



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ENTEGRE ET VE SÜT ÜRÜNLERİ
TESİSLERİNDE ENERJİ VE MADDE GERİ
KAZANIMINDA BİYODİZEL ELDESİ

Cemre YILMAZ

DOKTORA TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Cemre YILMAZ tarafından hazırlanan “Entegre Et ve Süt Ürünleri Tesislerinde Enerji ve Madde Geri Kazanımında Biyodizel Eldesi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Bilgehan NAS
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN
(Selçuk Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Cemre YILMAZ

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ENTEĞRE ET VE SÜT ÜRÜNLERİ TESİSLERİNDE ENERJİ VE MADDE GERİ KAZANIMINDA BİYODİZEL ELDESİ

Cemre YILMAZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dilek ERDİRENÇELEBİ

2025, 147 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ

Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU

Prof. Dr. Bilgehan NAS

Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN

Fosil yakıtlara çevre dostu alternatif olarak biyodizel yakıtlar bitkisel ve hayvansal yağlardan farklı metotlar ile üretilmektedir. Bazı sektörlerde ortaya çıkan hayvansal atık yağlar biyodizel üretiminde kullanılarak geri kazanılabilmekte ve çevre dostu yakıt olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada entegre et ve süt ürünleri üretimi tesisinden oluşan atıksuda bulunan hayvansal atık yağın ayrıştırılması ve biyodizel üretimi araştırılmıştır. Ham yağ önce et ve süt atıksularının birleştiği noktaya yağ ayırma havuzu yapılarak atıksudan ayrıştırılmıştır. Alınan bu hammadde daha sonra yoğunluklarına göre ayırma tankında posa, posa+su ve yağ olarak ayrıştırılmıştır. Bu işlem sonucunda %63-77 aralığında kullanılabilir yağ elde edilmiştir. Bu yağ dekantör santrifüj aracılığıyla katı (%37-49) ve sıvı (%14-20) faza ayrılmıştır. Yapılan tüm çalışmalarda 2-propanol (80°C), etanol (75°C) ve metanol (60°C) alkol ve reaksiyon sıcaklıkları kullanılmıştır. Serbest yağ asidi (SYA) %3,4 olan sıvı yağ ile 20, 25, 30, 35 ve 40:1 alkol:yağ mol oranları, 2, 4 ve 6 sa reaksiyon süreleri ile transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. ASTM D6751'e göre tüm koşullarda; EN 14214'e göre 2-propanol (20:1-6 sa; 25:1-4/6 sa; 30:1-4/6 sa; 35-40:1-6 sa), etanol (30:1-6 sa; 35-40:1-6 sa) ve metanol (35-40:1-6 sa) koşullarında uygun sonuç elde edilmiştir. Elde edilen uygun koşullarda birim maliyetler metanol ile 0,97-1,00 \$/L, etanol ile 1,24-1,46 \$/L, 2-propanol ile 1,78-2,80 \$/L biyodizel aralığında elde edilmiştir. SYA %9,7 olan katı yağa doğrudan asit katalizli ve iki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Doğrudan katalizli işlemde H₂SO₄ (%5, 7, 9), 48 sa ile ASTM D6751'e göre tüm koşullarda; EN 14214'e göre her üç alkol için 30:1 mol oranında ve %7 ve 9 H₂SO₄ ile uygun sonuç elde edilmiştir. Elde edilen uygun koşullarda birim maliyetler metanol ile 0,95-1,01 \$/L, etanol ile 1,50-1,51 \$/L, 2-propanol ile 2,56-2,58 \$/L biyodizel aralığında elde edilmiştir. İki basamaklı esterifikasyon ve transesterifikasyon işleminde 1. aşama; 2-propanol (6 sa, %3-4 H₂SO₄; 9:1-12:1), etanol (5 sa, %2-3 H₂SO₄; 9:1-12:1), metanol (4 sa, %1-1,75 H₂SO₄; 6:1), 2. aşamada hepsinde metanol 6:1,%0,5 KOH, 2 sa ile EN 14214 ve ASTM D6751'e uygun sonuç elde edilmiştir. Elde edilen uygun koşullarda birim maliyetler metanol ile 0,38-0,40 \$/L, etanol ile 0,52-0,55 \$/L, 2-propanol ile 0,76-0,82 \$/L biyodizel aralığında elde edilmiştir. Tüm uygun koşullar içinde birim maliyetler metanol kullanılan sistemlerde 0,38-1,01 \$/L, etanol 0,52-1,51 \$/L ve 2-propanol 0,76-2,80 \$/L biyodizel ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkol, biyodizel, esterifikasyon, hayvansal atık yağ, transesterifikasyon

ABSTRACT

PhD THESIS

BIODIESEL PRODUCTION IN ENERGY AND MATERIAL RECOVERY IN INTEGRATED MEAT AND DAIRY FACILITIES

Cemre YILMAZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Environmental Engineering**

Advisor: Prof. Dilek ERDİRENÇELEBİ

2025, 147 Pages

Jury

Prof. Dr. Dilek ERDİRENÇELEBİ

Prof. Dr. Mustafa ACAROĞLU

Prof. Dr. Bilgehan NAS

Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN

Biodiesel can be an environmentally friendly alternative to fossil fuels and can be produced from animal waste oils. In this study animal waste oil was recovered from the wastewater of an integrated meat and dairy facility by installing an oil-separation pool at the wastewater mixing point of meat and dairy effluents followed by density-based separation into sludge, sludge+water and oil. This procedure yielded 63-77% usable oil which was further split by a decanter centrifuge into solid (37-49%) and liquid (14-20%) phases. For biodiesel production, 2-propanol (80°C), ethanol (75°C) and methanol (60°C) were used. Transesterification of the liquid oil (FFA 3.4%) was conducted at alcohol:oil molar ratios of 20:1, 25:1, 30:1, 35:1, and 40:1 with reaction times of 2, 4, and 6 h. According to ASTM D6751 acceptable results were obtained under all conditions; according to EN 14214 compliance was achieved for 2-propanol (20:1-6 h; 25:1-4/6 h; 30:1-4/6 h; 35-40:1-6 h), ethanol (30:1-6 h; 35-40:1-6 h) and methanol (35-40:1-6 h). Under compliant conditions unit costs were 0.97-1.00 \$/L (methanol), 1.24-1.46 \$/L (ethanol) and 1.78-2.80 \$/L biodiesel (2-propanol). For the solid oil (FFA 9.7%) direct acid-catalyzed and two-step esterification / transesterification routes were applied. In the direct acid-catalyzed process H₂SO₄ (5%, 7%, 9%) and 48 h were used; complied with ASTM D6751 under all conditions while EN 14214 compliance was obtained at 30:1 molar ratio with 7% and 9% H₂SO₄ for all three alcohols. Corresponding unit costs were 0.95-1.01 \$/L (methanol), 1.50-1.51 \$/L (ethanol) and 2.56-2.58 \$/L biodiesel (2-propanol). In the two-step process, the first stage conditions were 2-propanol (6 h, 3-4% H₂SO₄; 9:1-12:1), ethanol (5 h, 2-3% H₂SO₄; 9:1-12:1) and methanol (4 h, 1-1.75% H₂SO₄; 6:1); in the second stage methanol (6:1), 0.5% KOH and 2 h were applied for all cases producing biodiesel compliant with both EN 14214 and ASTM D6751. Unit costs under these compliant conditions were 0.38-0.40 \$/L (methanol), 0.52-0.55 \$/L (ethanol) and 0.76-0.82 \$/L biodiesel (2-propanol). Overall across all compliant conditions, unit costs ranged from 0.38-1.01 \$/L for methanol-based systems, 0.52-1.51 \$/L for ethanol and 0.76-2.80 \$/L biodiesel for 2-propanol.

Keywords: Alcohol, biodiesel, esterification, transesterification, waste animal fat

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Ulaşım Araçlarının Yakıt Kullanımı ve Emisyon Faktörleri.....	3
2.2. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	6
2.2.1. Biyokütle.....	7
2.2.2. Biyodizel.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	52
3.1. Entegre Et ve Süt Ürünleri Üretimi Tesisi.....	52
3.2. Materyal.....	53
3.3. Yöntem.....	54
3.3.1. Yoğunluk farkıyla ayırma.....	56
3.3.2. Dekantör santrifüj	58
3.3.3. Çöktürmeli filtrasyon.....	59
3.3.4. Biyodizel üretimi	60
3.4. Analiz.....	63
3.5. Maliyet Analizi	70
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
4.1. Ham Atık Yağdan Sıvı ve Katı Yağ Üretimi.....	71
4.2. Sıvı Yağ Numunesinden Biyodizel Üretimi	78
4.2.1. 2-Propanol ile biyodizel üretimi	79
4.2.2. Etanol ile biyodizel üretimi.....	80
4.2.3. Metanol ile biyodizel üretimi.....	81
4.2.4. Değerlendirme	82
4.3. Katı Yağ Numunesinden Biyodizel Üretimi.....	89
4.3.1. 2-Propanol ile biyodizel üretimi	90
4.3.2. Etanol ile biyodizel üretimi.....	92
4.3.3. Metanol ile biyodizel üretimi.....	94
4.3.4. Değerlendirme	96
4.4. Yatırım ve Sistem Tasarım	102
4.5. Biyodizel Üretim Maliyet Hesabı	104
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	114

5.1. Sonuçlar	114
5.2. neriler	118
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŐ	136



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% : Yüzde

Ag₂SO₄ : Gümüş sülfat

AlCl₃ : Alüminyum klorür

°C : Santigrat derece

C-C atomları : Karbon–karbon atomları/bağları

CaO : Kalsiyum oksit

CH₄ : Metan

CO : Karbon monoksit

CO₂ : Karbon dioksit

CO₂ eşdeğeri : Emisyonların karbondioksit cinsinden eşdeğer değeri

e⁻ : Elektron

(Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O) : Demir (II) amonyum sülfat heksahidrat

H : Hidrojen

HC : Hidrokarbon(lar)

HCl : Hidroklorik asit

HgSO₄ : Cıva(II) sülfat

H⁺ : Hidrojen iyonu (proton)

H₂ : Hidrojen gazı

H₂O : Su

H₂S : Hidrojen sülfür

H₂SO₄ : Sülfürik asit

H₃PO₄ : Fosforik asit

K : Kelvin (sıcaklık birimi)

KOH : Potasyum hidroksit

K₂Cr₂O₇ : Potasyum dikromat

M : Molarite (mol/L)

Mg : Magnezyum

MgO-KOH-20 : MgO üzerine emdirilmiş yaklaşık %20 KOH içeren reaktif

ml : Mililitre

MPa : Megapascal

Mtep: Milyon ton eşdeğer petrol

NaOH : Sodyum hidroksit

NO : Azot monoksit

NO_x : Azot oksitleri

N₂ : Azot gazı

O₂ : Oksijen

pH : Çözelti asitlik/bazlık derecesi

SO₂ : Kükürtdioksit

SO₃ : Kükürttrioksit

T90 sıcaklığı : Yakıtın hacimce %90'ının damıtıldığı sıcaklık

TJ : Terajule

w/w : Ağırlıkça/ağırlıkça oran

Kısaltmalar

20E-2: Etanol:yağ 20:1, 2 sa
20E-4: Etanol:yağ 20:1, 4 sa
20E-6: Etanol:yağ 20:1, 6 sa
20M-2: Metanol:yağ 20:1, 2 sa
20M-4: Metanol:yağ 20:1, 4 sa
20M-6: Metanol:yağ 20:1, 6 sa
20P-2: 2-propanol:yağ 20:1, 2 sa
20P-4: 2-propanol:yağ 20:1, 4 sa
20P-6: 2-propanol:yağ 20:1, 6 sa
25E-2: Etanol:yağ 25:1, 2 sa
25E-4: Etanol:yağ 25:1, 4 sa
25E-6: Etanol:yağ 25:1, 6 sa
25M-2: Metanol:yağ 25:1, 2 sa
25M-4: Metanol:yağ 25:1, 4 sa
25M-6: Metanol:yağ 25:1, 6 sa
25P-2: 2-propanol:yağ 25:1, 2 sa
25P-4: 2-propanol:yağ 25:1, 4 sa
25P-6: 2-propanol:yağ 25:1, 6 sa
30E-2: Etanol:yağ 30:1, 2 sa
30E-4: Etanol:yağ 30:1, 4 sa
30E-6: Etanol:yağ 30:1, 6 sa
30M-2: Metanol:yağ 30:1, 2 sa
30M-4: Metanol:yağ 30:1, 4 sa
30M-6: Metanol:yağ 30:1, 6 sa
30P-2: 2-propanol:yağ 30:1, 2 sa
30P-4: 2-propanol:yağ 30:1, 4 sa
30P-6: 2-propanol:yağ 30:1, 6 sa
35E-6: Etanol:yağ 35:1, 6 sa
35M-6: Metanol:yağ 35:1, 6 sa
35P-6: 2-propanol:yağ 35:1, 6 sa
40E-6: Etanol:yağ 40:1, 6 sa
40M-6: Metanol:yağ 40:1, 6 sa
40P-6: 2-propanol:yağ 40:1, 6 sa
AR6: IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu
ASTM: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (American Society for Testing and Materials)
B100: Hacimce %100 biyodizel içeren yakıt
B20: Hacimce %20 biyodizel, %80 dizel içeren yakıt
B40: Hacimce %40 biyodizel, %60 dizel içeren yakıt
B6-B20: Hacimce %6-%20 biyodizel içeren dizel yakıt karışımları
B80: Hacimce %80 biyodizel, %20 dizel içeren yakıt
BOİ: Biyolojik oksijen ihtiyacı
CIP: Yerinde temizlik sistemi (Clean In Place)
CN: Setan sayısı
CSN: Çek Cumhuriyeti Ulusal Standardı
D-E₁ (%5,7,9): Etanol:yağ 20:1, %5 H₂SO₄, 75°C, 48 sa
D-E₂ (%5,7,9): Etanol:yağ 25:1, %5 H₂SO₄, 75°C, 48 sa
D-E₃ (%5,7,9): Etanol:yağ 30:1, %5 H₂SO₄, 75°C, 48 sa

D-M₁ (%5,7,9): Metanol:yağ 20:1, %5 H₂SO₄, 60°C, 48 sa
D-M₂ (%5,7,9): Metanol:yağ 25:1, %5 H₂SO₄, 60°C, 48 sa
D-M₃ (%5,7,9): Metanol:yağ 30:1, %5 H₂SO₄, 60°C, 48 sa
D-P₁ (%5,7,9): 2-propanol:yağ 20:1, %5 H₂SO₄, 80°C, 48 sa
D-P₂ (%5,7,9): 2-propanol:yağ 25:1, %5 H₂SO₄, 80°C, 48 sa
D-P₃ (%5,7,9): 2-propanol:yağ 30:1, %5 H₂SO₄, 80°C, 48 sa
DWC: Bölmeli distilasyon kolonu (Dividing-Wall Column)
E₁: 1. aşama: Etanol:yağ 9:1, %3 H₂SO₄, 5 sa, 75°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
E₂: 1. aşama: Etanol:yağ 12:1, %2 H₂SO₄, 5 sa, 75°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
EN 14214: Avrupa Biyodizel Standardı
GC-FID: Gaz Kromatografisi – Alev İyonizasyon Dedektörü
GC-MS: Gaz Kromatografisi – Kütle Spektrometresi
IPCC: Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
KOİ: Kimyasal oksijen ihtiyacı
LPG: Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquefied Petroleum Gas)
M₁: 1. aşama: Metanol:yağ 6:1, %1 H₂SO₄, 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
M₂: 1. aşama: Metanol:yağ 6:1, %1,5 H₂SO₄, 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
M₃: 1. aşama: Metanol:yağ 6:1, %1,75 H₂SO₄, 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
MA: Molekül ağırlığı
ON: Avusturya Ulusal Standardı (ÖNORM)
P₁: 1. aşama: 2-propanol:yağ 9:1, %4 H₂SO₄, 6 sa, 80°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
P₂: 1. aşama: 2-propanol:yağ 12:1, %3 H₂SO₄, 6 sa, 80°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C
PM: Partikül madde
RT-2560 kolon: GC analizlerinde kullanılan RT-2560 tipi kapiler kolon
SFTN: Soğuk filtre tıkanma noktası
SPAN 83: Span 83 ticari adıyla bilinen noniyonik yüzey aktif madde
SWOT: Güçlü yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler analizi (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats)
SYA: Serbest Yağ Asidi
TAG: Triasilgliserol
TAKM: Toplam askıda katı madde
TS EN 590: Dizel yakıt standardı
TS EN ISO: Türk Standardı - Avrupa Standardı - Uluslararası Standardizasyon Örgütü Standardı
TÜİK: Türkiye İstatistik Kurumu
UAKM: Uçucu askıda katı madde
YABE: Yağ asidi bütül esteri
YAME: Yağ asidi metil esteri
YAPE: Yağ asidi propil esteri

1. GİRİŞ

Enerji kaynakları sosyal ve ekonomik ilerlemeler için oldukça önemlidir. Enerji talebi Sanayi Devrimi'nden bu yana artarak günümüze kadar gelmiş olup hala devam etmektedir (Yılmaz, 2012). Dünyadaki enerji tüketiminin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Çoğu alanda tüketilen ve ülke ekonomilerine etkisi olan fosil yakıtlar, ilerleyen yıllarda dezavantajlarından dolayı mevcut ilgisini kaybedeceği ön görülmektedir (Bond, 2020). Günlük hayatta fosil yakıtlar enerji ihtiyacı için çok fazla kullanılmaktadır. Fosil yakıtların ucuz olması ve üretim aşamasında gelişen teknolojilerden dolayı son iki yüzyılda kullanımı yaygınlaşmış ve devamındaki süreçte ek olarak petrol ve doğalgaz tüketiminde artmaya başlamıştır. Fakat 1973 yılında meydana gelen Petrol Krizi nedeniyle fosil kaynaklı enerjiye güven azalmış ve çoğu ülke alternatif enerji kaynakları arayışına girmiştir. Fosil kaynaklı enerjinin neden olduğu çevre kirliliği ise bu arayışa hız kazandırmıştır (Yılmaz, 2012). Petrol rezervleri giderek azalmaktadır (Üçgül ve Akgül, 2010). British Petroleum 'un verilerine göre fosil kaynaklı yakıtların tükenme süresi; petrol-50 yıl, kömür-134 yıl ve doğal gaz-53 yıl olarak belirtilmiştir (Petroleum, 2019). Fosil kaynakların kullanımıyla oluşan hava kirliliği ile iklim değişikliğine neden olan en önemli etkenlerden biridir. Bu sebeplerden dolayı fosil kaynakların yerine karbonmonoksit (CO) salınımını daha az yapan ve çevre kirleticiliği az olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelinmektedir (Üçgül ve Akgül, 2010).

Fosil yakıtlar yanma sonucunda karbon dioksit (CO₂), azot monoksit (NO), kükürt dioksit (SO₂) vb. emisyonlar oluşturmaktadır. CO₂ miktarının artması ile sera gazı etkisi meydana gelerek dünya ortalama sıcaklığının artmasına ve iklim değişikliğine neden olmaktadır (Kumbur ve diğ., 2005). Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan sera gazları dünyanın ortalama sıcaklığını 1,2°C arttırmıştır. Önlem alınmazsa 21. yy. sonunda 2°C-6°C aralığına yükseleceği tahmin edilmektedir (Lowry, 2017).

Enerji ihtiyaçlarını fosil kaynaklardan karşılayan ve fosil yakıt kaynakları yetersiz olan ülkeler enerji ithalatı yapmak zorundadırlar. Enerji ithalatı yapmak zorunda olan ülkelerde enerji arz güvenliği sıkıntısı oluşmaktadır (Ursavaş ve Yıldırım, 2017).

Enerji sektöründeki denge, enerji arzı ve talebin karşılaştırılmasıyla belirlenmektedir. Enerji arzında üretim, ithalat, ihracat, rezervler ve stok değişimleri önemli değişkenlerdir. Aynı zamanda ekonomik büyüme, nüfus, teknolojik ilerlemeler, enerji fiyatları ve politikalar enerji talebinde etkili faktörlerdir (Bayraç, 2009).

Yenilenebilir enerji kaynakları insanoğlunun geleceği için büyük öneme sahiptir. Fosil kaynakların kullanımının atmosfere vermiş olduğu CO₂ birikmesi küresel ısınmaya yol açmakta, sıcaklık artışına neden olarak iklim değişikliğine ve buzulların erimesine neden olmaktadır. Bu ısı artışını önlemenin en önemli koşulu CO₂ birikimine neden olan fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kullanılmasıdır (Keleş ve Hamamcı, 2002).

Doğada bulunan organik maddelerden oluşan biyokütle işlenerek sıvı, katı ve gaz yakıtlara dönüştürülebilir. Bu işlem sonucunda biyo-etanol, biyo-gaz ve biyo-motorin gibi ana ürünlerin yanı sıra gübre ve hidrojen (H₂) gibi yan ürünler de elde edilebilmektedir (Şen, 2012).

- Doğrudan yakma
- Çevrim aşamaları
- Biyokimyasal çevrim aşamaları: Fermantasyon, anaerobik sindirim, biyofotoliz
- Termal çevrim aşamaları: Gazlaştırma, piroliz
- Agrokimyasal çevrim aşamaları: Transesterifikasyon
- Fiziksel aşamalar

Biyokütle, enerji kaynağı potansiyeli olan ve sosyoekonomik faydaları fazla olan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır (Tilki ve Çiçek, 2003).

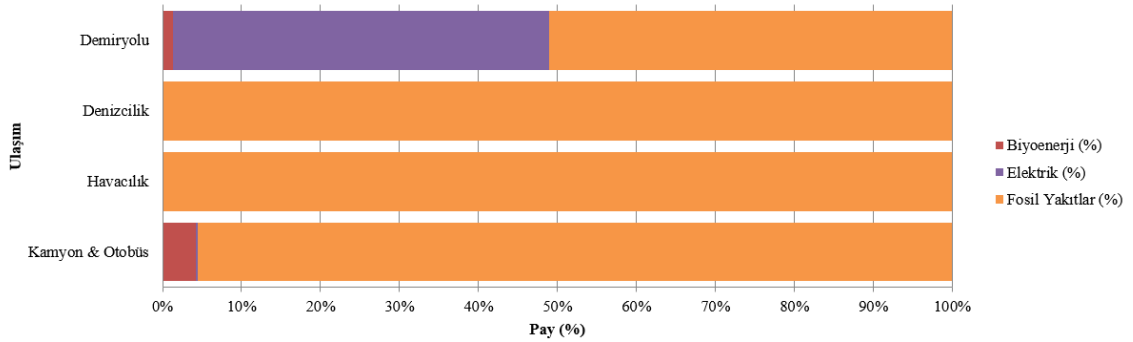
Gıda insanlığın temel ihtiyaçlarındandır. Gıda ürünleri içerisinde yer alan et ve süt ürünlerinin ise önemli bir yeri bulunmaktadır. Et ve süt ürünleri üretilirken oluşan ve gıda olarak kullanılmayan hayvansal yağların değerlendirilmesi hem ekonomi hemde çevresel fayda için önemlidir. Bu nedenle tez kapsamında entegre et ve süt ürünleri üretiminde oluşan hayvansal atık yağlardan biyodizel eldesi üzerine çalışılmıştır. Tez konusunun farklı ve özgün olan yönü literatürde çeşitli hayvansal atık yağlardan biyodizel çalışmaları yapılmış olsa da entegre et ve süt ürünleri üretiminden oluşan hayvansal atık yağ için bir çalışma bulunmamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde araçların yakıt kullanımı ve etkileri, yenilebilir enerji kaynakları, biyodizel ve biyodizelin temel kaynak ve kalite içeriği, hayvancılık sektörü ve hayvansal atık yağlar, hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi ile ilgili literatür çalışmaları bulunmaktadır.

2.1. Ulaşım Araçlarının Yakıt Kullanımı ve Emisyon Faktörleri

Ulaşım sektörü küresel sera gazı emisyonlarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Hub, 2025). Şekil 2.1’de verilen ulaşımaya göre yakıt kullanımında enerji tüketiminin en çok fosil yakıtlardan, en az biyoenerjiden karşılandığı görülmektedir. Elektrik kullanımı yoğunluklu olarak demiryolunda görülmekte olup kamyon ve otobüslerde biyoenerji tüketimi olsada enerji tüketiminin yoğunlukla fosil yakıtlardan karşılandığı, havacılık ve denizcilikte de tamamına yakınının fosil yakıtlardan sağlandığı görülmektedir.



Şekil 2. 1. Ulaşımaya Göre Yakıt Kullanımı (Hub, 2025)

TÜİK verilerine göre 2023 yılında Türkiye’de taşımacılıkta nihai enerji tüketimi Çizelge 2.1, ulaşım araçlarına göre yakıt dağılımı Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2. 1. 2023 yılında taşımacılık nihai enerji tüketimi (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025)

Taşımacılık türü	Enerji tüketimi (TJ)
Kara yolu	1.069.246
Hava yolu	263.683
Yurt içi deniz yolu	11.186
Demir yolu	9.905

Çizelge 2. 2. Taşıma türleri ve nihai yakıt tüketimleri (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025)

Taşıma türü / Yakıt türü	Alt kategori	Yıl	Birim	Değer
Kara yolu / Yakıt	Motorin	2023	Pay (%)	69,4
	LPG			15,8
	Benzin			14,6
	Diğer (CNG, LNG)			0,3
Hava yolu / Jet yakıtı	Uluslararası	2022	TJ	190139,5
		2023		219069
	Yurt içi	2022		37255,7
		2023		44498,7
Deniz yolu (yurt içi) / Motorin	Yolcu	2022	TJ	5966,6
		2023		5948,5
	Yük	2022		4753,8
		2023		4655,6
Demir yolu / Elektrik+Motorin	Konvansiyonel yük trenleri	2022	TJ	969,5
		2023		837,7
	Konvansiyonel yolcu trenleri	2022		198,2
		2023		180
	Yüksek hızlı trenler	2022		324,1
		2023		388,7
	Banliyö (kent içi)	2022		554,6
		2023		571,9
	Tramvay-metro	2022		2860,9
		2023		3076,8

2023 yılında Türkiye’de ulaştırma sektöründe en fazla nihai enerji tüketimi kara yolunda 1 milyon 69 bin 246 TJ olarak gerçekleşmiştir. %69,4’ü motorin, %15,8’i LPG, %14,6’sı benzin ve %0,3’ü diğer yakıtlardan oluşmaktadır. Kullanılan enerjinin %46,0’ını otomobiller, %23,4’ünü kamyonlar, %19,3’ünü kamyonetler, %6,1’ini otobüslerin tükettiği belirtilmiştir. Hava yolu taşımacılığında nihai enerji tüketimi 263 bin 683 TJ ve %83,1’i uluslararası, %16,9’u yurt içi uçuşlardan kaynaklandı ve jet yakıtı tüketimi 2022 yılına göre %15,9 arttığı belirtilmiştir. Yurt içi deniz yolu taşımacılığında nihai enerji tüketiminin 11 bin 186 TJ olduğu, %53,3’ü yolcu, %46,7’si yük taşımacılığı ve motorin tüketimi yıllık bazda %1,1 azaldığı belirtilmiştir. Demir yolu taşımacılığında ise enerji tüketimi 9 bin 905 TJ olup %51’i elektrik, %49’u motorinden kaynaklanmıştır. Motorin kullanımı %7,4 azalmış, elektrik tüketimi %3 artmış, yüksek hızlı trenlerde elektrik tüketimi %20, tramvay ve metrolarda %7,5 yükselmiştir. 2023 yılında Türkiye’de ulaştırma sektöründe enerji tüketimi en çok kara yolunda olup demir yolu en düşük tüketime sahiptir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2025).

Standartların sıkılaştırılması, teknolojinin geliştirilmesi, bakım ve kontrollerin artırılması, araç ile yakıt talebinin azaltılması, yakıt kalitesinin iyileştirilmesi gibi uygulamalar ile kirletici emisyon parametrelerin azalma tahmini Çizelge 2.3'te verilmiştir (Solmaz ve Çelikten, 2012; Zhang ve diğ., 2008). Çizelge 2.3'te CO, NO_x, PM ve HC için azalma tahmini olmasına rağmen CO₂'de olmamıştır. Bunun temel nedeni ise CO₂'in bir yanma ürünü olmasıdır.

Çizelge 2. 3. 2004-2023 kirletici faktörleri tahminleri (kg/ton) (Solmaz ve Çelikten, 2012; Zhang ve diğ., 2008)

Araç Sınıfı	Yakıt	Kirletici (kg/ton)														
		CO			NO _x			PM			CO ₂			HC		
		2004	2030	Δ%	2004	2030	Δ%	2004	2030	Δ%	2004	2030	Δ%	2004	2030	Δ%
Otomobil	Benzin	202,81	133,054	-34.4%	15,135	2,216	-85.4%	0,143	0,062	-56.6%	2996,82	3138,121	4.7%	12,86	2,94	-77.1%
	Dizel	15,84	8,849	-44.1%	11,24	5,895	-47.6%	0,57	0,247	-56.7%	2852,84	2872,046	0.7%	3,36	1	-70.2%
Otobüs	Benzin	382,175	168,635	-55.9%	24,797	7,229	-70.8%	0,293	0,867	195.9%	2675,202	3058,283	14.3%	25,243	10,445	-58.6%
	Dizel	27,476	11,686	-57.5%	57,744	15,77	-72.7%	1,348	0,351	-74.0%	2804,069	2855,639	1.8%	7,755	4,534	-41.5%
Hafif Ticari	Benzin	233,256	120,675	-48.3%	19,608	2,162	-89.0%	0,122	0,076	-37.7%	2926,58	2728,756	-6.8%	19,878	2,702	-86.4%
	Dizel	17,767	9,511	-46.5%	12,593	6,383	-49.3%	0,732	0,245	-66.5%	2841,22	2870,86	1.0%	6,058	0,825	-86.4%
Ağır Ticari	Benzin	347,472	131,108	-62.3%	22,878	7,635	-66.6%	0,318	0,091	-71.4%	2724,851	3120,702	14.5%	26,797	9,81	-63.4%
	Dizel	38,604	12,127	-68.6%	58,627	18,023	-69.3%	1,441	0,36	-75.0%	2802,813	2854,651	1.8%	7,93	4,604	-41.9%

Dizele kıyasla %100 biyodizelin (B100) toplam sera gazının (CO₂ eşdeğeri) %74 daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Division, 2008). Türkiye Biyodizel Sanayi Derneği verilerine göre biyodizel yaşam döngüsü boyunca dizelin neden olduğu emisyonların %76,4'üne kadar azaltım sağlayabilmektedir (Biyodizel Sanayi Derneği, 2019) .

IPCC AR6 raporuna göre biyoyakıtlar, kısa ve orta vadede (2050'ye kadar) özellikle elektrikli araç dönüşümünün yavaş kalabileceği alanlarda önemli bir emisyon azaltım seçeneği sunmaktadır. Biyodizel çoğu zaman mevcut araç altyapısıyla kullanılabilirdi için otobüsler ve demiryolu için emisyon azaltımına yüksek verim sağlayabilir ve uzun mesafe kamyonlar ve trenler ile deniz taşımacılığı ve havacılıkta da kullanılabilirler (Newman ve diğ., 2022). Dizel yakıt ulaşım sektöründe en yaygın kullanılan yakıt olduğu için bunun biyoyakıt ile değiştirilmesi sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir (Tan ve diğ., 2019).

2.2.Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji doğanın sürekli yenilenen döngüsü ile elde edilmektedir. Bu enerji türü güneş ışığı, rüzgâr, yağmur, okyanus gelgitleri, biyokütle ve jeotermal ısı gibi kaynaklardan sağlanmaktadır. Sıcak su temini, ulaşım yakıtları, elektrik üretimi ile geleneksel yakıtlara alternatif olmaktadır (Mohtasham, 2015). Fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Yaygın olarak kullanılan enerji kaynakları; hidrolik enerji, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisidir (Yılmaz, 2012).

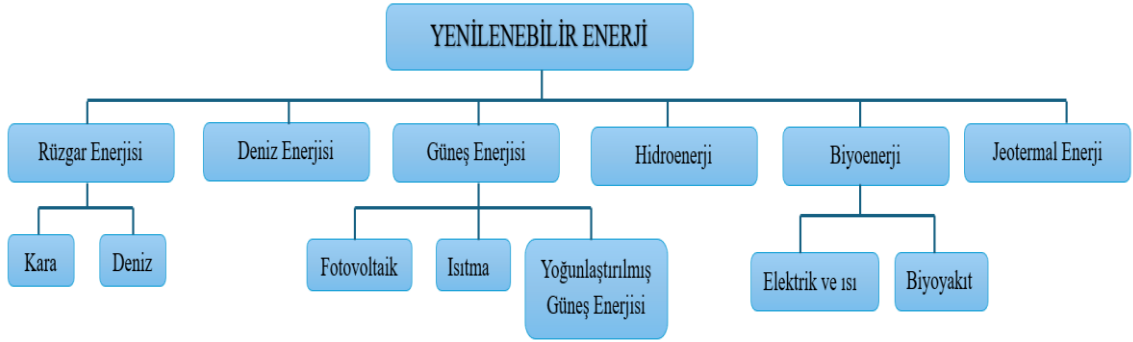
Enerjinin herhangi bir dönüşüm geçirmemiş hali birincil enerji olarak adlandırılmaktadır. Kömür, petrol, nükleer enerji, doğal gaz, biyokütle, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve dalga/gelgit enerjisi birincil enerji kaynakları içerisinde yer alır. Birincil enerji kaynakları dönüştürülerek ikincil enerji kaynakları elde edilir. İkincil enerji kaynakları arasında dizel, benzin, kok kömürü, elektrik, motorin, işlenmiş kömür, petrokok, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ve hava gazı gibi örnekler bulunmaktadır (Erdem ve Kadir, 2015).

Dünya birincil enerji kaynaklarının yıllara göre yakıt dağılımı ton eşdeğer petrol (Mtep) ve % olarak Çizelge 2.4’te verilmiştir (Yılmaz, 2012).

Çizelge 2. 4. Dünya birincil enerji kaynaklarının yıllara göre yakıt dağılımı (Yılmaz, 2012)

	1980		1990		2000		2011		2035	
Kaynak	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%
Petrol	3.107	43	3.230	37	3.649	36,4	4.130	31,5	5.053	27
Kömür	1.788	24,8	2.331	25	2.295	22,9	3.776	28,8	5.523	30
Doğal gaz	1.235	17	1.668	19	2.088	20,8	2.793	21,3	4.380	23
Nükleer	186	2,6	526	6	675	6,7	669	5,1	1.019	5
Hidrolik	148	2,1	184	2	225	2,3	301	2,3	460	2
Biyokütle	748	10,4	903	10	1.045	10,4	1.313	10	1.741	9
Diğer yenilenebilir	12	0,1	36	0,4	55	0,5	131	1	501	3
Toplam	7.224	100	8.779	100	10.034	100	13.113	100	18.676	100

Temel yenilenebilir enerji kaynaklarına ait sınıflandırma Şekil 2.2’de verilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğu toplam potansiyel, dünya genelindeki enerji ihtiyacının yaklaşık 3.078 katını karşılayabilecek düzeydedir (Luther ve diğ., 2015). Yenilenebilir enerji ve kullanım alanları Çizelge 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2. 2. Yenilenebilir enerji kaynakları ve kategorileri (Ellabban ve diğ., 2014)

Çizelge 2. 5. Yenilenebilir enerji ve uygulama alanları (Panwar ve diğ., 2011)

Enerji kaynağı	Enerji dönüşümü ve kullanım şekli
Güneş	Fotovoltaik piller, su ısıtıcılar, termal güç sistemleri, güneş kurutucular ve ocaklar
Biyokütle	Piroliz, ısı ve elektrik üretimi, çürütme, gazlaşma
Jeotermal	Enerji üretimi, kentsel ısıtma
Rüzgâr	Güç üretimi, yel değirmenleri, rüzgâr jeneratörleri, su pompaları
Gel-git	Gel-git barajı ve akımı oluşturma
Dalga	Elektrik üretimi, salınımlı dalga kolonu, nokta soğutucular, daralan kanal ve pendular
Hidrogüç	Güç üretimi

2.2.1. Biyokütle

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle, karbonhidrat bileşikleri içeren bitkisel ve hayvansal kaynaklardan üretilen enerji kaynağıdır. Biyokütle enerji kaynaklarından biyoetanol, biyodizel ve biyogaz gibi yakıtlar üretilmektedir (Erdem ve Kadir, 2015).

Biyokütle; doğada yaygın bulunan tarımsal ürünler ve artıklarından fiziksel, kimyasal ya da biyolojik yöntemlerle üretilen, ticari değeri ve temel özellikleri standartlaştırılmış katı, sıvı ve gaz hâlindeki bitkisel kökenli enerji taşıyıcılarını ifade eder. Daha genel olarak biyokütle, fosil kökenli olmayan, başlıca karbonhidrat yapısındaki bitkisel ve hayvansal organik madde stokudur. Yaklaşık yüz yıldan daha kısa sürede yenilenebilen karasal ve sucul bitkiler, hayvansal atıklar, gıda ve orman endüstrisi

artıklarının yanı sıra kentsel organik atıklar biyokütle kaynakları arasında yer alır (Acaroğlu, 2008).

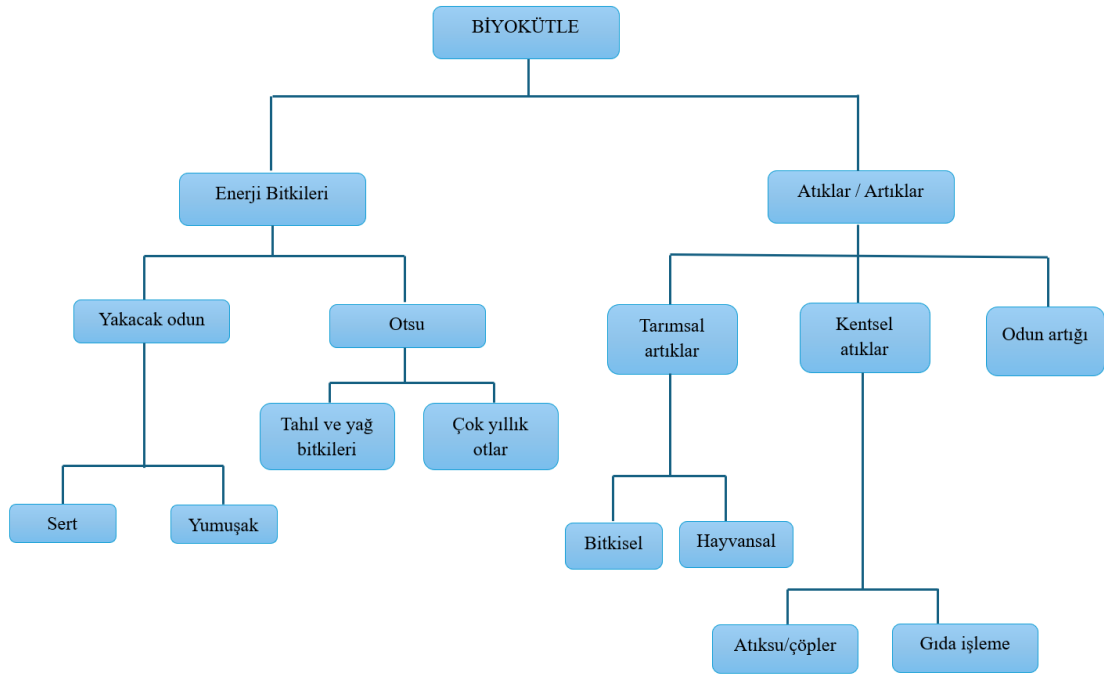
Biyokütle tükenme tehlikesinin olmaması ile ülkelerin tek bir enerji kaynağına bağımlılıktan kurtulmasını sağlamasıyla dikkat çekmektedir. Biyoyakıtların temel faydaları Çizelge 2.6'da verilmiştir. Biyokütle yakıtları katı, gaz veya sıvı olabilir. Biyokütlelerden biyokimya veya termokimya yöntemleriyle elde edilen çeşitli biyoyakıtlar şunlardır:

- Biyoetanol,
- Biyometanol,
- Biyodimetileter,
- Biyoyağ,
- Biyodizeldir (Koç, 2011).

