında tepkime tamamlanmazken 9:1 ve 12:1 oranların yüksek yağ asidi metil ester verimleri elde edilmiştir [53].

Reddy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, soya yağının metanol ile oda sıcaklığında yapılan transesterleşme tepkimesi, nanokristal katalizörler ile gerçekleştirilmiştir. Nanokristal boyuttaki katalizörler ile gerçekleştirilen transesterleşme tepkimelerinde oldukça yüksek verim elde edilmiştir [54].

Xie ve Haitao, transesterleşme tepkimesinde kullanılabilecek en yüksek bazlığa ve en iyi katalitik aktiviteye sahip katalizör elde etmek için yaptıkları çalışmalarında; 773 K sıcaklıkta 3 saat süren kalsinasyon işleminin sonucunda kütlece %35'lik KI/alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) üzerine ekleyerek hazırladıkları katalizörlerle %96 yağ asidi metil ester verimi elde etmişlerdir. 15:1 metanol/yağ oranı, 8 saatlik reaksiyon süresi ve %2,5 katalizör miktarında en yüksek verim değeri elde edilmiştir [55].

Leung ve arkadaşları, farklı depolama şartlarında biyodizelin bozunmasını incelemişlerdir. Bunun için 12 tane biyodizel örneği bir yıl boyunca farklı sıcaklıklarda tutulmuş ve sonuçlar araştırılmıştır. Test sonuçları, yüksek

sıcaklıklarda bozunma hızının arttığını göstermiştir. Biyodizelde su bulunması da bozunmayı hızlandıran diğer bir etkidir. En az bozunmanın 4-20°C olan ortamdaki örneklerde; en fazla bozunma ise 40°C civarındaki örneklerde olduğu gözlenmiştir [56].

Xie ve arkadaşları, soya yağı ve alümina üzerine desteklenmiş KNO<sub>3</sub> katalizörü kullanarak yağ asidi metil esterleri elde etmişlerdir. Transesterleşme tepkimesini 60°C'de 7 saat sürede 15:1 alkol yağ oranında ve %6,5 katalizör kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tepkime sonunda %87 verimle yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir [57].

Falco ve arkadaşları, soya yağının metanol ile transesterleşmesinde katalizör olarak reçinelerin kullanılmasını araştırmışlardır. Bazik ve asidik iyon değiştirici reçineleri kullanarak biyodizel sentezlemişlerdir. Tepkime değişkenleri olarak; metanol/yağ oranı, katalizör miktarı ve reaksiyon sıcaklığı çalışılmıştır. Tepkimelerde katalizörlerin etkili olduğu görülmüştür. Hazırlanan reçineler referans olarak kullanılan MgO/NaOH katalizörü ile karşılaştırıldığında bazik karakteri çok yüksek olan makro gözenekli reçinenin en yüksek aktiviteyi gösterdiği görülmüştür [58].

Chakraborty ve arkadaşları, soya yağının transesterleşmesinde katı katalizör olarak uçucu kül ve yumurta kabuğu türevini kullanmışlardır. Çalışmada CaO ile desteklenmiş uçucu kül katalizörünün, transesterleşmede kullanımını arttırmak için atık yumurta kabukları kullanılarak yeni katalizör geliştirilmiştir. Atık yumurta kabukları kalsine edilerek kullanılmıştır. Küçük gözenekli, yüksek bazik aktiflik gösteren katalizör hazırlanmıştır. Hazırlanan katalizörün optimum deney koşullarında %96'lık metil ester verimi elde edilmiştir. Ayrıca katalizör yüksek tekrar kullanılabilirlik özelliği göstermiştir [59].

Zhu ve arkadaşları heterojen bir sistemde Jatropha yağının transesterleşmesinde CaO'in katalitik aktivitesini araştırmıştır. Katalizörün kalsinasyon sıcaklığı ve süre, sıcaklık, katalizör miktarı, metanol/jatropha

yağı oranı gibi tepkime değişkenlerinin biyodizel üretimi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. 70°C'de 2,5 saatte 9:1 alkol yağ oranında %93 verimle yağ asidi metil esteri elde edilmiştir [60].

Tashtoush ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, hayvansal atık yağların, etil ve metil alkol ile biyodizele dönüşümlerinin optimizasyonu ve değerlendirilmesi incelenmiştir. Elde edilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, bitkisel yağ esaslı biyodizelin özelliklerine göre dizel yakıtı değerlerine daha yakın olduğu tespit edilmiş ve elde edilen ürünün iyi bir dizel yakıt olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan çalışmada, tepkime sıcaklığı, alkol/yağ molar oranı, alkol cinsi ve katalizör cinsi gibi parametreler incelenerek esterleşme tepkimesi veriminin en yüksek olduğu optimum koşullar belirlenmiştir. Saf etil alkol kullanılan transesterleşme tepkimesi veriminin bütün oranlarda, saf metil alkol ile yapılan çalışmalardan daha yüksek olduğu ve %100 alkol fazlalığının olduğu tepkimelerin en iyi verimler olduğu elde edilmiştir [61].

Yao ve arkadaşları 2010 yılında, belli miktardaki KOH'ın düşük kaynama noktasına sahip organik aminlere eklenmesi ile elde edilen katalizörlerin biyodizel eldesi için etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda tri-etil amin, di-etil amin ve ter-bütil amin olarak üç tür amin kullanılmıştır. Bu aminler üzerine KOH eklenmiştir ve katalizör/yağ oranı 367,1 mg/kg yağ olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışmalar sırasında KOH eklemesi yapılmadan saf organik aminlerle de deneyler yapılmış ve KOH eklemesi olmadan da %90'ın üzerinde biyodizel verimi elde edilmiştir [62].

Deng ve arkadaşları 2010 yılında, Jatropha yağı ve metanol kullanarak biyodizel eldesi için transesterleşme tepkimesi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda katalizör olarak önce direkt olarak NaOH kullanmışlardır ve bu çalışmada ürün verimini %47 olarak elde etmişlerdir [63].

Murugan ve arkadaşı 2011 yılında, yaptıkları çalışmada dimetil karbonat, etil alkol ve katalizör olarak da  $KF/Al_2O_3$  katalizörünü kullanarak dietil karbonat sentezlemişlerdir. Çalışmalarında sıcaklık, katalizör miktarı ve tepkimeye giren maddelerin oranları için optimum değerler belirlemişler ve çalışmalarını bu optimum koşullarda gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yaptıkları deneylerde katalizörün yeniden kullanımını araştırmışlardır ve katalizörün tekrar tekrar kullanımı sonucunda dikkate alınır bir fark olmadığı kararına varmışlardır. Çalışmalarda %96 verimle yağ asidi metil esterlerini elde etmişlerdir [64].

Wan ve arkadaşı 2011 yılında, kalsiyum oksit üzerine desteklenmiş aktif karbon kullanarak, hurma yağı ile transesterleşme tepkimesi gerçekleştirerek metil ester elde etmişlerdir. Kütlece %5,5 katalizör miktarı, 190°C sıcaklık, 15:1 metanol:yağ oranı ve 1 saat 21 dakikalık tepkime süresini optimum koşullar olarak belirlemişlerdir. Optimum koşullarda yaptıkları çalışmalar sonucunda %80 metil ester verimi elde etmişlerdir. Ayrıca katalizörün tekrar kullanımı da çalışılmış ve iki kullanımdan sonra da katalizörün performansının sürdürüldüğü anlaşılmıştır [65].

Boz, Değirmenbaşı ve arkadaşı 2009 yılında, bitkisel yağın biyodizel dönüşümünü  $KF/nano-\gamma-Al_2O_3$  katalizörü ile gerçekleştirmişlerdir. KF eklenmiş alümina kalsine edilmiş ve heterojen katalizör olarak kullanılmıştır. Çalışmada  $KF/\gamma-Al_2O_3$  oranı, kalsinasyon sıcaklığı, tepkime sıcaklığı, süre ve katalizör miktarı gibi değişkenlerin transesterleşme tepkimesi üzerine etkisi incelenmiştir. Uygun deney koşulları altında %97'lik bir verim değerine ulaşılmıştır. Bu yüksek verim, katalizör yüzeyinin yüksek bazlığı ve nanopartiküllü alüminanın kullanılması ile açıklanmıştır. Katalizörün tekrar kullanılabilirliğine bakıldığında ise K'nın ilk tepkimedan sonra katalizör yüzeyinden ayrıldığı gözlenmiş ve bu da katalizör aktivitesini ikinci ve üçüncü kullanımda düşürmüştür. Bunun da katalizör yüzeyinin tekrar KF eklenmesi ile giderilebileceğini öngörmüşlerdir [66].

Boz, Değirnenbaşı ve arkadaşı 2013 yılında yapmış oldukları bu çalışmada, kanola yağı ve metanolün biyodizele dönüşümünü transesterleşme tepkimesinde KF, KOH ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ile desteklenen kalsiyum bentonit merkezli katalizör kullanarak araştırmışlardır. Tepkime süresi, metanolün yağa molar oranı, sıcaklık ve katalizör, temel parametreler olarak belirlenmiştir. KF içeren katalizörün aktivitesinin diğer katalizörlere göre daha etkin olduğu belirlenmiştir [67].

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, transesterleşme tepkimesinde heterojen katalizörü kullanılarak yağ asidi metil esterlerin eldesi amaçlanmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan katalizörler, öncelikle kanola yağının metanol ile transesterleşme tepkimesinde test edildi. Alkol/yağ oranı, tuz/katalizör oranı, yağın cinsi, alkolün cinsi, katalizör miktarı ve tepkime süresi gibi değişkenlerin verim üzerindeki etkileri incelendi. Heterojen katalizör olarak CaO/LiNO<sub>3</sub>, alkol olarak metanol, etanol, propanol ve yağ olarak kanola, soya ve fındık yağı kullanıldı. Elde edilen yağ asidi metil esterlerin verimi gaz kromatografisi analizi ile hesaplandı. Optimum tepkime koşulları belirlendikten sonra elde edilen yağ asidi metil esterlerin yapısı ATR-IR ve <sup>1</sup>H-NMR spektroskopisi ile karakterize edildi.