Çizelge 2. 6. Biyoyakıtların başlıca faydaları (Thanh ve diğ., 2012)

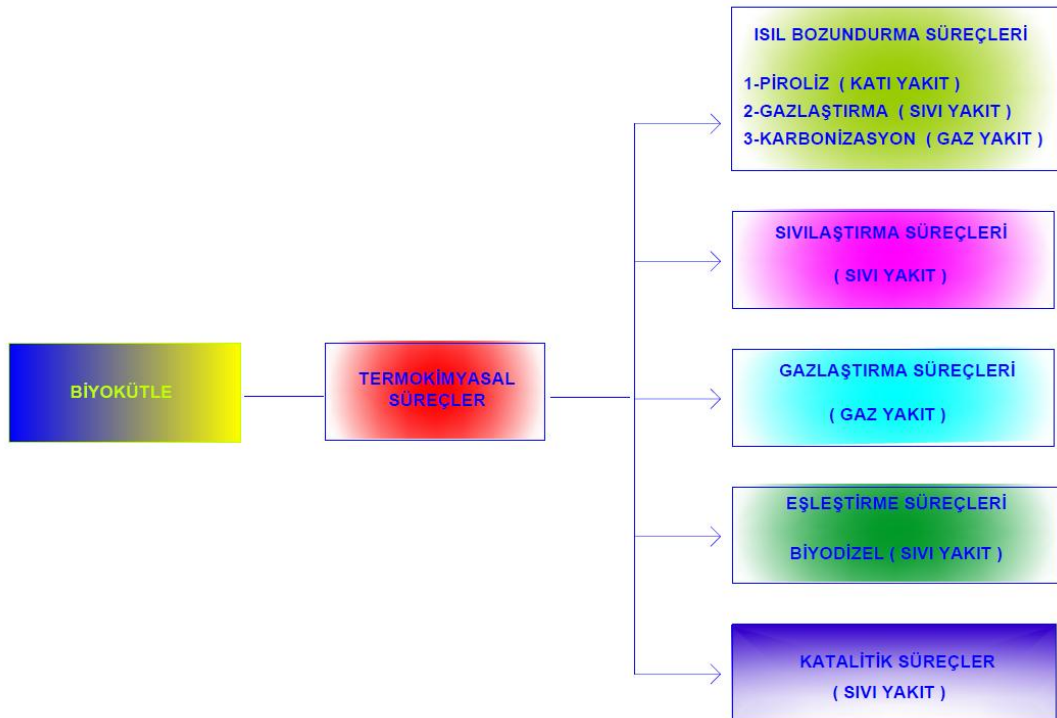
Fayda	Açıklama
Enerji güvenliği	Yenilenebilir olması
	Yakıt çeşitliliğinin olması
	Tedarik güvenliği
	Yurtiçi dağıtımı
	Fosil yakıtların kullanımının azaltılması
Çevresel etkiler	İthal petrole bağımlılığın azaltılması
	Karbon nötr
	Hava kirliliğinin azaltılmasını desteklemesi
	Kolay biyolojik parçalanabilirliği olması
	Sera gazlarının azaltılması
Ekonomik etkiler	Daha yüksek yanma verimliliği
	Kırsal üretimin sayısında artışa destek olması
	Tarımsal gelişme sağlaması
	Sürdürülebilir olması
	Çiftçi gelirinin artmasını desteklemesi

Biyokütle enerjisi üretim süreçlerinin yönetilebilmesi için hammaddelerle ilgili bilgi sahibi olunmalıdır. Hammaddelerin detaylı sınıflandırılması Şekil 2.3'te verilmiştir.

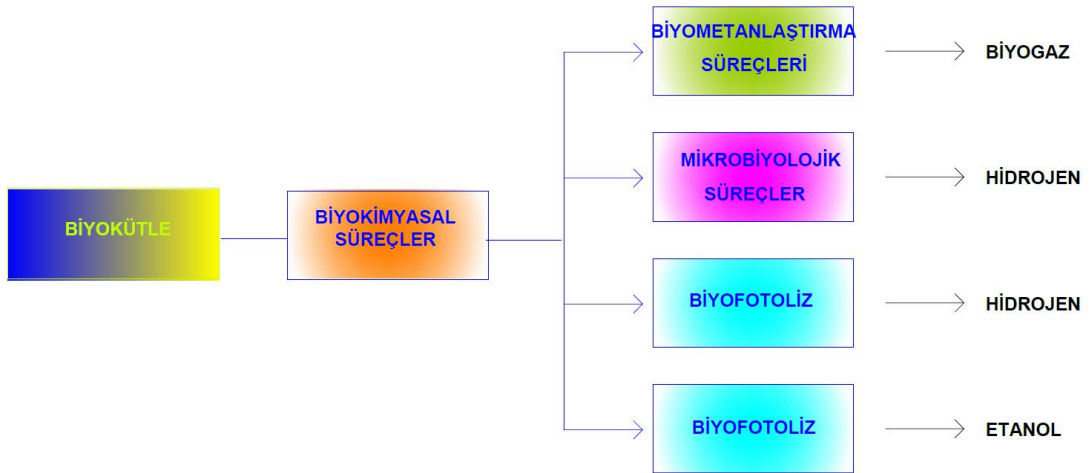


Şekil 2. 3. Hammaddelerin sınıflandırılması (Gent ve diğ., 2017)

Biyokütlenin kullanılabilirliği fiziksel ve dönüşüm süreçleriyle desteklenebilir. Fiziksel süreçler arasında kırma, öğütme, briketleme, filtrasyon, kurutma ve ekstraksiyon yer alır. Biyokütleye fiziksel işlemler uygulanması yakıt kalitesini artırır. Biyokütleden biyokimyasal (Şekil 2.4) ve termokimyasal dönüşüm süreçleri (Şekil 2.5).



Şekil 2. 4. Biyokimyasal dönüşüm aşamaları (Basu ve Kaushal, 2023)



Şekil 2. 5. Termokimyasal dönüşüm aşamaları (Basu ve Kaushal, 2023)

Dönüşüm süreçleriyle yüksek ısı değerlere sahip ve mevcut yakıtlara alternatif özellikleri olan birçok biyoyakıt üretilebilir (Ölçüm, 2006).

Biyometanlaşma, organik maddelerin anaerobik ortamda mikrobiyal reaksiyonlar ile metan (CH_4) ve CO_2 'e dönüştüğü süreçtir (Adekunle ve Okolie, 2015). Bu süreçte kompleks organik maddeler önce hidroliz ile ara ürünlere sonra asidojeniz ve asetojeniz ile uçucu yağ asitleri ve asetata dönüştürülür (Adekunle ve Okolie, 2015). Biyogazı yaklaşık %50-70 CH_4 , %30-50 CO_2 , iz miktarda hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer gazlar oluşturmaktadır (Horváth ve diğ., 2016). Biyohidrojen, organik maddelerin mikrobiyal reaksiyonlar ile hidrojen gazına (H_2) dönüştürüldüğü süreçtir (Anye ve diğ., 2024). Başlıca biyohidrojen üretim yöntemleri; biyofotoliz, fotofermantasyon ve karanlık fermentasyondur (Akhlaghi ve Najafpour-Darzi, 2020; Anye ve diğ., 2024). Biyofotoliz, fotosentetik mikroalg ve siyanobakteriler tarafından suyun elektron (e^-), proton (H^+) ve oksijene (O_2) ayrılması sonucu e^- ve H^+ iyonunun enzimlerle H_2 'nin üretildiği fotobiyolojik sistemdir (Eroglu ve Melis, 2011).

Termokimyasal dönüşümler piroliz, gazlaştırma, karbonizasyon gibi yüksek sıcaklık ve/veya basınç altında uygulanan yöntemlerdir (Basu ve Kaushal, 2023). Piroliz prosesi, biyokütlenin O_2 'siz ortamda yaklaşık 400-600°C aralığında ısıtılarak katı, sıvı ve gaz ürünlere ayrıldığı işlemdir (Bridgwater, 2011). Gazlaştırma prosesi, biyokütlenin sınırlı miktarda O_2 ile yaklaşık 700-1000°C aralığında ısıtılarak gaz ürünlere ayrıldığı işlemdir (Basu ve Kaushal, 2023).

2.2.2. Biyodizel

Motorun içten yanmalı sistemi petrol kaynağına dayalıdır. Sonlu kaynak olan petrolün sınırlı bir rezervi olmasından dolayı alternatif yakıtların araştırılması gerekmektedir (Haşimoğlu ve diğ., 2008).

Alternatif yakıt türünün rezerv durumu, yakıtı elde etmenin ekonomik ve fiziksel/kimyasal özelliklerinin dizel motora uygun olması gerekmektedir. Ayrıca yanma reaksiyonunda ortaya çıkan emisyonların çevre ve insan sağlığı için etkileri kullanılacak yakıtın seçiminde önemlidir (Alptekin ve Çanakçı, 2011).

Araştırmacılar motorlu taşıtlarda alternatif yakıt amaçlı alkol, doğalgaz, H₂, bitkisel ve hayvansal yağlar, sıvılaştırılmış petrol gazı kullanılabileceğini belirtmektedir. Birim fiyatlarının düşük olması, motorun performansında önemli bir azalma ve değişiklikler gerektirmemesi sunulan alternatif yakıtların tercih edilmesini destekler (Karaosmanoğlu, 2002).

Alternatif yakıtlardan biri olan biyodizel, dizel motor yapısında herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmektedir. Bu yakıtın dizele göre daha çevre dostu olduğu belirtilmekte olup içeriğinde (w/w) %10-15 oranında O₂ bulunmaktadır. Biyolojik olarak parçalanabilen, toksik maddeler içermeyen biyodizel petrol kökenli dizel yakıt ile yanma reaksiyonlarında benzer davranırlar. Bu nedenle biyodizel dizel ile karıştırılarak veya sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda direkt olarak kullanılabilmektedir (Emiroğlu ve diğ., 2018). Biyodizel zehirsizdir ve biyolojik olarak bozunabilmektedir. Dizele göre daha az kirletici egzoz gazı çıkardığı için emisyon profili daha iyidir. Daha iyi yanma özelliği sayesinde yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır (Lang ve diğ., 2001).

Biyodizelin avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Biyodizelin performans ve stabil çalışması dizel yakıt ile benzerdir (Aydın, 2007).
- Biyodizelin setan sayısı daha yüksek olduğu için dizel yakıtı oranla motorda daha düşük vurunlu meydana gelmektedir (Ejder, 2007).
- Çözünürlük özelliğinden dolayı motorda oluşabilen birikintileri temizleyebilmektedir (Ejder, 2007).
- Biyodizel, dizel yakıtı göre daha iyi yağlayıcılığa sahiptir (Çengelci, 2011).

- Biyodizelin parlama noktası dizel yakıta göre yüksek olduğu için depolama ve taşınması dizel yakıta göre daha güvenlidir (M. Kaya, 2010).
- Dizel yakıt ile karışım yapılarak motorda değişiklik yapılmadan kullanılabilir (Öğüt ve Oğuz, 2006).
- Antitoksiktir, içeriğinde kükürt ve kanserojenik madde bulunmamaktadır (Balci, 2009).
- Biyodizel toksik değildir ve biyolojik ayrışabilirliği kolay olduğu için dizel yakıta göre daha güvenlidir (Dağ, 2013)
- Üretimi ekonomik olup evsel ve endüstriyel alanlarda atık yağlardan elde edilebilmektedir. Bu nedenle atık miktarının azaltılmasına katkı sağlar (Yaşar, 2016).
- Ülkemizde ki petrol kullanımının dışa bağımlılığı göz önüne alındığında, yerli üretim yakıt ülkemiz nezdinde faydalı olacağı düşünülmektedir (Utku, 2009).

Biyodizelin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Dizel yakıtın ısı değerine yakın/biraz düşük olduğu için yanma sonucunda performans azalmasına neden olabilmektedir (Nişancı, 2007).
- Isı değerinin dizel yakıta göre yakın/düşük olduğundan dolayı yakıt tüketimi ağırlık sırasında %5-%6, hacim sırasında %10-%12 artmaktadır (Yaşar, 2016).
- Bulutlanma noktasının ve akma özelliklerinin yüksek olması nedeniyle soğuk iklimlerde dizel yakıta göre hızlı etkilenmektedir. Bu nedenle soğuk iklimler biyodizelin kullanımını kısıtlayan bir etkidir (M. Kaya, 2010). Soğuk havalarda donması, viskozitesinin yüksek olması, düşük ısı enerjisiye sahip olması ve uzun süreli depolanması durumunda jelleşebilmesi özellikleri nedeniyle yakıt enjektörlerinin ve filtrelerin tıkanmasına yol açmaktadır (Utku, 2009).
- Biyodizel yüksek miktarda doymamış yağdan elde edildiğinde dizel yakıta oranla hızlı bir şekilde oksitlenmeye neden olmaktadır (Şen, 2012).

Sığır, koyun iç yağı, domuz yağı, tavuk yağı ve balık yağı gibi hayvansal kaynaklı yağlardan biyodizel üretilmektedir. Farklı hayvansal yağların doymuş yağ asitleri açısından içeriği farklılık göstermektedir (Thamsiriroj ve Murphy, 2010). Doymuş yağ asidi koyun iç yağında %61,1, sığır yağında %45,6, domuz yağında %39,3, tavuk yağında %32 ve balık yağında %53,5'e kadar içerebileceği belirtilmiştir (Al Azad ve diğ., 2019);

Nur ve diğ., 2024; Thamsiroj ve Murphy, 2010). Hayvansal atık yağ biyodizel üretimi için iyi bir hammadde olmasına rağmen %20-25'i gliserindir ve bu da onları yapışkan ve kalın hale getirmektedir. Hayvansal atık yağları inceltmek ve vizkozitelerini azaltmak için transesterifikasyon işlemi uygulanmaktadır (Tashtoush ve diğ., 2004).

Dog̃an ve Temur, (2013) sığır iç yağı ile yaptıkları çalışmada 6:1 metanol:yağ oranı, (w/w) %0,75 KOH, 60°C, 60 dk koşullarında transesterifikasyon işlemi uygulamışlardır. Elde edilen biyodizele 18,9-16,3°C aralığında winterizasyon uygulanmıştır. Uygulama sonrası doymuş yağ asidi metil esteri (YAME) %86,91'den %73,38'e düşmüş, YAME oranı %12'den %19,9'a yükselmiştir. Bulutlanma noktası 21°C'den 17,4°C'ye, akma noktası 10,8°C'den 3,5°C'ye, yoğunluk 899 kg/m³'ten 861 kg/m³'e, viskozite ise 5,5 mm²/s'den 5,32 mm²/s'ye düşmüş ve biyodizelin soğuk akış özellikleri iyileştirilmiştir.

Punsuvon ve diğ., (2015b) asit değeri 78,8 mg KOH/g olan hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada 1,10 (v/w) metanol:yağ oranı, (w/w) %2,40 H₂SO₄, 60°C, 1 sa esterifikasyon ile asit değeri 2 mg KOH/g'nin altına düşürülmüştür. İkinci basamakta 6:1 metanol:yağ mol oranı, 60°C, 1,5 sa, (w/w) %1 KOH koşullarında yapılan transesterifikasyon sonucunda %86,10 metil ester verimi elde etmişler ve yoğunluk, viskozite, parlama noktası, ester içeriği ve diğer yakıt özelliklerinin ASTM D6751 ve EN 14214 biyodizel standartlarını karşıladığını belirtmişlerdir.

Takase ve Essandoh (2021) yaptıkları çalışmada yüksek serbest yağ asidi (SYA) içeren domuz yağına esterifikasyon ve transesterifikasyon işlemi uygulamışlardır. Esterifikasyon basamağında 8:1 metanol/yağ mol oranı, (w/w) %0,6-0,8 HCl, 60-65°C, 2-4 sa reaksiyon süresi ile yağların SYA değerleri; A: %10,7'den 0,35'e, B: %4,9'dan 0,84'e, C: %13,5'dan %1,5'a düşürülmüştür. Transesterifikasyonda basamağında 6:1 metanol/yağ mol oranı, %0,5-0,6 KOH, 60-65°C, 0,5-2 sa ile %97-100 kütleli verimle biyodizel elde etmişlerdir. Üretilen biyodizelin 40°C'de viskozitesi 4,3-5,1 mm²/s, yoğunluğu 865-873 kg/m³, asit değeri 0,2-0,45 mgKOH/g, parlama noktası 147-172°C olup EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarıyla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Ancak soğuk akış özellikleri ve oksidatif stabilite açısından saf halde kullanım için dizel veya diğer biyodizellerle karışım olarak kullanılması önerilmiştir.

Tashtoush ve diğ. (2004), yaptıkları çalışmada hayvansal atık yağa hem etanol hem metanol ile asit katalizli transesterifikasyon işlemi yapmışlardır. İki alkol içinde 100 gr yağ, 10 gr 2.25 M H₂SO₄, 50-90°C, 2-3 sa, alkol:yağ mol oranı ise stokiometrik değerin %100, %150 ve %200 fazlası uygulanmıştır. Etanol ile yapılan deneylerde %100

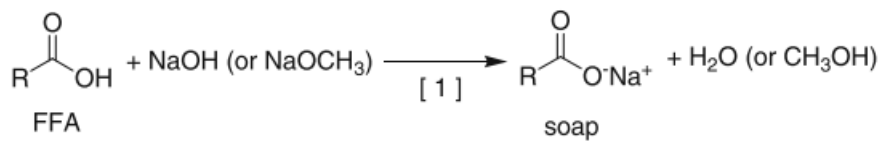
etanol fazlalığında verim %78, %150 fazlalıkta %82 ve %200 fazlalıkta %74 bulunmuştur. Viskozite ve enerji maliyeti ile birlikte değerlendirdiklerinde en uygun koşulu %100 etanol fazlalığı, 50°C, 2 sa belirlemişlerdir. Metanol ile aynı koşullarda elde edilen verim etanole yakın çıkmış ancak viskozitesinin daha yüksek ve gliserin ayrımının daha zayıf olduğu için etanol, metanole göre daha avantajlı bir alkol olarak değerlendirilmiştir.

Aydın ve diğ. (2023), at yağından biyodizel eldesi için yaptıkları çalışmada 5,5:1 alkol:yağ mol oranı, 600 ml at yağı, 150 ml metanol, 2,7 gr NaOH, 55°C, 1 sa transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra 12 sa bekletmişler ve gliserini ayırdıktan sonra biyodizeli saf su ile yıkamışlardır.

Mutreja ve diğ. (2011) koyun yağı ile yaptıkları çalışmada 22:1 metanol:yağ mol oranı, (w/w) %4 MgO-KOH-20, 65°C, 20 dk reaksiyon ile >%98 verim elde etmişlerdir.

Yüksek SYA içeriğine sahip yağ kullanıldığında direkt bazik transesterifikasyon ile biyodizel elde etmek mümkün değildir. Önce asit katalizör ile SYAların esterleştirilmesi gerekmektedir (Kusdiana ve Saka, 2004).

SYA değeri %3'ten yüksek olan yağlarda homojon baz katalizörler etkili olmamaktadır. Çünkü katalizörün SYA ile reaksiyona girmesi sonucu sabun ve su (Şekil 2.6) oluşmaktadır. Bu durum ise katalizörü etkisiz hale getirir ve istenmeyen karışım oluşur. Bu karışım reaksiyona girmemiş triasilgliseroller, diasilgliseroller, monoasilgliseroller, gliserol, sabun, su, biyodizel ve alkol içermektedir (Loterio ve diğ., 2005).



Şekil 2. 6. Sabun oluşumu (Loterio ve diğ., 2005)

Yağın SYA değeri $\geq$ %3 ise baz katalizli transesterifikasyon gerçekleşmez yada reaksiyon yavaşlar. Bu nedenle SYA içeriği yüksek olan yağlarda alternatif yöntemler veya ön işlem basamakları gerekmektedir (Çanakçı ve Van Gerpen, 2001).

SYA değeri yüksek olan yağlar esterlere dönüştürülürken ilk basamakta asit katalizörü ikinci basamakta ise baz katalizörü ile transesterifikasyon işlemi uygulanmalıdır (Çanakçı ve Van Gerpen, 2001).

Encinar ve Sa (2021) SYA %10,7 olan hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada ilk basamakta 6:1 metanol:yağ oranı, (w/w) %0,5 H₂SO₄, 65°C, 120 dk ile asit değeri 2,11 mg KOH/g'a düşürmüşlerdir. İkinci basamakta 6:1 alkol:yağ mol oranı, (w/w) %0,5 KOH, 65°C, 120 dk ile %97,2 verim elde etmişlerdir.

Idowu ve diğ. (2019) %9,4 SYA içeren hayvansal yağın baz katalizli transesterifikasyonu için ön esterifikasyon çalışması yapmışlardır. 6:1 metanol:yağ mol oranı, (w/w) %2 H₂SO₄, 73°C'de 70 W mikrodalga destekli esterifikasyon ile SYA değerini %1'e düşürmüşlerdir.

Dias ve diğ. (2009) asit değeri 14 mg KOH/g olan domuz yağını 6:1 metanol:yağ mol oranı, (w/w) %2 H₂SO₄, 45°C, 55°C ve 65°C'de çalışmışlardır. 65°C, 5 sa sonucunda asit değeri 10 mg KOH/g'a düşmüştür. Daha sonra H₂SO₄ oranı %2'den %3'e yükseltilmiş, 65°C, 3 sa sonunda asit değeri 3 mg KOH/g'a düşmüştür. Ardından 6:1 alkol:yağ mol oranı, (w/w) %1 NaOH, 3sa ile transesterifikasyon işlemi sonucunda verim %46, viskozite 4,72 mm²/s ve ester içeriği %92 elde edilmiştir.

Awad ve diğ., (2013) asit değeri 60 mg KOH/g olan hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada ilk basamakta (w/w) %5,4 H₂SO₄, %50 metanol, 60°C, 5 salık işlemle %95 verim elde etmişler ve asit değerini 1,3 mg KOH/g'a düşürmüşlerdir. İkinci basamakta (w/w) %1,8 H₂SO₄, %10 metanol, 1 sa ile asitlik 0.3 mg KOH/g'a düşürülmüş ve toplam verim %98'e yükselmiştir. Elde edilen biyodizelin yoğunluğu 870 g/L, viskozitesi 4.7-5.7 mm²/s ve YAME içeriği %91-93 olarak belirtilmiştir.

Bhatti ve diğ. (2008) atık koyun yağı ve tavuk yağı ile çalışma yapmışlardır. Asit katalizde H₂SO₄, baz katalizde KOH kullanılmış; asidik deneylerde yağın kütlesinin %25-100'ü oranında H₂SO₄, yağ miktarının 30 katı metanol ve 30-60°C aralığı denenmiştir. Optimum koşullar tavuk yağı için 30:1 alkol:yağ mol oranı, 50°C, 1,25 gr H₂SO₄; koyun yağı için 60°C, 30:1 ve 2,5 g H₂SO₄ olarak bulunmuştur. Bu koşullarda 24 sate verimler sırasıyla %99,01±0,71 ve %93,21±0,71'dir. 60°C'nin üzerinde H₂SO₄ kullanımı yağı yakıp verimi düşürdüğü için önerilmemiştir. Baz katalizde en yüksek verim tavuk %88,14; koyun %78,33 olup üretilen biyodizellerin özellikleri uluslararası standartlarla uyumlu bulunmuştur.

Çanakçı ve Van Gerpen (1999) asit katalizörle biyodizel üretiminde alkol:yağ mol oranı, sıcaklık, katalizör miktarı, reaksiyon süresi, su ve SYA miktarının etkilerini incelemiştir. 48 sa, 6:1 alkol:yağ mol oranı, (w/w) %3 H₂SO₄ koşullarında 25°C, 45°C ve 60°C'de sırasıyla %8,3; %57,2; %87,8 verim elde etmişler ve sıcaklık arttıkça yoğunluğun azaldığını belirtmişlerdir. Aynı sürede ve (w/w) %3 H₂SO₄, 60°C, mol

oranları 3,3:1-30:1 arasında denenmiş, 30:1'de verim %98,4'e çıkmıştır. Katalizör miktarı %1, %3 ve %5 seçildiğinde (48 sa, 60°C, 6:1) verim %72,7'den %95'e yükselmiştir. Sürenin 48'den 96 sae uzatılması (6:1, %3 H₂SO₄, 60°C) dönüşümü %87,8'den %95,1'e yükseltmiş ve asit katalizde yüksek verim için uzun sürelerin gerekli olduğu belirtilmiştir. Alkol türü denemelerinde (etanol, izopropil alkol, bütanol, metanol), %3 H₂SO₄, 6:1, 48 sa ve kaynama noktalarına uygun sıcaklıklarda (etanol/izopropil 75°C; metanol 60°C; bütanol 110°C) en yüksek dönüşüm etanolle %95,8 bulunmuştur (izopropil %92,9; bütanol %92,1; metanol %87,8). Su etkisi 96 sa, %3 H₂SO₄, 60°C ve 6:1'de incelenmiş ve su miktarı arttıkça dönüşümün düştüğü, %5 su ilavesinde yalnızca %5,6'ya indiği belirtilmiştir.

Ön esterifikasyon adımı katalizör olarak organik veya mineral asitler gibi asitler kullanılabilir. Mineral asitler arasında sülfürik asit (H₂SO₄), fosforik asit (H₃PO₄) ve hidroklorik asit (HCl) en yaygın olanlarıdır. Hidroklorik asit genelde %35 oranında çözelti halinde olduğu için reaksiyon ortamında büyük miktarda su olmasına ve bu durumda reaksiyona olumsuz etki etmesine neden olmaktadır (Van Gerpen, 2005).

Genel olarak asit katalizörlü reaksiyonlar yavaş gerçekleşir ve yüksek miktarda alkol ve katalizör gerektirir (Encinar ve diğ., 2011).

İşler ve diğ. (2010) ham deri yağı için optimum reaksiyon koşullarının 6:1 alkol:yağ mol oranı, 50°C, (w/w) %0.75 KOH, 5 dk reaksiyon süresinden oluştuğunu bildirmişlerdir.

da Cunha ve diğ. (2009) asit sayısı 1,2-1,8 mg KOH/g arasında değişen sığır yağı ile çalışma yapmışlardır. Daha önce eritmiş oldukları 800 kg sığır yağın 65°C reaktöre aktarmışlardır. (w/w) %1,5 KOH, 6:1 alkol:yağ mol oranı ile %96.4 verim elde etmişlerdir.

Erdoğan ve diğ. (2020), sığır kemik iliğinden 7:1 metanol: yağ mol oranı, (w/w) %1,25 NaOH, 65°C, 3 sa boyunca transesterifikasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Biyodizel verimi %95 olarak ölçülmüştür.

Altun ve Cengiz (2008) hayvansal iç yağlar ile yaptıkları çalışmada, 400 g iç yağı (0,46512 mol) 60°C'de eritilmiş, ardından 2 g NaOH, 89,4 g metil alkol (2,7907 mol), 60°C, 3 sa uygulamışlardır. Alkol buharlaşmasını önlemek için geri soğutucu kullanılmış ve 15°C şebeke suyu ile soğutma sağlanmıştır. Reaksiyon sonrası karışım 12 sa oda sıcaklığında bekletilmiş, gliserin fazı ayrıldıktan sonra ester fazı 60 C'deki saf su ile iki kez yıkanmıştır. Son aşamada ester filtreden geçirilip oda sıcaklığında kurutulmuştur.

Deney sonucunda hayvansal iç yağlardan %96 ester dönüşüm verimi ile biyodizel elde edilmiştir.

Cunha Jr ve diğ., (2013) hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada, sıcaklık parametreleri olarak 30°C, 50°C ve 70°C, katalizör miktarlarını %0,44, %0,88 ve %1,32 olacak şekilde ayarlamışlardır. Metanol:yağ oranları ise 6:1, 7:1 ve 8:1 olarak belirlenmiştir. 50°C ve 70°C’de yürütülen deneylerde verim %96,2 seviyesine ulaşmış olsa da biyodizelin gliserinden ayrılması sırasında çeşitli zorluklar yaşanmıştır. Çalışmada en yüksek kalite ve verimin (%83,5), 7:1 metanol:yağ oranında, %0,96 KOH ile 2000 dev/dak, 0,5 sa, 30°C koşulunda sağlandığı belirtilmiştir.

Demirbaş (2009) süperkritik metanol prosesinin katalitik olmadığını, daha düşük reaksiyon süresine sahip olduğunu, transesterifikasyon ürünlerinin çok daha basit saflaştırılma içerdiğini daha çevre dostu olduğunu bildirmiştir. Reaksiyon için 35-60 MPa ve 525-675°K gerektiğini belirtmişlerdir. Süperkritik metanolün başka bir faydasının ise 10 dk içerisinde dönüşümün %95’inin tamamlanmasıdır (Sharma ve diğ., 2008).

Lu ve diğ. (2007) *Candida sp.* 99-125 kullanarak domuz yağının biyokatalizör ile transesterifikasyonunu incelemişlerdir. 1 gr domuz yağı için optimum reaksiyon koşulları 0.2 gr immobilize lipaz, çözücü olarak 8 ml n-heksan, yağ ağırlığının %20’si kadar su, 40°C ve metanolün üç aşamalı eklenmesi olarak tespit edilmiştir. Bu koşullarda %87,4 oranında yağ asidi metil esteri elde etmişlerdir.

Teixeira ve diğ. (2009) geleneksel ve ultrason destekli sığır don yağından biyodizel üretimini karşılaştırmış ve her iki durumda da reaksiyon hızının ve biyodizel kalitesinin benzer olduğunu ancak ultrasonik uygulamanın reaksiyon süresini azalttığını belirtmişlerdir.

Çevresel açıdan bakıldığında etil esterlerin kullanımı metil esterlere kıyasla daha avantajlıdır (Anastopoulos ve diğ., 2015). Etil esterlerin metil esterlere göre daha yüksek setan sayısı, ısıl değer, oksidasyon kararlılığı ve yağlama özellikleri sayesinde daha düşük egzoz emisyonları oluşturur. Bu özelliklerinden dolayı etil ester üretimi metil esterlere kıyasla daha avantajlıdır (Verma ve diğ., 2015; Vicente ve diğ., 2007).

Donyağından üretilen biyodizelin daha yüksek bir kristalleşme başlangıç sıcaklığına sahip olmasının nedeni daha yüksek oranda doymuş yağ asitlerinden elde edilen esterler içermesidir. Doymuş ester miktarı, biyodizelin soğuk akış özelliklerini belirleyen en önemli faktördür. Yapılan çalışmada kullanılan hammaddelerdeki en yaygın iki doymuş yağ asidi olan palmitik asit (16:0) ve stearik asit (18:0) için saf izopropil ve

metil esterlerin erime noktaları şu şekildedir; palmitik asit metil esterleri 30°C, izopropil esterleri 13°C; stearik asit metil esterleri 39,1°C, izopropil esterleri 28°C. Bu veriler izopropil esterlerin soğuk hava koşullarında daha iyi performans göstereceğini doğrulamaktadır (Wang ve diğ., 2005).

Rachmaditasari ve diğ. (2024) katalizör yüzdesinin izopropil ester verimi üzerinde önemsiz bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Hindistan cevizi yağı ile yaptıkları çalışmalarında üretilen en yüksek izopropil ester verimi; 3 dk, (w/w) %0,2 NaOH ve 450 watt mikrodalga gücünde %99,5 olmuştur.

Homan ve diğ. (2017) yaptıkları çalışma sonucunda soya yağı ile propanol ve bütül alkol kullanarak yağ asidi propil ester (YAPE) ve yağ asidi bütül ester (YABE) üretimi için transesterifikasyonun oda sıcaklığında gerçekleştirilebileceğini tespit etmişlerdir. Propil ve bütül esterlerin üretiminde iyileştirmeler yaparak daha az sarfiyat ve çevreye daha dost bir alternatif biyodizel üretim süreci elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında YAPE (%81,73) ve YABE (%89,83) yüksek saflıklarda elde edilebileceğini bildirmişlerdir.

YAPE biyoyakıt olarak hem tek başına hem de mineral dizelle yapılan ikili veya üçlü karışımlar şeklinde en yaygın olarak araştırılan ve dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilen bir biyodizel türüdür. 2-propanol çözücü olarak kullanıldığında birçok araştırma makalesi palmye yağı Benjumea ve diğ. (2007), soya yağı I. Lee ve diğ. (1995), donyağı Wu ve diğ. (1998) tarafından farklı kaynaklardan elde edilen biyodizelin düşük sıcaklık özellikleri üzerinde de olumlu bir etkisi olduğu belirtilmiştir (Gotovuša ve diğ., 2022).

Biyodizel üretiminde 3 veya daha fazla karbon atomu içeren (C₃₊) alkoller kullanıldığında alkol yağ asidi alkil esteri ve trigliseritlerle tamamen karışabilir olduğu için tek fazlı bir sistem elde edilir. Metanol ve etanol durumunda ise iki fazlı bir sistem mevcuttur. C₃₊ yağ asidi alkil esterlerinin özellikleri YAME'lerden farklıdır. Çünkü daha uzun yağ asidi alkil esterleri daha yüksek viskozite, uygun ısınma değeri, setan sayısı ve özellikle dallanmış olduklarında soğuk filtre tıkanma noktası ve akma noktası gibi düşük sıcaklık özelliklerine sahiptir. Daha yüksek viskozite ve daha uzun alkil yapıları nedeniyle aynı zamanda yağlama kabiliyetini de artırır (Gotovuša ve diğ., 2022).

Genellikle biyodizelin çoğu YAME'lerden oluşur ve düşük maliyetli ve yaygın olarak bulunabilen metanol kullanılır. Ancak YAPE'lerin moleküler ağırlıkları daha fazla olduğu için verimi metil esterlerden yaklaşık %10 daha fazladır. Bu durum artan maliyeti kısmen telafi etmektedir (Wang ve diğ., 2005).

Boocock ve diğ. (1998) yaptıkları kinetik tartışmasında bütanoliz karışımının tek sıvı faz, metanoliz karışımının iki fazdan oluştuğunu belirtmişlerdir. Ayrıca içerisinde katalizör bulunan metanolde yağın çözünürlüğünün düşük olduğunu belirtmişlerdir. Yağın metanolde doygunluk seviyelerine ulaşmasının önemli bir zaman aldığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla kinetik çalışmada karıştırma kullanılmasına rağmen metanoliz reaksiyonun önemli kütle transferi sınırlamaları olduğunu belirtmişlerdir.

Doymuş yağ asidi yüksek olan yağ ile biyodizel üretimi için sadece bir karbon zinciri içeren metanole kıyasla daha uzun karbon zincirlerine sahip alkollerin eklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle hindistan cevizi yağının karbon zincirini biyodizel karbon zincirine uyarlamak için izopropil alkol kullanılarak metil estere göre daha iyi özelliklere sahip izopropil ester üretme amaçlanmıştır. Metil ester zayıf soğuk akış özellikleri sergilemiş ve 0°C'ye yakın bir sıcaklıkta kristalleşmeye başlamıştır (Rachmaditasari ve diğ., 2024).

Lee ve diğ. (1995) yaptıkları çalışmada soya fasulyesi yağı ve iç yağı kullanarak üretilen metil ve izopropil esterlerin kristalleşme başlangıç sıcaklıklarını karşılaştırmışlardır. Soya fasulyesi yağı için metil esterlerin kristalleşme başlangıç sıcaklığı 5,2°C, izopropil esterlerin başlangıç sıcaklığı -6,0°C olarak tespit edilmiştir. İç yağı için ise metil esterlerin kristalleşme başlangıç sıcaklığı 17,8°C, izopropil esterlerin ise 6,6°C olarak belirlenmiştir. Her iki hammadde için de izopropil esterlerin kristalleşme başlangıç sıcaklığı metil esterlerden 11°C'den daha düşük olarak bulunmuştur.

Transesterifikasyon reaksiyonunun başlangıç aşamalarında, alkolün (özellikle metanolün) yağda düşük çözünürlüğe sahip olması nedeniyle sürecin sınırlı olduğu ifade edilmiştir. Boocock ve diğ. (1998), tek bir faz elde edebilmek için yardımcı çözücünün eklenmesi ile reaksiyon hızının artacağını belirtmiştir. Bu işlem diğer alkollerle ve yüksek SYA içeren yağların asit katalizli ön işlem uygulamasında kullanılabilir (Boocock ve diğ., 1998; Van Gerpen, 2005).

Sharma ve diğ. (2008) metanolün emülsifikasyona neden olan ve metil ester tabakasının sudan ayrılmasında zorluk oluşturan bir emülgatör görevi görebilen polar hidroksil grubuna sahip olduğunu belirtmişlerdir.

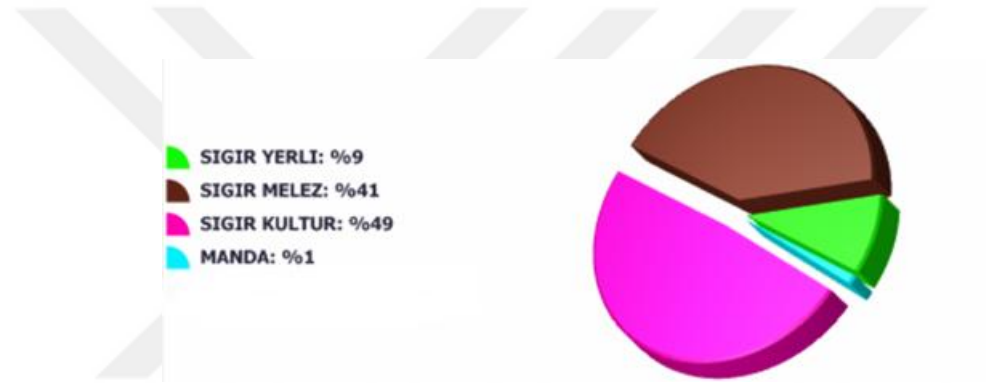
Literatür incelendiğinde, bitkisel yağlar ve atık bitkisel yağlardan biyodizel üretimi ile ilgili bir çok çalışma mevcuttur. Buna karşın hayvansal yağların biyodizel üretiminde değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, bitkisel yağ temelli araştırmalara kıyasla oldukça sınırlıdır. Özellikle entegre et ve süt ürünleri üretimi tesisi proses atıksuyunda ki yağdan biyodizel üretimi çalışması bulunmamaktadır.