### 4.1. Kullanılan Kimyasal Malzemeler

CaO, LiNO<sub>3</sub>, Metanol, Etanol, Propanol, Kanola Yağı, Soya yağı, Fındık yağı.

#### 4.1.1 Lityum nitrat

Kullanılan lityum nitrat (LiNO<sub>3</sub>), Sigma-Aldrich firmasından temin edildi. Lityum nitratın mol kütlesi 68,94 g/mol, yoğunluğu 2,38 g/cm<sup>3</sup>tür.

#### 4.1.2. Metanol

Çalışmalarda kullanılan metanol (CH<sub>3</sub>OH), Carlo Erba Reagent firmasına ait olup %99,9 saflıktadır.

#### 4.1.3. Etanol

Çalışmalarda kullanılan etanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH), Sigma-Aldrich firmasına ait olup saflığı %99,8'dir.

#### 4.1.4. Propanol

Çalışmalarda Merck firmasına ait, minimum %99 saflığa sahip olan propanol ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ) kullanıldı.

#### 4.1.5. Kanola yağı

Kanola yağının özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kanola yağının özellikleri

Enerji Değeri (Kcal ve Kj, 100 mL'de)
Tekli doymamış yağ asidi, (C18:1), (oleik asit) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Çoklu doymamış yağ asidi, (C18:2), (linoleik asit) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Çoklu doymamış yağ asidi, (C18:3), (linolenik asit) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Doymuş yağ asitleri <ul style="list-style-type: none"> <li>• Palmitik asit (C16:0), <math>\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}</math></li> <li>• Stearik asit (C18:0), <math>\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}</math></li> </ul>

## **4.2. Kullanılan Cihazlar**

### **4.2.1. Gaz kromatografisi**

Bu çalışmada, Agilent 6890 (CARBOWAX 20M kolonu) marka gaz kromatografisi cihazı kullanılmıştır. Analizler Kocaeli Üniversitesinde yapılmıştır.

### **4.2.2. ATR-IR spektroskopisi**

ATR-IR spektrumları, Perkin Elmer Nicolet 520 ATR-IR cihazı ile Hacettepe Üniversitesi Kimya bölümünde çekilmiştir.

### **4.2.3. <sup>1</sup>H-NMR spektroskopisi**

<sup>1</sup>H-NMR spektrumları, Bruker Ultrashield 400 MHz sıvı NMR spektrometresi ile Hacettepe Üniversitesi Kimya bölümünde çekilmiştir.

### **4.2.4. Terazi**

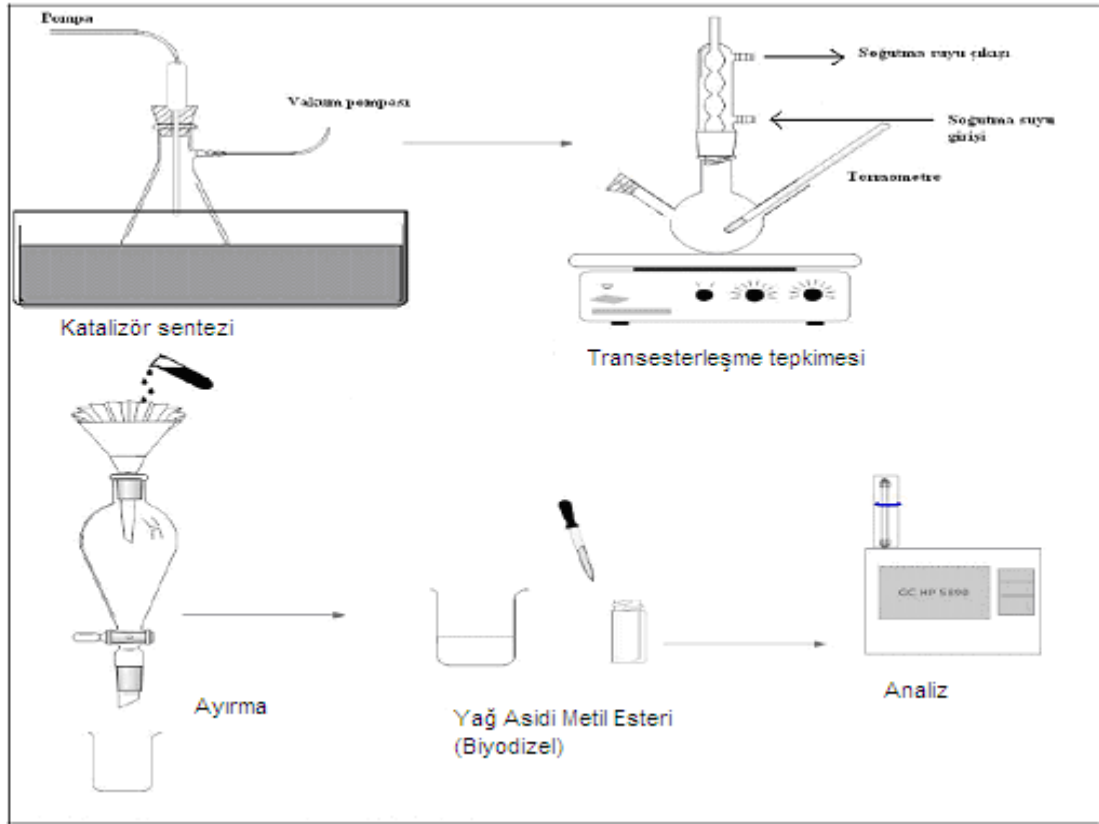
Çalışmada SCALTEC marka dijital terazi kullanıldı.

### **4.2.5. Manyetik karıştırıcı**

Çalışmada Velp Scientifica marka karıştırıcı kullanıldı.

## **4.3. Deneylerin Yapılışı**

Deneyler yukarıda bahsedilen malzemeler kullanılarak yapıldı. Yapılan deneylerde Şekil 4.3'te gösterilen deney düzeneği kullanıldı.



Şekil 4.3. Katalizör hazırlama, transesterleşme tepkimesi süreci

#### 4.3.1. Katalizörün hazırlanışı

Bu çalışmada kullanılan katı bazik katalizör,  $\text{LiNO}_3$  çözeltisinin  $\text{CaO}$  destek malzemesine eklenmesi yöntemiyle hazırlandı. Bu yöntem, Xie ve arkadaşının çalışması olan soya yağının metanol ile  $\text{KF}/\text{ZnO}$  katalizörünün transesterleşme tepkimesindeki yöntemine göre yapıldı [36]. Buna göre  $\text{LiNO}_3$ 'ün sulu çözeltisi hazırlanarak  $\text{CaO}$  üzerine damla damla eklendi. Bu şekilde farklı oranlarda  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörleri (%3, %5, %10, %15, %20, %25, %30) hazırlandı. Hazırlanan bu katalizör  $50^\circ\text{C}$ 'de 24 saat bekletilerek etüvde kurutuldu. Bu sürenin sonunda kuruyan katalizör, krozeyle alınarak  $500^\circ\text{C}$  'de 3 saat kül fırınında kalsine edildi.

### **4.3.2. Transesterleşme tepkimesi**

Belirli miktarda hazırlanmış olan alkol ve katı katalizör karışımı bir balona konuldu ve daha sonra gerekli miktardaki kanola yağı karışıma eklendi ve daha sonra yağ, alkol ve katalizör karışımı 600 rpm'lik bir karıştırma hızında, 60<sup>0</sup>C tepkime sıcaklığında geri soğutucu altında ısıtıldı. Isıtıcının sıcaklık ayarı sürekli kontrol edilmiş ve bir termometre yardımıyla 60<sup>0</sup>C tepkime sıcaklığında kalması sağlandı. Belirlenen süre tamamlandıktan sonra karışım soğumaya bırakıldı.

### **4.3.3. Ayırma**

Oluşan karışım, gliserolün yoğunluk farkı sebebiyle fazların ayrılması için ayırma hunisine aktarıldı. Üstteki yağ asidi alkil ester (biyodizel) fazı aktarma yöntemiyle alındı. Altta kalan gliserin fazı ise bir kaptan toplandı.

### **4.3.4. Alkolün uzaklaştırılması**

Ayırma işlemi tamamlandıktan sonra her bir fazdaki artan alkol damıtma işlemiyle uzaklaştırıldı. Uzaklaştırılan alkol saflaştırılarak geri kazanılabilir ve tekrar kullanılabilir.

### **4.3.5. Yağ asidi alkil esterlerin yıkanması**

Gliserin ve alkolden ayrıldıktan sonra yağ asidi alkil esterleri (biyodizel), kalıntı katalizör ve diğer safsızlıkları uzaklaştırmak için su ile yıkanıp daha sonra damıtma yöntemiyle su uzaklaştırıldı.

#### **4.3.6. Yağ asidi alkil esterlerin verimi**

Elde edilen ester miktarları Agilent 6890 (CARBOWAX 20M kolonu) gaz kromatografisi cihazı kullanılarak (AOCS Resmi Metodu Ca 14-56 kullanılarak) analiz edildi.

#### **4.3.7. Alkali tuz/ CaO oranı**

Transesterleşme tepkimesi, farklı oranlarda hazırlanan  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kullanılarak gerçekleştirildi.  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  miktarları, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 olarak tepkimeye alındı.

#### **4.3.8. Alkol/yağ oranı**

Alkol/yağ oranının transesterleşme tepkimesindeki değişimini incelemek amacıyla değişik alkol/yağ oranlarında tepkimeler gerçekleştirildi. Kullanılan Alkol/yağ oranları; 3:1, 9:1 ve 12:1 olacak şekildedir.