2.2.2.1. Hayvansal Yağların Tanımı ve Biyodizel Potansiyeli

İnsanlık var olduğundan beri tarım yaşamın temel bir unsuru olmuştur. Tarımın bir dalı olan hayvancılık sektörü ise hem endüstriyel hammaddelerin sağlanmasında hem de yeterli ve dengeli beslenme de önemli bir rol oynar (Er ve Özçelik, 2016).

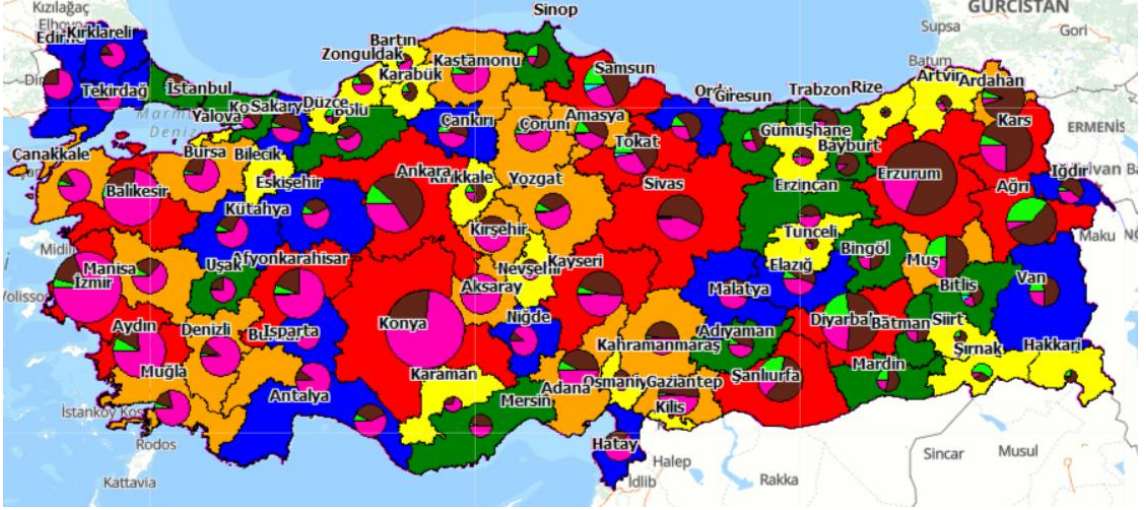
Hayvancılık sektörü artan nüfusun et, süt ve yumurta gibi temel besin kaynaklarına olan ihtiyacını karşılamaktadır. Et ve süt ürünleri, yem, veteriner ilaçları, deri ve tekstil sanayi, hayvancılık ekipmanları gibi birçok sektörde istihdam fırsatları ile ülke ekonomisine katma değer kazandırmaktadır (Ergün ve Bayram, 2021).

Türkiye’de büyükbaş hayvan dağılımı Şekil 2.7, büyükbaş hayvan sayısı grafiği analizi Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2. 7. Türkiye büyükbaş hayvan sayısı grafik analizi (ETKB, 2024)

Şekil 2.7’de farklı sığır türleri ve diğer büyükbaş hayvanların oranları verilmiştir. Verilere göre sığır kültür ırkları %49 ile en yüksek orana sahiptir. Bunu %41 ile sığır melez ırkları takip etmektedir. Sığır yerli ırklarının oranı %9, Manda varlığı %1’dir. Bu dağılım büyükbaş dağılımında kültür ve melez sığır ırklarının sayısal olarak yerli ırklara ve mandaya kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 8. Türkiye büyükbaş hayvan sayısı dağılımı (ETKB, 2024)

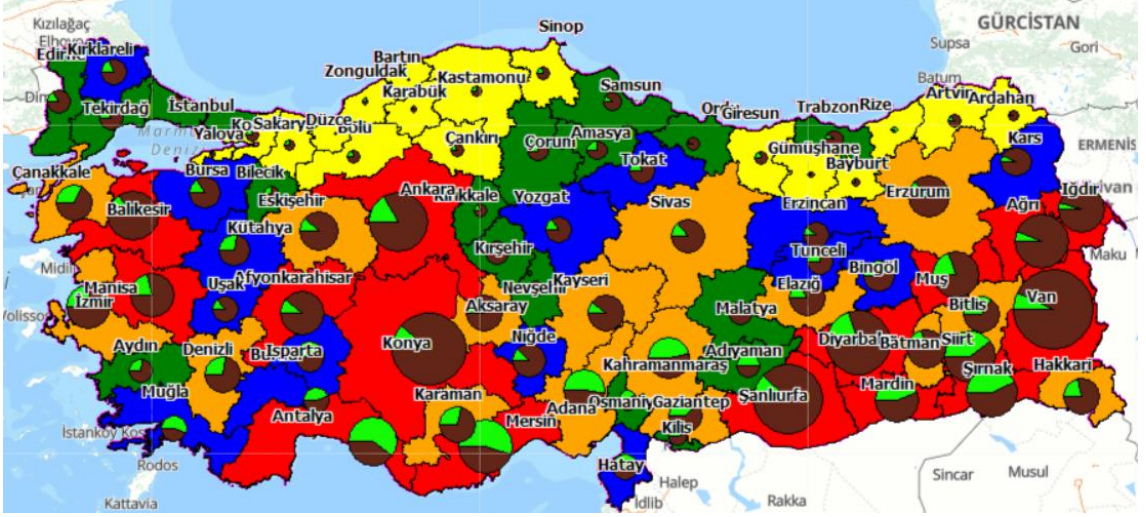
Şekil 2.8’de Türkiye’deki iller bazında sığır türleri ve diğer hayvanların oranları verilmiştir. Verilere göre batı illerde sığır kültür ırklarının yüksek oranda bulunduğu, İç Anadolu’nun bazı illerinde, Doğu Anadolu’nun kuzeyinde ve Erzurum çevresinde sığır melez ırklarının fazla olduğu görülmektedir. Sığır yerli ırklarının ise Doğu ve Güneydoğu Anadolu’nun bazı illeri ile Karadeniz’in iç kesimlerinde daha yüksek oranlarda yer aldığı görülmektedir. Manda varlığı genellikle çok düşük olup, küçük oranlarda Karadeniz ve Marmara bölgelerinin bazı illerinde görülmektedir.

Türkiye’de küçükbaş hayvan dağılımı Şekil 2.9, küçükbaş hayvan sayısı grafik analizi Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2. 9. Türkiye küçükbaş hayvan sayısı grafik analizi (ETKB, 2024)

Şekil 2.9’da Türkiye’deki küçükbaş hayvan varlığının türlere göre oranı gösterilmektedir. Verilere göre koyunlar %76 ile en yüksek paya sahiptir. Keçiler ise %24 oranındadır. Bu dağılımda koyun varlığının keçi varlığına kıyasla daha fazla olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 10. Türkiye küçükbaş hayvan sayısı dağılımı (ETKB, 2024)

Şekil 2.10’da Türkiye’deki iller bazında küçükbaş hayvan varlığının koyun ve keçi türlerine göre dağılımını göstermektedir. Verilere göre koyun varlığının yüksek olduğu iller çoğunlukla İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerindedir. Keçi varlığının daha yüksek olduğu iller ise özellikle Akdeniz Bölgesi, Ege Bölgesi ve bazı Karadeniz illerindedir. Ülke genelinde koyun varlığının keçiye kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.

Hayvanların ortalama ağırlık bilgileri Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2. 7. Hayvan cinsine göre ortalama ağırlıklar

Cins	Ağırlık			Kaynak
	Canlı	Karkas	Atık yağ	
Koyun	60	37,5	1,8	(Jayathilakan ve diğ., 2012)
Sığır	393	205,5	14,9	(Chavarria-Hernandez ve diğ., 2017)

Çizelge 2.7’deki verilere göre koyunda canlı ağırlık 60 kg, karkas ağırlık 37,5 kg ve atık yağ miktarı 1,8 kg’dır. Sığırdan ise canlı ağırlık 393 kg, karkas ağırlık 205,5 kg ve atık yağ miktarı 14,9 kg olarak verilmiştir.

Sığır ve koyunların yıllık bazda atık yağ miktarları 2010 ve 2030 yılları arasındaki miktarlarının veri ve model sonuçları Çizelge 2.8’de verilmiştir.

F. Aslan ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada Türkiye’de kesilen tüm hayvanlardan çıkan hayvansal atık yağın 2010 yılında yaklaşık 62 bin tondayken 2030 yılında yaklaşık 112 bin tona ulaşabileceğini belirtmişlerdir.

Biyodizel kısa zincirli alkol ve katalizör ile birlikte bitkisel, hayvansal, kullanılmış atık kızartma yağlarından üretilen yağ asidi esterlerinden oluşmaktadır (Altınsoy, 2007). Biyodizel dizel yakıtın bir alternatifidir. Petrol kaynaklı dizel yakıtlara fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından benzemektedirler. Biyodizel, dizel motorlarda tek başına yada dizel yakıtlar ile karışım yapılarak kullanılabilir. Bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal profili elde edilen biyodizelin yapısını etkilemektedir (Alptekin, 2013). Saf biyodizel B100 olarak tanımlanmaktadır. Biyodizel hem saf hemde dizel yakıt ile karışım yapılarak kullanılabilir (Erel, 2014). B20 %80 dizel %20 biyodizel karışımını içeren bir yakıttır (Alptekin, 2013). Et endüstrisinin bir yan ürünü olan hayvansal yağlar özellikle et işleme sanayisinin gelişmiş olduğu bölgelerde düşük maliyetleri nedeniyle ekonomik açıdan avantajlıdır (Jayathilakan ve diğ., 2012).

Çizelge 2. 8. 2010 ve 2030 yılları sığır ve koyun atık yağ miktar ve model sonuçları (F. Aslan ve diğ., 2024)

Yıl	Sığır atık yağı (ton)	Koyun atık yağı (ton)	Toplam atık yağ (ton)	Veri Türü
2010	41.694	20.060	61.754	Veri
2011	44.457	22.151	66.608	Veri
2012	48.660	22.264	70.925	Veri
2013	49.165	23.173	72.338	Veri
2014	50.128	24.823	74.951	Veri
2015	56.707	30.304	87.011	Veri
2016	56.793	27.484	84.278	Veri
2017	61.320	27.417	88.737	Veri
2018	62.690	27.418	90.107	Veri
2019	69.060	30.111	99.171	Veri
2020	69.453	32.708	102.161	Veri
2021	73.012	35.449	108.461	Veri
2022	70.059	34.676	104.735	Model sonucu
2023	68.363	35.043	103.406	Model sonucu
2024	69.661	35.495	105.153	Model sonucu
2025	71.425	36.275	107.700	Model sonucu
2026	72.914	36.893	109.807	Model sonucu
2027	71.291	36.667	107.958	Model sonucu
2028	72.704	37.044	109.748	Model sonucu
2029	73.924	37.409	111.332	Model sonucu
2030	74.125	37.766	111.891	Model sonucu

Biyodizel üretiminde hayvansal yağların kullanılması bertaraf ihtiyacını ortadan kaldırmak ve hayvansal yağların işlenmesiyle ilişkili maliyetleri azaltmak için avantajlı bir fırsattır (Janaun ve Ellis, 2010). Hayvansal yağların biyodizel için kullanılması, atık miktarını ve bertarafla ilişkili çevresel yükü azaltmakta, dizele kıyasla sera gazı emisyonları azaltabilmektedir (Shalom ve Saba, 2024).

Hayvansal atık yağların biyodizel hammaddesi olarak kullanılması daha yaygın kullanılan bitkisel yağlara göre ekonomik, çevresel ve gıda güvenliği açısından bir çok avantaj sunmaktadır. Hayvansal atık yağlar yüksek oranda doymuş yağ asitleri ve SYA içermektedir. Bu durum karmaşık üretim teknikleri gerektirir ve hayvansal atık yağların yüksek doymuşluk oranı birçok avantaj sağlamaktadır (örnek: yüksek kalorifik değer, setan sayısı ve oksidasyon stabilitesi) (Alptekin ve diğ., 2012; Ramírez-Verduzco ve diğ., 2012; Tong ve diğ., 2011).

Biyodizel üretiminde bitkisel yağlara alternatif olarak hayvansal yağların kullanımı son zamanlarda artmıştır. Düşük maliyetli bu hammaddeler ile üretilen biyodizelin yakıtın kalitesi artmaktadır. Düşük NO_x emisyonu, yüksek setan sayısı ve daha iyi oksidatif stabilite gibi özellikler elde edilir (Adewale ve diğ., 2015).

Biyodizel katı veya sıvı yağlardan elde edilen uzun zincirli yağ asitlerinin mono-alkil esterlerinden oluşur. Bitkisel yağ kullanımı biyodizel üretim sürecinde maliyetli olduğu için alternatif olarak hayvansal yağların kullanımına yönelinmiştir (Toldrá-Reig ve diğ., 2020).

Hayvansal atık yağdan biyodizel üretiminin SWOT Analizi Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2. 11. Hayvansal atık yağdan biyodizel üretimi SWOT Analizi (Ali Ijaz Malik ve diğ., 2024)

Atık hayvansal yağdan üretilen biyodizelin SWOT analizi, yenilenebilir enerji alanında konumunu gösteren unsurları vermektedir. Güçlü yönleri hammaddeye erişim kolaylığı ve yüksek miktarda bulunabilmesidir. Mezbahalar ve gıda tesisleri gibi bir çok endüstriden elde edilebilen hayvansal atık yağ biyodizel üretimi için sürekli bir kaynağa sahiptir. Çevresel faydaları ise sera gazı emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir enerjiye katkı sağlamasıdır. Dizel motorlarda geniş kullanım alanı olması uyumluluk açısından kolaylık sağlamaktadır. Teknolojide ki ilerlemeler sayesinde üretim verimliliği artırılabilir. Destekleyici politikalar veya teşvikler aracılığıyla katkı sağlanabilmektedir. Sürdürülebilirlik yaklaşımına farkındalık arttıkça biyodizelin benimsenmesi için uygun koşullar oluşabilecektir. Analizin zayıf yönleri ise hammadde kalitesinde ki değişiklik nedeniyle nihai biyodizelde tutarsızlık olabilmektedir. Biyodizel üretiminde hayvansal atık yağın kullanılması kamuoyu tutumunu ve pazarda kabulünü etkileyebileceği için dezavantaj sağlayabilmektedir (Ali Ijaz Malik ve diğ., 2024).

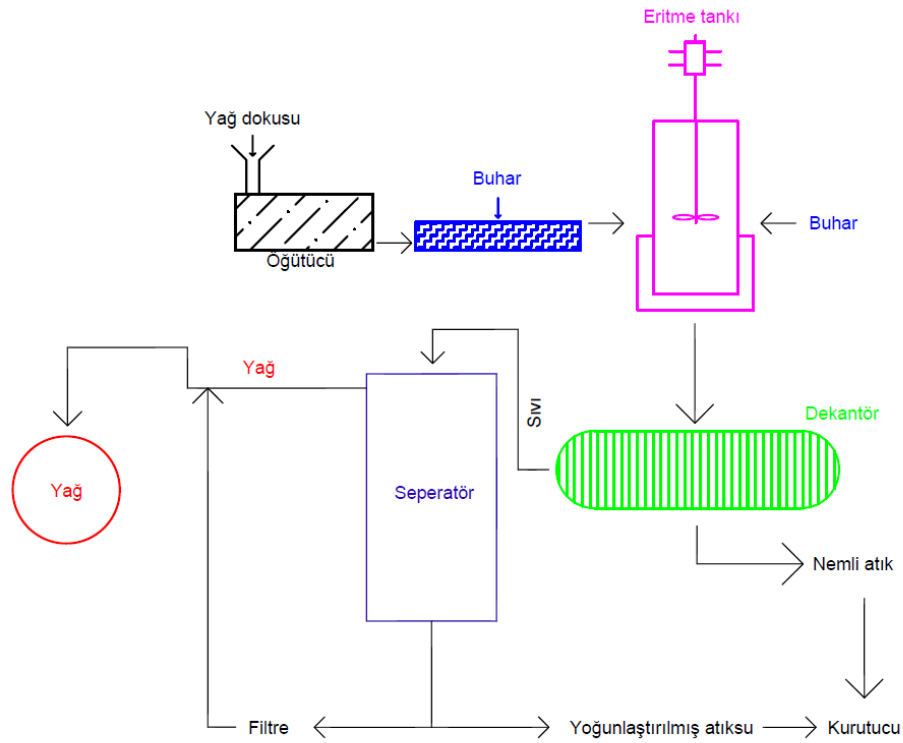
Biyodizelin hammaddesi endüstriyel veya tarımsal faaliyetin atığı olduğunda önemli bir çevresel fayda sağlamaktadır. Mezbahalarda oluşan atık sığır yağı genellikle sabun endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu atıkların entegre bir şekilde kullanılması bu yeni iş imkanları oluşturabilir (Costa Neto ve diğ., 2000).

Hayvansal yağlar genellikle trigliserit, protein, su ve çeşitli minerallerin karışımından oluşmaktadır. Büyük bir kısmı gıda endüstrilerinden (örnek; et ürünleri fabrikaları, mezbahalar, süt ürünleri fabrikaları) kaynaklanmaktadır (Ndiaye ve diğ., 2020).

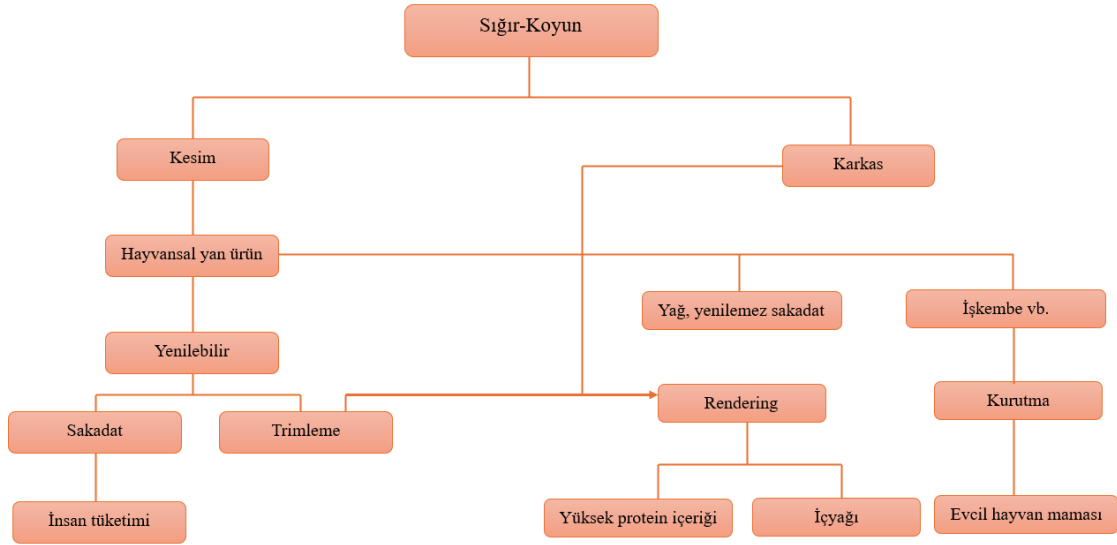
Hayvansal yağlar çoğunlukla et işleme tesislerinden ve rendering sürecinden yan ürün olarak elde edilmektedir. Başlıca hayvansal yağlar arasında sığır işleme sırasında elde edilen donyağı, domuz işleme sırasında elde edilen iç yağı, tavuk, hindi gibi kuşların işlenmesi sırasında oluşan kümes hayvanı yağı bulunmaktadır. Balık işleme tesisleri tarafından üretilen yağlar ve deri endüstrisinin yağlama atıkları da biyodizel hammaddesi olarak kullanılmaktadır (Alptekin ve diğ., 2012; Jayasinghe ve Hawboldt, 2012; Ong ve diğ., 2013)

Don yağı yüksek stearik ve palmitik asit içeriğine sahiptir ve bu içerik yüksek erime noktası ve viskoziteye sebep olur (Ma ve Hanna, 1999). Biyodizel üretiminde en çok kullanılan hayvansal yağlar sığır ve koyundan elde edilen yenilenebilir/yenilenemez yapıda olan don yağıdır. Yenilenebilir formu daha pahalı olsa da SYA içeriğinin düşük olması baz katalizli transesterifikasyon için uygun bir hammaddedir (Nelson ve Schrock, 2006).

Don yağı ıslak veya kuru yöntemlerle elde edilebilmektedir. Islak yöntemde yüksek sıcaklıkta buhar ile eritilir ve suda çözünmediği için yüzeyden sıyrılarak alınır. Kuru yöntemde ise yağ suyun bulunmadığı ortamda yüksek ısıya maruz bırakılır (Şekil 2.12). Donyağı işleme süreci Şekil 2.13’te verilmiştir (Adewale ve diğ., 2015; The AOCS Lipid Library, 2013). Hayvansal yağlar dizel yakıtın kalorifik ve setan sayısına çok yakın değerlere sahiptir ve içerisinde sabit oksijen bulunmaktadır (Kumar ve diğ., 2005). Hayvansal yağların alkoller ile kolay karışabilmesi dizel motorlarda modifikasyon yapılmadan kullanılabilmesini sağlamaktadır. Hayvansal yağların alkollerle karıştırılması yakıtın fiziksel özelliklerinede katkı sağlamaktadır (Kerihuel ve diğ., 2005)



Şekil 2. 12. Don yağı eldesi akış diyagramı (Adewale ve diğ., 2015; The AOCS Lipid Library, 2013)



Şekil 2. 13. Don yağı üretimi işleme süreci (Adewale ve diğ., 2015; The AOCS Lipid Library, 2013)

2.2.2.2. Yağ Asitlerinin Biyodizel İlişkisi

Biyodizel bitkisel ve hayvansanlar yağların içerisindeki trigliseridlerin bir alkolle transesterifikasyon ile oluşan yağ asidi esterleridir (Ma ve Hanna, 1999). Bu reaksiyonda trigliseridin gliserol yapısından ayrılan yağ asitleri alkol ile esterleşir. Esterlerin yağ asidi içeriği ham yağın yağ asidi içeriği ile neredeyse aynıdır. Ham yağda baskın olan yağ asidi biyodizelin içerisinde de ona karşılık gelen esterlerden oluşur (Knothe, 2005). Bu nedenle biyodizelin yakıt özellikleri yağ asidi zincirlerinin doymuşluk derecesi, dallanma yapısı, uzunluğu ile ilişkilidir (Bôas ve Mendes, 2022; Knothe, 2005).

Hayvansal yağların yağ asidi bileşiminde yüksek oranda bulunan, C-C atomları arasında bir adet kovalent bağdan meydana gelen ve oda sıcaklığında çoğunlukla katı olan yağlar doymuş yağ asitleridir (Çizelge 2.9).

Çizelge 2. 9. Doymuş yağ asitlerinin genel bileşenleri (Koç, 2011)

Bileşiğin adı	Molekül formülü	Yapı formülü
Asetik Asit	$C_2H_4O_2$	$CH_3 COOH$
Propiyonik Asit	$C_3H_6O_2$	$CH_3 CH_2 COOH$
Bütirik Asit	$C_4H_8O_2$	$CH_3 (CH_2)_2 COOH$
Kaproik Asit	$C_6H_{12}O_2$	$CH_3 (CH_2)_4 COOH$
Kaprilik Asit	$C_8H_{16}O_2$	$CH_3 (CH_2)_6 COOH$
Kaprik Asit	$C_{10}H_{20}O_2$	$CH_3 (CH_2)_8 COOH$
Laurik Asit	$C_{12}H_{24}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{10} COOH$
Miristik Asit	$C_{14}H_{28}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{12} COOH$
Palmitik Asit	$C_{16}H_{32}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{14} COOH$
Stearik Asit	$C_{18}H_{36}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{16} COOH$
Araşidik Asit	$C_{20}H_{40}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{18} COOH$
Behenik Asit	$C_{22}H_{44}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{20} COOH$
Lignoserik Asit	$C_{24}H_{48}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{22} COOH$
Serotik Asit	$C_{26}H_{52}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{24} COOH$
Montanik Asit	$C_{28}H_{56}O_2$	$CH_3 (CH_2)_{26} COOH$

Hayvansal yağların bir diğer bileşimi ise karbon zincirlerinde farklı konumlarda bir ya da daha fazla kovalent çift bağ olan doymamış yağ asitleridir (Çizelge 2.10).

İçeriklerindeki çift bağlardan dolayı doymamış yağ asitleri doymuş yağ asitlerine göre daha reaktiftir. Reaktivite yağ asidi zinciri içerisindeki çift bağ sayısına istinaden artmaktadır (Karaca ve Aytaç, 2007).

Çizelge 2. 10. Doymamış yağ asitlerinin genel bileşenleri (Koç, 2011).

Bileşiğin adı	Molekül formülü	Yapı formülü
Palmitoleik Asit	$C_{16}H_{30}O_2$	$CH_3(CH_2)_5 CH = CH(CH_2)_7 COOH$
Oleik Asit	$C_{18}H_{34}O_2$	$CH_3(CH_2)_7 CH = CH(CH_2)_7 COOH$
Linoleik Asit	$C_{18}H_{32}O_2$	$CH_3(CH_2)_4 CH = CHCH_2CH = CH(CH_2)_7 COOH$
Alfa- Linolenik Asit	$C_{18}H_{30}O_2$	$CH_3CH_2CH = CHCH_2CH = CHCH_2CH = CH(CH_2)_7 COOH$
Araşidonik Asit	$C_{20}H_{32}O_2$	$CH_3(CH_2)_4CH=CHCH_2CH=CHCH_2CH=CHCH_2CH=CH(CH_2)_3COOH$

Doğada en yaygın bulunan yağ asidi oleik asittir. Hayvansal lipidlerde ise en fazla yer alan doymamış yağ asitleri arahidonik, oleik, palmitoleik ve linoleik asitlerdir. Doymamış yağ asitlerinin bağ sayıları bir yada daha fazla olup doymuş yağ asidi formuna getirilebilmektedir. Doymamış yağ asitleri kolay bir şekilde okside olabilmekte ve çift bağ sayısı arttıkça oksidasyon daha hızlı gerçekleşmektedir. Işık, ısı, metal vb. oksidasyonu hızlandıran etkenlerdir (Koç, 2011).

Doymamış yağ asitlerinin çift bağ sayısı arttıkça daha düşük sıcaklıklarda sıvı formlarını koruyabilmektedirler. Doymamış yağ asitleri içeriğindeki çift bağlardan dolayı reaksiyon yetenekleri yüksektir. Karbon sayısı arttıkça yağların formu katı olmaktadır. Molekül ağırlıklarının artması ile erime noktaları da artmaktadır (Koç, 2011).

Sığır içyağının toplam yağ asitlerinin yaklaşık %40-45'i doymuş yağ asitlerinden oluşmakta ve büyük bir kısmı palmitik ve stearik asittir. Yaklaşık %50'si ise tekli doymamış yağ asitlerinden oluşmaktadır ve büyük bir kısmını oleik asittir. Çoklu doymamış yağ asitleri içeriği (özellikle linoleik asit ve çok az miktarda linolenik asit) ise genelde %3-5 civarındadır (Limmatvapirat ve diğ., 2021).

Yağ asidi esterlerinde karbon zincir uzunluğu arttıkça biyodizelin setan sayısı, ısıl değeri ve oksidasyon kararlılığı artmaktadır. Bununla birlikte biyodizelin viskozite ve erime noktası da artacağı için düşük sıcaklıklarda akıcılık özellikleri zayıflar (Boichenko ve diğ., 2025).

Doymuş yağ asidinin artmasıyla setan sayısı ve oksidasyon kararlılığı arttığı için yakıt daha kolay tutuşur ve depolamada daha kararlı bir form alır (Ramos ve diğ., 2009; Sierra-cantor ve Guerrero-fajardo, 2017). Doymamış yağ asidi içeriği yüksek olan biyodizellerde ise daha düşük bulutlanma ve akma noktaları ile soğuk akış özellikleri iyileşirken oksidasyon kararlılığı azalır, iyot sayısı yükselir ve uzun süreli depolamada bozunma olasılığı artar (Monirul ve diğ., 2015).

Hayvansal yağların doymuş yağ asidi içeriği yüksek olduğu için elde edilen biyodizelin de doymuşluğu yüksektir. Bu nedenle setan sayısı ve oksidasyon kararlılığı bitkisel yağ ile üretilen biyodizele göre daha yüksektir. Uzun zincirli yağ asidi esterlerinin erime noktaları yüksek olduğu için biyodizelin soğuk akış özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Sierra-cantor ve Guerrero-fajardo, 2017). Sığır yağından üretilen biyodizelin yüksek doymuş yağ asidi esterlerinin soğuk iklimlerde kristalizasyonundan dolayı filtre ve yakıt hatları tıkanır ve bulutlanma ve akma noktası artar. Bu nedenle katkı maddelerinin kullanımı ve harman oranları yapılması önerilmektedir (Monirul ve diğ., 2015).

Hayvansal yağlardan üretilen biyodizelin doymuşluk seviyesi yüksek olduğu için setan sayısı artar. Setan sayısının yüksek olması ise dizel motorlarda daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha iyi yanma davranışı sergiler (Gandure ve diğ., 2017).

Bitkisel yağlardan elde edilen biyodizelin bulutlanma noktası 0°C civarında olup hayvansal yağlardan üretilen biyodizelin 15°C civarında oldukça yüksek bulutlanma noktası vardır (Dwivedi ve Sharma, 2013).

Çift bağ sayısı arttıkça iyot değeri arttığı için pratikte yağın doymamışlık seviyesi iyot sayısı ile yorumlanır (Mahmudul ve diğ., 2017; Prankl ve Wörgetter, 1996).

Hayvansal ve bitkisel atık yağların doğrudan kullanım ve karıştırmada belli bir oran ile dizel yakıt veya çözücü ile karıştırılarak kullanılabilir. Yağın dizel ile karıştırılması en çok kullanılan yöntemdir. Bu işlem uygulanarak yağın viskozitesi düşer ve dizel yakıt tüketim miktarı azalır (Tippayawong ve Chumjai, 2012). Dizel yakıt ile yapılan seyreltme yönteminde oranlar B20, B40, B80 şeklinde ifade edilmektedir (Eryılmaz ve diğ., 2014).

Hayvansal yağların yakıt olarak doğrudan kullanımının ana sorunları yüksek viskozite ve uçuculuğunun az olmasıdır (Adewale ve diğ., 2015).

Kumar ve diğ. (2005), hayvansal yağı 1500 rpm'de 2.8 kW nominal güce sahip tek silindirli, doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motora enjekte etmeden önce farklı sıcaklıklarda ısıtmışlardır. Önceden ısıtılmış hayvansal yağ, dizel yakıtla kıyasla daha kısa

ateşleme gecikmesi ve yanma süresi, daha yüksek zirve basıncı ve daha düşük duman emisyonları göstermiştir. Kumar ve diğ. (2006) sıkıştırma ateşlemeli motorda yakıt olarak hayvansal yağ kullanmanın farklı yöntemlerini karşılaştırdıkları çalışmada tek silindirli, hava soğutmalı, doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motor kullanarak yakıtları motorun maksimum güç çıkışının %100 ve %60'ında test etmişlerdir. Saf hayvansal yağ kullanıldığında, saf dizele kıyasla silindir tepe basıncında azalma, daha düşük bir ön karışımli yanma hızı ve daha uzun bir ateşleme gecikmesi tespit etmişlerdir.

Bousbaa ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada hayvansal yağlar ve bitkisel yağlar ile sıkıştırma ateşlemeli motorun çalışmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Saf dizel ile biyoyakıtlar karşılaştırıldığında farklı yanma özellikleri rapor etmişlerdir. Hayvansal atık yağlardan üretilen yakıt, saf dizele kıyasla toplam yanmamış yakıtı ve azot oksit emisyonlarını azaltmıştır.

Dizelin viskozitesini azaltmak için hayvansal yağlar ile dizel karıştırılmıştır. Bu karışımların dizel motorlarda etkin bir şekilde performans gösterdiği belirtilmiştir. Karışımın en büyük avantajı ise teknik modifikasyon gerektirmemesi ve uygulanmasının kolay olmasıdır (Kumar ve diğ., 2006a; Mrad ve diğ., 2012).

Kerihuel ve diğ. (2006) dizel motor yakıtı olarak etanol-hayvansal yağ emülsiyonlarını stabilite, yapı, viskozite, yağ içeriği ve ekonomik yönleri için incelemişlerdir. Optimum emülsiyon koşullarının hacimce %36,4 etanol, %3,6 sorbitan seskiolat (Span83), %10 su ve %50 hayvansal yağ olduğunu belirlemişlerdir. Mikro emülsiyon oluşturmada birbiri ile çözünmeyen iki sıvı ile iyonik veya iyonik olmayan organik içeriklerin kendi içlerinde oluşturduğu kolloidal çözelti mikro emülsiyondur. Mikro emülsiyon yönteminde organik madde olarak kısa zincirli alifatik alkol kullanılmaktadır (Acharya ve diğ., 2016).

Mikroemülsifikasyon, yağ/alkol karışımlarının amfifil bileşikler eklenerek çözündürülmesiyle hibrit dizel yakıtların oluşturulması için uygulanmaktadır. Metanol gibi kısa zincirli, düşük karbon sayılı alkoller polar olmayan bitkisel ve hayvansal yağlarda sınırlı ölçüde çözünmektedir. Bu nedenle karboksilat, Span83, fosfolipidler, 2-oktanol ve n-bütanol gibi yüzey aktif maddeler gibi amfifilik bileşikler yağın çözünabilirliğini artırmak, seyrelmesini sağlamak ve viskozitesini düşürmek amacıyla kullanılır. Amfifilik bileşiklerin normalde karışmayan sıvılara eklenmesiyle kendiliğinden oluşan çapı görünür ışığın dalga boyunun dörtte birinden daha küçük olan optik izotropik sıvı mikro yapılarının dengeli bir dispersiyonu mikroemülsiyon olarak tanımlanır (Schwab ve diğ., 1983).

2.2.2.2.Biyodizel Üretim Yöntemleri

Hayvansal ve bitkisel yağlardan biyodizel üretimi için kimyasal ve biyolojik yöntemler uygulanmaktadır. Kimyasal yöntem baz veya asit katalizör kullanılması ile gerçekleştirilmektedir. Biyolojik yöntem ise temel olarak lipazların kullanılması ile enzimatik bir dönüşümü içermektedir. Katalizörsüz yöntemler ve süperkritik sıcaklık dönüşümlerine dayalı üretim teknikleri ile ilgili araştırmalar devam etmektedir (Lam ve diğ., 2010). Biyodizel üretim yöntemleri ve karşılaştırması Çizelge 2. 11’de verilmiştir.

Süperkritik metot katalizör kullanılmadan yaklaşık 250°C’de ve 240 sn’de transesterifikasyon işlemidir. Bu yöntemde transesterifikasyon için kullanılan alkolün kritik sıcaklığı ve basıncı önemli bir rol oynamaktadır (Kaya, 2007). Süperkritik sıcaklıkta çalışma prensibi basınç ve sıcaklık ilişkisinin etkisiyle çözücünün dielektrik sabiti, yoğunluk, viskozite ve polarite gibi özelliklerini reaksiyon için uygun koşullara getirmektir (Yenioğlu, 2009). Alkollerin kritik basınç ve sıcaklık değerleri Çizelge 2.12’de verilmiştir.

Biyodizel üretiminde en sık tercih edilen yöntem transesterifikasyon işlemidir. Trigliserit molekülünün alkol ve katalizör ile reaksiyona girip yağ esteri ile gliserin oluşturma süreci olarak tanımlanmaktadır (Viêgas ve diğ., 2015). Transesterifikasyon, bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel olarak adlandırılan alkil esterlerin üretildiği reaksiyondur (Knothe ve diğ., 2005). Stokiyometrik hesaplamalar ile transesterifikasyon reaksiyonu için alkol:yağ mol oranı en az 3:1 olmalıdır (Cheng ve diğ., 2014).

Çizelge 2. 11. Biyodizel üretim metotları karşılaştırması (Atadashi ve diğ., 2011; Helwani ve diğ., 2009)

Değişkenler	Baz katalizör	Asit katalizör	Lipaz katalizör	Süperkritik alkol	Heterojen katalizör
Reaksiyon sıcaklığı (°C)	60-70	55-80	30-40	239-385	180-220
Ham maddede SYA	Sabunlaşmış ürünler	Esterler	Metil esterler	Esterler	Hassas değil
Ham maddede su	Reaksiyonu engeller	Reaksiyonu engeller	Etkisi yok	-	Hassas değil
Metil ester verimi	Normal	Normal	Daha yüksek	İyi	Normal
Gliserolün geri kazanımı	Zor	Zor	Kolay	-	Kolay
Metil esterlerin saflaştırılması	Tekrarlanan yıkama	Tekrarlanan yıkama	Yok	-	Kolay
Katalizör üretim maliyeti	Ucuz	Ucuz	Nispeten pahalı	Orta	Potansiyel olarak daha ucuz

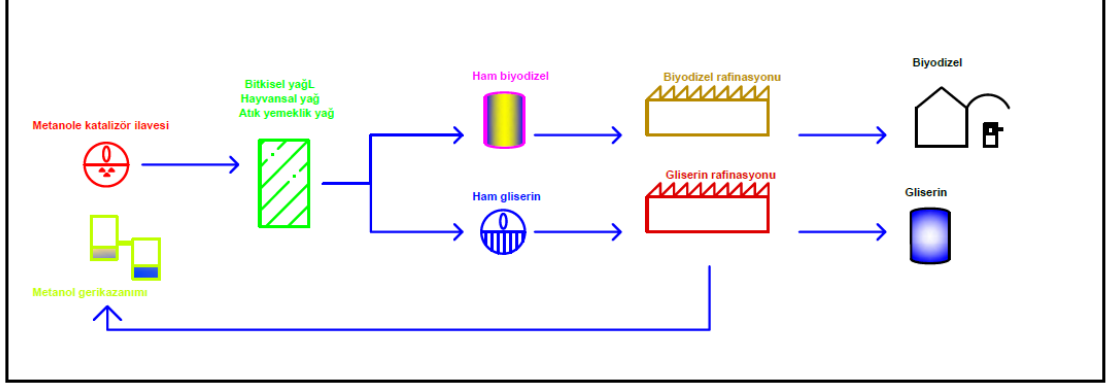
Çizelge 2. 12. Alkollerin kritik basınç ve sıcaklık değerleri (Demirbaş, 2006)

Alkol	Kritik Basıncı (Mpa)	Kritik Sıcaklık (°C)
Metanol	8,1	239,2
Etanol	6,4	243,2
1-Propanol	5,1	264,2
1-Bütanol	4,9	287,2

Trigliseritlerin transesterifikasyonu katalizli ve katalizsiz olarak ikiye ayrılmaktadır. Katalizli transesterifikasyon kullanılan katalizör türüne bağlı olarak homojen, heterojen veya enzimatik katalizli yöntem olarak sınıflandırılmaktadır. Katalizsiz transesterifikasyon ise süperkritik yöntem olup üretim sürecindeki temel zorlukları azaltmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla uygulanabilmektedir (Ong ve diğ., 2013).