#### **4.3.9. Sürenin etkisi**

Tepkime süresinin transesterleşme tepkimesindeki etkisini incelemek amacıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat gibi farklı sürelerde deneyler yapıldı.

#### **4.3.10. Alkolün etkisi**

Alkolün transesterleşme tepkimesi üzerine etkisini incelemek için farklı türlerde alkoller kullanılarak deneyler yapıldı. Sırasıyla metanol, etanol ve propanol alkollerini ile çalışıldı.

#### **4.3.11. Yağın etkisi**

Hazırlanan katalizör ile kanola yağı, soya yağı ve fındık yağı kullanılarak transesterleşme tepkimesi yapılarak yağın etkisi incelendi.

#### **4.3.12. Katalizör miktarının etkisi**

Alkol, yağ ve katalizör karışımındaki katalizör miktarının oranı değiştirilerek katalizör miktarının transesterleşme tepkimesine olan etkisi incelendi. Karışımındaki katalizör miktarının karışımındaki tamamının miktarına olan oranları %1, %2, %3, %4 ve %5 şeklinde hazırlanarak katalizör miktarının etkisi incelendi.

#### **4.3.13. Kalsinasyon sıcaklığının etkisi**

$\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kül fırınında  $500^\circ\text{C}$  sıcaklığında kalsine edildi.

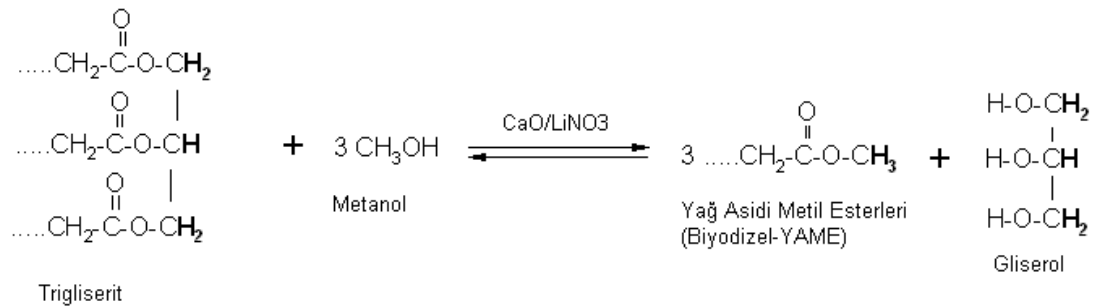
## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yapılmış olan deneysel çalışmamızda transesterleşme tepkimesine etki eden parametreler değiştirilerek elde edilen yağ asidi alkil esterleri (biyodizel) gaz kromatografisi ile analiz edildi. Analiz sonucunda her bir numunenin verimi belirlendi. Bu analizlerden elde edilen verilerin ışığında hazırlanan katalizörün optimum çalışma şartları belirlendi. Elde edilen yağ asidi metil esterleri ATR-IR ve  $^1\text{H-NMR}$  spektroskopileri ile karakterize edildi.

### 5.1. $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$ ve Alkol/yağ Oranının Etkisi

Transesterleşme tepkimesi stokiyometrik olarak bir mol trigliseritin ve üç mol alkolün, üç mol yağ asidi esteri ve bir mol gliserol oluşturmasıdır. Ester verimini etkileyen önemli bir faktör alkol yağ oranıdır.

Yapılan çalışmalarda alkol/yağ oranı, dengeyi esterlerin oluşum yönüne doğru kaydırmak amacı ile her zaman stokiyometrik orandan daha yüksek seçildi.



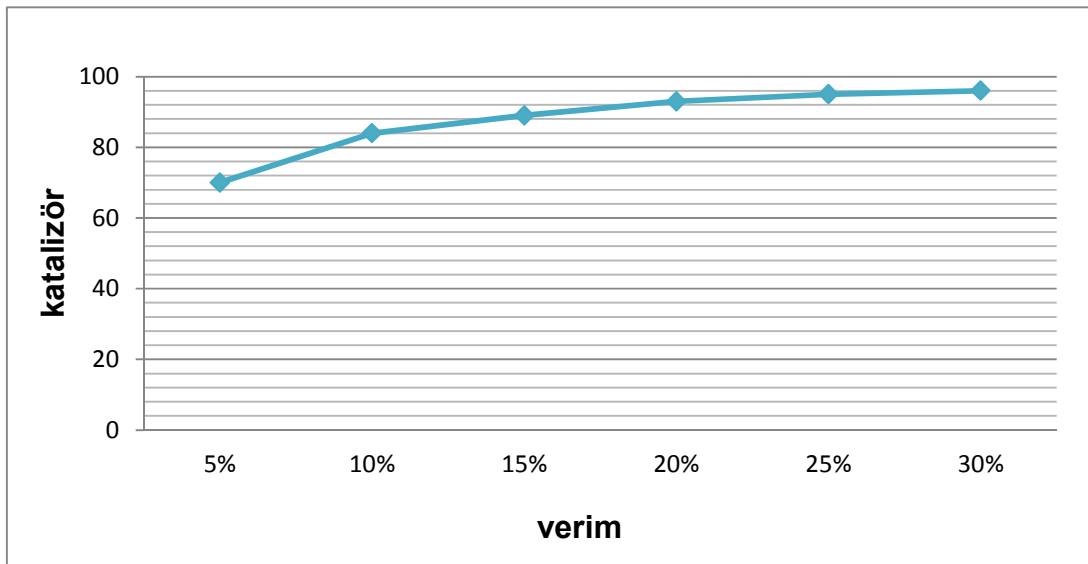
Şekil 5.1. Transesterleşme Tepkimesi

Farklı alkol/yağ oranları ile yapılan deneylerdeki  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  oranının çeşitli yüzdelerde hesaplanması ile hazırlanan katalizörün, aktivitesini belirlemek amacıyla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1.  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  oranının verim üzerine etkisi (3:1 alkol/yağ oranında)

$\text{LiNO}_3/\text{CaO}$ oranı	Verim (%)
5%	70
10%	84
15%	89
20%	93
25%	95
30%	96

Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi  $\text{CaO}$  üzerine eklenen  $\text{LiNO}_3$  miktarının değiştirilmesi ile %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında sentezlenen katalizörlerin, 3:1 (alkol/yağ) oranında kullanılarak sırasıyla %70, %84, %89, %93, %95 ve %96 verimle yağ asidi metil esterleri elde edildi.



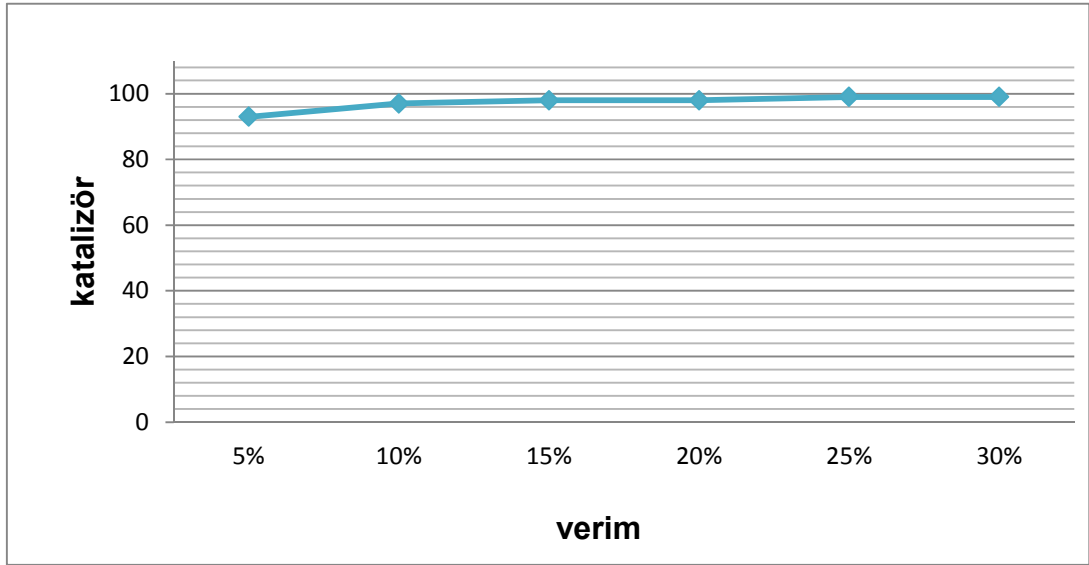
Şekil 5.2.  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  oranının verim üzerine etkisi (3:1 alkol/yağ oranında)

Şekil 5.2'den de görüldüğü gibi  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizöründeki  $\text{LiNO}_3$  yüzdesi arttıkça yağ asidi metil esterlerin verimi de artmıştır.

Çizelge 5.2.  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  oranının verim üzerine etkisi (9:1 alkol/yağ oranında)

$\text{LiNO}_3/\text{CaO}$ oranı	Verim (%)
5%	93
10%	97
15%	98
20%	98
25%	99
30%	99

Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi  $\text{CaO}$  üzerine eklenen  $\text{LiNO}_3$  miktarının değiştirilmesi ile %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında sentezlenen katalizörlerin, 9:1 (alkol/yağ) oranında kullanılarak sırasıyla %93, %97, %98, %98, %99 ve %99 verimle yağ asidi metil esterleri elde edildi.



Şekil 5.3. LiNO<sub>3</sub>/CaO oranının verim üzerine etkisi (9:1 alkol/yağ oranında)

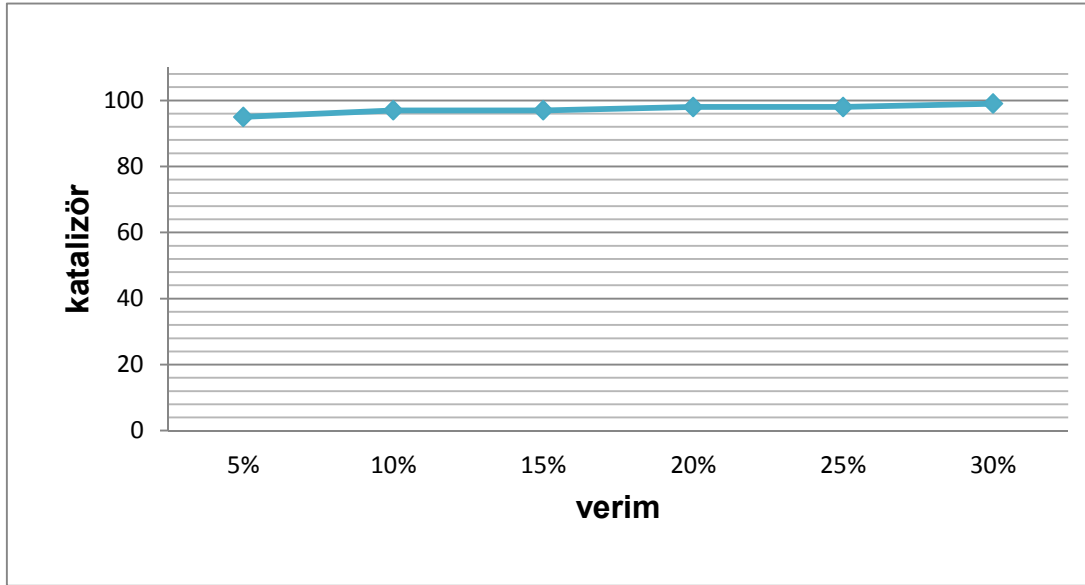
Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi yine LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizöründeki LiNO<sub>3</sub> yüzdesi arttıkça yağ asidi metil esterlerin verimi de artmıştır.

Çizelge 5.3. LiNO<sub>3</sub>/CaO oranının verim üzerine etkisi (12:1 alkol/yağ oranında)

LiNO <sub>3</sub> /CaO oranı	Verim (%)
5%	95
10%	97
15%	97
20%	98
25%	98
30%	99

Çizelge 5.3'de görüldüğü gibi CaO üzerine eklenen LiNO<sub>3</sub> miktarının değiştirilmesi ile %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında sentezlenen

katalizörlerin, 12:1 (alkol/yağ) oranında kullanılarak sırasıyla %95, %97, %97, %98, %98 ve %99 verimle yağ asidi metil esterleri elde edildi.



Şekil 5.4. LiNO<sub>3</sub>/CaO oranının verim üzerine etkisi (12:1 alkol/yağ oranında)

Şekil 5.4'ten de görüldüğü gibi yine LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizöründeki LiNO<sub>3</sub> yüzdesi arttıkça ester verimi de artmıştır.

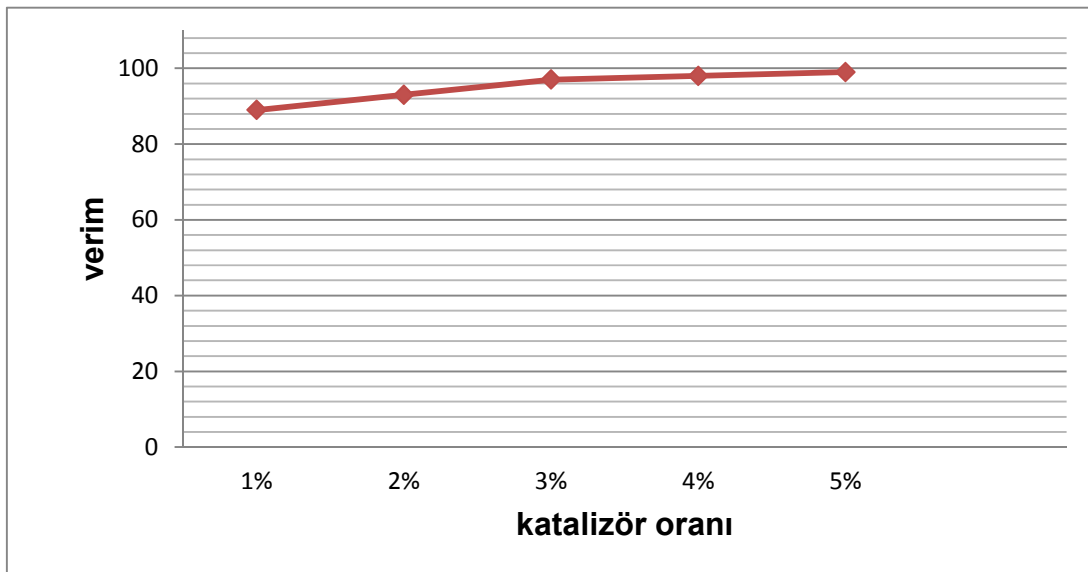
## 5.2. Katalizör Miktarının Etkisi

Katalizör miktarının etkisini incelemek için transesterleşme tepkimesi, 60°C'de, 9:1 metanol/yağ oranında, 5 saat süreyle gerçekleştirildi. Alkol-yağ-katalizör karışımındaki katalizör miktarının karışımındaki yüzdeleri %1, %2, %3, %4 ve %5 olarak alınarak ve Çizelge 5.4'de ki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.4. Katalizör miktarının verim üzerine etkisi

Katalizör oranı (%)	Verim (%)
1	89
2	93
3	97
4	98
5	99

Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi karışımdaki katalizör miktarı %1, %2, %3, %4 ve %5 olduğunda sırasıyla %89, %93, %97, %98 ve %99 verimle yağ asidi metil esterleri elde edildi.



Şekil 5.5. Katalizör miktarının verim üzerine etkisi

Şekil 5.5'ten de görüldüğü gibi katalizör miktarı arttıkça yağ asidi metil ester verimi de artmaktadır.

Yapılan bu çalışmalardan elde edilen sonuçlardan sonra 9:1 (alkol/yağ) oranı, %10'luk LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizörü ve %3 katalizör oranı en uygun koşullar olarak belirlendi.

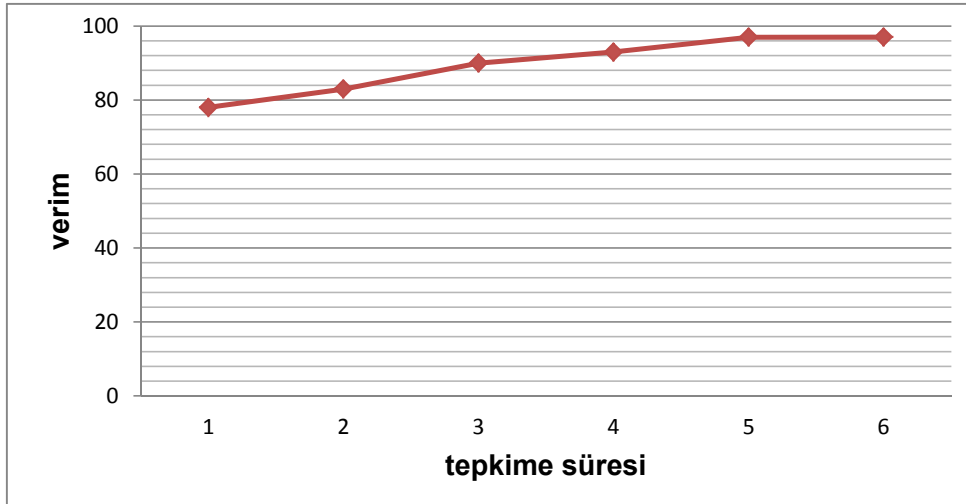
### 5.3. Tepkime Süresinin Etkisi

Transesterleşme tepkimesi, metanol/yağ oranı (9:1), %3 katalizör miktarında, %10'luk LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizörü ile 60°C'de tepkime süresi 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olmak üzere yapıldı. Çizelge 5.5.'te görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.5. Tepkime süresinin verim üzerine etkisi

Süre (saat)	Verim (%)
1	78
2	83
3	90
4	93
5	97
6	97

Çizelge 5.5'te görüldüğü gibi tepkime süresi arttıkça daha yüksek verimlerde yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Tepkime süresinin verim üzerine etkisi

Şekil 5.6'dan da görüldüğü gibi yağ asidi metil esterlerin verimleri tepkime süresi arttıkça artmaktadır. Bu sonuçların elde edilmesiyle tepkime süresi 5 saat olarak tercih edilmiştir.

#### 5.4. Çeşitli Yağların Verim Üzerine Etkisi

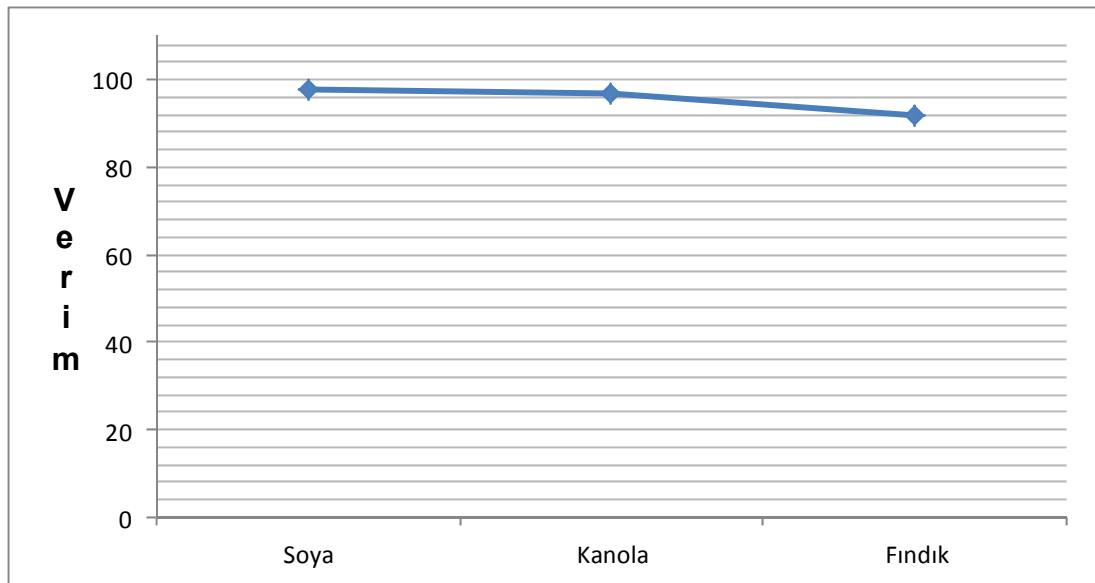
##### 5.4.1. Yağ türünün (metanolde) verim üzerine etkisi

Transesterleşme tepkimesi, alkol/yağ oranı (9:1), %3 katalizör miktarında, %10'luk  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  kullanılarak,  $60^\circ\text{C}$ 'de alkol türü olarak metanol, yağ türleri olarak soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı kullanıldı. Çizelge 5.6'da gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.6. Farklı yağ türlerinin (metanolde) verim üzerine etkisi

Yağ	Alkol	Verim (%)
Soya yağı	Metanol	98
Kanola yağı	Metanol	97
Fındık yağı	Metanol	92

Çizelge 5.6'da görüldüğü gibi transesterleşme tepkimesinde soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı ile alkol türü olarak metanol kullanımında sırasıyla %98, %97 ve %92 verimle yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir.