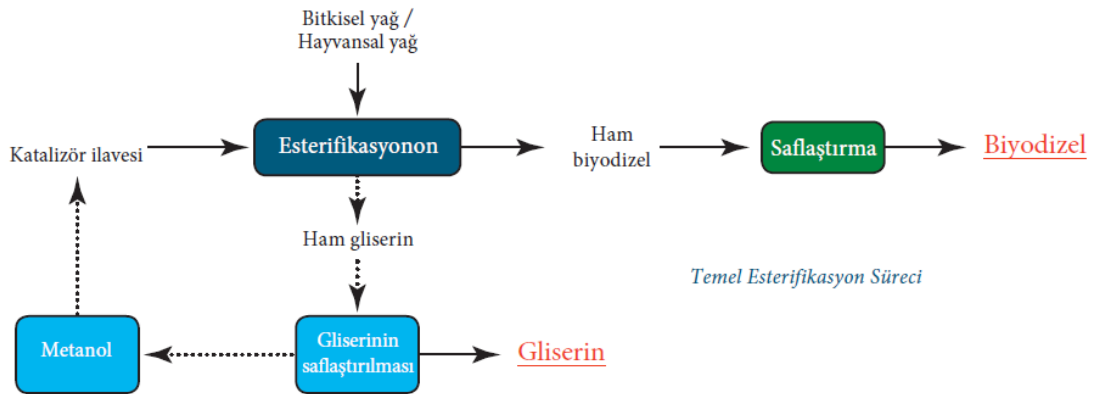
Transesterifikasyon reaksiyonundan sonra ilk olarak biyodizel ve yan ürün olan gliserol ayrışır. Ayrışma, üretilen biyodizel ve gliserolün yoğunluk farkıyla gerçekleşmektedir. Yoğunluk değerlerinin farklı olması biyodizel ve gliserol fazlarının ayrışması için gereken santrifüjleme veya yerçekimi ile çöktürme gibi basit uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. Ayrışma hızı emülsiyon oluşumu, yoğun karıştırma, gliserol ve biyodizelin birbirleriyle çözünürlüğü gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Van Gerpen ve diğ., 2004).

Hayvansal ve bitkisel yağların kimyasal yapısı üretilen biyodizelin özelliklerini etkilemektedir. Trigliceritler hayvansal ve bitkisel yağların çoğunluğunu oluşturmaktadır. Trigliceritler, üç farklı yağ asidinin bir gliserol molekülüyle birleşmesiyle oluşan bir yağ molekülüdür. Bitkisel ve hayvansal yağlardaki yağ asitleri gliserol molekülü ile nasıl bağlandığına göre birbirinden ayrılır. İki veya daha fazla çift karbon bağı içeren yağ asitleri çoklu doymamış yağ asitleri olarak bilinirken tekli doymamış yağ asitleri yalnızca bir çift karbon bağına sahiptir (Vellguth, 1983).

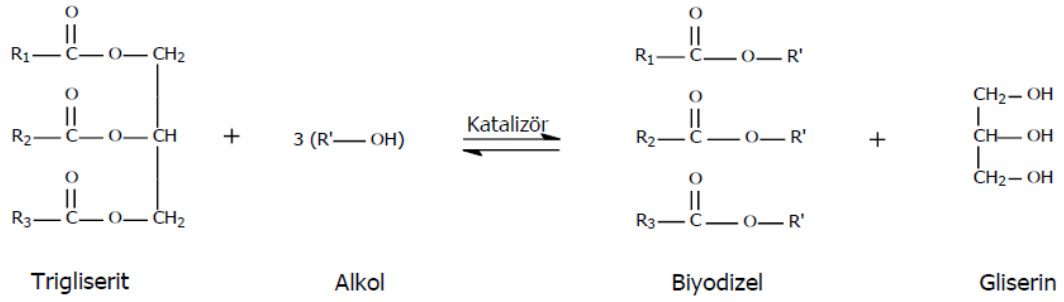


Şekil 2. 14. Biyodizel eldeinde transesterifikasyon uygulaması

Triasilgliseroller, hayvansal ve bitkisel yağların temel bileşenleridir (TAG; çoğunlukla trigliseritler olarak adlandırılmaktadır). TAG'lar, gliserollü (1,2,3-propanetriol; gliserol çoğunlukla gliserin adıyla tanımlanmaktadır) yağ asitlerinin esterleridir. TAG'larda yer alan çeşitli yağ asitleri, hayvansal ve bitkisel yağların yağ asidi özelliğini içerir. Yağ asitlerinin çeşitli kimyasal ve fiziksel içeriklerinden dolayı yağ asidi karakterizasyonu hayvansal veya bitkisel yağın niteliğini etkileyen başlıca parametredir. Transesterifikasyon sürecinde hayvansal veya bitkisel yağ katalizör ve alkol ile reaksiyona alınarak yağ asidi karışımlarına karşılık gelen alkil esterler üretilir (Şekil 2.15) (Knothe ve diğ., 2005). Esterleştirme işleminin örnek bir diyagramı Şekil 2.15, reaksiyon Şekil 2.16'da verilmiştir.

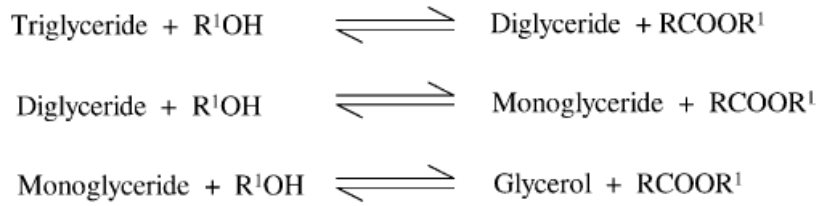


Şekil 2. 15. Temel esterifikasyon süreci (Alleman ve diğ., 2016)

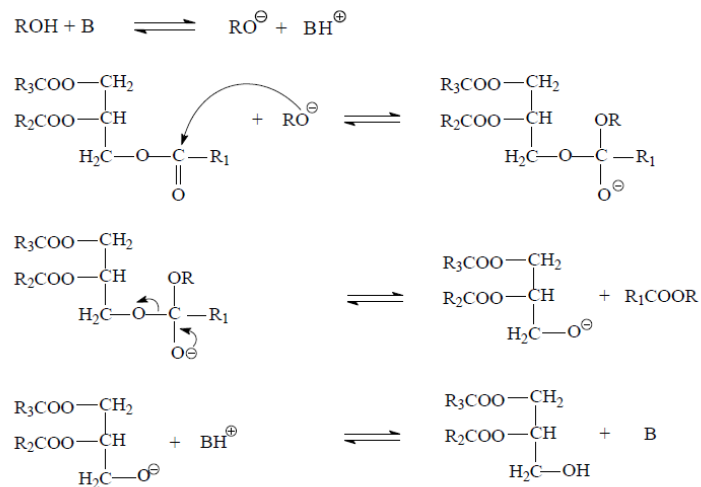


Şekil 2. 16. Transesterifikasyon reaksiyonu (Acaroğlu, 2003)

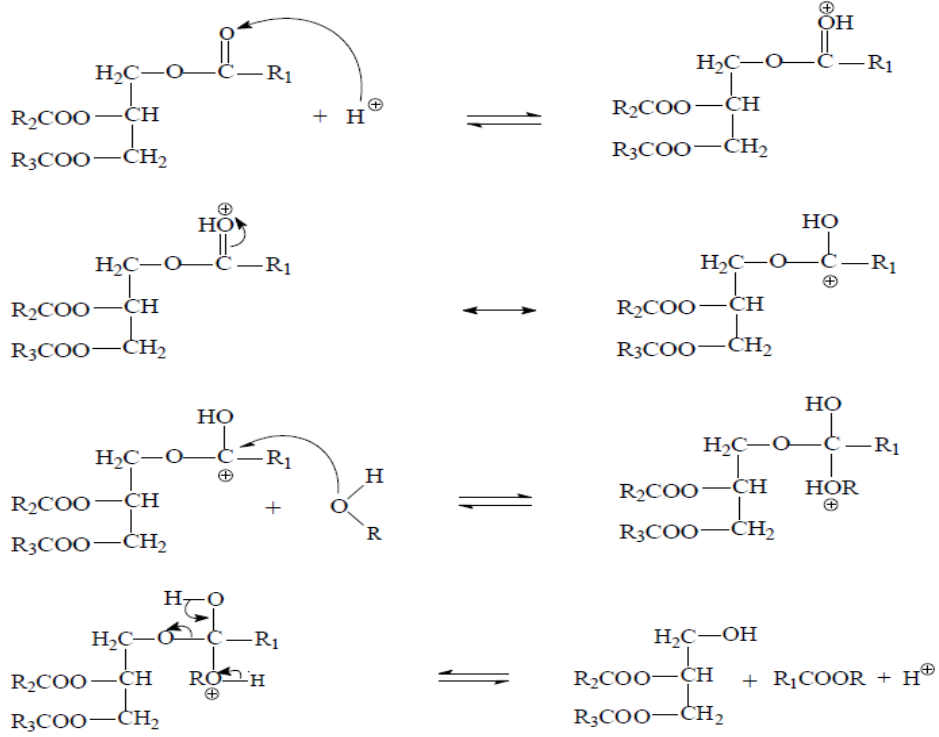
Transesterifikasyonda, TAG'lar bir baz veya asit katalizör kullanılarak katalize edilebilmektedir. Trigliserit, digliserit ve monogliserit ara ürünlerine ve daha sonra gliserole dönüşmektedir (Darnoko ve Cheryan, 2000). TAG'ların transesterifikasyonu için genel süreç Şekil 2.17, baz katalizör ile olan reaksiyon Şekil 2.18 ve asit katalizör ile olan reaksiyon Şekil 2.19'da verilmiştir.



Şekil 2. 17. Trigliseritlerin transesterifikasyon süreci (Meher ve diğ., 2006)



Şekil 2. 18. Baz katalizör ile trigliseritin transesterifikasyonu (Lee ve diğ., 2009)



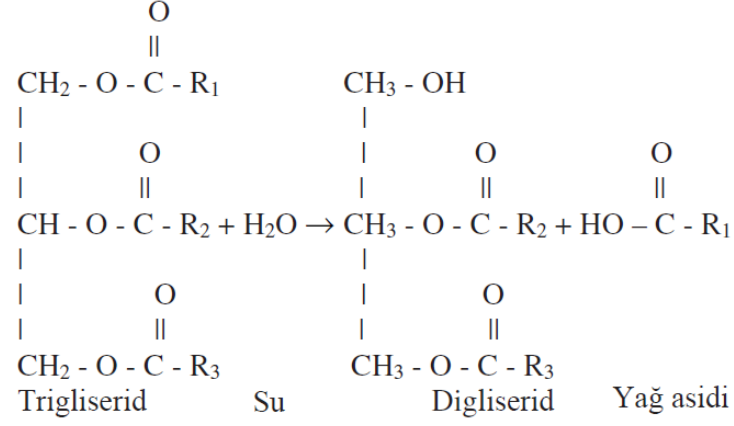
Şekil 2. 19. Asit katalizör ile trigliseritin transesterifikasyonu (Thanh ve diğ., 2012)

Transesterifikasyon için homojen katalizörlerin reaksiyon aşamasında yüksek enerji tüketimi ve maliyetinden dolayı kolay ayrışabilen ve geri dönüştürülebilen heterojen katalizör çeşitleri araştırılmıştır. Yapılan birçok çalışmada homojen katalizör kullanırken uygulanan nötrleştirme ve yıkama adımlarını kaldırmak için heterojen katalizör kullanılmıştır. Ancak daha düşük ester verimi, daha yüksek reaksiyon sıcaklığı ve daha uzun reaksiyon süresi gibi sorunlarla karşılaşmışlardır (Chew ve Bhatia, 2008).

Bhatti ve diğ. (2008), atık koyun yağı ve tavuk yağı ile yaptıkları çalışmada homojen baz (KOH) ve asit (H₂SO₄) katalizörlü transesterifikasyon uygulamışlardır. KOH ile gerçekleştirilen tek aşamalı transesterifikasyon reaksiyonuna kıyasla, tek aşamalı asit transesterifikasyonda daha yüksek biyodizel verimi elde ettiklerini bildirmişlerdir. Bu durum KOH sürecinde sabun oluşumuna bağlanmıştır.

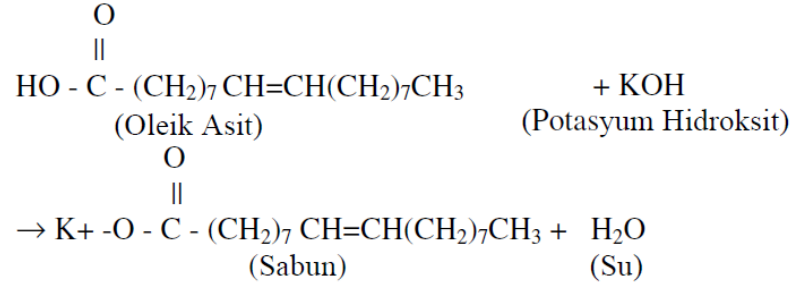
Soriano Jr ve diğ. (2009), yüksek SYA'ların NaOH ve KOH katalizörleri ile sabunlaşma reaksiyonu yolu ile reaksiyona girmesinden dolayı aşırı sabun oluşumuna yol açtığını belirtmiştir.

Sıvı ve katı yağlardaki su ve SYA baz katalizli transesterifikasyon işleminde sorun oluşturabilmektedir. Su yüksek sıcaklıklarda trigliseritleri digliseritlere hidrolize edebilir ve SYA oluşturabilir (Şekil 2.20).



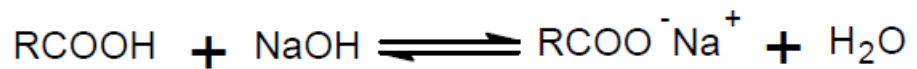
Şekil 2. 20. Serbest yağ asitleri oluşturan trigliseridin hidroliz (Van Gerpen ve diğ., 2004)

Katalizörün alkali olması durumunda ise SYA ile reaksiyona girerek sabunlaşmış ürün oluşumuna neden olacaktır (Şekil 2.21) (Van Gerpen ve diğ., 2004).



Şekil 2. 21. Sabun oluşumu (Van Gerpen ve diğ., 2004)

Baz kataliz kullanılan reaksiyonlarda yüksek serbest yağ asidi ve nem içerikli yağın kullanılması sabunlaşma (Şekil 2.22) yoluyla ürün kaybı, ürün ayırma ve saflaştırmada zorluk ve atık su oluşumu nedeniyle çevre sorunları ve maliyete neden olmaktadır (Lim ve diğ., 2009).



Şekil 2. 22. Serbest yağ asidinin sabunlaşma reaksiyonu (Lim ve diğ., 2009)

Yüksek SYA'lı yağlar baz katalizli transesterifikasyon ile biyodizele dönüştürülemezler. Yüksek SYA içeriği sabunlaşmaya neden olmaktadır. Asitler SYA'ları esterleştirebilirler ancak yavaş reaksiyon hızları ve maliyetli olması nedeniyle bu yöntem daha az tercih edilmektedir. Hem asidik hemde bazik bölgeleri olan heterojen katalizörler SYA'yı esterleştirirken aynı zamanda trigliseritleri biyodizele dönüştürebilmektedirler (Semwal ve ark., 2011).

Heterojen kataliz, heterojen baz kataliz ve heterojen asit kataliz olarak ikiye ayrılmaktadır. Heterojen kataliz çeşitli katı katalizörler kullanılarak uygulandığında reaksiyon adımlarının sayısına göre de sınıflandırılabilir (Adewale ve diğ., 2015).

Helwani ve diğ. (2009) biyodizel üretiminde kullanılan heterojen ve homojen katalizörlerin fayda ve zararlarını tartışmışlardır. Homojen katalizörler 40-65°C aralığında kolay dönüşebildikleri için endüstriyel biyodizel üretiminde verimlidir ama rafinasyon sorunu oluşturmaktadır. Homojen katalizörlerin kullanıldığı prosesler için gerekli olan birçok nötrleştirme ve yıkama adımlarını uygulamamak için biyodizel üretiminde heterojen katalizör kullanılmaya başlanmıştır. Yazarlar verimin %100'e yakın ve metil ester içeriğinin %99'un üzerinde saflıkta olduğu ve yan ürün olarak oluşan gliserolün %98'in üzerinde saflıkta olduğunu belirtmişlerdir. Genel üretim maliyeti yan ürün olan gliserolün verimli kullanılmasıyla iyileştirilebilir (Chew ve Bhatia, 2008).

Geri kazanım ve yan ürünün işlenmesi ile ilgili sorunları çözebilmek için biyodizel üretiminde lipazlar kullanılarak enzimatik metanoliz ile ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Enzim katalizi kullanımının en büyük sorunu maliyetinin yüksek olmasıdır. Maliyeti azaltmak için geri kazanım ve yeniden kullanıma yönelik enzim immobilizasyonu önerilmektedir (Balat ve Balat, 2010). Lipaz katalizörü, alternatif sunmasına rağmen bu teknolojinin endüstriyel ilerleyişinin fizibilite nedeniyle geciktiğini belirtilmiştir. Biyodizel üretiminde katalizör değerlendirilmesinde ürünün ayrılması ve saflaştırılmasında karşılaşılan zorluklara rağmen homojen baz katalizli reaksiyonun avantajlı olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi ise homojen katalizör kullanılan reaksiyonun kinetik hızı heterojen katalizör kullanılan reaksiyondan daha hızlı ve homojen katalizörlerin daha ekonomik olmasıdır (Atadashi ve diğ., 2011).

Düşük serbest yağ asidi içeriği içeren yüksek kaliteli yağların transesterifikasyonu için ağırlıklı olarak homojen alkali katalizör kullanılmaktadır. Bunun nedeni alkali katalizörün yüksek YAME üretmesi ve reaksiyonun basit ekipmanlarla gerçekleştirilebilmesidir. Bunun yanında yüksek miktarda SYA içeren düşük kaliteli ham yağlarla biyodizel üretimin en yaygın yöntemi güçlü bir H₂SO₄ katalizörü ile

esterifikasyon ve sonra alkali katalizör ile transesterifikasyondur (Thanh ve diğ., 2012). SYA'ların içeriğini azaltmak için alkali katalizörler ile yapılan transesterifikasyondan önce asit katalizörleri kullanılır (Atabani ve diğ., 2012).

Yağın genel formülünde üç kollu molekül bulunmaktadır. Reaksiyon süreci içerisinde önce üç kollu molekül kollarından birini bırakarak digliseriti oluşturur. Ardından diğer kolunu bırakıp monogliseriti ve daha sonra üçüncü kolunu bırakarak gliserol formunu alır. Bu esnada ise her ayrılan kol alkol ile birleşerek biyodizeli meydana getirir. Fakat reaktör içerisindeki moleküllerin tamamının reaksiyonu gerçekleştirmesi mümkün değildir. Dolayısıyla içeriğinde az da olsa monogliserit, digliserit ve trigliserit molekülleri bulunur. Çökme aşamasında ise bazı gliserol molekülleri çökme işlemini gerçekleştirmeyip biyodizel içerisinde kalabilir (Eryılmaz, 2009).

Biyodizelde su ve tortu kirliliği, “işletme/depolama hijyeni” ile ilgili sorunlar olarak değerlendirilir. Suyun varlığı iki şekilde olabilir; çözünmüş su veya askıda su damlacıkları. Biyodizel normalde suda çözünmez kabul edilse de dizel yakıtı göre çok daha fazla su tutar. Biyodizel, çözünmüş su olarak 1500 ppm'e kadar su içerebilirken dizel yakıt genellikle yaklaşık 50 ppm su içerir. Tortu ise askıda duran pas ve kir parçacıkları olabileceği gibi yakıtın oksidasyonu sırasında oluşan ve yakıt içinde çözünmeyen bileşiklerden de kaynaklanabilir (Mishra ve Goswami, 2018).

Yakıt içeriğinde bulunan nem ve su yakıt pompası ve enjektör parçalarının zarar görmesine sebep olur (Keskin, 2005). Biyodizel içeriğinde su miktarının fazla olması taşıma ve depolanmasında oksitlenmeye ve bakteri oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle biyodizelde çamur oluşumuna ve asitleşmeye etki etmektedir (Demir, 2006; Erol, 2006; Eryılmaz, 2009).

Ham biyodizelin saflaştırılması için kullanılan yöntemler üç kategoriye ayrılmaktadır; yenilikçi yöntemler, kuru yıkama ve ıslak yıkama. Basit ve etkili ıslak yıkama yöntemleri, su, su ile organik çözücüler veya mineral asit ile su kullanarak uygulanmaktadır. Bu yöntemler metanol, sabun, gliserol ve çeşitli hidrofobik bileşenleri verimli bir şekilde giderebilmektedir. Ancak bu yöntemlerin birkaç dezavantajı bulunmaktadır. İlk aşamada deiyonize su kullanıldığı için süreç sonucunda atık su oluşur ve bu da arıtılması gereken önemli bir hacim anlamına gelir. Birkaç yıkama adımının ardından biyodizel ve suyun ayrılması ve biyodizelin kurutulması gerekir. Bu nedenle ıslak yıkama yöntemlerinin yer, zaman ve enerji açısından yoğun yöntemler olduğu söylenebilir (Sander ve diğ., 2018).

Kiss ve Ignat, (2012) yaptıkları çalışmada metanol-su-gliserol karışımı için tek ekipmanla ayırma yapabilen bir DWC (Dividing-Wall Column) tasarlamışlardır. Bu sistemle metanol üst fazdan, su yan akımdan ve gliserol alt fazdan alınmaktadır. Çalışma sonucunda enerji tüketiminde yaklaşık %27, toplam yıllık maliyette ise yaklaşık %25 azalma elde etmişlerdir.

Yamane ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada ham biyodizelden artık metanolün uzaklaştırılması için kapalı devre kabarcık sıyırma özellikli sistem kurmuşlardır. Ham biyodizel ısıtılmış bir reaktöre alınarak gözenekli bir dağıtıcıdan verilen hava/azot gazının küçük kabarcıklar hâlinde sıvı fazdan geçirilmesiyle metanolün gaz fazına taşınması sağlanmış, metanolce zengin gaz akımı düşük sıcaklıklı bir yoğunlaştırıcıya yönlendirilerek metanolün yoğunlaştırulup toplanması ve ardından metanolce fakirleştirilmiş gazın tekrar reaktöre döndürülmesiyle gaz dolaşımı kapalı çevrim olarak işletilmiştir. Metanol derişiminin azalmasına bağlı olarak biyodizel içinde çözünmüş potasyum, gliserol ve sabunların bir kısmının tortu hâlinde çöktüğü, bu tortunun fiziksel ayırma işlemleriyle uzaklaştırıldığı, son aşamada ise biyodizelden iz metanol ve iyonik safsızlıkların giderilmesi amacıyla aktif kil veya iyon değıştirici reçine ile adsorpsiyon uygulanarak ürünün EN 14214 standardına uygun hâle getirildiğı ve yüksek saflıkta biyodizel elde edildiğı bildirilmiştir.

Transesterifikasyon sonrasında biyodizelden gliserin, alkol ve katalizör kalıntılarının ayrıştırılması gerekmektedir. Farklı biyodizel saflaştırma yöntemleri, avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.13'te verilmiştir (Nur ve diğ., 2024).

Tremblay ve diğ., (2008) biyodizel üretiminde metanol tüketimini azaltmak ve ürün saflığını artırmak için sürekli çalışan bir membran reaktör sistemi kullanmışlardır. Reaksiyon sonunda karışım seramik membran üzerinden geçirilerek YAME açısından zengin permeat fazı ile metanol/gliserol açısından zengin polar faz ayrıştırılmıştır. Polar fazla farklı oranlarda reaktöre geri beslenmiştir. Böylece metanol tüketiminin azaltılması, reaksiyon ve ayırma basamaklarının tek bir ekipmanda birleştirilmesi ve sürekli işletmeye uygun, enerji ve maliyet açısından daha verimli bir biyodizel üretim sürecinin elde edilebilmesi çalışmanın başlıca avantajları olmuştur.

Çizelge 2. 13. Biyodizel saflaştırma metotları (Nur ve diğ., 2024)

Metot	Alt yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Verim	Çevresel Etkisi
Islak yıkama		Daha temiz son ürün Yüksek düzeyde basitlik Düşük başlangıç kurulum maliyeti	Zaman alıcı Yüksek enerji gereksinimi Yüksek üretim maliyeti Düşük biyodizel verimi	>90	Yüksek (artırılmaz ise)
Kuru yıkama	Damıtma	Yüksek saflıkta biyodizel üretir Geniş bir kirletici yelpazesini uzaklaştırabilir	Yüksek karmaşıklık Yüksek maliyet Düzenli bakım gerektirir Yüksek karbon emisyonu	100	Orta
	Adsorpsiyon	Yüksek düzeyde basitlik İşletme kolaylığı Adsorbanın rejenerasyonuna imkân verir	Adsorbanın dikkatli seçilmesini gerektirir Kirlenmiş adsorbanın bertarafı gerekir	>95	Düşük
	Membran ayırma	Yüksek seçicilik Yüksek çok yönlülük Sürekli işletim	Membran tıkanması oluşumu Ölçeklenebilirlik sınırlı Yüksek enerji gerektirir Yüksek üretim maliyeti	90-95	Düşük
	Çözücü destekli kristalleşme	Yüksek seçicilik Optimizasyon potansiyeli	Çözücünün dikkatli seçilmesini gerektirir Yüksek karmaşıklık	98-99	Orta

Sinichi ve diğ., (2017) yaptıkları çalışmada sarı haldan unundan 2-propanol ile yağ çıkarmışlardır. Yağ ve 2-propanol karışımını direkt kullanarak metil ester ve 2-propanol sürecinde 2-propanolü vakum altında buharlaştırma ile geri kazanmışlardır.

Carlucci (2022) biyodizel üretiminde alkolü verimli kullanmak için reaktif distilasyon ve sürekli prosesleri önermiştir. Konvansiyonel sistemlerde ayrı ekipman ve enerji gerektiğini ancak distilasyonlu/sürekli sistemlerde bu ihtiyacın azaldığını belirtmiştir.

Miyuranga ve ark. (2022) çalışmalarında transesterifikasyon sonrası metanol geri kazanımı yapmışlardır. Reaksiyon sonrası numuneye 70°C’de basit damıtma uygulamışlardır. Geri kazanılan metanolün saflığı GC-MS ile ölçülerek %92,5 bulunmuştur. Ticari metanolün saflığı %98,5 olmasına rağmen geri kazanılan metanolden biyodizel üretiminde verim alındığı ve yeniden kullanıma uygun olduğu belirtilmiştir.

Philip ve diğ. (2014) biyodizel üretiminde metanolün geri kazanımı için simülasyon çalışması yapmışlardır. bileşenlerin uçuculuk farkına göre kolon içinde ayrıldığı distilasyon, sıvı fazdaki uçucu bileşenin bir kolon boyunca buharla sıyrıldığı striping, karışımın basınç veya sıcaklığının ani değiştirilmesiyle kısmi buharlaşmanın sağlandığı tek kademeli flaş ve bu işlemin art arda iki kez uygulandığı çift kademeli flaş üniteleri enerji ve maliyet açısından değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, en yüksek metanol

geri kazanım oranı ve saflığının distilasyon ve striping ile elde edildiği, ancak özellikle distilasyonun en yüksek enerji tüketimine sahip olduğu ortaya konmuştur.

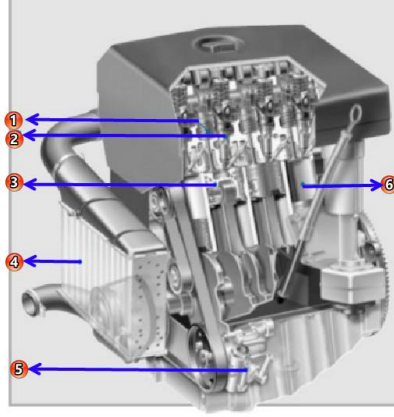
2.2.2.4. Dizel ve biyodizel yakıt özellikleri

1824 yılında Fransız bilim adamı Nicolas Léonard Sadi Carnot, dizel motorların çalışma prensibini araştırmıştır. 1832 yılında Carnot öldükten sonra Herbert Akroyd Stuart ve Rudolf Diesel, dizel motorların çalışma prensiplerini araştırmışlardır (Akbal, 2013).

Dizel motorların temelini oluşturan Carnot, havanın önceden yüksek basınç altında sıkışması ve aynı anda yakıtın da enjekte edilmesi gerektiği fikrini ortaya atmıştır. Carnot'un öne sürdüğü bir diğer önemli öneri ise yanma odası duvarlarının soğutulması gerektiğidir (Demiröz, 2010).

Rudolf Diesel, 1892 yılında yanma odasında kullanılacak havanın sıkıştırılmasından oluşan sıcaklığın yakıtın alevlenme sıcaklığından fazla olduğunu gösterdiği makinesiyle ilk patentini almıştır (Akbal, 2013).

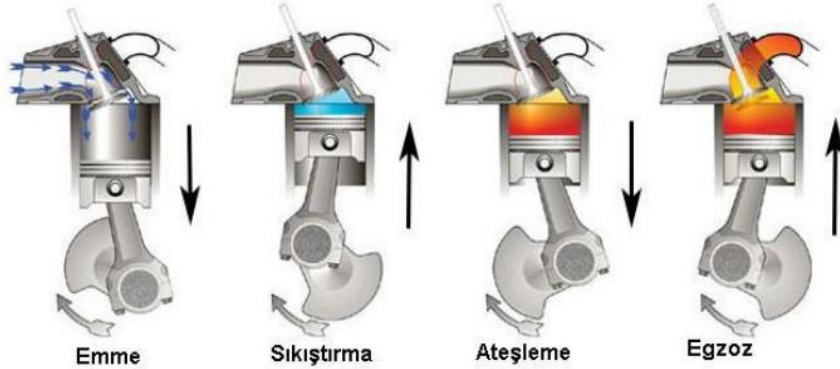
1922'de Robert Bosch dikkatini dizel motora çevirmiştir. Bosch, dizel motora yönelik manyetolar ve bujiler gibi belirli aksesuar parçalarının yüksek hacimli hassas üretimi için benzer şekilde uygun parçalar üretmeye yönelmiştir. Dizel motorlar için söz konusu aksesuar parçaları yakıt enjeksiyon pompaları ve nozüllerdir. Rudolf Diesel, yakıtı direkt enjekte etmek için ihtiyaç olan nozülleri ve yakıt enjeksiyon pompalarını bulamamıştır. Yakıtı ölçmek ve atomize etmek yalnızca pompa ve nozül ile yapılacağı için nozüllerin oldukça küçük çıkış açıklıklarına sahip olması gerekiyordu. Bosch'un geliştirmek istediği enjeksiyon pompalarının, yalnızca o dönemde mevcut motorların gereksinimlerini değil, aynı zamanda gelecekteki motorlu taşıtların dizel motorlarının gereksinimlerini de karşılaması gerekiyordu. Robert Bosch 28 Aralık 1922'de bu gelişmeye başlanması kararı alınmıştır. Geliştirmeyi planladığı yakıt enjeksiyon pompası için tek tek pompa elemanları arasındaki küçük farklılıklar ile az miktarda yakıtı bile enjekte edebilmeyi amaçlamıştır. 1927'de yakıt enjeksiyon pompasının ilk numunesi üretildi. Daha büyük miktarlarda ve iki, dört ve altı silindirli motorlara yönelik versiyonlar, numunelerin Bosch'ta zorlu testlerden ve pratik kullanımda başarılı bir şekilde geçmesinin ardından 30 Kasım 1927'de Bosch tarafından onaylanmıştır. 1929'un başında Bosch pompasının doğrudan enjeksiyonlu dizel motora dahil edilmesiyle delik tip nozüller eklenmiştir (Reif, 2014).



Şekil 2. 23. Birim enjektör sistemli otomobil dizel motoru örneği (Reif, 2014)

Şekil 2.23'te verilen dizel motor örneğinde; 1. Valf dişlisi, 2. Enjektör, 3. Piston pimi ve biyel kolu ile piston, 4. Ara soğutucu, 5. Soğutma sıvısı pompası, 6. Silindir' i göstermektedir (Reif, 2014).

Dizel motorlarda yanma sırasında dizel yakıt-hava karışımının oluşturduğu basınç, pistonu aşağıya iterek ve krank milini döndürerek iş yapar. Bir dizel motor önce emme sonra sıkıştırma daha sonra ise ateşleme ve egzoz olmak üzere dört farklı döngü ile çalışmakta olup Şekil 2.24'te gösterilmiştir (Parlak, 2017).



Şekil 2. 24. Dört zamanlı dizel motorun gösterimi (Parlak, 2017)

Yakıt oluşturma tasarımı açısından dizel motorlar Direkt Püskürtmeli Motor ve Endirekt Püskürtmeli Motor olarak iki çeşittir. Endirekt püskürtmeli motor sisteminde ana yanma odasına bağlı bir ön yanma odası yer almaktadır. Sıkıştırma esnasında, silindir merkezli ön yanma odası yönünde meydana gelen hava akımı, ön yanma odasında yoğun bir hava hareketi oluşturur. Gerçekleşen hava hareketi, ön yanma odasına püskürtülen yakıtın hava ile karışımının kısa sürede oluşmasını sağlayarak ön yanma odasında yanma

meydana gelir. Yanmanın oluşturduğu yüksek sıcaklık ve basınç vasıtasıyla yanma ön yanma odasından ana yanma odasına doğru devam eder. Direkt püskürtmeli motorlarda yanma odası tek bir bölmeden oluşur ve piston yüzeyinde bir oyuk bulunur. Bu oyuk, yanma için gerekli hava hareketlerinin oluşmasına yardımcı olur. Emme kanalına hava hareketlerini iyileştirmek için bazı motorlarda helisel şekil verilmektedir. Emme aşamasında helisel şekilli giriş hattından aktarılan hava dönme hareketi gerçekleştirir, dönme hareketi sıkıştırma anında piston üzerinde yer alan oyuk aracılığıyla güçlendirilir. Yanma, yakıtın yüksek basınçlı yanma odasına enjektör yardımı ile püskürtülmesiyle başlatılır. Endirekt püskürtmeli motorlara göre direkt püskürtmeli motorlar daha etkin ve yakıt tüketiminin az olmasından dolayı son dönemlerde daha rağbet görmektedir. Direkt püskürtmeli motorlara göre endirekt püskürtmeli motorların yakıt kalite duyarlılığı azdır (Knothe ve diğ., 1997).

Dizel yakıtlar ham petrolün kademeli damıtılmasından elde edilmektedir. Kaynama noktası 180-370°C arasında değişen hidrokarbonlar içermektedir. Benzin ortalama 500°C'de tutuşurken dizel yakıt yaklaşık 350°C'de (alt limit 220°C) tutuşmaktadır. Dizel yakıtlara olan artan talebi karşılamak için rafineriler, termal ve katalitik parçalama ürünleri gibi dönüşüm ürünleri eklenmektedir. Bunları elde etmek için büyük ağır yağ moleküllerinin parçalanması gerekmektedir (Reif, 2014).

Dizel yakıtın en iyi yanma koşullarını elde etmek için aşağıdaki özelliklere sahip olması gerekmektedir;

- Yüksek setan sayısı
- Düşük kaynama noktası
- Düşük yoğunluk ve viskozite
- Düşük aromatik bileşikler (özellikle poliaromatik bileşikler) içeriği
- Düşük sülfür içeriği

Biyodizelin yanma kalitesini etkileyen parametreler; hammaddenin yağ asidi içeriği, üretim prosesi, üretim sürecinde kullanılan kimyasallar ve proses şartları şeklinde sıralanabilir. Dizel motorlarda sorun olmadan kullanımı için reaksiyonun tamamlanması, gliserol, katalizör ve alkolün uzaklaştırılması, SYA'nın olmaması gibi parametrelerin kontrolü gerekmektedir.

Biyodizelin hammadde içeriğini belirleyen en önemli parametreler ester içeriği, yoğunluk, su içeriği, partikül madde (PM), SYA, kükürt, fosfolipit ve iyot sayısıdır. Hammaddede su bulunması durumunda esterleşme reaksiyonunun tamamlanmamasına

ve sabun oluşumuna neden olur. Hammaddede yer alan PM çalışma öncesi filtrelenmelidir. Hammaddenin magnezyum ve kalsiyum içermesi durumunda fosfolipitler emülsiyon oluşturmaktadır. Degumming yapılarak bu fosfolipitler giderilebilir. Bitkisel yağda kükürt içeriğine rastlanmasa da hayvansal yağ içeriğinde tüy ve deriden kaynaklanan kükürt bulunabilir. Doymamış ve doymuş yağ asitleri içeriğine göre iyot değeri değişmektedir. Hayvansal yağların içeriğinde iyot değeri düşüktür fakat düşük sıcaklıklarda donma riski vardır (Demir, 2006; Eryılmaz, 2009).

Biyodizel kalitesindeki iyileşmeler küresel olarak geliştirilmektedir. Biyodizel, farklı kaynak, özellik ve kalitelere sahip farklı ölçekli tesislerden üretildiğinde motor performansının sorunsuz bir şekilde sağlanması için biyodizel kalitesinin standartlaştırılması gerekmektedir (Balat ve Balat, 2010). Biyodizelin özellikleri ve niteliklerinin uluslararası biyodizel standartlarına uygun olması gerekmektedir. Biyodizel yakıtı için Amerikan Malzeme Test Standartları (ASTM 6751) veya Avrupa Birliği (EN 14214) Standartları kullanılmaktadır (Atadashi ve diğ., 2010). Bu standartlar haricinde Almanya (DIN 51 606), Avusturya (ON) ve Çek Cumhuriyeti'nden (CSN) standartlarında mevcuttur (Lin ve diğ., 2011).

Ester içeriği, bir biyodizel içerisindeki yağ asidi esterlerinin kütlece yüzdesidir (w/w) (Fournier, 2017). Ester içeriği biyodizelin üretildiği hammaddeye göre değişmektedir. Bazı hammaddelerden elde edilen biyodizelin doymamış ester içeriği yüksek miktarda iken bazılarında düşüktür. Biyodizel prosesinde en önemli nokta esterleşme reaksiyonunun tam olarak gerçekleştirilmesidir (Eryılmaz, 2009).

Setan sayısı sıkıştırma sonucunda basınç ile sıcaklık değeri artan havaya enjekte edilen yakıt için tutuşabilme göstergesidir. Dizel motorlarda yakıt, alevleme olmadan yüksek sıcaklık ve basınç ile tutuşabildiği için setan sayısı oldukça önemlidir. Motorun çalışması yakıtın istenilen zaman aralığında tamamen yanabilmesine bağlıdır. Setan sayısı yetersiz ise yakıt uygun zaman diliminde yanamaz ve genişleme esnasında pistonlara uygun miktarda itme gücü sağlayamaz. Setan sayısı büyük dizel motorlarda düşüktür ve motor verimliliğinin artmasına neden olur. Küçük hacimli motorların motor hızı büyük hacimli motorlara göre daha fazladır ve yakıtın 1/100 ile 1/1000 sn arasında tutuşabilmesi için setan sayısının yüksek olması gerekmektedir. Yakıttaki setan sayısı silindirlerin büyüklüğüne ve motorun hızına uygun olmalıdır (Parlak, 2017). Motor çıkış gücünü, emisyonları, yanma davranışını ve alevlemeyi etkileyen özelliklerden biri olan setan sayısı düşük sıcaklık şartlarında otomatik alevlemeyle bağlantılı bir özelliği ifade etmektedir (Jeong ve Kang, 2000). Yakıtın setan sayısı düşük ise yakıt içeriğinin

yoğunluğu artar, sıcaklık ve sıkıştırma yükselmeye başladığında kendiliğinden tutuşamaz, motorda sese neden olur (Krieger, 1966). Yakıtın setan sayısı yüksek ise yakıtın tutuşabilirliği ve tutuşma niteliğinde yüksektir. Yüksek setan sayısı sayesinde motorun düşük sıcaklıklarda çalışma performansı artar, motordan gelen ses azalır, daha yumuşak çalışır ve emisyon değerleri daha uygun seviyeye gelir. Setan sayısı yüksek yakıt kullanıldığı zaman hava yakıt karışımı yanma odasında daha az sıkıştırma oranlarında tutuşabilir ve patlama şartlarına ulaşabilmeyi sağlamış olur. Dolayısıyla motor sesi ve emisyon miktarlarında düşüş olur. Yakıtlarda setan sayısının çok düşük ya da çok yüksek olması birçok soruna neden olabilmektedir. Çok düşük ya da çok yüksek setan sayılı dizel yakıtlı motorların faaliyetini etkilediği için bu sayının belirli aralık içerisinde olması gerekmektedir. Dizel motorlarda setan sayısı 40-60 aralığında olmalıdır (Robert Bosch GmbH, 2005). Biyodizel için setan sayısı ASTM D6751 için ≥ 47 , EN 14214 için ≥ 51 olması gerekmektedir. Yüksek derecede doymuş hammaddelerden üretilmiş biyodizelin setan sayısı ise 60 veya daha yüksek olabilmektedir. Soya, ayçiçeği, mısır ve kanola bazlı biyodizelin setan sayısı 47'ye yakındır (Edition, 2008).

Akışkanların akma meyiline karşı gösterdikleri dirence viskozite denir. Kinematik ve dinamik viskozite olarak ikiye ayrılmaktadır. Birim miktarda sıvının, birim uzaklıktaki iki nokta arasında birim ivme ile hareket edebilmesi için gereken kuvvete dinamik viskozite denir. Kinematik viskozite, akışkanın dinamik viskozitesi ile yoğunluğunun oranı olarak tanımlanmaktadır (Parlak, 2017). Kinematik ve dinamik viskozite farklı kavramlardır. Sıvının kayma hızı ile uygulanan kayma hızı arasında ki oran dinamik viskozitedir. Kinematik viskozite ise bir akışkanın yerçekimi altında akışa karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Acaroğlu, 2003). Dizel yakıt, yakıt sistemini yağlama yetenekleri nedeniyle yüksek viskoziteye sahiptir. Bu nedenle enjektör deliklerinden püskürtülerek silindirde eşit bir şekilde yayılması için vizkozitesinin düşük olması gerekmektedir. Yüksek viskozite, yanma sırasında kirletici emisyon gazlarının artmasına neden olmaktadır. Vizkozitesi yüksek olan yakıtlar silindir duvarlarına çarptıktan sonra parçalanabilir ancak silindir içinde kolayca parçalanamazlar. Bu, yanma veriminin azalmasına ve egzoz emisyonlarının artmasına neden olur (Parlak, 2017). Düşük vizkozite değeri, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yakıt spreyinin hızlı bir şekilde atomizasyonunu kolaylaştırmakta ve kontak gecikmesini azaltmaktadır. Yüksek vizkozite değeri mekanik yakıt pompalarında ise yakıt kaçağı kayıplarının azalmasını sağlar ve dolayısıyla daha fazla enjeksiyon basıncına neden olur (Giakoumis ve Sarakatsanis, 2018). Vizkozitenin yüksek olması yakıtın hızını azaltarak pompanın

çektığı gücün artmasına ya da doğru çalışmamasına neden olabilir. Vizkozitesi yüksek olan yakıtların püskürtülmesi zordur ve tutuşması gecikmeli gerçekleşmektedir (Murugan ve diğ., 2008). Biyodizelin vizkozite değerinin yüksek çıkması transesterifikasyon reaksiyonunun tam olarak gerçekleşmediğini göstermekte olup biyodizelin içinde gliserolün bulunduğunu gösterir. Transesterifikasyon sonrası yıkama işleminde gliserol giderilmekte ancak yeterli miktarda giderilemeyen gliserol viskozitenin artışına sebep olmaktadır (Eryılmaz, 2009).

Birim miktar başına yakıtın harcadığı enerji ısı değer olarak ifade edilmektedir. Yakıtın ısı değeri, yakıt tüketimini azaltır ve enjeksiyon sisteminin kullanım ömrünü uzatır. Isı değerinin birimi kJ/kg veya kcal/kg'dır. Referans bir sıcaklığa karşılık yanma ürünlerinin entalpi değerlerinin bulunması ve yakıtın tüketim miktarına bölünmesi yoluyla bulunmaktadır (Dorado ve diğ., 2003).

Yakıtın kaynama sıcaklığı aralığına distilasyon denir. Yakıt içeriğinin %80 buharlaşması T80 olarak gösterilir. Yakıtın vizkozitesi, setan sayısı gibi birçok parametreye distilasyon özelliği etki etmektedir. Yakıtın distilasyon niteliği kalite kontrolü aşamasında da önem arz etmektedir. %50 veya %15 distilasyon sıcaklığı, yakıtın %50'sinin veya %15'inin buharlaştığı zamandaki sıcaklığını gösterir. Distilasyon sıcaklığı %15 iken motorun soğuk havalarda çalıştırılması, hızlanması gibi özellikler etkilenir. HC'lar içeren yakıtların yanması zordur. Yakıtın maksimum distilasyon sıcaklığının azalması, yakıtın içerisinde yer alan HC'ların yoğunluğun ve vizkoziteninde azalmasını sağlar (Uzun, 2020).

Distilasyon sıcaklığının maksimum değeri arttırılırsa yakıtın aromatik içeriğinde artmış olur. Bu nedenle setan sayısı, viskozite, yoğunluk ve distilasyon nitelikleride değişir (Erwin, 1992).

Yakıtların aromatik içeriği fazla ise T90 sıcaklığı ve yoğunluğu fazla, setan sayısı az olmaktadır. Yakıtın aromatik içeriği azaldığında emisyonlar, NO_x ve yakıt sarfiyatında belirli bir miktar azalma olduğu ifade edilmiştir (Changlin ve diğ., 2000).

Yoğunluk, yakıtın birim hacmine düşen kütlesidir. Yakıtın yoğunluğu; aromatik içerik, distilasyon niteliği, setan sayısı ve vizkozitesi ile direkt ilgili olup partikül ve NO_x emisyonu oluşumunda önemli bir etkidir. Yoğunluk arttırılırsa püskürtülen yakıtın kütlesinin ve emisyonunun artmasına neden olacaktır. Yoğunluk azaltılırsa tüketilen yakıt miktarı arttırmaktadır (Uzun, 2020). Ham petrol kaynaklı ürünlerin belirlenmesi için uygulanan parametrelerden biri de özgül ağırlıktır. 15,6°C'de aynı sıcaklıklardaki yakıtın yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranıdır. Özgül ağırlığı yüksek yakıtlar yüksek ısı

enerji ve karbon oranına sahiptir (Safgönül ve diğ., 2013). Yoğunluk değeri düştükçe yakıt o kadar kolay tutuşur (Haşımoğlu, 2005). Esterleştirme işleminde gliserin yeterince uzaklaştırılmazsa yoğunluk değeri yüksek çıkmaktadır (Akyarlı ve diğ., 2004).

Sıvı buharının parlayabilir bir atmosfer oluşturduğu en düşük sıcaklık parlama noktası olarak ifade edilir (Yavuz ve diğ., 2008). Yakıtın ateşleme kaynağına maruz kaldığında tutuşabileceği en düşük sıcaklık parlama noktasıdır. Parlama noktası, yakıtın depolama kriterlerinde, nakliyesinde ve alınması gereken önlemlerde etkindir (Li ve diğ., 2005). Dizel yakıtı karşı biyodizelin üstünlüklerinden biri parlama noktasının daha yüksek olmasıdır. Bu özellik sayesinde taşıma ve depolama güvenliğinde artmaktadır. Ancak biyodizelin üretim aşamasında kullanılan alkolün tam olarak uzaklaştırılamaması parlama noktasının daha düşük olmasına neden olur (Eryılmaz, 2009).

1 gr biyodizel içerisinde bulunan SYA'yı nötralize edebilmek için gereken KOH miktarının mg birimi ile ifadesi asit sayısıdır (Erol ve diğ., 2006; Demir, 2007). Asit sayısı özelliği yakıtın kullanım ömrü hakkında bilgi vermekle birlikte yakıtın kalitesine dair bir göstergedir. Biyodizelin asit sayısı Amerika ve Avrupa biyodizel standartlarında 0,5 mg KOH/gr olarak belirtilmektedir (Agarwal, 2007; Mishra ve Goswami, 2018). Üretilmiş olan biyodizelde asit değerinin standart değerlerin üstünde olması yakıt sistemlerinde korozyona ve tortuya neden olacağı için yakıt filtre ve pompasının zarar görmesine neden olacaktır (Tyson, 2001).

Kül içeriği yakıtın içinde bulunan aşındırıcı katılar, katalizör kalıntıları ve çözünebilir metal sabunları gibi inorganik kirleticilerin miktarını tanımlar. Biyodizel yakılır ve tamamen tutuşturulup yandıktan sonra, mevcut sülfatlanmış kül yüzdesini belirlemek için sülfürik asitle muamele edilir (Mishra ve Goswami, 2018).

Biyodizel içerisinde kül, katı formda aşındırıcı parçalar ve tam olarak giderilmemiş katalizör şeklinde olabilmektedir. Bunlar yakıt pompası, enjektör, segman ve pistonlarda aşınmaya ve motor içerisinde tortuya neden olmaktadır (Eryılmaz, 2009).

Ham petrol işlenirken içeriğinde yer alan kükürt yeterli miktarda giderilmezse yanma esnasında kükürt oksijen ile reaksiyona girerek kükürt dioksit (SO_2) veya kükürt trioksit (SO_3) oluşturabilirken açığa çıkan SO_3 gazı ise su (H_2O) ile birleşerek H_2SO_4 açığa çıkarabilmektedir. H_2SO_4 silindir cidarlarını aşındırarak motorun arızalanmasına neden olabilir (Goering, 1992).

Motorlu taşıtlardan açığa çıkan yağ buharı, aşınma parçaları, kurşun içerikli bileşikler, asbestler, egzoz gazı, pas ve korozyondan kaynaklanan sıvı, katı, gaz atıklarla çevreyi kirliliğine neden olmaktadır. Egzoz gazı içeriğinde yer alan HC, CO, NO_x ve PM

emisyonları bu kirleticilerin en yoğun ve zararlı olanlarıdır. NO_x ve PM emisyonları en çok dizel motorları nedeniyle oluşmaktadır (Işıksoluğu, 1997). Petrol türevlerinin hepsinde kükürt bulunmaktadır. Ham petrolün işlendiği rafineri endüstriyel tesislerinde kükürt oranının belirli değerlere getirilmesine çalışılır. Dizel yakıtta bulunan kükürt, emisyon oluşumuna neden olur (Doğan ve diğ., 2012).

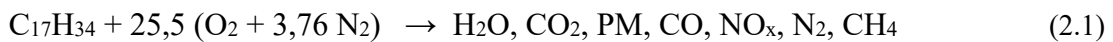
Dizel motorlardan toplu taşıma ve ağır yük vasıtalarında yaygın olarak faydalanılmaktadır. Bu nedenle, dizel motorların meydana getirdiği emisyonların azaltılması çok önemlidir (Haşimoğlu ve diğ., 2002).

Dizel motorlardan kaynaklanan kirleticilerin en önemlileri;

- CO₂
- NO_x
- Kükürtlü bileşenler
- HC
- Aldehitler
- Partiküllerdir (Borat ve diğ., 1992).

Teorik olarak bir kg yakıtı yaklaşık on beş kg hava ihtiyacı vardır. Dizel motorlarda gerekli olan hava ihtiyacı, miktarının 1,5 ila 2 katı miktarda hava ile yanma sağlanmaktadır. Yanma olayı ile kirletici bileşenler oluşmaktadır. Uygulamadaki hava ve yakıt oranı, teorik olarak tam yanma miktarından daha yüksek olsa da silindirin içinde yer alan yakıt damlaları için ihtiyaç olan hava sağlanamamaktadır. Dolayısıyla eksik yanma meydana gelerek is oluşmaktadır (Haşimoğlu ve diğ., 2002).

Denklem 2.1'de motorin-hava karışımlarının yanması sonucunda oluşan ürünleri gösterilmektedir (MEB, 2011).



Egzoz emisyonu dizel motorun tipi, tüketilen yakıt ve kalitesi, sistemdeki emisyon kontrolü ve sürüş şartlarına göre değişebilmektedir. Benzinli motorlarla karşılaştırıldığında dizel motorların PM ve NO_x emisyonları daha yüksektir. Dizel motorların düşük hava sıcaklıkları ve yüksek yanma sıcaklıkları, NO_x ve PM üretimini artırır. Ancak benzinli motorlara göre HC ve CO üretimi daha azdır (Akbal, 2013).

Çanakçı ve Van Gecrpen (2003b) bitkisel ve %9 SYA içeren hayvansal yağ ile üretilen biyodizelleri saf halde motorin ile karıştırarak dört silindirli, turboşarjlı bir dizel

motorda test etmişlerdir. Tam yük ve 1400 d/d koşullarında bu biyodizellerin yakıt özelliklerinin benzer olduğu ancak hayvansal yağın setan sayısının daha yüksek olduğu belirtmişlerdir.

Bousbaa ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada hayvansal yağdan üretilen biyodizelin sıkıştırılmalı ateşleme motorda deneyerek dizel ile arasındaki yanma özelliklerini incelemişlerdir. Atık hayvansal yağdan elde edilen yakıtın dizele kıyasla toplam yanmamış yakıt ve NO_x emisyonlarının az olduğu belirtmişlerdir.

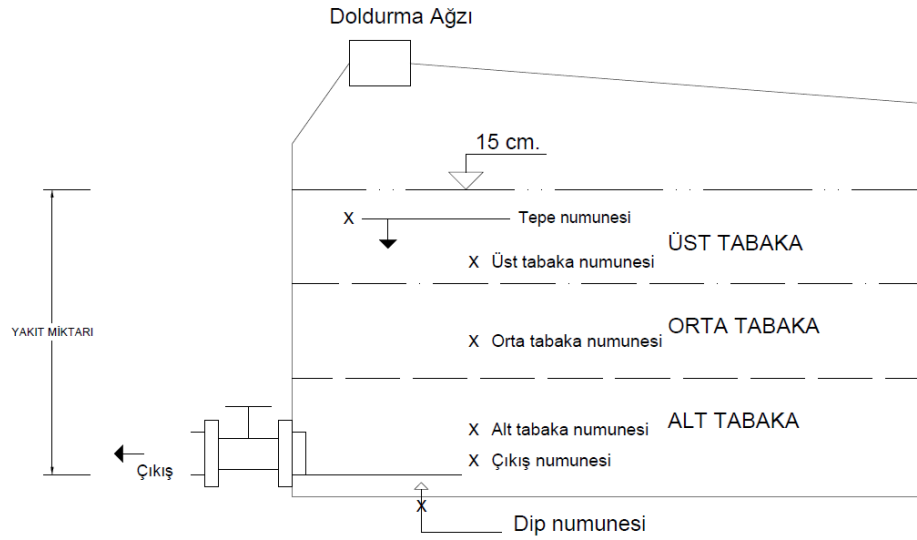
Kumar ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmada hayvansal yağı ısıtıttıktan sonra 2.8 kW ve 1500 rpm devirde çalışan tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motora enjekte etmişlerdir. Hayvansal yağ dizelden daha düşük ateşleme gecikmesi ve kısa yanma süresi, daha yüksek tepe basıncı ve daha düşük duman emisyonları oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Behçet ve diğ. (2015) balık ve tavuk yağından ürettikleri biyodizelin %20'sini dizel yakıt karıştırmışlardır. Performans ve emisyon analizi için karışımı tek silindirli dizel motorda test etmişlerdir. Test sonucunda dizel yakıtı göre NO_x emisyonunun ve yakıt tüketiminin arttığını, güç, CO, moment, HC ve CO₂ emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir.

TS EN 14214, Avrupa Standartlar Birliği tarafından belirlenen biyodizel standardıdır. Bu standart, genel olarak DIN 51606 standardını temel alır ve dizel motorlar için %100 konsantrasyonda otomotiv yakıtı olarak kullanılan ya da TS EN 590'da belirtilen özelliklere uygun dizel yakıtlara eklenen biyodizel için gereksinimleri ve test yöntemlerini kapsar (Koç, 2011). Çizelge 2.14'te B100 ve B6-B20 için ABD ve Avrupa standartları verilmiştir (Hoekman ve diğ., 2012).

Biyodizel, soğuk iklim koşullarında uygun depolama kurallarına uyularak en az 6 ay süreyle saklanabilir. Depolama için petrodizel tankları ve ortamları kullanılabilir. Ancak depolamadan önce, tankta su bulunuyorsa mutlaka uzaklaştırılmalıdır. Ayrıca depolama tanklarındaki bakır, pirinç ve bronz bileşenler çelik veya alüminyum malzemelerle değiştirilmelidir. Uzun süre depolanan biyodizel kullanmadan önce pH seviyesi ölçülmeli ve 7 ile 10 arasında kalması sağlanmalıdır. Aynı şekilde uzun süre depolanan biyodizelin kullanılmadan önce özgül ağırlığının 0,9'un üzerinde olup olmadığı kontrol edilmelidir. Biyodizel tankları mümkün olduğunca dolu tutulmalıdır. Bu önlemin amacı biyodizelin hava ile temasını en aza indirmektir. Eğer biyodizel nemli ve sıcak bir iklimde depolanacaksa depo tanklarına katkı maddesi eklemek gereklidir. Biyosit olarak bilinen bu sıvı formdaki zehir depo içerisindeki mikroorganizmaları yok

etmek için kullanılır. Yakıt tankına eklenecek biyosit miktarı 50-60 gr olmalıdır. Bu miktar depo üç kez boşaltılana kadar etkili olmaya devam eder. Eğer dizel motor iki haftadan daha uzun bir süre kullanılmıyacaksa depo yakıtla doldurulmalı ve içine yine 50-60 gr biyosit veya biyostat eklenmelidir. Bakteri gelişimini önleyen biyostat, özellikle ılık ve nemli bölgelerde bakteri üremesini en aza indirmek amacıyla yakıtta periyodik olarak eklenmelidir (Öğüt ve Oğuz, 2006). Yakıt depo tankı ve numune alma noktaları Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2. 25. Yakıt depolama tankı numune alım noktaları (Van Gerpen ve diğ., 2004)

Çizelge 2. 14. ABD ve Avrupa Biyodizel Standartları

Özellik	B100				B6-B20	
	ASTM D6751		EN 14214		ASTM D7467	
	Limit	Metot	Limit	Metot	Limit	Metot
Su ve tortu (hacim %, maks.)	0.05	D 2709	0.05	EN 12937 ^g	0.05	D 2709
Toplam kirleticiler (mg/kg, maks.)			24	EN 12662		
Kinematik viskozite 40°C'de (mm ² /s)	1.9-6.0	D 445	3.5-5.0	EN 3104/3105	1.9-4.1	D 445
Tutuşma noktası, kapalı kap (°C, min.)	130	D 93	101	EN 3679	52	D 93
Metanol (ağırlık %, maks.)	0.20 ^a	D 93	0.20	EN 14110		
Setan sayısı (min.)	47	D 613	51	EN 5165	40	D 613
Bulutlanma noktası (°C)	Rapor ^d	D 2500	Ülkeye özgü ^d	D 2500	Rapor ^d	
Sülfatlanmış kül (ağırlık %, maks.)	0.020	D 874	0.020	EN 3987	0.01	D 482
Toplam alkali içerik (ağırlık %, maks.)						
Grup I metaller Na+K (mg/kg, maks.)			5.0	EN 14538; EN 14108/14109		
Grup II metaller Ca+Mg (mg/kg, maks.)			5.0	EN 14538		
Toplam kükürt (ppm, maks.)	15	D 5453	10	EN 20846	15	D 5453
Fosfor (ppm, maks.)			10	EN 14107		
Asit sayısı (mg KOH/g, maks.)	0.50	D 664	0.50	EN 14104	0.3	D 664
Karbon kalıntısı (ağırlık %, maks.)	0.050	D 4530			0.30	D 524
Serbest gliserin (ağırlık %, maks.)	0.02	D 6584	0.02	EN 14105/14106		
Toplam gliserin (ağırlık %, maks.)	0.24	D 6584	0.25	EN 14105		
Monogliserit (ağırlık %, maks.)			0.70	EN 14105		
Digliserit (ağırlık %, maks.)			0.20	EN 14105		
Trigliserit (ağırlık %, maks.)			0.20	EN 14105		
Damıtma (T90 °C, maks.)	36 ^c	D 1160	360	EN 3405	343	D 86
Bakır şerit korozyonu (3 h 50°C'de, maks.)	No. 3	D 130	No. 1	EN 2160	No. 3	D 130
Oksidasyon kararlılığı (110°C, dk, min.)	3	EN 14112	8	EN 11192		
Linolenik asit metil esteri (ağırlık %, maks.)			12.0	EN 14103		
Poliansatüre yağ asidi metil esterleri (ağırlık %, maks.)			1.0	EN 14103		
Ester içeriği (ağırlık %, min.)			96.5	EN 14103		
İyot sayısı (g I ₂ /100 g, maks.)			120	EN 14111		
Yoğunluk (kg/m ³)			860-900	EN 3675	6-20 vol. %	D 7371
Aşınma sınırı, yağlayıcılık @60°C WSD (µm, maks.)					520	D 6079
Soğukta bekleme filtrasyonu (saniye, maks.)	360 ^f	D 7501				

a: Alternatif olarak, parlama noktası >130 °C olmalıdır.

b: ULSD ile harmanlama için. Diğer yakıtlar için daha yüksek kükürt seviyelerine izin verilir.

c: Atmosferik eşdeğer T-90 noktası

d: Düşük sıcaklık özellikleri kesin olarak belirtilmemiştir ancak yakıt tedarikçisi ile alıcı arasında kararlaştırılmalıdır.

e: Bu sınır yakıtın alt %10'luk fraksiyonuna dayanmaktadır.

f: Düşük sıcaklıktaki (<-12°C) dizel harmanlarında kullanım için en fazla 200 sn

g: EN 12937 yöntemi, sedimenti değil toplam suyu (g/g biriminde) ölçer

3. MATERYAL VE YÖNTEM

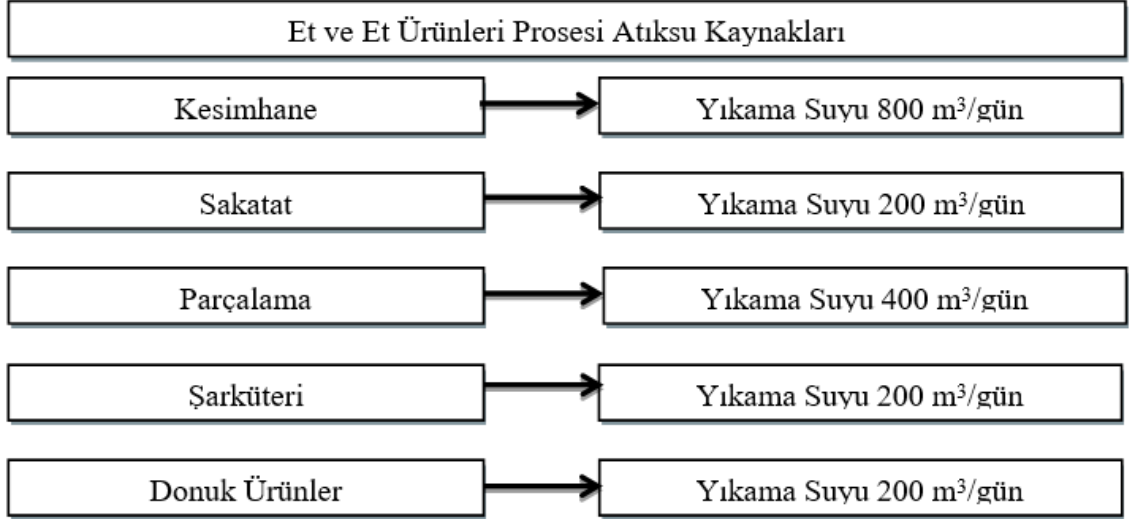
3.1. Entegre Et ve Süt Ürünleri Üretimi Tesis

Çalışma yıllık ortalama 700.000 ton çiğ süt, 6.000 adet büyükbaş ve 180 adet küçükbaş işlenen entegre et ve süt ürünleri üretim tesisinde yürütülmüştür. Çalışma yapılan tesise ait üretilen ürünler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Et ve et ürünleri üretimi proseslerinden yaklaşık 1000 m³/gün ve kesimhaneden 1800 m³/gün atıksu oluşmakta, kan ayrı toplanmakta ve atıksu arıtma tesisine gelmemektedir. Süt ve süt ürünleri tesisinde ise 2000 m³/gün atıksu oluşmakta olup her iki prosesten çıkan atıksu birleşerek atıksu arıtma tesisine gelmektedir. Şekil 3.1’de et ve et ürünleri üretimi prosesinden, Şekil 3.2’de süt ve süt ürünleri prosesinden oluşan atıksu kaynakları ve miktarları verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Et ve süt ürünleri

Bölüm	Ürün
Et ve Et Ürünleri	Büyükbaş Sakatat, Küçükbaş Sakatat, Büyükbaş Karkas, Küçükbaş Karkas, Parça Et, Parçalanmış Büyükbaş Eti, Kuzu Kemikli Et, Marine Et, Yaşlandırılmış Et, Tütsülenerek Kurutulmuş Parça-Dilimli Et, Map Kıyma Köfte, Salam, Sosis, Sucuk, Pastırma, Jambon, Kavurma, Pişmiş – Donuk Cheeseburger Köfte, Döner, Pişmiş Döner, Pizza
Süt ve Süt Ürünleri	UHT ve Pastörize Süt, Yoğurt, Ayrar, Beyaz Peynir, Kaşkaval, Blok Peynir, Künefe Peyniri, Dil Peyniri, Kaşar, Taze Peynir, Süzme Peynir Süt Tozu, Süzme Yoğurt, Kefir, Tereyağı, Eritme Peynir, Peynir Altı Suyu Tozu, Lor Peyniri, Krema



Şekil 3. 1. Et prosesi atıksu kaynakları



Şekil 3. 2. Süt prosesi atıksu kaynakları

3.2. Materyal

Ham atık yağın atıksudan ayrılması için entegre et ve süt ürünleri üretim tesislerinden ayrı proses hattı ile gelen atıksuların birleştiği ilk kanalizasyon sistemine yağ ayırma havuzu inşa edilmiştir (Şekil 3.3). Tesisten gelen atıksuyun içerisinde yer alan atık hayvansal yağ, yağ ayırma havuzunda su yüzeyinde 24 sa süresince biriktirilerek reaktöre aktarılmaya hazır hale getirilmiş ve aktarılmıştır.

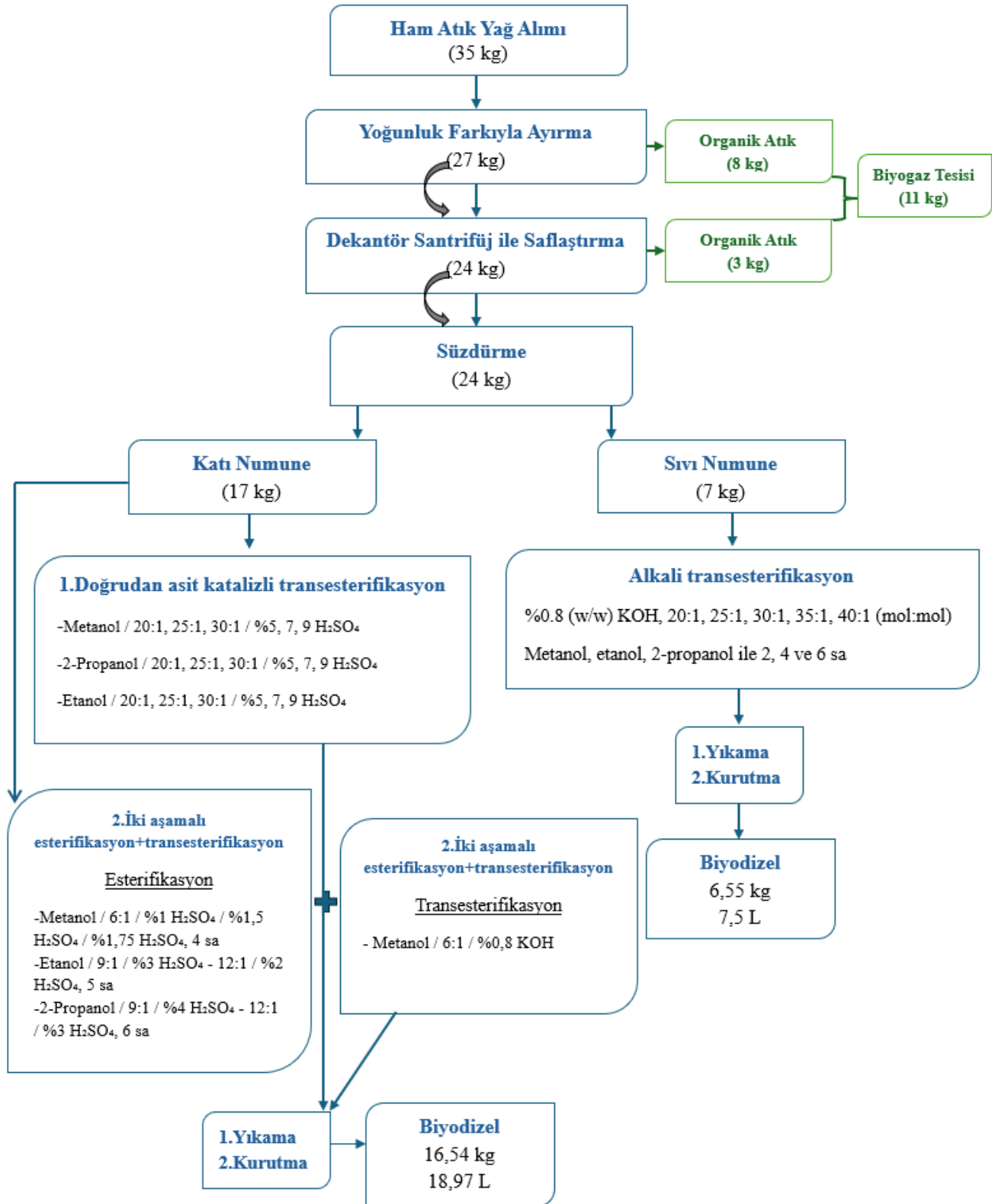


Şekil 3. 3. Yağ ayırma havuzu; A: Havuz dış görünüm, B: Havuz iç görünüm

Çalışmada biyodizel eldesinde kullanılan esterifikasyon ve transesterifikasyon işlemlerinde Merck MA 32,04 g/mol, %99,8 saflıkta, yoğunluğu 0,792 g/cm³ (20°C) ve kaynama noktası 64,5°C olan metanol (CH₃OH), Merck MA 46,07 g/mol, %99,8 saflıkta, yoğunluğu 0,790-0,793 g/cm³ (20°C) ve kaynama noktası 78,3°C olan etanol (C₂H₅OH), ve Merck MA 60,1 g/mol, %98 saflıkta, yoğunluğu 0,78 g/cm³ (20°C) ve kaynama noktası 82,4°C olan 2-Propanol (C₃H₈O), katalizör olarak yoğunluğu 2,04 g/cm³ (20°C), molekül ağırlığı 56,11 g/mol Merck pelet potasyum hidroksit (KOH), Honeywell Fluka marka sülfürik asit, ISOLAB MA 74,12 g/mol, ≥ %99,5 saflıkta, yoğunluğu 0,71 g/cm³ (20°C) olan dietileter, Merck MA 86,18 g/mol, yoğunluğu 0,66 g/cm³ (20°C), ≥ %99,9 saflıkta heksan, Merck yoğunluğu 1,03 g/cm³ (20°C), pH <1 (H₂O, 20°C) ve 2 M HCl, Merck MA 294,18 g/mol potasyum dikromat (K₂Cr₂O₇), Merck MA 296,65 g/mol, yoğunluğu 6,47 g/cm³ (20°C) cıva sülfat (HgSO₄), Merck MA 311,8 g/mol, yoğunluğu 5,45 g/cm³ (20°C) gümüş sülfat (Ag₂SO₄) kullanılmıştır.

3.3. Yöntem

Biyodizel üretimi için entegre et ve süt ürünleri üretim tesisinden oluşan atıksudaki yağlı ham atıktan yağ eldesi çalışması dört, yağdan biyodizel üretimi çalışması iki adımdan oluşmuştur. Bu adımlara ait iş akış şeması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3. 4. İş akış şeması

3.3.1. Yoğunluk farkıyla ayırma

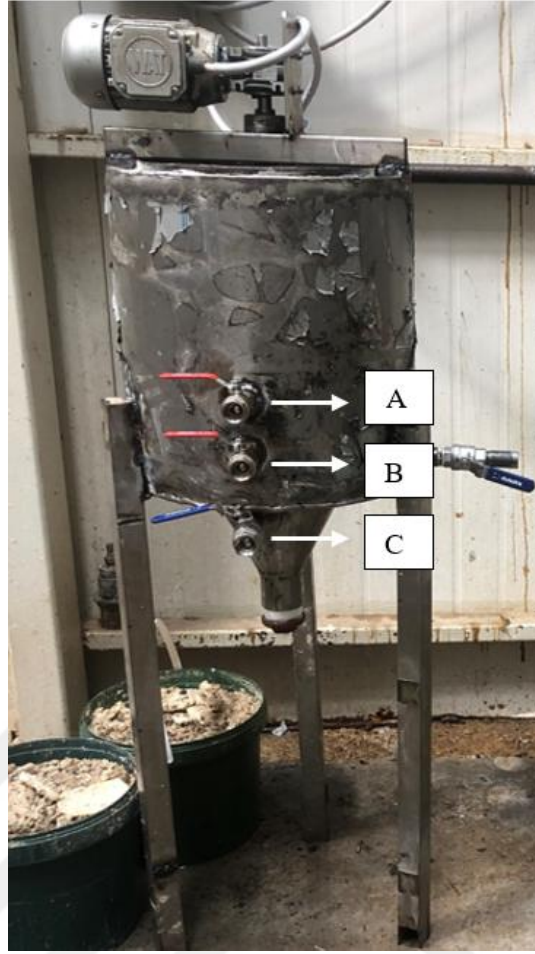
Atıksudan alınan yağlı ham atıkta bulunan yağ partikül madde ve sudan ayırmak için reaktör inşa edilmiştir (Şekil 3.5). Bu reaktör, su, katı ve partikül maddelerin alt ve orta fazlarda kalması ile yağın üst faza çıkmasını sağlayacak şekilde ısıtma ve karıştırma cihazları ile tasarlanmıştır. Yağın erime sıcaklığını izlemek için bir termometre, uygun karıştırmayı sağlamak için bir karıştırıcı ve karıştırıcıyı çalıştırmak için bir motor ile donatılmıştır. Katı maddelerin daha verimli bir şekilde çökebilmesini sağlamak için reaktörün altına bir huni yerleştirilmiştir. Faz ayırma sürecini takip etmek için örnekleme ve kontrol vanaları, içeriği ısıtmak için buhar separatörü reaktöre dahil edilmiştir. Yoğunluk farkıyla ayırma deneyleri 12 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Atıksudan ayrıştırılmış ham atık yağ reaktöre alınmış, eritmek için giriş buharı 140°C'ye ayarlanmış ve reaktör ceketini ilgili set noktasına (40/60/80/100°C) sabitlenmiştir. Yağ yumuşamaya başlayınca karıştırıcı devreye alınmış ve yaklaşık 40 dk karıştırma yapılmıştır. Her koşulda set sıcaklığına ulaşıldığında giriş buharı sıcaklığı koruyacak şekilde daha düşük bir değere indirilmiş, ısıtıcı ve karıştırıcı durdurularak reaktör 60°C'de çökelmeye bırakılmıştır. Çökelme başlangıcından itibaren alt, orta ve üst fazlardan birer sa arayla numune alınarak santrifüj tüpleriyle sabit faz ayrımı elde edilesiye kadar izlenmiştir. Tüm set noktalarında karıştırma süresi yaklaşık 40 dk olup çökelme 1-6 sa aralığında sa'lik numuneyle takip edilmiştir (Şekil 3.6).

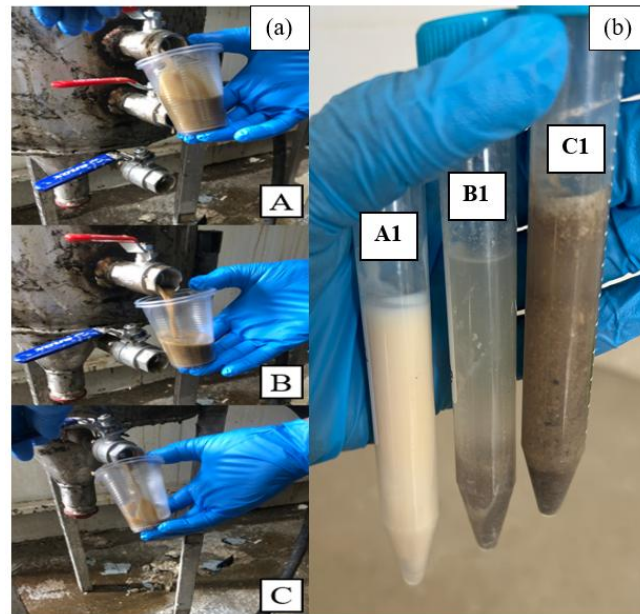
Oluşan fazlar:

- Alt faz; çökebilen katılar
- Orta faz; çökemeyen partiküller ve su
- Üst faz; çalışmada kullanılacak yağ

Bu işlem sonucunda elde edilen üst faz dekantör santrifüje aktarılmıştır.



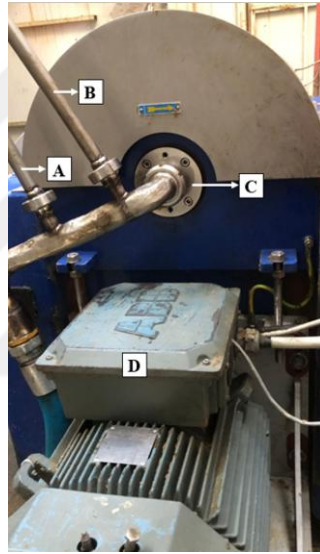
Şekil 3. 5. Yoğunluklara göre ayırma reaktörü; A: Üst faz yağ alma valfi, B: Çökemeyen partikül ve su valfi, C: Çöken katı maddeler valfi



Şekil 3. 6. (a) A: Üst faz yağ numunesi alımı, B: Çökemeyen partikül ve su numunesi alımı, C: Çöken katı madde numune alımı. (b) A1: Santrifüjlenmiş üst faz numunesi, B1: Santrifüjlenmiş orta faz numunesi, C1: Santrifüjlenmiş alt faz numunesi

3.3.2. Dekantör santrifüj

Entegre et ve süt ürünleri üretim prosesinin atıksuyundan ayrılan hayvansal yağın yoğunluk bazlı ayırma işleminde elde edilen üst faz yağ dekantör santrifüje alınmıştır (Şekil 3.7). Çalışmada kullanılan dekantör santrifüj iki çıkışlı olup; birinci çıkış biyodizel için girdi malzemesi olarak kullanılacak süpernatant numunesini, ikinci çıkış ise kalan posayı vermektedir (Şekil 3.8). Dekantörde, merkezkaç kuvvetine tabi tutulan hayvansal yağ, trigliserit, yağ asitleri, su ve katı atık yoğunluklarına göre ayrılarak sonraki adım filtrasyonda sıvı ve katı yağ bileşenlerinin ayrılması sağlanmıştır. Santrifüj işlemi 27 kg numune için 3dk sürmüştür.