Şekil 5.7. Farklı yağ türlerinin (metanolde) verim üzerine etkisi

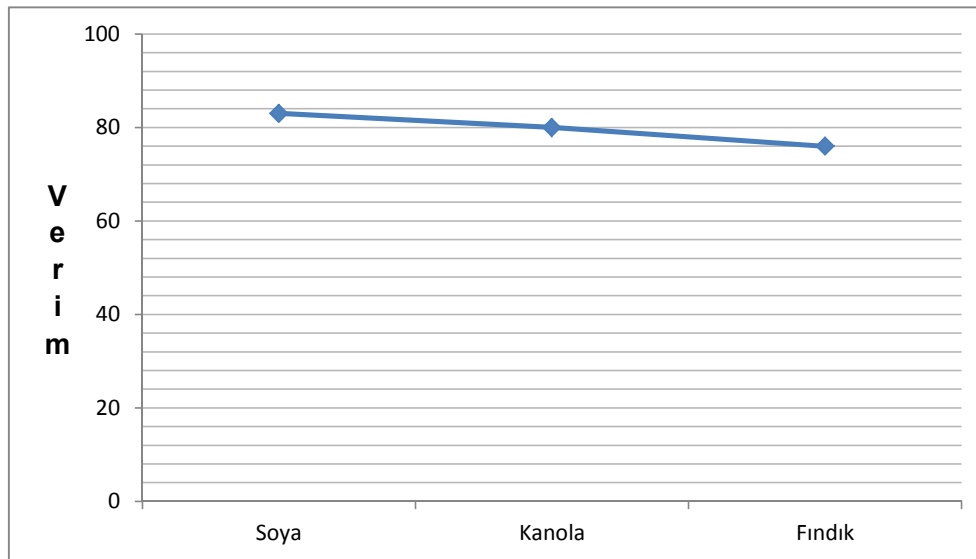
#### 5.4.2. Yağ türünün (etanolde) verim üzerine etkisi

Transesterleşme tepkimesi, alkol/yağ oranı (9:1), %3 katalizör miktarında, %10'luk  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kullanılarak,  $60^\circ\text{C}$ 'de alkol türü olarak etanol, yağ türleri olarak soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı kullanıldı. Çizelge 5.7'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.7. Farklı yağ türlerinin (etanolde) verim üzerine etkisi

Yağ	Alkol	Verim (%)
Soya yağı	Etanol	83
Kanola yağı	Etanol	80
Fındık yağı	Etanol	76

Çizelge 5.7’de görüldüğü gibi transesterleşme tepkimesinde soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı ile alkol türü olarak etanol kullanımında sırasıyla %83, %80 ve %76 yağ asidi etil esterlerin verimleri elde edildi.



Şekil 5.8. Farklı yağ türlerinin (etanolde) verim üzerine etkisi

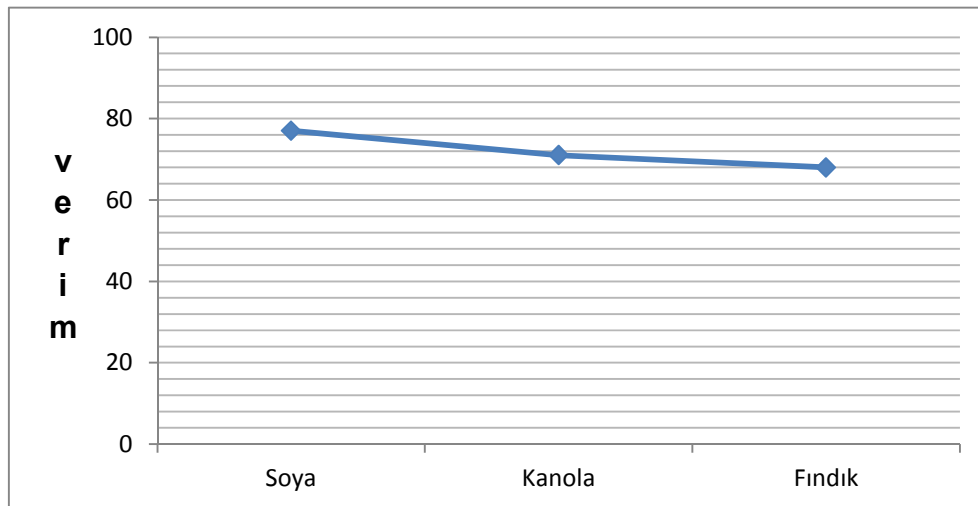
### 5.4.3. Yağ türünün (propanolde) verim üzerine etkisi

Transesterleşme tepkimesi, alkol/yağ oranı (9:1), %3 katalizör miktarında, %10'luk  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kullanılarak,  $60^\circ\text{C}$ 'de alkol türü olarak propanol, yağ türleri olarak soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı kullanıldı. Çizelge 5.8'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.8. Farklı yağ türlerinin (propanolde) verim üzerine etkisi

Yağ	Alkol	Verim (%)
Soya yağı	Propanol	77
Kanola yağı	Propanol	71
Fındık yağı	Propanol	68

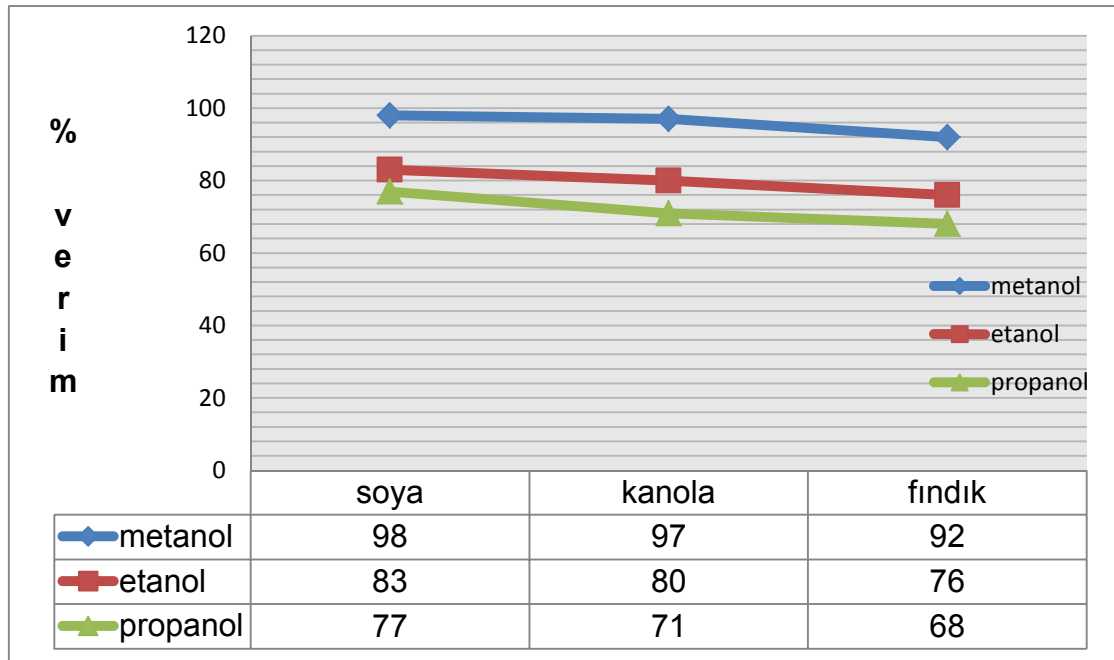
Çizelge 5.8'de görüldüğü gibi transesterleşme tepkimesinde soya yağı, kanola yağı ve fındık yağı ile alkol türü olarak propanol kullanımında sırasıyla %77, %71 ve %68 yağ asidi propil esterlerin verimleri elde edildi.



Şekil 5.9. Farklı yağ türlerinin (propanolde) verim üzerine etkisi

#### 5.4.4. Yağ türlerinin (farklı alkol çeşitlerinde) verim üzerine etkisinin karşılaştırılması

Transesterleşme tepkimesinde çeşitli alkol türlerinin çeşitli yağ türlerine etkisi araştırıldı. Kanola yağı, fındık yağı ve soya yağı kullanımında alkol türü olarak da metanol ile transesterleşme tepkimesinde en yüksek verim elde edildi. Buna bağlı olarak da yağ türünün etkisi için sadece metanol ile yapılan deney sonuçlarına bakıldığında soya yağının en yüksek verime ulaştığı görülmüştür.