Şekil 3. 7. Dekantör santrifüj hammadde giriş noktası, A: İç hazne yavaş yıkama, B: Tambur çeperi hızlı yıkama, C: Hammadde girişi, D: Ana tambur motoru



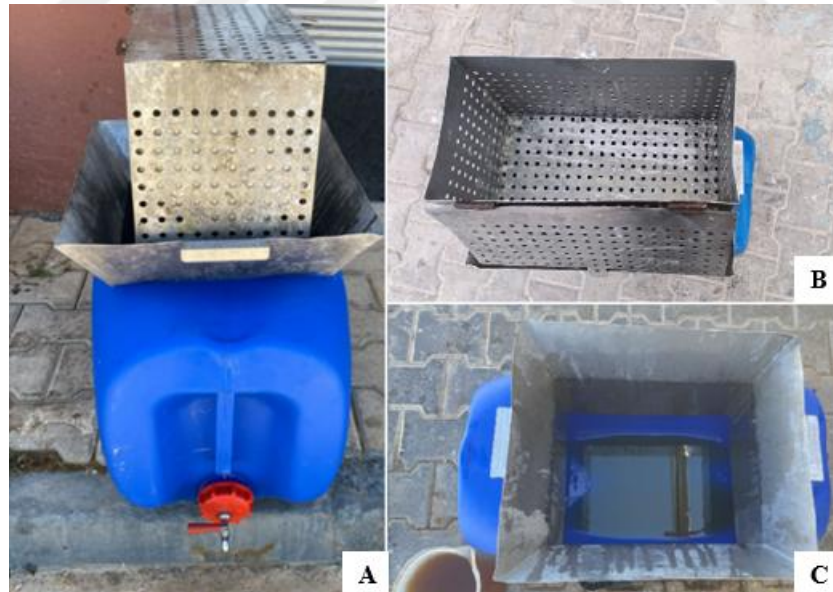
Şekil 3. 8. A: Süpernatant numunesi çıkışı, B: Posa çıkışı

3.3.3. Çöktürmeli filtrasyon

Dekantör santrifüjden alınan üst faz süpernatant numunesi oda sıcaklığında çöktürmeli filtrasyon işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 3.9). Filtrasyon işlemi, santrifüj işlemiyle ısınmış numunenin sıcaklığı oda sıcaklığına geldikten sonra sıvı faz filtreye yerleştirilerek yerçekimi etkisi ile huniye süzdürülmüştür (Çizelge 3.2). Filtrasyon ünitesinde yağ iki ana forma ayrılmıştır. Santrifüj etkisi ile ayrılmış düşük yoğunluklu sıvı yağ fazı filtre deliklerinden geçerek ayrı elde edilmiştir. Diğer form ise daha yoğun bileşenlerin zenginleşmesiyle filtrede çökelmiş olarak kalan katı yağ fazıdır.

Çizelge 3. 2. Filtrasyon ünitesi filtre ölçüleri

Malzeme	Ölçüler	Birim
Süzgeç Hunisi Girişi	45x37	cm
Süzgeç Hunisi Çıkışı	35x27	cm
Süzgeç (18 kg kapasiteli)	40x20x24	cm
Delik çapı	8	mm
Bekletme süresi	5	sa



Şekil 3. 9. Filtrasyon süreci; A: Filtrasyon kurulumu, B: Hammadde filtrasyonu için kullanılan filtre, C: Sıvı fazın filtreden geçtiği bölüm

3.3.4. Biyodizel üretimi

Atıksudan ayrıştırılan yağlı ham atıktan ön işlemlerle elde edilen sıvı ve katı yağdan biyodizel üretimi yapılmıştır. Sıvı yağ için transesterifikasyon, katı yağ için doğrudan asit katalizli ve iki aşamalı esterifikasyon-transesterifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Sıvı yağ ile yapılan çalışmada, %3,4 SYA içeriği yönetilebilir bir değerde olduğu ve nem kontrolü sağlandığı için (%99,8 yağ içeriği) yüksek alkol:yağ oranı ile transesterifikasyon verimi incelenmiştir.

3.3.4.1. Sıvı yağdan biyodizel üretimi

Alkol ile transesterifikasyon reaksiyonlarında kullanmak üzere sıvı yağa sırasıyla %SYA, bağlı yağ asidi ve serbest yağ asidi kompozisyonu analizleri yapılmıştır. Ortalama MA bağlı yağ asidi ve serbest yağ asidi kompozisyonunun ağırlık ortalaması yöntemiyle hesaplanmıştır. Bağlı yağ asitlerine ait ortalama yağ asidi mol kütlesi üç ile çarpılmış, gliserolün katkısı eklenmiş ve esterleşme sırasında ayrılan üç mol suyun kütlesi stokiometrik olarak çıkarılmıştır. Serbest yağ asidi katkısı ise trigliserit ortalaması ve serbest yağ asidi ortalamasının kütle paylarına göre birleştirilmiştir ve MA 865,5 g/mol olarak hesaplanmıştır.

Sıvı yağdan transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretimi çalışmasında alkol olarak metanol, etanol ve 2-propanol kullanılmıştır. Üç alkol için de katalizör miktarı yağın ağırlıkça %0,8 oranında KOH ile sabit tutularak 20:1, 25:1, 30:1, 35:1 ve 40:1 alkol:yağ mol oranlarında her biri için 2, 4 ve 6 sa'lik reaksiyon süreleri uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.10'da verilmiştir.

2-propanol ile biyodizel üretiminde öncelikle sıvı yağ 80°C'ye ısıtılıp 2-propanolün kaynama noktası 82,3°C değerinin altında çalışılmıştır. Dijital ısıtıcı ve karıştırıcı ekipmanı ile sıcaklık 80±2°C'de sabit tutulup karıştırıcı ile yağ karıştırılarak sıcaklığın her yerde eşit olması sağlanmıştır. Sıcaklık dijital termometre ile takip edilmiştir. Alkol-katalizör karışımı 80°C sıcaklıktaki sıvı yağa yavaş bir şekilde dökülmüştür. Ağzı kapalı geri soğutuculu sistem tamamlanıp 80°C sıcaklık ve 1200 rpm karışım değerlerinde sabit tutularak reaksiyon başlatılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda biyodizel ile yan ürün olarak gliserol oluşmuştur. Oluşan gliserol yoğunluk farkından yararlanılarak biyodizelden ayrılmıştır. Aynı koşullarda sadece

sıcaklık değiştirilerek kaynama noktası $78,37^{\circ}\text{C}$ olan etanol için $75\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de, kaynama noktası $64,7^{\circ}\text{C}$ olan metanol için $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de reaksiyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 10. Transesterifikasyon deney düzeneği

Reaksiyon sonunda alkol distilasyon ile geri kazanılmıştır. Faz ayrımı sonrası elde edilen biyodizel içerisinde kalan sabun, katalizör ve alkol kalıntılarının uzaklaştırılması için saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işlemi 3 kez tekrarlanmıştır. Yıkama sonrasında biyodizel içerisinde bulunan suyun uzaklaştırılması için ısıtıcı karıştırıcı üzerinde ağzı açık cam beherde yaklaşık $110\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 45-60 dk ısıtılarak kurutma yapılmıştır (Miyuranga ve diğ., 2022). Biyodizelin atmosferik kaynama noktası aralığı $330-357^{\circ}\text{C}$ olduğu için kurutma işleminde biyodizel kaybı olmamıştır (Alleman ve diğ., 2016).

3.3.4.2. Katı yağdan biyodizel üretimi

Alkol ile transesterifikasyon reaksiyonlarında kullanmak üzere sıvı yağa sırasıyla %SYA, bağlı yağ asidi ve serbest yağ asidi kompozisyonu analizleri yapılmıştır. Ortalama MA bağlı yağ asidi ve serbest yağ asidi kompozisyonunun ağırlık ortalaması yöntemiyle hesaplanmıştır. Bağlı yağ asitlerine ait ortalama yağ asidi mol kütlesi üç ile çarpılmış, gliserolün katkısı eklenmiş ve esterleşme sırasında ayrılan üç mol suyun kütlesi stokiometrik olarak çıkarılmıştır. Serbest yağ asidi katkısı ise trigliserit ortalaması ve

serbest yağ asidi ortalamasının kütle paylarına göre birleştirilmiştir ve MA 887,5 g/mol olarak hesaplanmıştır. Katı yağın esterifikasyon ve transesterifikasyon reaksiyonları için alkol:yağ mol ve alkali-asit oranlarındaki gerekli miktarlar MA'dan yola çıkılarak hesaplanmıştır.

Biyodizel üretiminde alkol olarak metanol, etanol ve 2-propanol kullanılmıştır. Asit katalizli transesterifikasyon işleminde metanol, etanol ve 2-propanol ile paralel işlemler uygulanarak 20:1, 25:1 ve 30:1 alkol:yağ mol oranlarında ve her oran için katalizör olarak %5, %7, %9 (w/w) H₂SO₄ kullanılmıştır. Metanol için 60±2°C ve SYA değerinin %1'in altına düştüğü optimum süre olan 48 sa ile reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda kıyaslama yapabilmek için sadece sıcaklık değiştirilerek kaynama noktası 78,37°C olan etanol için 75±2°C, kaynama noktası 82,3°C olan 2-propanol için 80±2°C'de asit katalizli transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

İki kademeli esterifikasyon-transesterifikasyon işleminde ilk basamakta; SYA değeri ikinci basamakta kullanılacak baz katalizörün sabunlaşmasını önleyip ester verimini arttırmak için alkol metanol, etanol ve 2-propanol, katalizör H₂SO₄ kullanılarak %1'in altına düşürülmüştür. Metanol ile yapılan esterifikasyonda 6:1 alkol:yağ mol oranı tercih edilmiştir, çünkü bu oranla 98,1 verim elde edilmiş olup daha yüksek oranlarda alkol kullanımı sarfiyatı artacağı için gerekli görülmemiştir. Katalizör miktarı %1, %1,5 ve %1,75 (w/w) H₂SO₄ denenmiş ve optimum dönüşüm koşulları 60°C'de %1 (w/w) H₂SO₄ ve 4 sa'lik reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. SYA değeri %1'in altına düştükten sonra ikinci adımda transesterifikasyon 6:1 metanol:yağ mol oranı ve %0,5 (w/w) KOH ile 60°C'de 2 sa ile gerçekleştirilmiştir.

Etanol ve 2-propanol ile yapılan iki kademeli esterifikasyon-transesterifikasyon işleminin esterifikasyon basamağında 6:1, 9:1 ve 12:1 alkol:yağ mol oranları; %1, %2, %3 ve %4 (w/w) H₂SO₄ katalizör miktarları ve 4, 5, 6 sa'lik reaksiyon süreleri denenmiştir. Bu oran ve koşullar seçilirken ön denemelerde verim alınan aralık dikkate alınmış, farklı katalizör miktarları ve sürelerin verime etkilerini görmek amacıyla yapılmıştır. Etanol ile yürütülen iki kademeli esterifikasyon-transesterifikasyon işleminin esterifikasyon basamağında reaksiyonlarda SYA değerinin %1'in altına özellikle 9:1 alkol:yağ oranı, %3 (w/w) H₂SO₄ ve 12:1 alkol:yağ oranı %2 (w/w) H₂SO₄, 75°C, 5 sa'lik koşullarda indirilebildiği görülmüştür. Benzer şekilde 2-propanol ile yapılan çalışmalarda da aynı koşullarda SYA değerinin 9:1 oranında %4 (w/w) H₂SO₄ ile 12:1 oranında %3 (w/w) H₂SO₄, 80°C'de 6 sa'lik reaksiyonlar ile SYA'nın %1'in altına düşürülebildiği belirlenmiştir. Etanol ve 2-propanol ile yapılan iki kademeli esterifikasyon-

transesterifikasyon işleminin esterifikasyon basamağında SYA değerleri %1'in altına düştükten sonra her ikisi içinde transesterifikasyon basamağında 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 (w/w) KOH, 60°C, 2 sa ile gerçekleştirilmiştir.

3.4. Analiz

Biyodizel üretim aşamasında kullanılmak üzere alkol, katalizör ve yağ miktarlarının tartımları için OHAUS Adventurer Pro markalı hassas terazi; 200 g üzerindeki tartımlar için ise CAS ED-H markalı terazi kullanılmıştır. Reaksiyon sıcaklıklarının kontrolünde TFA 30.1021 marka dijital termometre kullanılmıştır. Yoğunluk farkı ile ayırma ön işleminde numune takibi için ELEKTRO-MAG M 415 E markalı santrifüj ve ISOLAB marka santrifüj tüpleri kullanılmıştır. Biyodizel üretimi sürecinde reaksiyonların yürütülmesi aşamasında ısıtma ve karıştırma işlemleri için DLAB MS-H280-Pro markalı ısıtıcılı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Faz ayrımları ISOLAB marka 1000 mL hacimli ayırma hunisi ile yapılmıştır. Yağ içeriği tayini, filtrasyon sonrası elde edilen katı ve sıvı yağ numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup bu analizlerde kullanılan yöntemler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Yağ ve atıksu analizlerinde uygulanan metotlar

Parametre	Birim	Metot
Yağ Asidi Kompozisyonu (C14:0, C14:1, C15:0, C15:1, C16:0, C16:1, C17:0, C17:1, C18:0, C18:1n9t, C18:1n9c, C18:2n6t, C18:2n6c, C20:0, C20:1, C18:3n6)	% (m/m) (toplam yağ asidine göre)	TS EN ISO 12966-2 (ISO 12966-2:2017) TS EN ISO 12966-4 (ISO 12966-4:2015)
Yüzde serbest yağ asidi	%	TS EN ISO 660
Doymamış yağ	% (m/m) (toplam yağ asidine göre)	Hesaplama yöntemi (Yağ asidi profiline göre; toplam doymamış yağ asitleri yüzdesi)
Doymuş yağ	% (m/m) (toplam yağ asidine göre)	Hesaplama yöntemi (Yağ asidi profiline göre; toplam doymuş yağ asitleri yüzdesi)
Yağ Tayini	% (m/m)	Gravimetrik (sokslet) metot, kantitatif, TS 2664
Asitlik Tayini	mg KOH/g	Titrimetrik metot, kantitatif, TS EN ISO 660
Katı Madde Tayini	%	Gravimetrik metot, SM 2540 B
Uçucu Katı Madde Tayini	%	Gravimetrik metot, SM 2540 E
Biyolojik Oksijen İhtiyacı Tayini	mg/L	5 Günlük BOİ testi, SM 5210 B
Kimyasal Oksijen İhtiyacı Tayini	mg/L	Açık reflaks-titrimetrik metot, SM 5220 B
Yağ ve Gres Tayini	mg/L	Gravimetrik (sokslet) metot, SM 5520 D

Hammadde ve hammaddeden elde edilen katı ve sıvı yağ numunelerinin yağ asidi kompozisyonu, Gaz kromatograf (GC) kullanılarak belirlenmiştir. Bağlı yağ asidi kompozisyonu belirlemek için TS EN ISO 12966-2:2017’de tanımlanan alkali katalizli transmetilasyon ile lipidler YAME dönüştürülmüştür. 0,1 gr yağ 2 ml n-heksanda çözülüp 0,2 ml 0,5 mol/l sodyum metoksit/metanol çözeltisi ilave edilmiş ve 25°C’de 5 dk karıştırılmıştır. Karışım 0,2 ml %1 (v/v) asetik asit/metanol ile nötralize edilmiş, 1 ml saf su eklenerek faz ayrımı sağlanmıştır. Üst faz susuz Na₂SO₄ ile kurutulmuş ve 2 ml viallere aktarılmıştır. Elde edilen metil esterler TS EN ISO 12966-4:2015 kapsamında kapiler GC-FID ile analiz edilmiş olup RT-2560 (100 m x 0,25 mm x 0,20 µm) kolon kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak azot, inlet 220°C ve dedektör 280°C’de çalışılmış ve numune Shimadzu marka otomatik enjeksiyon ünitesine sahip GC cihazına enjekte edilmiştir. SYA kompozisyonunda ise 0,1 gr yağ 5 ml n-heksanda çözülüp 0,5 mol/l sulu KOH ile 1 dk çalkalanarak SYA’lar potasyum sabunu halinde sulu faza alınmıştır. Sulu faz 2 mol/l HCl ile pH<2’ye asitlendirilmiş, oluşan SYA’lar n-heksanla 3×2 ml (sulu fazı üç kez, her seferinde 2 ml n-heksanla) ayrı ayrı ekstrakte edilerek geri kazanılmış ve bu fraksiyon TS EN ISO 12966-2:2017’ye göre ısıtmalı asit katalizli metanoliz ile YAME’e dönüştürülmüştür (%5 (v/v) H₂SO₄/metanol, 80°C, 1 sa). Reaksiyon sonrası 2 ml n-heksan ve 1 ml su ile fazlar ayrıştırılmış, içinde kalabilecek suyu gidermek için üst faz kurutulduktan sonra 2 mL viallere aktarılmış ve metil esterler TS EN ISO 12966-4:2015 kapsamında kapiler GC-FID ile analiz edilmiş olup RT-2560 (100 m x 0,25 mm x 0,20 µm) kolon kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak azot, inlet 220°C ve dedektör 280°C’de çalışılmış ve numune Shimadzu marka otomatik enjeksiyon ünitesine sahip GC cihazına enjekte edilmiştir.

% SYA oleik asit cinsinden titrimetrik metot ile TS EN ISO 660 standardı ile ölçülmüştür. 10 gr numuneye 100 ml %95’lik etanol:dietil eter (v:v) eklenmiştir. Daha sonra fenolftalein (%1’lik etanollü çözelti) ilave edilerek 0,1 N KOH ile titrasyon yapılmıştır. %SYA değeri Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$\% SYA = \frac{V.c.M \times 100}{1000 \times m} \quad \text{Denklem (3.1)}$$

V: KOH sarfiyatı (ml)

c: KOH normalitesi (N)

M: Sonucun ifade edilmesi için seçilen asidin mol başına gram cinsinden molar kütlesi.

Yapılan çalışmada oleik asit cinsinden 282 gr/mol kullanılmıştır.

m: Deney numunesinin ağırlığı (gr)

Yağ tayini analizi, Sokslet ekstraksiyon metodu ile TS 2664 standardı kapsamında yapılmıştır. 5 gr numune ekstraksiyon kartuşuna alınıp 50-70 ml heksan eklenerek ekstraksiyon işlemi Sokslet cihazında 69°C’de 6 sa yapılmıştır. Elde edilen ekstrakt rotavapor yardımıyla yoğunlaştırılmıştır. Numuneler 50 ml kapasiteli krozelere aktarılmış, 103±2°C’de sabit kütleye kadar etüvde kurutulmuştur. Daha sonra desikatörde soğutulup tartım yapılmış ve elde edilen değerler Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır.

$$\%Yağ \text{ İçeriği} = \frac{Son \text{ tartım (gr)} - Kroze \text{ darası (gr)}}{Numune \text{ miktarı (gr)}} \times 100 \quad \text{Denklem (3.2)}$$

Asitlik tayini için yaklaşık 5 gr numuneye 50 ml nötrale edilmiş etanol-eter (1:1, v/v) karışımı ilave edilmiştir. Çözeltiye birkaç damla fenolftalein indikatörü damlatılmıştır. Hazırlanan karışım, manyetik karıştırıcı eşliğinde standartlaştırılmış 0,1 N KOH çözeltisi ile titre edilmiştir. Titrasyona çözelti kalıcı açık pembe renk alana kadar devam edilmiştir. Deney sonunda asitlik değeri Denklem 3.3 ile hesaplanmıştır.

$$Asitlik (mg KOH/g) = \frac{V \times N \times 56,1}{m} \quad \text{Denklem (3.3)}$$

V: KOH sarfiyatı (mL)

N: KOH çözeltisinin normalitesi (N)

56,1: Potasyum hidroksitin eşdeğer ağırlığı (mg/meşd)

m: Numunenin kütlesi (g)

Katı madde tayini için iyi karıştırılmış homojen numuneden $7\pm0,1$ g alınarak kurutma kabına aktarılmıştır. Numuneler $103\pm2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit tartıma gelesiye kadar bekletilmiş ardından desikatörde soğutulup analitik terazide tartılmıştır. Toplam katı madde miktarı Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Katı Madde} = \frac{(M_k - M_b)}{M_n} \times 100 \quad \text{Denklem (3.4)}$$

M_k = Kurutma kabı + kuru kalıntı ağırlığı (gr),

M_b = Boş kurutma kabı ağırlığı (gr),

M_n = Numunenin yağı ağırlığı (gr).

Uçucu katı madde tayini için 105°C 'de kurutma sonrası elde edilen filtre kalıntıları kullanılmıştır. Bu kalıntılar sabit tartıma getirilmiş porselen kroze içinde kül fırınında $550\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta yaklaşık 15-20 dk yakılmıştır. Numune fırından çıkarıldığında doğrudan desikatöre konmamış önce havada bir miktar soğutulmuş daha sonra desikatörde tamamen soğutularak tartılmıştır. 550°C öncesi ve sonrası kütle farkı, uçucu katı madde miktarını vermiştir. Hesaplama Denklem 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Uçucu Katı Madde} = \frac{(M_k - M_b)}{M_k} \times 100 \quad \text{Denklem (3.5)}$$

M_k = 550°C 'ye girmeden önceki kuru kalıntı ağırlığı (gr),

M_b = 550°C sonrası kalan kül ağırlığı (gr).

Biyodizel verimi, ilgili biyodizelin üretildiği yağ numunesinin ağırlığı ve o yağdan üretilen biyodizelin ağırlığı kullanılarak Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır (Odetoye ve diğ., 2021).

$$\text{Verim (\%)} = \frac{\text{Biyodizelin ağırlığı (gr)}}{\text{Kullanılan yağ numunesinin ağırlığı (gr)}} \quad \text{Denklem (3.6)}$$

[2-Propanol/12:1/% $3\text{H}_2\text{SO}_4$ /6 sa + metanol 6:1/% $0,5\text{KOH}$ /2 sa], [Etanol/9:1/% $3\text{H}_2\text{SO}_4$ /5 sa + metanol 6:1/% $0,5\text{KOH}$ /2 sa], [Metanol/6:1/% $1\text{H}_2\text{SO}_4$ /4 sa + metanol 6:1/% $0,5\text{KOH}$ /2 sa] iki aşamalı esterifikasyon-transesterifikasyon işlemiyle elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri için uygulanan test metotları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3. 4. Yakıt özellikleri test metotları

Parametre	Birim	Test Metodu
Ester İçeriği	% (m/m)	EN 14103
Yoğunluk (15°C)	g/cm ³	EN ISO 12185
Kinematik Viskozite (40°C)	mm ² /s	EN ISO 3104
Parlama Noktası	°C	EN ISO 3679
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	°C	EN 14107
İyot Sayısı	g I ₂ /100g	EN 14111
Asit Sayısı	mg KOH/g	EN 14104

{[2-Propanol / 12:1 / %3 H₂SO₄ / 6 sa / 80°C] + [Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 sa / 60°C]}, {[Etanol / 9:1 / %3 H₂SO₄ / 5 sa / 75°C] + [Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 sa / 60°C]}, {[Metanol / 6:1 / %1 H₂SO₄ / 4 sa / 60°C] + [Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 sa / 60°C]} iki aşamalı esterifikasyon-transesterifikasyon işlemiyle elde edilen biyodizellerin setan sayısı (CN) Denklem 3.7 (Sander ve diğ., 2018) ile hesaplanmıştır;

$$CN = 62.2 + 0.017 \times w(C12:0) + 0.074 \times w(C14:0) + 0.115 \times w(C16:0) + 0.177 \times w(C18:0) - 0.103 \times w(C18:1) - 0.279 \times w(C18:2) - 0.366 \times w(C18:3) \quad \text{Denklem (3.7)}$$

$w(Cx:y)$ = İlgili ester bileşeninin ağırlıkça yüzdesi

Denklem 3.7’de yer alan katsayılar farklı YAME’lerin biyodizelin SS üzerindeki etkisini temsil eden ampirik regresyon katsayılarıdır. Yapılan çalışmalarla ölçülen SS ile YAME yüzdeleri verilerine en küçük kareler yöntemiyle çoklu doğrusal regresyon uygulanarak model elde edilmiştir. Elde edilen modelde y-kesişimi olarak hesaplanan 62.2 sabit terim olarak kullanılmıştır. Pozitif katsayılar doymuş YAME’lerin CN arttırıcı etkisini göstermektedir. Negatif katsayılar ise doymamış YAME’lerin CN düşürücü etkisini göstermektedir. Zincir uzunluğu yüksek doymuş yağ asitleri CN arttırırken çift bağ içeren doymamış yağ asitleri CN azaltmaktadır. Bu katsayılar biyodizel veri setinde deneysel ölçümler ile çoklu doğrusal regresyon analizi ile türetilmiştir (Sander ve diğ., 2018).

Yağlı ham atığın alındığı atıksuya ait BOİ analizinde atıksu numunesine aşı eklenerek 300 mL BOİ şişelerine oksijenlenmiş seyreltme suyu ile aktarılmıştır. Karşılaştırma için kör numune sadece seyreltme suyu ile doldurulmuş şişe ile hazırlanmıştır. Tüm şişeler hava kabarcığı bırakmadan kapatılarak 20±1°C’de karanlıkta 5 gün inkübe edilmiştir. Başlangıçta ve 5. gün sonunda çözünmüş oksijen (ÇO) ölçülmüş

ve geçerli sayım için her şişede ≥ 2 mg/L oksijen azalımı ve ≥ 1 mg/L son ÇO şartı takip edilmiştir. Denklem 3.8 ile hesaplanmıştır.

$$BOİ5 (mg/L) = \frac{(D1-D2)-(B1-B2) f}{P} \quad \text{Denklem (3.8)}$$

D1: Aşılı seyrelmiş atık suyun numune hazırlandıktan sonra 15 dk içinde ölçülmüş ÇO değeri (mg/L)

D2: Aşılı seyrelmiş atıksuyun inkübasyondan sonraki ÇO değeri (mg/L) B1: Seyrelmiş aşının hazırlandıktan sonra 15 dk içindeki ÇO değeri (mg/L)

B2: Aşı numunesinin inkübasyondan sonraki ÇO değeri (mg/L)

f = Numunedeki aşı yüzdesinin kontroldeki aşı yüzdesine oranı (D1'deki aşı % / B1'deki aşı %)

P: Seyreltme oranı

Yağlı ham atığın alındığı atıksuya ait KOİ analizinde 50 mL alınan atıksu numunesine HgSO₄ eklenmiştir. Ag₂SO₄ içeren derişik H₂SO₄ ile 0,04167 M K₂Cr₂O₇ ile 2 sa reflaks altında ısıtılmıştır. Soğutulan çözeltide tepkimeye girmeden kalan dikromat, ferroin indikatörü eşliğinde K₂Cr₂O₇'e göre standardize edilmiş (Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O) (FAS) ile titre edilip aynı koşullarda kör deney yapılmıştır. Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır.

$$KOİ (mg/L) = \frac{(A-B) \times M \times 8000}{V} \quad \text{Denklem (3.9)}$$

A: Kör deneyde harcanan FAS (mL)

B: Numunede harcanan FAS (mL)

M: FAS molaritesi (mol·L⁻¹)

V: Analiz edilen numune hacmi (mL)

Yağlı ham atığın alındığı atıksuya ait yağ ve gres tayini için 250 mL atıksu numunesi alınmış ve Soxhlet ekstraksiyon cihazı kullanılarak heksan ile yaklaşık 6 sa ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ekstrakt rotavapor yardımıyla yoğunlaştırılmış, ardından etüvde kurutularak çözücü uzaklaştırılmıştır. Daha sonra kalıntı sabit tartıma gelinceye kadar 103-105°C'de etüvde kurutulmuş ve analitik terazide

tartılmıştır. Aynı işlemler reaktif blank için de uygulanmıştır. Sonuçlar blank değeri düşülerek ve kullanılan numune hacmi esas alınarak Denklem 3.10 ile hesaplanmıştır.

$$Yağ\ ve\ Gres\ (mg/L) = \frac{(M_{son} - M_{boş} - M_{blank}) \times 1000}{V_{numune}} \quad \text{Denklem (3.10)}$$

M_{son}: Son tartım (mg)

M_{boş}: Boş kap tartımı (mg)

M_{blank}: Reaktif blank kütlesi (mg)

V_{numune}: Numune hacmi (mL)



3.5. Maliyet Analizi

Maliyet analizi 100 gr yağ üzerinden her koşulda kullanılan alkol ve katalizörün mol oranlarına göre hesaplanan miktarın birim maliyeti (\$/gr), elektronik ekipmanların çalışma süreleri ve enerji sarfiyatı (kWh), proses aşamalarında elde edilen miktarlar ve koşulların verimi üzerinden yapılmıştır. Her biyodizelin kendi yoğunluğuna göre \$/L birim maliyeti elde edilmiştir. Maliyet hesabında geri kazanılan alkol miktarı tüketim miktarından çıkarılmıştır. Biyodizel üretiminde en düşük maliyetli kimyasallar metanol: 0,0042 \$/gr ve H₂SO₄: 0,0044 \$/g. Etanolun birim maliyeti 0,0062 \$/gr olup metanol ve H₂SO₄'e göre daha yüksektir. 2-propanol: 0,01025 \$/gr ve KOH: 0,0192 \$/gr en pahalı girdiler olarak belirlenmiştir. Enerji girdisi olarak elektriğin maliyeti ise 0,0147 \$/kWh'dır. Metanol ve H₂SO₄ ekonomik açıdan avantajlı girdiler, KOH ve 2-propanol ise maliyet yükünü arttıran girdiler arasında yer almaktadır. Birim hesap tablosu Çizelge 3. 5'te verilmiştir.

Çizelge 3. 5. Birim maliyet hesap tablosu

Adım	Sarfiyat (gr)	İşlem	Birim maliyet (\$)
1	Katalizör*	x	H ₂ SO ₄ : 0,0044 KOH: 0,0192
2	Alkol **	x	Metanol: 0,0042 Etanol: 0,0062 2-propanol: 0,01025
3	Enerji sarfiyatı***	x	0,0147
<i>Toplam maliyet (katalizör+alkol+enerji) = (\$)</i>		/	<i>Üretilen biyodizel (gr)****</i>
<i>Yoğunluk*****</i>		x	<i>Birim maliyet</i>

*İki basamaklı uygulamada asit ve baz için ayrı hesaplanıp toplam sarfiyatı alınmıştır

**Alkol sarfiyatında reaksiyonda kullanılan miktardan geri kazanılan miktar çıkarılmıştır

***Her basamakta kullanılan elektronik ekipmanların çalışma süreleri baz alınmıştır

**** Hesaplanan biyodizelin % verimi üzerinden

*****Birim fiyatı hesaplanan biyodizele ait yoğunluk değeri alınmıştır

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Ham Atık Yağdan Sıvı ve Katı Yağ Üretimi

Tasarlanan reaktör hacmine göre alınan 35 kg'lık ham numunenin 80 ve 100°C'de faz ayrımları gerçekleştirilmiştir. Süre ve miktarlar Çizelge 4.1'de ve faz yüzdeleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Hayvansal atık yağdan biyodizel eldesi için öncelikle atık yağın kullanılabilir forma çevrilmesi gerektiğinden atık yağın içerisinde bulunan yağ harici katı atıklar ve suyun ayrılarak üst fazdan uygun yağ numunesi elde edilmiştir. Atık içeriğinin ayrıştırılması, eritilerek faz ayrımları sağlanarak alt fazda posa, orta fazda su ve çökelmeyen katılar, üst fazda yağ elde edilmesine yönelik yapılmıştır.

Çizelge 4. 1. Yoğunluklarına göre ayırma reaktöründe süre ve yağ geri kazanımı

T (°C)	Erime Süresi (dk)	Erime Sonrası Sedimentasyon Süresi (sa)	Ham Numune (kg)	Elde Edilen Kullanılabilir Üst Faz Miktar (kg)	Üst Fazda Yağ Eldesi (%)
100	20	1,5	35	22-27	63-77
80	25	2	35	20-25	57-71

Çizelge 4.1'deki verilere göre çalışmada 35 kg'lık ham atık yağ reaktörde eritilmiş ve üst fazdan yağ elde edilmiştir. 100°C'de erime 20 dk içinde tamamlanmış, 1,5 sa'lık sedimentasyonun ardından 22-27 kg kullanılabilir üst faz elde edilmiştir; bu miktar 35 kg ham numuneye göre %63-77 yağ eldesine karşılık gelmiştir. 80°C'de ise erime 25 dk sürmüş, 2 sa'lık sedimentasyon sonrasında 20-25 kg üst faz ile verim %57-71 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4. 2. 80°C ve 100°C'de numunenin faz ayırma işlemi sonucunun ağırlıkça % miktarları

	Reaktöre giren ham atık numune ağırlığı (kg)	80°C		100°C	
		Minimum Üst Faz Eldesinde (%)	Maksimum Üst Faz Eldesinde (%)	Minimum Üst Faz Eldesinde (%)	Maksimum Üst Faz Eldesinde (%)
Alt Faz		29	20	28	17
Orta Faz	35	14	9	9	6
Üst Faz		57	71	63	77

Çizelge 4.2'deki verilere göre 80°C'de üst faz %57-71 aralığında, orta faz %9-14, alt faz ise %20-29 arasında değişmiştir. Sıcaklık 100°C'ye çıkarıldığında üst fazın %63-77'ye yükseldiği, orta fazın %6-9 ve alt fazın %17-8 aralığına düştüğü olduğu görülmüştür. Bu durum faz ayrımının 100°C'de daha verimli gerçekleştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.3'te entegre et ve süt ürünleri üretimi proses atıksularının birleşiminden oluşan atıksuyun özellikleri verilmiştir. Atıksuyun KOİ: 3200-4500 mg/L ve BOİ: 1778-2500 mg/L aralık değerleri suyun protein, makine/ekipman/alan temizliğinden gelen kan kalıntısı ve karbonhidrat gibi maddelerden kaynaklanan organik içeriğe sahip olduğunu göstermektedir. Yağ-gres: 500-600 mg/L ve TAKM: 700-1000 mg/L değerleri atıksuyun yüksek miktarda partikül ve yağ içerdiğini göstermektedir. pH: 4,5-8,5 aralığında olması ise süt fabrikasından gelen laktozun laktik aside dönüşümü gibi fermentasyon süreçlerinin ve CIP (Clean In Place), hem et hem süt fabrikasından gelen makine/ekipman/alan temizliğinde kullanılan kimyasalların atıksuyun pH aralığını genişlettiğini göstermektedir.

Çizelge 4. 3. Ham atıksuda analiz edilen parametreler

Parametre	Birleşmiş Akım (Et Proses+Süt Proses Atıksuyu)	Birim
KOİ	3200-4500	mg/L
BOİ	1778-2500	mg/L
pH	4,5-8,5	-
TAKM	700-1000	mg/L
Yağ-Gres	500-600	mg/L

Sıcaklığın artmasıyla lipidlerin oksidasyon hızıda artmaktadır. Bu artış ile birlikte lipidlerin oksidasyonu sonucu oluşan hidroperoksit, aldehit/keton gibi ürünlerinde oluşma hızı artmaktadır (Philipp ve diğ., 2023; Zhuang ve diğ., 2022). Oil ve diğ. (2024) sığır ve tavuk yağlarıyla yaptıkları ısıtma yaşlandırma çalışmalarında süre ve sıcaklık arttıkça oksidasyon göstergesi olan asit değerinin yükseldiğini tespit etmişlerdir. 100°C üzerindeki denemelerde ise SYA ve sabunlaşma riskinin artacağı belirtilmiştir. Lakmini ve diğ. (2022) hayvansal yağ ile 121°C'de yaptıkları çalışmada ise ısıtma süresi arttıkça asit değerinin ve toplam polar bileşiklerin arttığını, doymamış yağ asidinin azalmaya başladığını belirtmişlerdir. Bu nedenle yüksek sıcaklık ham atık yağın faz ayrımını

kolaylaştırsada yağın kimyasal kalitesini düşüreceği için çalışmamızda 100°C'nin üstüne çıkılmamıştır.

Yağın sıcaklıkla ayrılmasında etkin koşul kabul edilen 100°C'de elde edilen orta faz ve alt fazın % KM, UAKM, su ve yağ analiz sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre alt fazın katı madde içeriği %76-84 aralığında bulunmuştur. Orta fazda ise katı madde içeriği %8-13 aralığında ölçülmüştür. Alt fazdaki uçucu katı madde değeri %43-61, orta fazda ise %3-8 aralığında elde edilmiştir. Yağ tayini sonuçlarında ise alt fazda %0,6-0,9, orta fazda %0,5-0,3 aralığında yağ bulunduğu görülmektedir. Bu değerler yağın alt ile orta fazda çok düşük miktarda olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular yoğunluklarına göre faz ayırıştırma tankının yağ ayırmada verimli çalıştığını, yağın üstte, suyun büyük oranda orta kısımda ve katıların altta toplandığını doğrulamaktadır.

Çizelge 4. 4. 100°C'de elde edilen orta faz ve alt faz numunelerin analiz sonuçları

Parametre	Alt faz (%)	Orta faz (%)
Katı Madde	76-84	8-13
Uçucu Katı Madde (% numune)	43-61	3-8
Su İçeriği	23-15	91-86
Yağ	0,6-0,9	0,5-0,3

Çizelge 4.5'te verilen sonuçlara göre 100°C koşulunda 35 kg reaktöre giren yağlı ham atıktan faz ayırıştırma ile elde edilen kullanılabilir yağ 22-27 kg aralığındadır. Elde edilen yağ dekantör santrifüj sonrası 18-24 kg aralığında olup devamında uygulanan çöktürmeli filtrasyonda 5-7 kg sıvı yağ ve 13-17 kg katı yağ elde edilmiştir. Yoğunluk farkıyla ayırma basamağında 35 kg ham atık yağda bulunan 8-13 kg katı madde huni kısmına çökmüş, dekantörden 3-4 kg posa çıkmıştır. Et ve süt ürünleri üretim tesisinden çıkan bu katı atıklar tehlikesiz atık olduğu için biyogaz tesisinde enerji geri kazanımı için geri değerlendirilebilecektir.