Şekil 5.10. Farklı yağ türlerinin (farklı alkol çeşitlerinde) verim üzerine etkisi

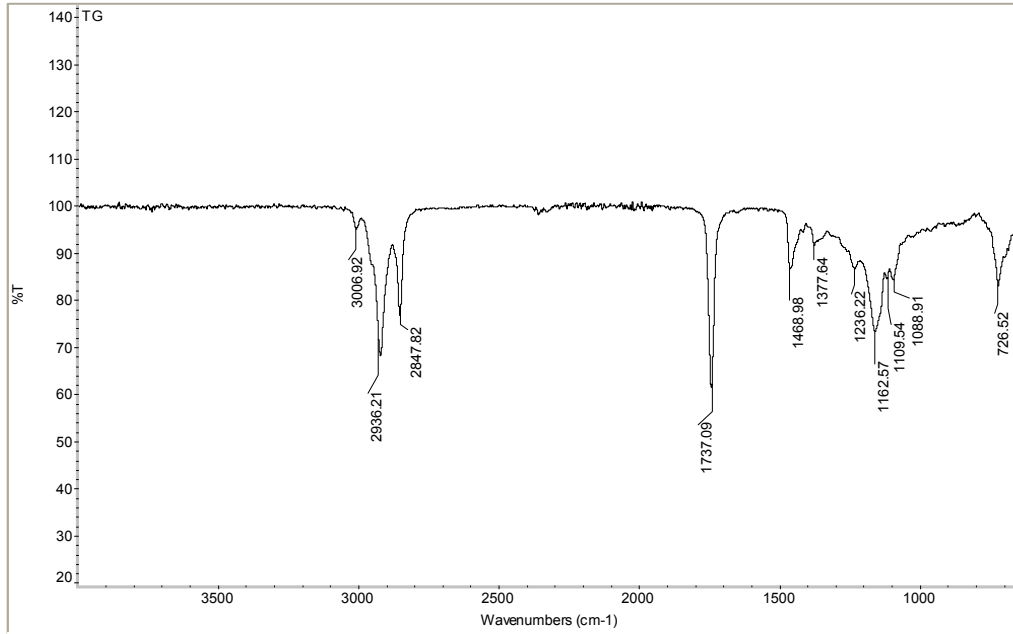
## 6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Enerjinin büyük öneme sahip olması ve fosil yakıt rezervlerinin azalan ömrü, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır. Enerjinin, ihtiyaç sahiplerine ucuz, sürekli, sürdürülebilir ve güvenli bir şekilde ulaştırılabilmesi ancak dünyada var olan ve değerlendirilmeyi bekleyen yenilenebilir enerji kaynaklarının toplum ve insan ihtiyaçlarıyla doğanın dengesini gözetilen bir yaklaşımla devreye alınmasıyla mümkündür. Yağ asidi metil esterleri (Biyodizel-YAME) dünyanın yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında,  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü ile kanola yağı, soya yağı ve fındık yağı kullanılarak farklı alkol türleri ile farklı koşullarda yağ asidi metil esterleri sentezlendi. Transesterleşme tepkimesi üzerine; alkali tuz/ $\text{CaO}$  miktarı, alkol/yağ oranı, çeşitli alkoller, çeşitli yağlar, katalizör miktarı ve tepkime süresi gibi etkiler araştırıldı. Yağ asidi metil esterleri sentezinin gerçekleştiği transesterleşme tepkimesi için optimum koşullar belirlendi.

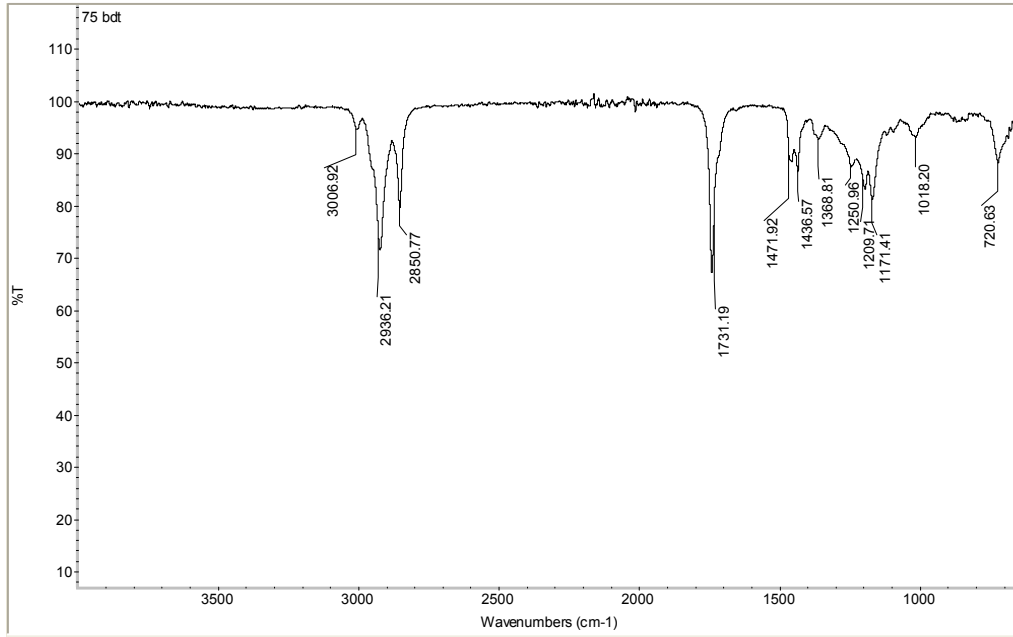
Yağ asidi metil esterleri eldesindeki optimum tepkime koşulları ( $60^\circ\text{C}$  sıcaklık koşulları için) %10  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizör miktarı, 9:1 alkol/yağ oranı, %3 katalizör miktarı ve 5 saat tepkime süresi olduğu belirlendi. Bu koşullarda elde edilen yağ asidi metil esterleri %97 verimle elde edildi. Kullanılan yağ ve alkol türleri arasında ise en yüksek verim kanola yağı ve metanol kullanımı sonucunda elde edildi.

Optimum koşullarda elde edilen yağ asidi metil esterlerin yapısı ATR-IR ve  $^1\text{H-NMR}$  ile karakterize edildi.



Şekil 6.1. Kanola yağının ATR-IR spektrumu

3006,92 cm <sup>-1</sup>	C=C-H gerilmesi
2936,21 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H gerilmesi
2847,82 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H gerilmesi
1737,09 cm <sup>-1</sup>	C=O gerilmesi (ester için)
1468,98 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem içi eğilmesi (CH <sub>2</sub> ve CH <sub>3</sub> için)
1377,64 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem içi eğilmesi (CH <sub>2</sub> ve CH <sub>3</sub> için)
1162,57 cm <sup>-1</sup>	C-O-C gerilmesi
726,52 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem dışı eğilmesi (CH <sub>2</sub> > 4 için)