Çizelge 4. 5. Reaktöre giren atıktan 100°C'de ayırıştırma aşaması sonrası elde edilen miktarlar

Ham Atık Yağlı Numune Miktarı (kg)	Faz Ayırıştırma Sonrası Elde Edilen Atık Yağ Miktarı (kg)	Dekantör Santrifüj Sonrası Elde Edilen Yağ Miktarı (kg)	Çöktürmeli Filtrasyon Sonrası Elde Edilen Sıvı Yağ Miktarı (kg)	Çöktürmeli Filtrasyon Sonrası Elde Edilen Katı Yağ Miktarı (kg)
35	22-27	18-24	5-7	13-17
%100	%63-77	%51-68	%14-20	%37-49

Sığır yağı ile yapılan çalışmalarda elde edilen yağ hammaddesinin MA değerleri 850.92 g/mol (Gokul ve Jambulingam, 2019), 860 g/mol (Okwundu ve diğ., 2019), 858.5 g/mol (Espinosa ve diğ., 2009), 860 g/mol (Altun ve Cengiz, 2008), 978.74 g/mol (Yuvanashree ve diğ., 2014), 884 g/mol (Zhao ve diğ., 2013), 897 g/mol (Taravus ve diğ., 2009) olarak belirtilmiştir. Bu değerler çalışmamızda hesaplanan atık yağ MA: 891,9 g/mol, katı yağ MA: 887,5 g/mol ve sıvı yağ MA: 865,5 g/mol değerleriyle uyumludur.

Faz ayırmada elde edilen atık yağ, dekantör sonrası oda sıcaklığında yağın bir kısmının kristalleşmesiyle elde edilen katı ve geri kalanının ise sıvı formda elde edildiği yağ fraksiyonlarının Çizelge 4.6'da bağlı ve serbest yağ asidi kompozisyonları ile birlikte kimyasal özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4. 6. Atık yağ, ayrılmış katı yağ ve sıvı yağ fraksiyonlarının bağlı ve serbest yağ asidi kompozisyonu

Yağ Asitleri	Birim	Atık Yağ		Katı Yağ		Sıvı Yağ	
		Bağlı Yağ	Serbest	Bağlı Yağ	Serbest	Bağlı Yağ	Serbest
		Asidi	Yağ Asidi	Asidi	Yağ Asidi	Asidi	Yağ Asidi
C14:0	%	2,8	2,7	2,66	2,61	2,36	2,26
C14:1	%	0,1	0,5	0,19	0,47	0,31	0,42
C15:0	%	0,2	0,2	0,25	0,26	0,15	0,22
C15:1	%	0,2	0,3	0,20	0,28	0,25	0,29
C16:0	%	24,7	21,1	25,58	20,76	19,20	21,07
C16:1	%	2,4	2,8	2,64	2,77	3,38	2,65
C17:0	%	1,1	1,0	0,99	0,94	0,89	0,85
C17:1	%	1,0	0,3	0,86	0,40	0,89	0,32
C18:0	%	24,2	21,9	26,42	22,30	20,43	20,10
C18:1n9t	%	0,6	0,4	0,51	0,48	0,55	0,44
C18:1	%	40,0	44,0	37,10	44,98	46,13	46,32
C18:2n6t	%	0,2	0,1	0,23	0,16	0,38	0,19
C18:2n6c	%	2,4	3,5	2,33	3,03	3,71	3,21
C20:0	%	0,1	0,2	0,11	0,11	0,12	0,21
C20:1	%	0,1	0,3	0,19	0,29	0,31	0,36
C18:3n6	%	0,03	0,04	0,13	0,15	0,26	0,12
Doymuş yağ	%	53,10	47,09	56,01	46,98	43,15	44,71
Doymamış yağ	%	46,96	52,29	44,38	53,01	56,17	54,32
Serbest Yağ Asidi	%	12		9,7		3,4	
Asitlik	mg KOH/g	23,9		19,3		6,8	
Yağ içeriği	%	96		99,6		99,8	
Molekül Ağırlığı	g/mol	891,9		887,5		865,5	

Çizelge 4.6'ya göre uygulanan bu süreçte doymuş asitlerce zengin trigliseritler (özellikle C16:0 ve C18:0 içerikleri) daha kolay kristallenerek katı faza geçmiş, tekli doymamış trigliseritler (C18:1 ağırlıklı) ise sıvı fazda kalmıştır (Calliau, 2025). Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere doymuş yağ asitleri katı yağda daha yüksek iken sıvı yağda daha düşük değere sahiptir. Bu sonuçlar doymuş asitlerce zengin trigliseritlerin kolay kristallendiği için katı faza geçtiğini göstermektedir. Yağ asidi kompozisyonlarında en yüksek oranlar C18:1, C16:0 ve C18:0'dır. Bu değerler sığır/koyun kökenli hayvansal yağlar ve süt yağları için rapor edilen değerlerle benzerlik göstermektedir (Limmatvapirat ve diğ., 2021; Martínez ve diğ., 2025; Wamser, 2012). Limmatvapirat ve diğ. (2021) sığır yağının başlıca bileşenlerini bu üç asit olarak tanımlamıştır. Süt yağının ise yaklaşık %98'i trigliserittir. %65-70'i ağırlıklı olarak C16:0, C14:0, C18:0, %25-30'u C18:1, %2-5'i çoklu doymamış yağ asitleridir (Martínez ve diğ., 2025).

Dekantasyon sonrası SYA/asitlik içeriğinin azalması atıksuda bulunan kostiğin SYA'yı sabunlaştırarak ayırabildiğini göstermektedir. Bitkisel/hayvansal yağların rafinasyonunda uygulanan nötralizasyon adımı da aynı prensibe dayanmaktadır. Yağa kostik ilave edildiğinde SYA sabunlara dönüşür ve endüstride "sabunstok" denen faz oluşmaktadır (M. Victoria Ruíz-Méndez ve M. Carmen Dobarganes, 2019). Sabunstok su, sabun, nötr yağ ve fosfolipit içerir ve santrifüj ile yağdan ayrılır. Böylelikle yağ fazının % SYA içeriği azalır (Chumsantea ve diğ., 2012). Invexoil (2024) kimyasal arıtmada SYA'nın NaOH eklenerek giderildiğini ve oluşan sabun fazının santrifüjle uzaklaştırıldığını belirtmiştir. Chamara ve diğ. (2025) yaptıkları çalışmada NaOH ile SYA'yı %10,09'dan %3,48'e düşürürken %35,10 sabun oluşumunu gözlemlemişlerdir. Literatüre bakıldığında yoğunluk farkıyla ayırma reaktöründen çıkan üst fazdan elde edilen atık yağın dekantör sonrası katı ve sıvı yağ fazlarında ölçülen SYA değerlerinin düşmesi, CIP ve alan/makine/ekipman kimyasal temizleyicilerinden oluşan bazik ortamda SYA'nın sabun tuzlarına dönüşmesiyle açıklanmaktadır. CIP ve alan/makine/ekipman kimyasal temizleyicileri ile başlayan sabunlaşma eğilimi yoğunluk farkı ile ayırma reaktöründe tam gerçekleşmeyebilir ve yağ içinde su/alkali/sabun emülsyonu olarak kalabilmektedir. Dekantör santrifüj etkili karışım ile SYA'nın nötralize olmasını ve oluşmuş sabunların posa fazında uzaklaşmasını kolaylaştırmaktadır.

Yağ içeriği ön işlem uygulamalarında atık yağda %96 iken katı yağda %99,6, sıvı yağda %99,8 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar uygulanan ön işlemlerle yağ içeriğinin arttığını ve safsızlıkların giderildiğini göstermektedir. Literatürde hayvansal atık yağlara biyodizel üretiminden önce uygulanan ön işlem çalışmaları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4. 7. Ön işlem uygulamaları

Hammadde	Eritme Sıcaklığı (°C)	Ön İşlemler/Uygulamalar	Açıklama	Kaynak
Hayvansal atık yağ	100	Eritme ile faz ayırma → dekantör santrifüj → çöktürmeli filtrasyon	35 kg numune, ham yağdan: 27 kg (santrifüj sonrası); 7 kg sıvı yağ ve 17 kg katı yağ (verim:%63-77)	Bu çalışma
Tavuk yağı	90-100	Eritme → filtrasyon → santrifüj	Kolajen malzemelerin yağdan ayrılması	Kirubakaran ve diğ., (2023)
Donyağı	100	Eritme, filtrasyon (safsızlık giderme)/laboratuvar ölçeği, baz katalizli transesterifikasyon	100 kg donyağından 45 kg kullanılabilir hayvansal yağ (verim; %45)	Akgün ve diğ. (2009)
Mezbaha yan ürünleri	110	Eritme → 110°C'de eritme ile ~%70 su giderimi → perkolasyon/filtrasyon/laboratuvar ölçeği, baz katalizli transesterifikasyon	Eriyik fazdaki sıvı yağ katılardan ayrılması; ardından filtrasyonla ince katılar uzaklaştırılması, (verim; tavuk 76,8; içyağ 90,8; domuz 91,4)	Mata ve diğ. (2014)
Balık atıkları	Kaynatma; su≈100, Yıkama:60	Kaynatma→ ayırma hunisi → 60°C damıtılmış suyla yıkama → pres → santrifüj → vakum filtrasyonu/laboratuvar ölçeği, baz katalizli transesterifikasyon	Ham balık yağı eldesi, kalan safsızlıkların vakum filtrasyonla ayrılması, (verim %89,5)	Mata ve diğ. (2014)
Tavuk yağı	90-100	Eritme → filtrasyon → santrifüj/laboratuvar ölçeği, starein olein ayırımı	Kolajen malzemelerin uzaklaştırılması	Arnaud ve diğ. (2006)
Atık tavuk yağı	100	Küçük parçalara ayırma → eritme → filtrasyon → santrifüj/laboratuvar ölçeği, baz katalizli transesterifikasyon	Katıların yağdan ayrılması	Lin ve Tsai (2015)
Tavuk kesimhane yağı	60	Isıtma (≈15 dk) → çöktürme ve merkezkaç/laboratuvar ölçeği, esterifikasyon	Yağ fazı: >%30 ve ≈%50 (40°C); devir 1500 rpm üstünde ek iyileşme sınırlı; süre >2 dk ek fayda sağlamadı.	(Kolet ve diğ., 2020)
Kahverengi yağ	80	Isıtma + 6-12 sa dinlendirme (dekantasyon)/tam ölçek/doğrudan yakıt yağı	Üç katman ayrışımı (yağ, su, posa)	(Hendrixon, 2014)
Mezbaha DAF çamuru	90-95	Ön ısıtma + dekantör/tam ölçek, yağ geri kazanımı	Yağ/su/katı fazlarının ayırımı ile yağ geri kazanımı. %90 su, %7 katı, %3 yağ	(Meat ve Corporation, 2015)
Atıksu arıtma tesisi yağ gres	80-85	Isıtma → santrifüj (4000 rpm, 3 dk) /laboratuvar ölçeği, esterifikasyon	%92 yağ geri kazanımı	(Lopez ve diğ., 2016)

Literatür ve bu çalışma birlikte değerlendirildiğinde farklı hayvansal yağlardan biyodizel üretimi için uygulanan ön işlemlerde 90-110°C aralığında eritme ve katı-sıvı ayırma (santrifüj/filtrasyon) adımlarının uygulandığı görülmektedir. Kirubakaran ve diğ., (2023) tavuk yağını 90-100°C’de eritip filtreleme ve santrifüjle kolajeni uzaklaştırmışlardır. Arnaud ve diğ. (2006) tavuk yağı için benzer bir eritme-filtrasyon-santrifüj işlemi uygulamışlardır. Lin ve Tsai (2015) atık tavuk yağını küçük parçalara ayırıp 110°C’de eritmiş ve ardından filtreleme ve santrifüj ile katıları uzaklaştırmıştır. Akgün ve diğ. (2009) donyağını 100°C’de eriterek 100 kg numuneden 45 kg kullanılabilir yağ elde etmişlerdir. Mata ve diğ. (2014) mezbahalardan toplanan hayvansal yan ürünleri 110°C’de eriterek yaklaşık %70 su içeriğini uzaklaştırmış, eriyik fazdaki sıvı yağı perkolasyon/filtrasyon ve santrifüjle katılardan ayırmıştır. Aynı çalışmada balık atıklarını kaynatmışlar, üst fazdaki ham balık yağına yıkama-presleme-santrifüj ve son olarak vakum filtrasyon işlemleri uygulamışlardır. Çalışmalarda farklı hayvansal yağlar kullanılmasına rağmen eritme ve ardından birden fazla ayırma basamağı ile su/katı/safsızlıklar giderilerek biyodizel hammaddesi elde edilmiştir.

Yağlar erime noktaları farklı çok sayıda TG’den oluşmakta ve yaklaşık 25°C’de genellikle değişen oranlarda katı ve sıvı yağ içermektedirler (Martini ve diğ., 2006). Katı ve sıvı yağ ayırma işlemi 25°C’de yapılmaktadır ve genel olarak katı faz içeriği %10-90 aralığında olmaktadır (Martini ve diğ., 2006) . İki fazlı yapı mekanik ayırma (örnek; dekantör) veya fraksiyonlama sonrasında katı fazda yüksek stearin ve sıvı fazda yüksek olein olarak elde edilebilmektedir (Martini ve diğ., 2006). Dekantör çıkışında atık yağın oda sıcaklığında hem katı hem sıvı formda elde edilmesinin nedeni yağın farklı yoğunlukta TG karışımı olması ve uygulanan merkezkaç hareketi ile oluşan hidrodinamik kayma ile ayrılmasıdır. Çok bileşenli yapı geniş erime/kristalleşme aralığı ve polimorf (çok şekilli) yapıların oluşmasına ve aynı sıcaklıkta katı-sıvı ayırmasına neden olmaktadır. Yüksek merkezkaç alanında hidrodinamik kaymada oluşan viskoz ısınma küçük kristalleri bir miktar eritebilir ve ekipmandan çıkışta soğuma esnasında bazı kısımlar yeniden kristalleşirken bazıları sıvı kalır (Tran ve Rousseau, 2016)

Bu ön çalışmamızın başlıca artıları; kimyasal kullanılmaması, et ve süt prosesinden gelen heterojen bir akımda yağ geri kazanımı yapılabilmesi, tekrar kullanılabilir organik katı maddelerin elde edilebilmesidir. Atık yağda sabunlaşma ve emülsiyon eğilimi yüksek olacağı için yağın katı ve sıvı olarak ayrıştırılmasının, biyodizel üretim sürecini (gliserin oluşumu, faz ayrımları, kimyasal sarfiyatları) olumlu yönde etkileyeceği değerlendirilmiştir.

4.2. Sıvı Yağ Numunesinden Biyodizel Üretimi

Sıvı yağ ile yapılan çalışma, geri kazanılan alkolün tekrar kullanımı koşuluyla farklı alkoller ve yüksek alkol oranı kullanılarak transesterifikasyon ile biyodizel elde edilmesi üzerine yapılmıştır. Yağın SYA içeriği %5'ten küçük olduğunda transesterifikasyon alkali katalizörlerle gerçekleştirilebilmekte ancak SYA sabunlaşmaya yol açtığı için ilave bazik katalizör gerekebilmektedir (Van Gerpen, 2005). SYA içeriği %5'in üzerinde ise ester-gliserol faz ayrımı zorlaşmakta ve suyla yıkama esnasında emülsiyon oluşumu artmaktadır (Van Gerpen, 2005). SYA değeri %3,4 olan sıvı yağda yağ içeriğinin yüksek olması (%99,8) nedeniyle sabun oluşum riskinin az olması, düşük baz katalizör kullanılarak (%0,8 w/w) sabun oluşum hızının sınırlandırılması, stokiometrinin (3:1 alkol:yağ mol oranı) üzerinde alkol kullanımıyla Le Chatelier ilkesi uyarınca dengenin yağ asit esterleri (YAE) yönüne kaydırılması ile kütle transferini iyileştirerek transesterifikasyon işlemi uygulanmıştır (Ma ve Hanna, 1999; Van Gerpen, 2008). Le Châtelier ilkesi dengedeki bir sisteme derişim/sıcaklık/basınç gibi bir dış etki uygulandığında sistemin bu etkiyi azaltacak yönde yeni denge konumuna kayacağı şeklinde tanımlanmaktadır (Thomsen ve Law, 2000).

Sıvı yağ ile biyodizel üretiminde 2-propanol, etanol ve metanol olarak üç farklı alkol kullanılmıştır. Bu alkollerin Hansen çözünübilirlik parametreleri yaklaşık olarak metanol için δP (polar) = 12.3, δH (H-bağı) = 22.3; etanol için δP (polar) = 8.8, δH (H-bağı) = 19.4; 2-propanol için δP (polar) = 6.1, δH (H-bağı) = 16.4 (Hansen, 2025; Murase Nakamura, 2023) ve Snyder polarite indeksi (P') değerleri yaklaşık olarak metanol için $P' = 5.1$; etanol için $P' = 4.3$; 2-propanol için $P' = 3.9$ 'dur (Chem-Supply, 2007; Harvey, 2019). Hayvansal yağlar apolar olduğu için δP ve δH 'si düşük çözücülerde daha iyi çözünürler (Peña-gil ve diğ., 2016). Metanol, etanol ve 2-propanolün Hansen çözünübilirlik parametreleri ve Snyder polarite indeksleri farklıdır. 2-propanolde etanolden, etanolde ise metanolden daha iyi bir çözünmektedir.

Hansen parametrelerinde δP 'nin polar, δH 'nin ise hidrojen-bağı etkileşimini ifade etmekte ve çözücülerin polar/protik karakterinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. P' ise çözücülerini göreli polaritelerine göre sıralayan bir ölçektir (Hansen, 2007).

Literatürde biyodizel yakıt kalitesini belirleyen en hassas özelliklerden birinin viskozite olduğu ve viskozitenin enjeksiyon sisteminde püskürtme davranışını, atomizasyonu ve yanma verimini doğrudan etkilediği belirtilmektedir (Sa ve diğ., 2014) Uygulanan transesterifikasyon reaksiyonları sonucunda elde edilen biyodizelin EN 14214

ve ASTM D6751 standartlarına uygunluk sağlamasında biyodizel verimi ve yoğunluktan ziyade ulaşılması kritik parametre viskozite olarak belirlenmiştir.

4.2.1. 2-Propanol ile biyodizel üretimi

2-propanol ile 20:1, 25:1, 30:1, 35:1, 40:1 alkol:yağ mol oranlarında ve her oran için 2, 4 ve 6 sa reaksiyon sürelerinde elde edilen biyodizelin verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Alkol:yağ mol oranı ve reaksiyon süresi arttıkça ağırlıkça biyodizel verimi de artış göstermiştir. Aynı reaksiyon süresinde artan alkol:yağ oranı ile artan biyodizel verimi, alkol miktarının bağlı yağ asitlerinin esterleşmesinin tamamlanmasında süreden daha etkin olduğunu göstermiştir. Optimum çalışma koşulu 20P-6 olarak elde edilmiştir. Bu seviyenin üzerindeki değerlerde verime önemli bir katkı sağlanmamıştır.

Çizelge 4. 8. 2-Propanol:yağ mol oranı ve reaksiyon sürelerine göre verim, yoğunluk, viskozite

Koşul	Alkol:Yağ Mol Oranı - Reaksiyon süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
20P-2	20:1 - 2	85,2	0,885	6,2
20P-4	20:1 - 4	85,8	0,88	5
20P-6	20:1 - 6	86,2	0,875	4,5
25P-2	25:1 - 2	90,4	0,878	5,8
25P-4	25:1 - 4	91,2	0,874	4,8
25P-6	25:1 - 6	92,4	0,871	4,2
30P-2	30:1 - 2	92,6	0,878	5,5
30P-4	30:1 - 4	94,2	0,872	4,5
30P-6	30:1 - 6	97,2	0,87	4
35P-6	35:1 - 6	97,8	0,868	3,9
40P-6	40:1 - 6	98,1	0,866	3,8

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

Çalışma sonuçlarında hesaplanan biyodizel verimi ağırlıkça yüzde olup literatürdeki verim tanımı/birimi farklılık gösterebilir. Tabloya göre tüm koşullarda yoğunluk 0,866-0,885 g/cm³ aralığında kalarak EN 14214 ve ASTM D6751 sınırlarını sağlamakta olup uygunluğu belirleyen başlıca parametre viskozite olmuştur. 20P-2, 25P-2, 30P-2 koşullarında viskozite 5,5-6,2 mm²/s aralığında EN 14214’ı karşılamamakta ve 20P-2’de 6,2 mm²/s ile ASTM D6751 üst sınırını aşmaktadır. Reaksiyon süresi 4-6 sa’e çıkarılarak alkol:yağ oranı artırıldığında viskozite 3,8–5,0 mm²/s aralığına düşmektedir. 20P-4, 25P-4 ve üzerindeki tüm koşullar her iki standardı da karşılamaktadır.

Elde edilen yoğunluk değerleri reaksiyon koşullarına bağlı olarak 0,870 g/cm³-0,885 g/cm³ arasında EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarına uygun gerçekleşmiştir. 20P koşulunda sürenin 2 sa'ten 6 sa'e artırılması 0,010 g/cm³'lük bir yoğunluk azalmasına neden olmuştur. 25P-2'e göre 25P-6 koşulunda yoğunluk değeri 0,007 g/cm³ azalmıştır. 30P-4'e göre 35P-6 koşulunda ise yoğunluk değeri 0,002 g/cm³'lük bir azalma ile ihmal edilebilir seviyede belirlenmiştir.

4.2.2. Etanol ile biyodizel üretimi

Etanol ile transesterifikasyonda elde edilen biyodizel verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Gravimetrik biyodizel verimi, alkol:yağ mol oranı ve reaksiyon süresinin artırılmasıyla düzenli bir artış göstermiştir. Verimde en belirgin artış 30:1 mol oranlarında ölçülmüş, mol oranı 35:1 ve 40:1'e arttırıldığında verimde sırasıyla %95,56 ve %97,32 olarak en yüksek değerlere ulaşılmıştır. Elde edilen bütün biyodizel yoğunluk değerlerinde EN 14214 ve ASTM D6751 standartları sağlanmıştır. Reaksiyon süresindeki artış yoğunlukta ihmal edilebilir seviyede iyileşme sağlamıştır. En düşük yoğunluk değeri ise 40E-6 koşulunda elde edilen 0,870 g/cm³ olmuştur. Elde edilen viskozite değerleri reaksiyon süresi ve mol oranına bağlı olarak 7,2 mm²/s ile 4,5 mm²/s arasında değişerek sadece 30E-6, 35E-6 ve 40E-6 koşullarında EN 14214 ve ASTM D6751 standartları sağlanmıştır.

Sıvı yağdan biyodizel üretiminde ortak tüm koşullarda 2-propanol kullanımının etanole kıyasla daha yüksek verim ve akışkanlık özellikleri sağladığı görülmüştür. 20:1 mol oranından 40:1'e çıktıkça ve süre 2 sa'ten 6 sa'e uzadıkça her iki alkolde de verim artmış olup 2-propanolde bu artış 30P-6 koşulunda doygunluğa ulaşmıştır. En yüksek verimler 40P-6'da %98,1, 40E-6'da %97,3'tür. Her iki çalışmada da süre arttıkça yoğunluk ve viskozite azalmış ve viskozite 40P-6'da 3,8 mm²/s, 40E-6'da 4,5 mm²/s olarak ölçülmüştür. Verim, viskozite ve yoğunluk için 2-propanol ile yapılan çalışmada daha iyi sonuç elde edilmiştir.

Çizelge 4. 9. Etanol:yağ mol oranı ve reaksiyon sürelerine göre verim, yoğunluk ve viskozite

Koşul	Alkol:Yağ Mol Oranı - Reaksiyon süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
20E-2	20:1 - 2	80,94	0,895	7,2
20E-4	20:1 - 4	81,51	0,885	6,3
20E-6	20:1 - 6	81,89	0,88	5,4
25E-2	25:1 - 2	85,88	0,89	6,7
25E-4	25:1 - 4	86,64	0,88	5,6
25E-6	25:1 - 6	87,78	0,875	5,1
30E-2	30:1 - 2	87,97	0,888	6,4
30E-4	30:1 - 4	89,49	0,878	5,5
30E-6	30:1 - 6	92,34	0,875	4,8
35E-6	35:1 - 6	95,56	0,875	4,6
40E-6	40:1 - 6	97,32	0,87	4,5

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

2-propanolün etanole göre daha düşük δP , δH ve P'' 'ye sahip olması yağ fazı ile daha iyi uyum gösterdiği için aynı koşullarda etanolden daha verimli olmuştur. 2-propanolün yağ ile tek faza yakın bir form oluşturduğu, daha yüksek polaritesi olan etanoliz karışımlarında baz kataliz varlığında daha uzun süre emülsiyon oluştuğu ve bunun da gliserol faz ayrımının yavaş gerçekleşmesine yol açtığı ifade edilmektedir (Zhou ve Boocock, 2006). Ayrıca, 2-propanol gibi C3+ ve/veya dallanmış alkollerin yağ ile daha iyi karışıp tek faza yakın davranması kütle aktarımını artırarak kısa sürede daha yüksek dönüşüm eğilimi oluşturduğu ve reaktan veya eş-çözücü olarak kullanıldığında alkol-yag sistemlerini daha etkin biçimde çözerek reaksiyonu hızlandırdığı belirtilmiştir (Gotovuša ve diğ., 2022; Pham ve diğ., 2021).

4.2.3. Metanol ile biyodizel üretimi

Metanol ile gerçekleştirilen transesterifikasyon ile elde edilen biyodizel verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Elde edilen biyodizel verim değerleri mol oranı ve reaksiyon süresine bağlı olarak %68,16 ile %83,10 arasında değişmiştir. Alkol:yağ mol oranı arttıkça reaksiyon veriminin belirgin bir şekilde artması, süreden ziyade reaksiyonun tamamlanması için gerekli metanol miktarına

ulaşılamadığını göstermiştir. Uygulanan en yüksek mol oranları 35:1 ve 40:1 değerlerinde 6 sa reaksiyon süresinde verim sırasıyla %79,8 ve %83'e yükselebilmektedir.

Elde edilen yoğunluk değerleri reaksiyon süresi ve mol oranına bağlı olarak 0,900 g/cm³ ile 0,875 g/cm³ arasında EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarını sağlamıştır. Alkol:yağ mol oranı arttıkça yoğunluk değerinde ihmal edilebilir seviyede azalma gerçekleşmiştir.

Elde edilen biyodizel viskozite değerleri, reaksiyon süresi ve mol oranına bağlı olarak 7,5 mm²/s ile 4,6 mm²/s arasında değişmiştir. 20:1 ve 25:1 mol oranlarında 2-4 sa ve 30:1-2 sa koşullarında viskozite değeri hem ASTM D6751 hem de EN 14214 standartlarını sağlamamıştır. 30M-4 koşuluna kadar 20M-6, 25M-4, 25M-6'da viskozite değeri ASTM D6751 standardını sağlamış, EN 14214 standardının dışında kalmıştır. Elde edilen biyodizelin yoğunluk ve viskozitesinin EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarına aynı koşulda uygunluğu sadece 35M-2 ve 40M-2 koşullarında sağlanmıştır.

Çizelge 4. 10. Metanol:yağ mol oranı ve reaksiyon sürelerine göre biyodizel verimi

Koşul	Alkol:Yağ Mol Oranı - Reaksiyon süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
20M-2	20:1-2	68,16	0,9	7,5
20M-4	20:1-4	68,64	0,89	6,5
20M-6	20:1-6	68,96	0,885	5,5
25M-2	25:1-2	72,32	0,895	7
25M-4	25:1-4	72,96	0,883	6
25M-6	25:1-6	73,92	0,88	5,1
30M-2	30:1-2	74,08	0,89	6,8
30M-4	30:1-4	75,36	0,879	5,5
30M-6	30:1-6	77,76	0,875	5,1
35M-2	35:1-6	79,8	0,878	4,9
40M-2	40:1-6	83,1	0,875	4,6

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

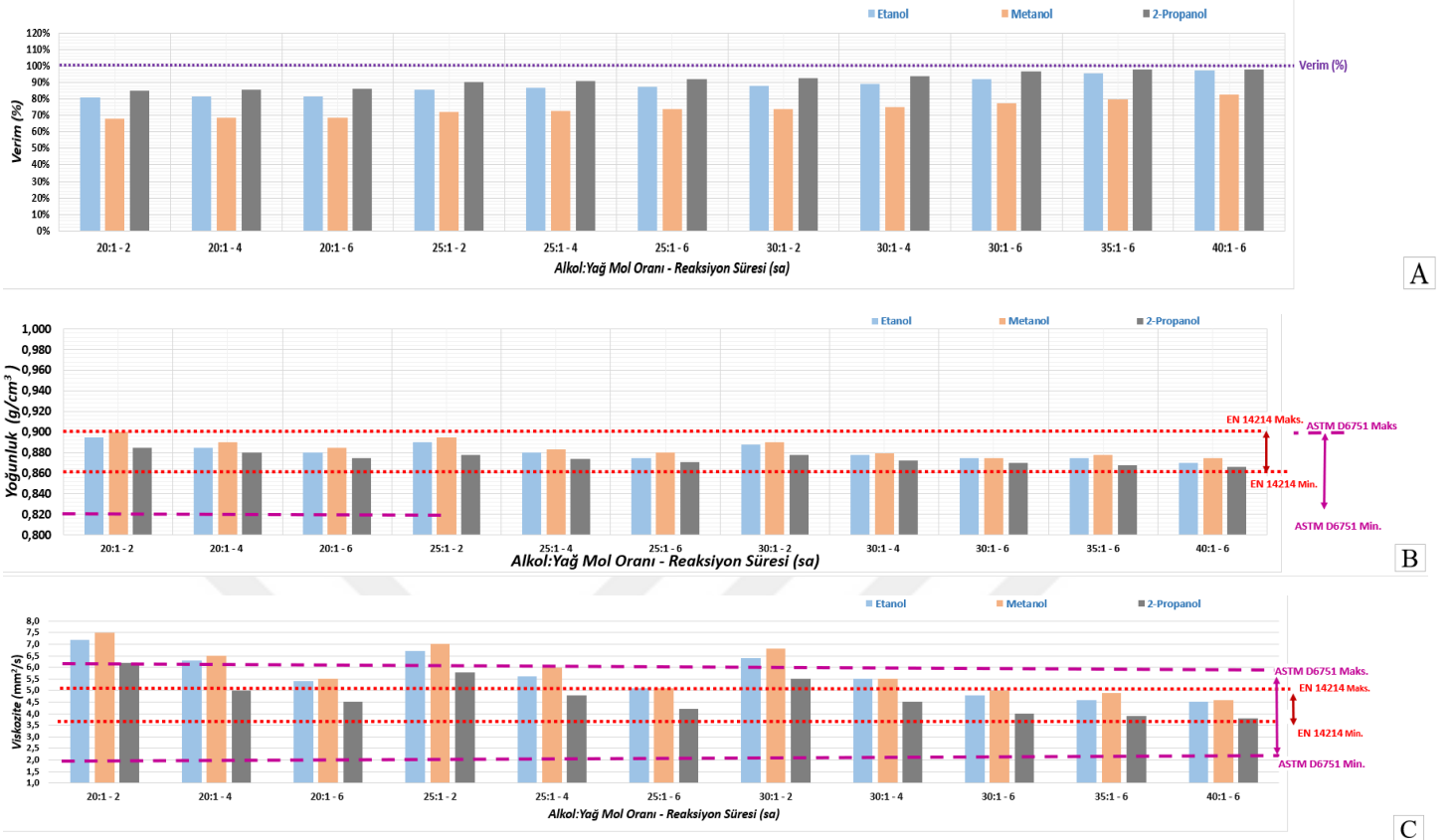
*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

4.2.4. Değerlendirme

Metanol, etanol ve 2-propanol ile yapılan çalışmalar sonucunda kıyaslamalar Şekil 4.1'de verilmiştir. Aynı koşullar altında en yüksek biyodizel verimlerinin sırasıyla 2-propanol, etanol ve metanol olarak elde edilmiştir. Bu verim sıralamasının Hansen

çözünübilirlik parametreleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Apolar sıvı yağ fazı δP ve δH değerleri daha düşük olan alkollerde daha iyi çözüldüğü için δP ve δH 'si en düşük olan 2-propanol en iyi, etanol orta ve metanol ise en zayıf uyumu göstermiştir. Metanolden etanol ve 2-propanole doğru çözücünün polaritesi ve hidrojen bağı yapma eğilimi azaldığı için yağ-alkol sistemi tek faza daha yakın davranmaktadır. Bu nedenle yüzey gerilimi ve kütle aktarım direnci azalarak reaksiyon hızı ve dönüşüm artmaktadır. 2-propanolün diğer alkollere göre en yüksek verime ve en düşük yoğunluk ile viskozite değerlerine sahip olması Hansen parametreleri ve Snyder polarite indeksinin çözünübilirlik ve faz davranışı ile uyumlu bulunmuştur. EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarına uygun olacak şekilde 2-Propanol için en ekonomik biyodizel eldesi olarak 25P-4 koşuludur. Etanol için yoğunluğun ve viskozitenin standartlara uygun olduğu 30E-6 koşuluna daha yüksek mol oranları ve süreler gerekli olsa da etanolün daha düşük maliyeti, çevre dostu ve ekonomik üretim için uygulanabilir bir seçenektir. Metanol ile 40M-6 koşulunda yapılan üretimlerde ise elde edilen maksimum verim %83 olup viskozite ve yoğunluk değerleri bu koşulda uygundur. Biyodizel üretiminde metanol, reaksiyon sonrası distilasyon ile geri kazanılıp prosese geri beslenebilmekte ve fazla/artan metanolün >%90'ı (simülasyonlarda artan metanolün %95-98) geri kazanılabilmektedir (Dhar ve Kirtania, 2009; Laboratory, 2008; Manuale ve diğ., 2013; Mythili ve diğ., 2014; Thompson ve Advisor, 2018). Etanolün geri kazanımı çoğunlukla ön ayırma/filtrasyonun ardından atmosferik veya vakum distilasyon/rektifikasyon ile yapılmakta ve yüksek saflık gereksinimlerinde etanol-su azeotropu nedeniyle moleküler elek adsorpsiyonu veya membran temelli pervaporasyon gibi adımlar ilave edilmektedir (Banat ve Guggenheim, 2004; Larimi ve diğ., 2024). Enerji ve maliyet açısından bakıldığında, klasik azeotropik distilasyona kıyasla pervaporasyon ve hibrit (distilasyon+membran/adsorpsiyon) sistemlerin belirgin tasarruf potansiyeli sunduğu, proses düzeyinde karşılaştırmalı çalışmaların %50'ye varan enerji kazanımlarına işaret ettiği görülmektedir (Granjo ve diğ., 2020; Van Hoof ve diğ., 2004). Kullanılan alkoller distilasyon yoluyla reaksiyon sonrasında artan alkol miktarlarının %90-95 aralığında kolaylıkla geri kazanılabilmektedir.

Metanol, biyodizel üretiminde hem düşük maliyet hem de kısa alkil zincirine sahip olduğu için yüksek polaritesi ve reaktivitesi sayesinde trigliseritlerle hızlı reaksiyona girme potansiyeli taşıdığı için en yaygın kullanılan alkoldür (Salaheldeen ve diğ., 2021). Ancak yağda yüksek SYA içeren bir sistemde metanolün bu teorik avantajları pratik bir dezavantaja dönüşmektedir.



Şekil 4. 1. Biyodizel eldesinde 2-Propanol, etanol ve metanol sonuç kıyaslaması A: Verim, B:Yoğunluk, C:Viskozite

Polar yapıdaki metanol ile apolar trigliseritlerin moleküler yapıları arasındaki temel farklılıklar nedeniyle birbirini içinde çözünmeleri oldukça zordur ve bu durum proses verimliliği için önemli bir engel teşkil etmektedir. Bu temel faz uyumsuzluğu reaksiyonun yalnızca yağ ve metanolün birbirine temas ettiği çok küçük bir yüzey alanında (ara yüzey) gerçekleşebileceği anlamına gelmektedir. Bu durum reaktanların birbirine ulaşmasını engelleyen ve reaksiyon kinetiğini yavaşlatan bir kütle transferi sınırlaması oluşturmaktadır (Yang ve diğ., 2024). Reaksiyon ilerledikçe oluşan gliserol de polar bir moleküldür. Faz dengesi çalışmalarına göre metanolün büyük bir kısmı apolar olan biyodizel fazı yerine kendisine daha çok benzeyen polar gliserol fazında çözünme eğilimindedir (Andreatta ve diğ., 2008; Csernica ve Hsu, 2010). Bu durum metanolün reaksiyona girmemiş yağ molekülleriyle temasını daha da azaltarak verimi düşürmektedir. Bu nedenle sıvı yağ ile olan çalışmamızda en düşük verim metanol ile alınmıştır.

Etanol, metanole göre $-CH_2-$ birimi daha uzun karbon zincirine sahip olduğu için daha az polardır (Fadhil ve Ahmed, 2018). Etanolün bir yardımcı çözücü olarak etkili olduğu çünkü yağlar içindeki çözünürlüğünün yanı sıra nükleofilik ikame oranını iyileştirerek reaksiyon hızını da artıran etkili bir ester değiştirme ajanı olarak davrandığı belirtilmektedir (Fadhil ve Ahmed, 2018). Bu bulgu etanolün metanole göre neden daha iyi performans gösterdiğini açıklamaktadır. Etanol, apolar hayvansal yağ içinde metanolden daha iyi çözünerek reaksiyonun gerçekleşebileceği temas yüzeyini (ara yüzey alanını) genişletmektedir. Daha geniş bir reaksiyon alanı daha fazla molekülün aynı anda reaksiyona girebilmesi anlamına gelmektedir. Faz dengesi açısından bakıldığında, etanolün bir kısmı yine gliserol fazında dağılsa da metanole göre biyodizel fazındaki varlığı daha fazla gerçekleşerek reaksiyonun daha verimli ilerlemesine olanak tanımaktadır (Maia ve diğ., 2013). Etanolün bu özellikleri bu çalışmada metanole göre daha yüksek bir verim elde edilmesini sağlamıştır.

Transesterifikasyon işleminde 2-propanol gibi düşük polar, protik (çözücü) ve amfifilik (hem polar hem apolar) eş-çözücülerin kullanılmasıyla reaksiyonun kısa sürede tamamlandığı ve transesterifikasyon hızının kullanılan 2-propanol miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir (Pham ve diğ., 2021). Bu durumda 2-propanol en az polar alkol olarak hayvansal yağda çok iyi çözünerek ve tek bir homojen faza dönüştürerek kütle transferi direncini belirgin bir biçimde düşürebilmektedir. Reaktanların ve katalizörün kütle aktarımı sınırlamasını azaltan ve tek faz sağlayabilen 2-propanolün dallanmış yapısı nedeniyle daha düşük olan kimyasal reaktivitesini telafi ederek genel reaksiyon hızını ve verimi arttırmaktadır (Larimi ve diğ., 2024; Pham ve diğ., 2021; Şanlı ve Çanakçı, 2008).