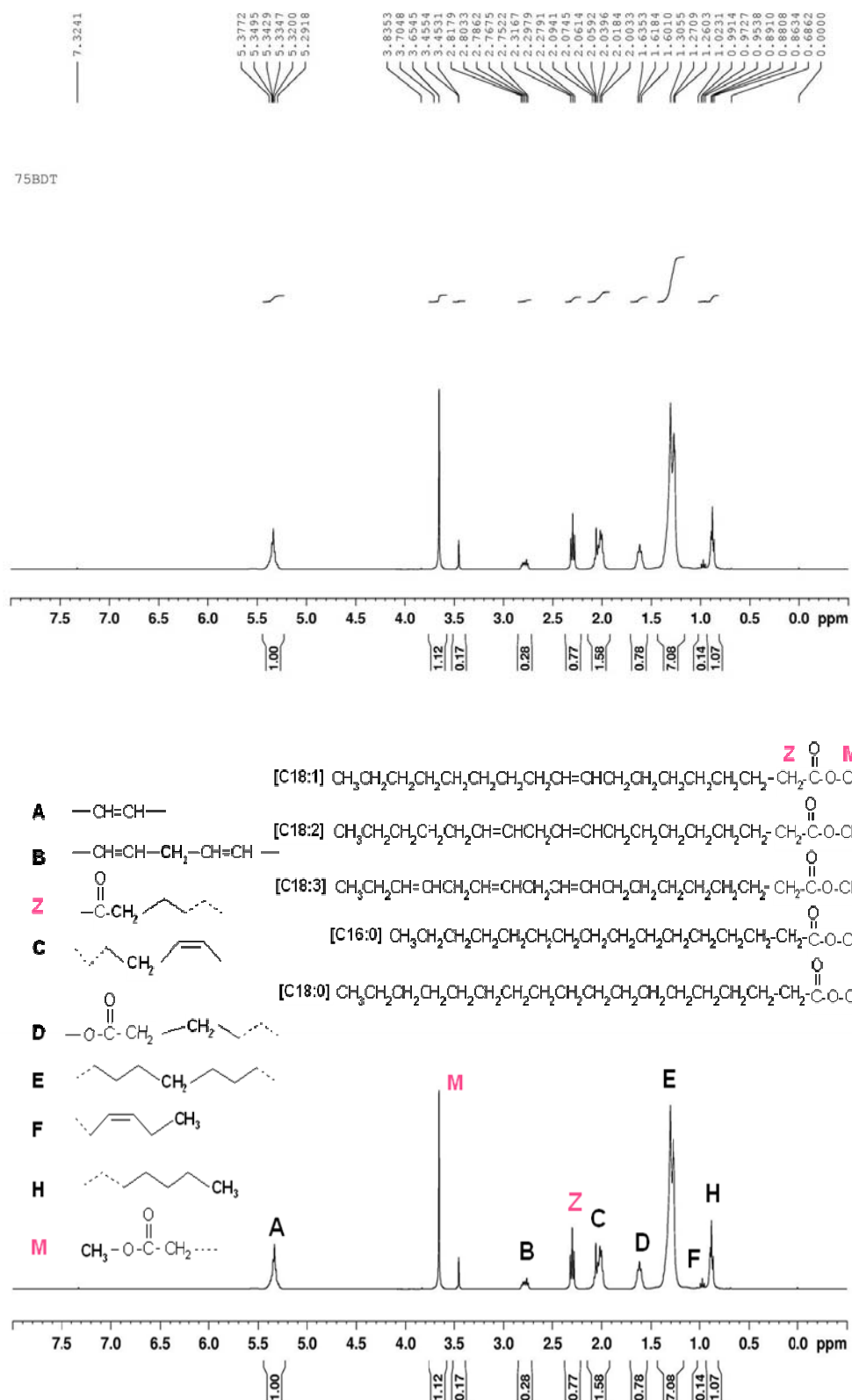


Şekil 6.2. Yağ asidi metil esterlerin ATR-IR spektrumu

3006,92 cm <sup>-1</sup>	C=C-H gerilmesi
2936,21 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H gerilmesi
2850,77 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H gerilmesi
1731,19 cm <sup>-1</sup>	C=O gerilmesi (ester için)
1471,92 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem içi eğilmesi (CH <sub>2</sub> ve CH <sub>3</sub> için)
1368,81 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem içi eğilmesi (CH <sub>2</sub> ve CH <sub>3</sub> için)
<b>1436,57 cm<sup>-1</sup></b>	<b>CH<sub>3</sub> asimetric eğilmesi (COO-CH<sub>3</sub> için)</b>
<b>1209,71 cm<sup>-1</sup></b>	<b>O-CH<sub>3</sub> gerilmesi</b>
1171,41 cm <sup>-1</sup>	C-O-C gerilmesi
720,63 cm <sup>-1</sup>	Alifatik C-H düzlem dışı eğilmesi (CH <sub>2</sub> > 4 için)

Yağ asidi metil esterinde, 1436,57 cm<sup>-1</sup>'de CH<sub>3</sub> asimetric eğilmesi (COO-CH<sub>3</sub> için) ve 1209,71 cm<sup>-1</sup>'de O-CH<sub>3</sub> gerilmesinin gözlenmesi yapıyı doğrulamaktadır.





Şekil 6.4. Yağ asidi metil esterlerin <sup>1</sup>H-NMR spektrumu



ATR-IR ve  $^1\text{H-NMR}$  spektrum sonuçlarından yağ asidi metil esterlerin içerisinde tepkimeye girmemiş metanol ve tepkime sonunda oluşan gliserinin olmadığı böylece saf olarak yağ asidi metil esterleri elde edilmiştir.

LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizörü ile elde edilen yağ asidi metil esterlerin verimi literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldı (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. LiNO<sub>3</sub>/CaO katalizörünün transesterleşme tepkimesindeki etkinliğinin karşılaştırılması

Yağ	Katalizör	Katalizör miktarı (%w)	Alkol: yağ oranı	Tepki me süresi	Sıcaklık (°C)	YAME Verim (%)	Literatür [No]
Soya	KNO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5	15:1	7 saat	60	87	[57]
Palmiye	KF/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	12:1	3 saat	65	90	[35]
Palmiye	KOH/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	15:1	2 saat	60	91	[50]
Jatropha	CaO	1,5	9:1	2,5 saat	70	93	[60]
Soya	KI/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	15:1	8 saat	65	96	[55]
<b>Kanola</b>	<b>CaO/LiNO<sub>3</sub></b>	<b>3</b>	<b>9:1</b>	<b>5 saat</b>	<b>60</b>	<b>97</b>	-
Kanola	KF/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	15:1	8 saat	65	97	[66]
Kanola	KF/Kalsiyum bentonit	3	6:1	7 saat	65	98	[67]

Çizelge 6.1'den de görüldüğü gibi, bu tez çalışmasında sentezlenen  $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$  katalizörü kullanılarak oldukça yüksek verimle yağ asidi metil esterleri elde edildi.

Bu çalışmanın devamında elde edilen yağ asidi metil esterlerin yakıt özellikleri incelenmeli, motorlu taşıtlarda kullanım durumları ve standartlara uygunluğu araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Hoydonckx, H., De Vos, D., Chavan S., Jacobs A., "Esterification and transesterification of renewable chemicals", **Topics in Catalysis**, 27: 83-96 (2004).
2. Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H., "Biodiesel fuel production by transesterification of oils", **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 92: 5, 405-416 (2001).
3. Wright, H., Segur, J., Clark, H., Coburn, S., Langdon, E., Dupuis, R., "A report on ester interchange", **Oil Soap**, 21: 145-148 (1944).
4. Xu, Y., Du, W., Liu, D., "Study on the kinetics of enzymatic interesterification of triglycerides for biodiesel production with methyl acetate as the acyl acceptor" **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, 32: 241-245 (2005).
5. Öztürk, H.H., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı", **Teknik Yayinevi**, Ankara, 20-21 (2008).
6. Karabulut, Y., "Türkiye Enerji Kaynakları", **A.Ü Basımevi**, Ankara, 115-116 (2000).
7. Varınca, K. B., Gönüllü M. T., "Türkiye'de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma", **I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi**, Eskişehir, 270 (2006).
8. Philibert, C., "The Present And Use of Solar Thermal Energy As A Primary Source of Energy", **Solar Thermal Energy Global Status Report**, IEA Yayını, Paris, 3-4 (2011).
9. Doğanay, H., Enerji Kaynakları, 2, Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi, Coğrafya Eğitimi Bölümü, **Şafak Yayinevi**, Erzurum, 587 (1991).
10. Eniş, A., "TMMOB makina mühendisleri odası enerji çalışma grubu", **Enerji Politikaları ile Yerli, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları**, 303 (2009).
11. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ([http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/dunyada\\_jeo.aspx](http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/dunyada_jeo.aspx)) (2012).
12. Canik, B., Çelik, M., Arıgün, Z., "Jeotermal Enerji", A.Ü.F.F. Döner sermaye işletmesi, **Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü**, 50-52 (Mayıs 2009).

13. İnternet: Dokuz Eylül Üniversitesi Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi (<http://web.deu.edu.tr/jenarum/index.php/dunyada-jeotermal>) (2010).
14. Şimşek, N., "Enerji Sorununun Çözümünde Jeotermal Enerji Alternatifi, Cilt:8", **Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi İktisat Bölümü**, Biga-İZMİR, 15-20 (1998).
15. Öztürk, H.H., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Kullanımı" ,**Teknik Yayınevi**, Ankara, 22-23 (2008).
16. Goncaloğlu, İ., Ertürk F., Erdal A., "Termik Santrallerle Nükleer Santrallerin Çevresel Etki Değerlendirmesi Açısından Karşılaştırılması", **Ekoloji Çevre Dergisi**. Sayı: 34, Ocak-Şubat-Mart (2000).
17. İnternet: <http://www.ruzgarenerjisi.gen.tr/ruzgar-enerjisi-ile-elektrik-uretimi/> (2012)
18. Hayli, S., "Rüzgâr Enerjisinin Önemi, Dünya'da Ve Türkiye'deki Durumu" **Fırat Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü**, 10-12 (2001).
19. Aktürk, Z., **Konuralp Tıp Dergisi**, 2(1): 41-45 (2010).
20. Akova, İ., "Yenilenebilir enerji kaynakları" , **Nobel Yayın**, Ankara, 1, 154-155 (2008).
21. Saraçoğlu, N., "Biyokütlenin enerji üretiminde değerlendirilmesi", **ZKÜ Bartın Orman Fakültesi Orman Amenajmanı**, 74100, Bartın, 505 (2002).
22. Acaroğlu, M., "Alternatif enerji kaynakları" , **Nobel Yayın**, Ankara, 2, 178, (2007).
23. Acaroğlu, M., "Alternatif enerji kaynakları " , **Nobel Yayın**, Ankara, 2, 154-155 (2007).
24. İnternet: "[http://www.emo.org.tr/ekler/c85deffa0b8b7a7\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/c85deffa0b8b7a7_ek.pdf)" (2009).
25. İnternet: "Tubitak-Mam.Enerji Sistemleri Çevre Araştırma Enstitüsü" [www.mam.gov.tr](http://www.mam.gov.tr) (2012).
26. Ar, F., "Sıvı Biyoyakıtlar: Dünyadaki Uygulamaları-Türkiye'deki Mevcut Durum, YEKS 2007, **Bildiriler Kitabı**", MMO Yayın No: E/2007/452, 83-92 (Kasım 2007 ).
27. Karaosmanoğlu, F., "Biyomotorin ve Türkiye", **Enerji**, 1, İstanbul, 35-38, (2001).

28. Cengiz, T., "Bazı nano boyutlu katalizörlerin sentezi, karakterizasyonu ve bu katalizör sisteminde transesterleşme tepkimesinin incelenmesi", **Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara,10-11 (2010).
29. Aras, M., "Bazı alkali (baz) katalizörlerinin hazırlanması,karakterizasyonu ve bu katalizörler varlığında yağlardan transesterleşme tepkimesi ile biyodizel üretimi", **Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara,13-14 (2011).
30. Özlem, F., "Transesterifikasyon ile kanola yağı metil esteri sentezi optimizasyonu", **Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara,27-28 (2006).
31. Nouredini, H., Gao, X., Philkana, R.S., "Immobilized Pseudomonas Cepacia Lipase For Biodiesel Fuel Production From Soybean Oil", **Biosource Technology**, 96: 769-777 (2005).
32. Kouzu, M., Kasuno, T., Tajika, M., Sugimoto, Y., Yamanaka, S., Hidaka, J., "Cacium oxide as a solid base catalyst for tranesterification of soybeanoil and its application to biodiesel production", **Fuel**, 87: 2798-2806 (2008).
33. Marchetti, J.M., Miguel, V.U., Errazu, A.F., "Possible methods for biodiesel production", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 11: 1300-1311 (2007).
34. Xie W., Huang X., Li H., "Soybean oil methyl esters preparation using NaX zeolites loaded with KOH as a heterogeneous catalyst", **Bioresource Technology**, 98: 936-939 (2007).
35. Bo, X., Guomin, X., Lingfeng, C., Ruiping, W., Lijing, G., "Transesterification of Palm Oil with Methanol to Biodiesel over a KF/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Heterogeneous Base Catalyst" **Energy and Fuels**, 21: 3109-3112 (2007).
36. Xie, W., Huang, X., "Synthesis of Biodiesel from Soybean Oil using Heterogeneous KF/ZnO Catalyst", **Catalysis Letters**, 107 (1-2), 53-59 (2006).
37. Feng, G., Xiu,Z., Liang, Z., "Synthesis of biodiesel from acidified soybean soapstock using a lignin-derived carbonaceous catalyst", **Applied Energy**, 98: 47-52 (2012).
38. Li, H., Xie, W., "Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel with Zn/I<sub>2</sub> Catalyst", **Catalysis Letters**, 107 (1-2), 25-30 (2006).

39. Wu, Q., Wan, H., Li, H., Song, H., Chu, T., “Bifunctional temperature-sensitive amphiphilic acidic ionic liquids for preparation of biodiesel”, **Catalysis Today**, 200, 74–79 (2013).
40. Guo, F., Xiu, Z., Liang, Z., “Synthesis of biodiesel from acidified soybean soapstock using a lignin-derived carbonaceous catalyst”, **Applied Energy**, 98: 47–52 (2012).
41. Kouame, S., Perez, J., Eser S., Benesi, A., “<sup>1</sup>H-NMR Monitoring of the transesterification process of Jatropha oil”, **Fuel Processing Technology**, 97: 60-64 (2012).
42. Evangelista, J., Chellappa, T., Coriolano, A., Fernandes, V., Souza, L., Araujo, A., “Synthesis of alumina impregnated with potassium iodide catalyst for biodiesel production from rice bran oil”, **Fuel Processing Technology**, 104: 90-95 (2012).
43. Leclercq, E., Finiels, A., Moreau, C., “Transesterification of rapeseed oil in the presence of basic zeolites and related solid catalysts”, **Journal of the American Oil Chemists' Society**, 1161-1165 (2006)..
44. Kawashima, A., Matsubara, K., Honda, K., “Acceleration of catalytic activity of calcium oxide for biodiesel production”, **Bioresource Technology**, 100: 696–700 (2009).
45. Wang, J., Chen, K., Wu, J., Wang, P., Huang, S., Chen, C., “Production of biodiesel through transesterification of soybean oil using lithiumorthosilicate solid catalyst”, **Fuel Processing Technology**, 104: 167–173 (2012).
46. Ebiura, T., Echizen, T., Ishikawa, A., Murai, K., Baba, T., “Selective transesterification of triolein with methanol to methyl oleate and glycerol using alumina loaded with alkali metal salt as a solid-base catalyst”, **Applied Catalysis A: General**, 283: 111–116 (2005).
47. Majewski, M., Pollack, S., Palmer, V., “Diphenylammonium salt catalysts for microwave assisted triglyceride transesterification of corn and soybean oil for biodiesel production”, **Tetrahedron Letters**, 50: 5175–5177 (2009).
48. Felizardo, P., Correia, M., Raposo, I., Mendes, J., Berkemeier, R., Bordado, J., “Production of Biodiesel from Waste Frying Oils”, **Waste Management**, 26(5): 487-494 (2006).
49. Hanh, H., Dong, N., Okitsu, K., Nishimura, R., Maeda, Y., “Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field”, **Renewable Energy**, 34: 766–768 (2009).

50. Noiroj, K., Intarapong, P., Luengnaruemitchai, A., Jai-In, S., "A Comparative study of KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil", **Renewable Energy**, 34: 1145–1150 (2009).
51. Trakarnpruk, W., Porntangjitlikit, S., "Palm oil biodiesel synthesized with potassium loaded calcined hydrotalcite and effect of biodiesel blend on elastomer properties", **Renewable Energy**, 33: 7, 1558-1563 (2008).
52. Georgogianni, K., Katsoulidis, A., Pomonis, P., Kontominas, M., "Transesterification of soybean frying oil to biodiesel using heterogeneous catalysts", **Fuel Processing Technology**, 90:5, 671-676 (2009).
53. Enciner, J., Gonzalez, J., Rodriguez, J., Tajedor, A., "Biodiesels fuel from vegetable oils: transesterification of Cynara cardunculus L. Oils with ethanol", **Energy and Fuels**, 16: 443-50 (2002).
54. Reddy, C., Oshel, R., Verkade, J., "Room-Temperature Conversion of Soybean Oil and Poultry Fat to Biodiesel Catalyzed by Nanocrystalline Calcium Oxides", **Energy and Fuels**, 20: 1310-1314 (2006).
55. Xie, W., Li, H., "Alumina-supported potassium iodide as a heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil", **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, 255: 1-9 (2006).
56. Leung, D., Koo, B., Guo, Y., "Degradation of biodiesel under different storage conditions", **Biosource Technology**, 97: 250-256 (2006).
57. Xie, W., Peng, H., Chen, L., "Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as a solid base catalyst", **Applied Catalysis A: General**, 300: 67-74 (2006).
58. Falco, M., Córdoba, C., Capeletti, M., Sedran, U., "Basic ion Exchange resins as heterogeneous catalysts for biodiesel synthesis", **Advanced Materials Research**, 132: 220-227 (2010).
59. Chakraborty, R., Bepari, S., Banerjee, A., "Transesterification of soybean oil catalyzed by fly ash and egg shell derived solid catalysts", **Chemical Engineering Journal**, 165: 798-805 (2010).
60. Zhu, H., Wu, Z., Chen, Y., Zhang, P., Duan, S., Liu, X., Mao, Z., "Preparation of biodiesel catalyzed by solid super base calcium oxide and its refining process", **Chinese Journal of Catalysis**, 27: 5, 391-396 (2006).
61. Tashtoush, G., Al-Widyah, M., Al-Jarrah, M., "Experimental Study on Evaluation and Optimisation of Conversion of Waste Animal Fats into Biodiesel", **Energy Conversion and Management**, 45: 2697-2711 (2004).

62. Yao, J., Ji, L., Sun, P., Zhang, L., Xu, N., “Low boiling point organic amine catalyzed transesterification of cottonseed oil to biodiesel with trace amount of KOH as co-catalyst”, **Fuel**, 89: 3871–3875 (2010).
63. Deng, X., Fang, Z., Liu, Y., “Ultrasonic transesterification of *Jatropha curcas* L. oil to biodiesel by a two-step process”, **Energy Conversion and Management**, 51: 2802–2807 (2010).
64. Murugan, C., Bajaj, H., “Synthesis of diethyl carbonate from dimethyl carbonate and ethanol using KF/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an efficient solid base catalyst”, **Fuel Processing Technology**, 92: 77–82 (2011).
65. Wan, Z., Hameed, B., “Transesterification of palm oil to methyl ester on activated carbon supported calcium oxide catalyst”, **Bioresource Technology**, 102: 2659–2664 (2011).
66. Boz, N., Değirmenbaşı, N., Kalyon, D.M., “Conversion of biomass to fuel: Transesterification of vegetable oil to biodiesel using KF loaded nano- $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as catalyst”, **Applied Catalysis B: Environmental**, 89: 590-596 (2009).
67. Boz, N., Değirmenbaşı, N., Kalyon, D.M., “Transesterification of canola oil to biodiesel using calcium bentonite functionalized with K compounds”, **Applied Catalysis B: Environmental**, 138: 139, 236-242 (2013).

**EKLER**

### EK-1. Transesterleşme Tepkimesi İçin Gerekli Hesaplamalar:

- %5'lik katalizör ( $\text{LiNO}_3/\text{CaO}$ ) hazırlamak için:
- $2.5 \text{ g LiNO}_3 \times 5/100 = 0,125 \text{ g LiNO}_3 + 2,375 \text{ g CaO}$
- %10, %15, %20, %25 ve %30'luk katalizörler hazırlanırken, %5'lik katalizör hazırlamadaki formül kullanıldı.

3:1 Alkol/yağ oranı aşağıdaki gibi hazırlandı.

Kanola yağının yoğunluğu: 0,8998 g/mL

Kanola yağının molekül ağırlığı: 806 g/mol

Metanolün yoğunluğu: 0,7914 g/mL

Metanolün molekül ağırlığı: 32,04 g/mol

Kullanılan kanola yağ miktarı: 12,5 g

$12,5/806 = 0,015,5 \text{ mol yağ}$

Alkol/yağ (3:1) oranı olması gerekiyor;

$0.015,5 \text{ mol} \times 3 = 0.048 \text{ mol alkol}$

$0.048 \text{ mol alkol} \times 32,04 \text{ g/mol} = 1,54 \text{ g alkol}$

$d=m/v \quad 0,7914= 1,54/V \quad V= 1,94 \text{ ml alkol (metil alkol)}$

12,5 g kanola yağı + 1,94 mL metil alkol + 0,375 g katalizör

EK-1. (Devam) Transesterleşme Tepkimesi İçin Gerekli Hesaplamalar:

9:1 Alkol/yağ oranı

12,5 g kanola yağı + 5,83 mL alkol + 0,375 g katalizör

12:1 Alkol/yağ oranı

12,5 g kanola yağı + 7,78 mL metil alkol + 0,375 g katalizör

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : BAĞCI, Fatih  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 24.05.1985 Ankara  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 505 635 43 40  
e-mail : erguvan855@hotmail.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üni. / Kimya Bölümü	-
Lisans	Erciyes Üni./ Kimya Bölümü	2009
Lise	Mustafa Kemal Anadolu Lisesi	2003

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007	Refik Saydam Hıfzıssıhha Merkezi Başkanlığı	Stajyer
2008	Oylum Bisküvi A.Ş.	Ar-Ge
2012	Tarım ve Kırsal Kalkınmayı Destekleme Kurumu Kastamonu İl Koordinatörlüğü (Y.K. Uzmanı)	

### Yabancı Dil

İngilizce