2-propanol metanolden daha uzun karbon zincirine sahiptir. Daha uzun zincire ve yüksek kaynama noktasına sahip olduğu için trigliseritlerle daha iyi karışarak kütle transferini arttırmaktadır. Metil ve etil esterlere göre daha hacimli ve düşük kristalleşme eğilimi olduğu için soğuk iklim koşullarında kullanımı daha avantajlıdır (Esipovich ve diğ., 2024; Huang ve diğ., 2015a)

2-propanol biyoyakıt, yakıt katkı maddesi, bir çok alanda ara madde olarak kullanılabilir. İklim değişikliği petrokimyasallar yerine biyobazlı yenilenebilir kaynaklardan üretime ihtiyacı arttırmaktadır. 2-propanol üretimi enerji tüketimi yoğun olan süreçler, atıksu, atık H_2SO_4 kaynaklı çevre kirliliğine neden olan petrol bazlı proseslerdir. Mikrobiyal 2-propanol üretimi çevre dostu ve düşük maliyetli olup petrol bazlı üretime alternatif bir yöntemdir (Jin ve diğ., 2022; Li ve diğ., 2016; Panjapakkul ve

El-halwagi, 2018). 2-propanol üretiminde biyokütle/atık gazların fermantasyonu gibi biyoteknolojik süreçlere yönelindiği ve bu nedenle gelecek yıllarda biyobazlı bir alkol olarak temin edilebileceği belirtilmektedir (Almohasin ve diğ., 2023; Panjapakkul ve El-halwagi, 2018).

Hansen yaklaşımı açısından trigliserit esaslı yağların δP ve δH bileşenleri düşüktür (Batista ve diğ., 2015). Bu nedenle δP ve δH 'si benzer/düşük çözücüler daha iyi çözme eğilimindedir (HSP Basics, 2025). Hayvansal yağlar uzun zincirli trigliseritlerden oluşur. Trigliseritler yüksüz, non-polar/hidrofobik nötral lipitlerdir ve bu nedenle düşük polariteye sahiptirler (Hartwing ve diğ., 2024; Lísá ve diğ., 2011).

Çalışma koşullarındaki her mol oranı için üç alkolün verimi birlikte değerlendirildiğinde alkollerin Hansen çözünebilirlik parametreleriyle (metanol: $\delta P=12,3$; $\delta H=22,3$ / etanol: $\delta P=8,8$; $\delta H=19,4$ / 2-propanol: $\delta P=6,1$; $\delta H=16,4$) uyumlu olduğu görülmektedir. Apolar yağ fazının δP ve δH değeri daha düşük olan çözücülerde daha iyi çözünmesi nedeniyle yağ ile en iyi sonucu 2-propanol, ardından etanol, en zayıf sonucu ise metanol vermiştir. 20:1 mol oranında yapılan çalışmada 2-propanol ile verim %85-86, yoğunluk 0,885-0,875 g/cm³ ve viskozite 6,2-4,5 mm²/s; etanol ile verim %81-82, yoğunluk 0,895-0,880 g/cm³, viskozite 7,2-5,4 mm²/s; metanol ile verim %68-69, yoğunluk 0,90-0,885 g/cm³, viskozite 7,5-5,5 mm²/s olarak elde edilmiştir. Düşük mol oranında, yağ-alkol karışabilirliği sınırlı olduğu için δP ve δH 'si en düşük olan 2-propanol daha yüksek verim ve daha düşük viskozite sağlamaktadır. 25:1 mol oranında yapılan çalışmada 2-propanol ile verim %90-%92, yoğunluk 0,878-0,871 g/cm³, viskozite 5,8-4,2 mm²/s; etanol için verim %86-88, yoğunluk 0,890-0,875 g/cm³, viskozite 6,7-5,1 mm²/s; metanol için verim %72-74, yoğunluk 0,895-0,88 g/cm³, viskozite 7-5,1 mm²/s aralığında elde edilmiştir. Bu mol oranında da 2-propanol, yağ ile daha iyi tek faz davranışı gösterdiği için hem en yüksek verim hem de en düşük yoğunluk ve viskozite elde edilmiştir. 30:1 mol oranında yapılan çalışmada 2-propanol ile verim %93-%97, yoğunluk 0,878-0,870 g/cm³, viskozite 5,5-4,0 mm²/s; etanolde verim %88-92 yoğunluk 0,888-0,875 g/cm³, viskozite 6,4-4,8 mm²/s; metanolde ise verim %74-78, yoğunluk ve viskozite 0,89-0,875 g/cm³ ve 6,8-5,1 mm²/s aralığında kalmaktadır. Artan mol oranıyla birlikte özellikle 2-propanol ve etanol için Hansen parametreleri sayesinde sağlanan daha iyi karışabilirlik, metanole göre belirgin avantaj sağlamaktadır. 35:1 mol oranı (6 sa) yapılan çalışmada 2-propanol ile %97,8 verim, 0,868 g/cm³ yoğunluk ve 3,9 mm²/s viskozite; etanol ile %95,56 verim, 0,875 g/cm³ yoğunluk ve 4,6 mm²/s viskozite; metanol ile ise %79,8 verim, 0,878 g/cm³ yoğunluk ve 4,9 mm²/s ölçülmüştür. Bu mol oranında

2-propanol ve etanol neredeyse tam dönüşüme yaklaşıırken, δP ve δH 'si yüksek metanol yağ fazıyla hala sınırlı uyum göstermiştir. 40:1 mol oranı (6 sa) yapılan çalışmada 2-propanolde verim %98,1'e, yoğunluk 0,866 g/cm³'e, viskozite 3,8 mm²/s'ye; etanolde verim %97,32'ye, yoğunluk 0,870 g/cm³'e, viskozite 4,5 mm²/s'ye ulaşmaktadır. Metanolde ise yüksek mol oranına rağmen verim ancak %83,1'e çıkmış, yoğunluk 0,875 g/cm³, viskozite 4,6 mm²/s elde edilmiştir. Yüksek mol oranında faz davranışı tüm alkoller için iyileşse de, Hansen parametrelerine göre yağ fazına en yakın olan 2-propanol hâlâ en yüksek dönüşüm ve en düşük yoğunluk/viskozite değerlerini sağlamaktadır.

Bu çalışmada metanolün polaritesinin yüksek olması, yağ fazında sınırlı çözünmesi ve oluşan gliserolün metanolü kendi fazında tutarak kütle transferini kısıtlaması elde edilen düşük verim değerlerini doğrulamaktadır. Bu nedenle en yüksek reaksiyon şartlarında diğer alkollere göre düşük verim (40M-6 sa %83,1, 40E-6 sa %97,32, 40P-6 sa %98,1) ve uygun aralıkta viskozite elde edilebilmiştir. Etanolün, metanolde daha düşük polaritesi sayesinde yağ içinde daha etkin ara yüzey alanı oluşturduğu ve kütle transferini iyileştirdiği elde edilen daha yüksek verim %97,3 (40:1, 6 sa) ve EN 14214 viskozite aralığını daha düşük koşullarda ($\geq 30:1$ -6 sa) sağlamıştır. 2-Propanol en az polar ve yağda en iyi çözünen alkol olduğu için %98,1 ile en yüksek verim (40:1, 6 sa) elde edilmiş olup en hızlı viskozite uyumu 25:1-4 sa'da sağlanmıştır ve tüm koşullarda yoğunluk değerleri standartların aralıklarında kalmıştır.

Wang ve diğ. (2005) soya yağı ve sarı gres ile yaptıkları çalışmada transesterifikasyon işleminde alkol olarak 2-propanol kullanmışlardır. Optimum reaksiyon koşulları 20:1 alkol:yağ mol oranı ve (w/w) %1 sodyum metali olarak belirlenmiştir. Motor performansı ve emisyonlar açısından izopropil esterler dizel motorda test edilmiş ve No.2 dizel ile aynı kaynaklı metil esterlere kıyasla HC, CO ve duman emisyonlarında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Alhassan ve Uemura (2016) yaptıkları çalışmada 2-propanol ve (w/w) %1,5 KOH kullanarak 24:1 alkol:yağ mol oranı, 70°C, 2 sa'te %98,9 biyodizel verimi elde etmişlerdir. Aynı yağdan metanol ile 24:1 alkol:yağ mol oranı, 65°C, 2 sa'te yaptıkları çalışmada ise %71,9 verim elde ettiklerini ve izopropil ester veriminin buna göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Huang ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada etanol, metanol ve 2-propanol ile transesterifikasyon işlemide %95 verime ulaşmak için gereken etanol ve 2-propanol miktarının metanol miktarından %25 daha az olduğunu belirtmişlerdir. Elde edilen biyodizellerin kristalleşme sıcakları etil ester için 0,19°C, izopropil ester için -3,15°C ve

metil ester için 2,08°C olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinden sarfiyat için etanol ve 2-propanolün metanole göre daha avantajlı olduğu, 2-propanolün ise soğuk akış özelliklerinde en verimli olduğu görülmektedir.

Karmakar ve Halder (2021) katalizör kullanmadan transesterifikasyon reaksiyonunu hızlandırmak ve çok kısa sürede yüksek biyodizel verimi elde etmek için aşırı ısıtılmış alkolle yüksek sıcaklıkta çalışma yapmışlardır. Metanol ve 2-propanol ile 200-280°C aralığında yaptıkları çalışmada yaklaşık 8dk'da 220°C'de metil ester %97,6 ve izopropil ester %99,2 olarak elde etmişlerdir.

Metanol ve etanolün düşük maliyetleri ve yüksek reaktiviteleri nedeniyle biyodizel endüstrisinde ve baz katalizli transesterifikasyon işlemlerinde en çok kullanılan iki alkoldür. Ancak metanol ve etanolden elde edilen metil ve etil esterlerin doymuş yağ oranı yüksek yağlarda yüksek bulutlanma ve akma noktası sergilediği için soğuk iklim kullanımlarında katkı maddesi, karışım oranları veya soğuk akış iyileştirme adımlarına ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir (Knothe ve Van Gerpen, 2005; Mohamed ve., 2024).

Biyodizelin soğuk akış özellikleri (bulutlanma noktası, akma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası) yağ asidi bileşiminden etkilenmektedir. Doymuş esterler bu değerleri kötüleştirmekte ve doymamışlık arttıkça düşük sıcaklık davranışı iyileşmektedir (Dunn, 2011; Sia ve diğ., 2020). Mevcut çalışmada elde edilen sıvı yağın düşük (katı yağa oranla) yağ asidi içeriği nedeniyle biyodizel soğuk akış özelliklerinde yüksek doymamış yağ asidi esterlerini daha yüksek oranda sağlayarak avantaj elde edilmiştir. Buna ilaveten izopropil esterler, metil/etil esterlerle karşılaştırıldığında dallanmış alkil zincir nedeniyle genellikle daha iyi soğuk akış davranışı göstererek izopropil esterler daha geç kristallenmekte ve filtre tıkanmasına daha az eğilim göstermektedir (Gotovuša ve diğ., 2022). Dallanmış yapısı nedeniyle 2-propanol ile üretilen izopropil esterlerin yoğunluk, viskozite ve soğuk iklim özellikleri gibi yakıt özelliklerindeki verimi aynı yağdan üretilen etil ve metil esterlere göre daha fazla gerçekleşmektedir (Esipovich ve diğ., 2024). YAPE'lerin doymuş yağ asidi yüksek hammaddelerden elde edilen biyodizel içeriğinde soğuk iklimlerde B100 olarak direkt kullanımında soğuk akış özelliklerini iyileştirdiği belirtilmektedir (Esipovich ve diğ., 2024; Gotovuša ve diğ., 2022; Huang ve diğ., 2015; Wang ve diğ., 2005). Bu nedenle 2-propanolün reaktivitesi metanol ve etanole göre az olmasına rağmen uygun koşullarda (daha yüksek alkol:yağ mol oranı ve sıcaklık) yüksek ester verimi elde edilebildiği için 2-propanol ile elde edilen biyodizel en uygun sonuç 30:1, 6sa olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yağ asidi esterlerinde alkolün zincir uzunluğu arttıkça NO_x emisyonlarına neden olabilecek yakıt özellikleri iyileştiği ve fermantasyon

yoluyla biyopropanol üretilbildiği için yağ asidi propil ester uygun bir alternatif seçenек olmaktadır (Gotovuša ve diğ., 2022). Yapılan çalışmada sıvı yağdan 2-propanol ile elde edilen biyodizelin kış ayları için daha uygun bir seçenек olduğu değerlendirilmiştir.

4.3. Katı Yağ Numunesinden Biyodizel Üretimi

Biyodizel üretiminde kullanılacak yağın SYA içeriği katalizör seçiminde belirleyici bir parametredir. Hayvansal yağlar yüksek SYA içerdiği için baz katalizli transesterifikasyon sırasında SYA'lar alkaliyle sabunlaşarak emülsiyon, faz ayrımı sorunları, fazla katalizör tüketimi ve verim kaybı oluşturduğu için sadece baz katalizli transesterifikasyon uygun değildir (Atadashi ve diğ., 2012). SYA içeriği %5'e kadar olan yağlarla yapılan transesterifikasyon işleminde alkali katalizörler kullanılabilir ancak SYA'lar alkaliyle sabunlaştığı için ilave katalizör gerekmektedir (Van Gerpen, 2005). SYA %5'in üstünde ise ester-gliserol faz ayrımı zorlaşır ve su ile yıkama işleminde emülsiyon oluşumu artar (Van Gerpen, 2005). Yüksek SYA'nın neden olduğu ayrışma ve emülsiyon problemini engellemek için asidik bir katalizör ile esterifikasyon yapılarak SYA'lar esterlere dönüştürülür (Van Gerpen, 2005). SYA'nın önce asit katalizli esterifikasyonla <%1'e düşürülüp ardından baz katalizli transesterifikasyon işleminin yapılması gerekmektedir (Çanakçı ve Van Gerpen, 2001). Diğer bir yöntem ise asit kataliz kullanımı sabun oluşturmadağı için SYA'sı çok yüksek olan hayvansal yağlarda tek aşamada SYA'lar esterleştirilip, trigliseritler transesterifiye edilebilir. Bu reaksiyon baz katalize göre daha yavaş olsada sabun sorununu önleyebilmektedir (Van Gerpen ve diğ., 2004).

Bu çalışmada, SYA değeri %9,7 olan katı yağdan biyodizel üretiminde sabunlaşmayı ve düşük verimi önlemek amacıyla baz katalizli transesterifikasyon yerine doğrudan asit katalizli ve iki aşamalı asitli esterifikasyon+alkali transesterifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Doğrudan asit katalizli işlem alkol olarak 2-propanol, etanol ve metanol, katalizör olarak H_2SO_4 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon işleminde esterifikasyon basamağında SYA, alkol olarak 2-propanol, etanol ve metanol, katalizör olarak H_2SO_4 kullanılarak %1'in altına düşürülmüş, transesterifikasyon basamağının her biri için metanol ve KOH katalizörü ile sabit koşulda yürütülmüştür. Asit katalizli esterifikasyon reaksiyonu sonucunda ester ve su oluşmaktadır (Encinar ve Sa, 2021). Esterifikasyon işlemleri sonrası oluşan su fazı ayrılmış, esterlenmiş yağ fazında artan asit ve alkolü gidermek için $30\pm 2^\circ C$ su ile

yıkanmış, yıkama suyu pH'ı 6-7 olduktan sonra sabit ağırlığa kadar $110\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 45-60 dk ısıtılarak su uzaklaştırılmıştır. Transesterifikasyon sonrası oluşan gliserin ayrılmış, sabun, katalizör ve alkol kalıntıları $30\pm 2^{\circ}\text{C}$ su ile yıkama yapılarak uzaklaştırılmıştır. Yıkama sonrası sabit ağırlığa kadar $110\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de 45-60 dk ısıtılarak su uzaklaştırılmıştır.

4.3.1. 2-Propanol ile biyodizel üretimi

4.3.1.1. Doğrudan asit katalizli transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

2-propanol ile 20:1, 25:1, 30:1 alkol:yağ mol oranlarında, her oran için katalizör olarak %5, %7 ve %9 (w/w) H_2SO_4 ve her koşulda sabit 48 sa reaksiyon süresi ile yapılan biyodizelin verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4. 11. 2-Propanol ile doğrudan asit katalizli işlem sonuçları

Koşul	Katalizör	Katalizör Miktarı (w/w%)	2-Propanol:Yağ Mol Oranı	Reaksiyon Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Reaksiyon Süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Viskozite (mm^2/s)
D-P ₁	H_2SO_4	5	20:1	80	48	75	0,884	5,7
		7				80	0,884	5,5
		9				84	0,882	5,4
D-P ₂	H_2SO_4	5	25:1	80	48	82	0,882	5,3
		7				87	0,881	5,3
		9				93	0,88	5,1
D-P ₃	H_2SO_4	5	30:1	80	48	89	0,878	5,1
		7				92	0,878	5
		9				94	0,877	4,9

*EN 14214; yoğunluk (g/cm^3): 0,860-0,900, viskozite (mm^2/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm^3): 0,820-0,900, viskozite (mm^2/s): 1,9-6,0

D-P₁ koşullarında verimler sırasıyla %75, %80 ve %84, D-P₂ koşullarında verimler %82, %87 ve %93, D-P₃ koşullarında %89, %92 ve maksimum %94 verim değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre öncelikle katalizör miktarının artmasıyla dönüşüm oranının yükseldiği, alkol miktarının artmasıyla reaksiyonun hızlı ilerleyerek verimin arttığı belirlenmiştir.

Yoğunluk değerleri 0,884-0,877 g/cm^3 aralığında olup tamamı EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarını sağlamıştır. Alkol:yağ mol oranı 20:1'den 30:1'e ve katalizör miktarı %5'ten %9'a artırıldıkça yoğunlukta azalma gözlenmiştir.

Viskozite ise 5,7'den 4,9 mm²/s'e düşmüştür. D-P₁ ve D-P₂ koşullarında elde edilen 5,7-5,1 mm²/s değerleri EN 14214'ün üst sınırı olan 5,0 mm²/s'in üzerindeyken D-P₃ koşullarında %7 ile 5,0 mm²/s üst sınır değere ulaşılmış, %9 katalizörde ise 4,9 mm²/s ile standart sağlanmıştır. ASTM D6751 standardına göre tüm koşullarda uygun sonuç elde edilmiştir. Alkol ve H₂SO₄ miktarı arttıkça verim yükselmesiyle ürünün viskozite ve yoğunluğu azalmıştır.

4.3.1.2. İki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

2-Propanol ile katı numunede yapılan iki aşamalı biyodizel üretiminde birinci aşamada asit katalizli esterifikasyon ve ikinci aşamada baz katalizli transesterifikasyon işlemi uygulanmıştır. İki aşamalı üretilen biyodizele ait sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiştir.

P₁ koşulunda birinci aşamada 2-propanol ile 9:1 alkol:yağ mol oranı, %4 (w/w) H₂SO₄, 80°C ve 6 sa esterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında ikinci aşamada 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 (w/w) KOH, 60°C ve 2 sa süreyle transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen biyodizel verimi %96,6 olarak ölçülmüştür.

P₂ koşulunda birinci aşamada 12:1 alkol:yağ mol oranı, %3 (w/w) H₂SO₄, 80°C ve 6 sa süre ile esterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada %0,5 (w/w) KOH, 6:1 metanol:yağ oranı, 60°C ve 2 sa süre koşullarında transesterifikasyon işlemi gerçekleştirilmiş olup biyodizel verimi %97,9 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4. 12. 2-Propanol ile iki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon çalışmasının verim, hacim ve kütle sonuçları

Koşul	1. Aşama (Asit)	SYA (%)	2. Aşama (Baz)	Verim (%)	Hacim (mL)	Kütle (gr)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
	Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)		Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)					
P ₁	2-Propanol / 9:1 / %4 H ₂ SO ₄ / 6 / 80	0,97	Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 / 60	96,6	109	96,6	0,885	4,95
P ₂	2-Propanol / 12:1 / %3 H ₂ SO ₄ / 6 / 80	0,98		97,9	111	97,9	0,881	4,91

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

P₁ koşulunda birinci aşamada asit katalizli esterifikasyon ile SYA değeri %0,97'ye düşürülmüştür. İkinci aşamada ise transesterifikasyon sonucu elde edilen biyodizelde yoğunluk 0,885 g/cm³ ve viskozite 4,95 mm²/s olarak ölçülmüş olup EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarını sağlamaktadır.

P₂ koşulunda birinci aşamada asit katalizli esterifikasyon ile SYA değeri %0,98'e düşürülmüştür. İkinci aşamada uygulanan aynı transesterifikasyon koşulları sonucunda yoğunluk 0,881 g/cm³ ve viskozite 4,91 mm²/s olarak ölçülmüş olup EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarında elde edilmiştir.

4.3.2. Etanol ile biyodizel üretimi

4.3.2.1. Doğrudan asit katalizli transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

Etanol ile 20:1, 25:1, 30:1 alkol:yağ mol oranlarında, her oran için katalizör olarak %5, %7 ve %9 (w/w) H₂SO₄ ve 48 sa reaksiyon süresi ile yapılan biyodizel üretiminde verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.13'te verilmiştir.

Çizelge 4. 13. Etanol ile doğrudan asit katalizli işlem sonuçları

Koşul	Katalizör	Katalizör Miktarı (w/w%)	Etanol:Yağ Mol Oranı	Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Reaksiyon Süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
D-E ₁	H ₂ SO ₄	5	20:1	75	48	78	0,878	5,5
		7				83	0,877	5,5
		9				86	0,877	5,3
D-E ₂	H ₂ SO ₄	5	25:1	75	48	85	0,875	5,3
		7				90	0,874	5,1
		9				92	0,874	5,1
D-E ₃	H ₂ SO ₄	5	30:1	75	48	90	0,872	5,1
		7				91	0,872	4,9
		9				95	0,87	4,9

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

D-E₁ koşullarında verim %78-86, D-E₂'de %85-92 ve D-E₃'te %90-95 aralığında elde edilmiştir. En yüksek verim D-E₃ koşulunda %95 ile %9 (w/w) H₂SO₄ ile sağlanmıştır. Her üç koşulda yoğunluk değerleri 0,878-0,870 g/cm³ aralığında olup EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarını sağlamıştır.

Alkol:yağ mol oranı 20:1'den 30:1'e ve katalizör miktarı %5'ten %9'a yükseldikçe yoğunlukta azalma ve viskozitede %9 H₂SO₄ koşulunda 4,9 mm²/s ile EN 14214, ASTM D6751 standardına göre tüm koşullarda uygun sonuç elde edilmiştir.

4.3.2.2. İki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

Etanol ile katı numunede yapılan iki aşamalı biyodizel üretimindeki birinci aşamada asit katalizli esterifikasyon işlemi, ikinci aşamada baz katalizli transesterifikasyon işlemi uygulanmıştır. Etanol ile iki aşamalı üretilen biyodizele ait verim, yoğunluk ve viskozite Çizelge 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4. 14. Etanol verim, hacim ve kütle

Koşul	1. Aşama (Asit) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)	SYA (%)	2. Aşama (Baz) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)	Verim (%)	Hacim (mL)	Kütle (gr)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
E ₁	Etanol / 9:1 / %3 H ₂ SO ₄ / 5 / 75	0,95	Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 / 60	97,8	111,0	97,8	0,882	4,85
E ₂	Etanol / 12:1 / %2 H ₂ SO ₄ / 5 / 75	0,92		97,5	110,5	97,5	0,883	4,82

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

E₁ koşulunda birinci aşamada %3 (w/w) H₂SO₄, 9:1 etanol:yağ mol oranı, 75°C ve 5 sa reaksiyon süresi ile esterifikasyon yapılmıştır ve SYA değeri %0,95'e düşürülmüştür. İkinci aşamada %0,5 KOH ile 6:1 metanol:yağ mol oranı, 60°C ve 2 sa bazik transesterifikasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen biyodizel verimi %97,8 olarak ölçülmüştür.

E₂ koşulunda birinci aşamada %2 (w/w) H₂SO₄ ile 12:1 etanol:yağ mol oranı, 75°C ve 5 sa esterifikasyon gerçekleştirilmiş ve SYA değeri %0,92'ye düşürülmüştür. İkinci aşamada %0,5 KOH ile 6:1 metanol:yağ oranında ve 60°C'de 2 sa transesterifikasyon gerçekleştirilmiş ve biyodizel verimi %97,5 olarak ölçülmüştür.

E₁ ikinci aşamada 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 (w/w) KOH ve 2 sa transesterifikasyon gerçekleştirilmiş olup yoğunluk 0,882 g/cm³ ve viskozite 4,85 mm²/s olarak EN 14214 ve ASTM D6751 standardının sınırları içerisinde elde edilmiştir.

E₂ koşulunda ikinci aşamada uygulanan koşullar sonucunda biyodizel yoğunluğu 0,883 g/cm³ ve viskozite 4,82 mm²/s olarak bu değer hem EN 14214 hem de ASTM D6751 uygun elde edilmiştir.

4.3.3. Metanol ile biyodizel üretimi

4.3.3.1. Doğrudan asit katalizli transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

Metanol ile 20:1, 25:1, 30:1 alkol:yağ mol oranlarında, her oran için katalizör olarak %5, %7 ve %9 (w/w) H₂SO₄ ve 48 sa reaksiyon süresi ile yapılan biyodizel verim, yoğunluk ve viskozite sonuçları Çizelge 4.15'te verilmiştir.

Çizelge 4. 15. Metanol ile doğrudan asit katalizli işlem sonuçları

Koşul	Katalizör	Katalizör Miktarı (w/w%)	Metanol:Yağ Mol Oranı	Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Reaksiyon Süresi (sa)	Verim (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
D-M ₁	H ₂ SO ₄	5	20:1	60	48	86	0,879	5,4
		7				91	0,878	5,4
		9				93	0,878	5,3
D-M ₂	H ₂ SO ₄	5	25:1	60	48	90	0,876	5,2
		7				93	0,875	5,1
		9				96	0,872	5,1
D-M ₃	H ₂ SO ₄	5	30:1	60	48	92	0,872	5,1
		7				96	0,871	4,9
		9				97	0,869	4,8

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

D-M₁ koşullarında verim sırasıyla %86, %91 ve %93 olarak belirlenmiştir. D-M₂ koşullarında verimler %90, %93 ve %96'ya yükselmiş, D-M₃ koşullarında ise %92, %96 ve %97 olarak ölçülmüştür. %97 olan en yüksek verim D-M₃ koşullarında elde edilmiştir. Ölçülen yoğunluklar 0,879-0,869 g/cm³ aralığındadır ve tamamı EN 14214 ile uyumludur. Alkol:yağ mol oranı 20:1'den 30:1'e ve katalizör miktarı %5'ten %9'a çıktıkça yoğunlukta azalma gözlenmiştir. Viskozite ise 5,4'ten 4,8 mm²/s'ye düşmektedir: 20:1 oranında 5,4-5,2 mm²/s; 25:1'de 5,2-5,1 mm²/s; 30:1'de 5,1-4,8 mm²/s elde edilmiştir. EN 14214 için 30:1 alkol:yağ mol oranında %7'de 4,9 ve %9'da 4,8

mm²/s standardı karşılamaktadır. Buna karşın ASTM D6751 (1,9-6,0 mm²/s) açısından tüm numuneler uygundur.

4.3.3.2. İki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon ile biyodizel üretimi

Metanol ile katı numunede yapılan iki aşamalı biyodizel üretimi uygulamasında ilk aşama olarak asit katalizli esterifikasyon uygulanmıştır. Bu aşamada 1%, 1,5% ve 1,75% (w/w) olarak artan oranlarda H₂SO₄ kullanılarak esterifikasyon gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde sabit olarak 6:1 metanol:yağ mol oranı, 60°C ve 4 sa süre kullanılmıştır. İkinci aşamada ise sabit koşullarda %0,5 (w/w) KOH, 6:1 mol oranı, 60°C, 2 sa transesterifikasyon uygulanmış ve elde edilen verimler sırasıyla %97,3, %98,1 ve %97,5 olarak ölçülmüştür. Metanol ile iki aşamalı üretilen biyodizele ait verim, yoğunluk ve viskozite değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4. 16. Metanol verim, hacim ve kütle

Koşul	1. Aşama (Asit) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)	SYA (%)	2. Aşama (Baz) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa) / Sıcaklık (°C)	Verim (%)	Hacim (mL)	Kütle (gr)	Yoğunluk (g/cm ³)	Viskozite (mm ² /s)
M ₁	Metanol / 6:1 / %1 H ₂ SO ₄ / 4 / 60	0,95		97,3	111,1	97,3	0,872	4,42
M ₂	Metanol / 6:1 / %1,5 H ₂ SO ₄ / 4 / 60	0,92	Metanol / 6:1 / %0,5 KOH / 2 / 60	98,1	112,5	98,1	0,870	4,40
M ₃	Metanol / 6:1 / %1,75 H ₂ SO ₄ / 4 / 60	0,90		97,5	111,4	97,5	0,871	4,40

*EN 14214; yoğunluk (g/cm³): 0,860-0,900, viskozite (mm²/s): 3,5-5,0

*ASTM D6751; yoğunluk (g/cm³): 0,820-0,900, viskozite (mm²/s): 1,9-6,0

M₁ koşulunda ilk aşamada %1 (w/w) H₂SO₄ ile 6:1 metanol:yağ mol oranı, 60°C ve 4 sa esterifikasyon gerçekleştirilmiş ve SYA değeri %0,95'e düşürülmüştür. İkinci aşamada 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 (w/w) KOH ve 2 sa transesterifikasyon sonucu yoğunluk 0,872 g/cm³ ve viskozite 4,42 mm²/s olarak EN 14214 ve ASTM D6751 sınırlarına uygun olarak ölçülmüştür.

M₂ koşulunda %1,5 H₂SO₄ ile 6:1 metanol:yağ mol oranı, 60°C ve 4 sa esterifikasyon gerçekleştirilmiş ve SYA değeri %0,92'ye düşürülmüştür. İkinci aşamada 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 (w/w) KOH ve 2 sa transesterifikasyon sonucu yoğunluk

değeri 0,870 g/cm³ ve viskozite 4,40 mm²/s olarak EN 14214 ve ASTM D6751 sınır değerleri arasında elde edilmiştir.

M₃ koşulunda %1,75 H₂SO₄ kullanılarak yapılan ilk aşamada SYA değeri %0,90'a düşürülmüş, ikinci aşamada sonunda biyodizel yoğunluk değeri 0,871 g/cm³ olarak ve viskozite 4,40 mm²/s olarak ölçülmüştür. Bu değer EN 14214 ve ASTM D6751 sınır değerleri arasında elde edilmiştir.

4.3.4. Değerlendirme

Doğrudan asit katalizli biyodizel üretiminde alkol türü, alkol:yağ mol oranı ve H₂SO₄ miktarının verim ve ürün özellikleri üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Deneysel koşullarda reaksiyon süresi sabit tutulmuş, sıcaklık ise kullanılan alkolün kaynama noktasına göre seçilmiştir. Verim açısından en yüksek performans metanol ile elde edilmiştir. Metanol kullanıldığında 60°C ve 30:1 mol oranında H₂SO₄ miktarının %9'a yükseltilmesiyle verim %97'ye ulaşmış; aynı koşullarda viskozite 4,8-4,9 mm²/s ve yoğunluk 0,869-0,871 g/cm³ 'e düşmüştür (D-M₃). Etanol için en iyi koşul 75°C, 30:1 ve %9 H₂SO₄ ile %95 verim, 4,9 mm²/s viskozite ve 0,870 g/cm³ yoğunluk olarak belirlenmiştir (D-E₃). 2-propanolde ise 80°C'de 30:1 ve %8 H₂SO₄ koşulunda %94 verime ulaşılmış; viskozite 4,9 mm²/s, yoğunluk ise 0,877 g/cm³ elde edilmiştir (D-P₃). Bu bulgular, verim ve akışkanlık özellikleri bakımından metanol > etanol > 2-propanol sıralaması ile daha kısa zincirli ve daha az sterik engelli alkollerin daha düşük sıcaklıkta daha yüksek dönüşüm sağladığını göstermektedir. Metanol, asitle kataliz şartında daha düşük sıcaklık gereksinimi ve daha yüksek nihai dönüşümü ile süreç açısından en avantajlı alkol olup etanol, çevresel ve tedarik avantajları düşünüldüğünde kabul edilebilir performans sunmaktadır; 2-propanol ise daha yüksek sıcaklık ihtiyacı ve nispeten düşük maksimum verim nedeniyle ikinci planda kalmaktadır.

Metanol ile yapılan asit ile esterifikasyonda alkolün kısa zincirli ve primer olması nedeniyle sterik (hacimsel) engel düşük kalmış ve reaksiyon daha kolay hızlandırılabilmiş olup daha az katalizör ve daha düşük alkol/yağ oranı ile aynı SYA hedefi yakalanabilmiştir. Buna karşılık etanol ve 2-propanol (sekonder alkol) için sterik etkiler arttığından reaktivitenin düştüğü ve esterleşmenin daha yavaş ilerlediği ve dolayısıyla aynı hedef için daha yüksek alkol oranı ve daha uzun süre gerektirdiği belirlenmiştir (Kastratović ve Bigović, 2018). Primer alkollerin (metanol, etanol) sekonder olana (2-propanol) göre daha hızlı esterleşmesi ve hız sırasının primer > sekonder olması

metanolün daha düşük dozlarda aynı SYA düşüşünü sağlamasını desteklemektedir (Kastratović ve Bigović, 2018).

Çizelge 4.17’de iki aşamalı ve doğrudan asit katalizli biyodizel üretim çalışmaları verilmiştir. Emiroğlu ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada hammadde olarak hindi rendering yağı kullanmışlardır. İlk aşamada 11:1 metanol:yağ mol oranında, %2.5 (w/w) H_2SO_4 asit katalizörü ile 1 sa esterifikasyon yapmışlardır. İkinci aşamada metanol kullanılarak 5.6:1 oranında, %1 (w/w) KOH baz katalizörü ile 1 sa transesterifikasyon işlemi uygulamışlardır. Bu koşullarda %88.5 oranında biyodizel verimi elde etmişlerdir. Encinar ve diğ. (2011) hayvansal atık yağ ile yaptıkları çalışmada metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranında, 65°C, %0.5 (w/w) H_2SO_4 kullanarak 4 sa esterifikasyon ve ikinci aşamada 6:1 metanol:yağ mol oranında ve %0.5 (w/w) KOH ile 2 sa baz katalizli transesterifikasyon uygulamışlar ve %97.3 verim elde etmişlerdir. Awad ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada hayvansal atık yağ kullanarak esterifikasyon aşamasında metanol ile 30:1 alkol:yağ mol oranında ve 60°C, %3.6 (w/w) H_2SO_4 ile 5 sa, reaksiyon gerçekleştirmişlerdir. Ardından ikinci aşamada metanol kullanarak 10:1 alkol:yağ mol oranında ve 60°C, %1.8 (w/w) H_2SO_4 ile 1 sa reaksiyon gerçekleştirilmiş ve >%98 oranında verim elde etmişlerdir. Ilavarasi Panneerselvam ve Miranda (2011) koyun yağını iki kez %1 (w/w) H_2SO_4 ile ilk aşamada 6:1 sonra 5:1 metanol:yağ mol oranında toplamda 3 sa esterifikasyona tabi tutmuş, ikinci aşamada ise 6:1 metanol:yağ mol oranında 0.39% (w/w) KOH kullanarak 1.5 sa transesterifikasyonla %94 verim elde etmişlerdir. Bhatt ve diğ. (2008) koyun yağı ile yaptıkları çalışmada %25 (w/w) H_2SO_4 ile 30:1 metanol:yağ mol oranında ve 60°C, 24 sa reaksiyon süresi ile tek aşamalı süreç gerçekleştirmişlerdir. Tek aşamalı bu süreçle %93.21 verim elde etmişlerdir.

Çizelge 4. 17. İki aşamalı ve doğrudan asit katalizli biyodizel üretim çalışmaları

Hammadde	1. Aşama (Asit)				2. Aşama (Baz)				Verim (%)	Kaynak	
	Alkol	Katalizör (w/w H ₂ SO ₄)	Sıcaklık (°C)	Alkol:Yağ Mol Oranı Süre (sa)	Alkol	Katalizör (w/w KOH)	Sıcaklık (°C)	Alkol:Yağ Mol Oranı Süre (sa)			
Hayvansal Atık Yağ	2-Propanol	%4	80±2	9:1, 6	Metanol	%0,5	60±2	6:1, 2	96,6	Bu çalışma	
		%3		12:1, 6					97,9		
		%5, %7, %9		20:1, 48					75, 80, 84		
				25:1, 48					82, 87, 93		
	Etanol	%3	75±2	9:1, 5	Metanol	%0,5	60±2	6:1, 2	97,8		
		%2		12:1, 5					97,5		
		%5, %7, %9		20:1, 48					78, 83, 86		
				25:1, 48					85, 90, 92		
	Metanol	%1	60±2	6:1, 4	Metanol	%0,5	60±2	6:1, 2	97,3		
		%1,5							98,1		
		%1,75							97,5		
		%5, %7, %9							20:1, 48		86, 91, 93
									25:1, 48		90, 93, 96
30:1, 48	92, 96, 97										
Koyun yağı	Metanol	%25	60	30:1, 24					93,21	Bhatti ve diğ. (2008)	
Hindi Rendering Yağı	Metanol	%2,5	-	11:1, 1	Metanol	%1	-	5,6:1, 1	88,5	Emiroğlu ve diğ. (2018)	
Hayvansal Atık Yağ	Metanol	%0,5	65	6:1, 4	Metanol	%0,5	-	6:1, 2	97,3	Encinar ve diğ. (2011)	
Hayvansal Atık Yağ	Metanol	%3,6	60	30:1, 5	Metanol	%1,8 H ₂ SO ₄	60	10:1, 1	>98	Awad ve diğ. (2013)	
Koyun yağı	Metanol	%1	-	6:1, 1,5	Metanol	%0,39	-	6:1, 1,5	94	Ilavarasi ve Miranda (2011)	
Hayvansal yağ	Metanol	%0,5	65	6:1, 2	Metanol	%0,5	-	6:1, 2	97,2	Encinar ve diğ. (2021)	
Fleshing yağı	Metanol	%10	-	30:1, 1	Metanol	%1	-	7,5:1, 1	82	Alptekin ve diğ. (2014)	
Hayvansal yağ	Metanol	%2	-	11:1, 1	Metanol	%1	-	6:1, 1	87,4	Keskin (2018)	
İç yağı	Metanol	%2	60	6:1, 5	Metanol	%1 NaOH	60	6:1, 1	95,7	Dias ve diğ. (2009)	
İç yağı	Metanol	%3	60	6:1, 3	Metanol	%1 NaOH	60	6:1, 1	92	Dias ve diğ. (2009)	
İç yağı	Metanol	%2,4	-	1,1:1, 1	Metanol	%1	-	6:1, 1,5	86,1	Punsuvon ve diğ. (2015)	

Encinar ve diğ. (2021) hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada metanol ile 65°C’de, 6:1 alkol:yağ mol oranında ve %0.5 (w/w) H₂SO₄ ile 2 sa reaksiyon gerçekleştirmişlerdir. İkinci aşamada metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranında %0.5 (w/w) KOH ile 2 sa reaksiyon süresi ile %97.2 verim elde etmişlerdir. Alptekin ve diğ. (2014) fleshing yağı kullanarak iki kez uygulamalı %10 (w/w) H₂SO₄ ve metanol ile 30:1 alkol:yağ mol oranında 1 sa esterifikasyon gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra metanol ile 7.5:1 alkol:yağ mol oranında %1 (w/w) KOH ile transesterifikasyon yapmışlar ve %82.0 verim elde etmişlerdir. Keskin (2018), hayvansal yağı %2 (w/w) H₂SO₄ ve metanol ile 11:1 alkol:yağ mol oranında 1 sa reaksiyon süresi ile esterifikasyon ve ardından metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranında ve %1 (w/w) KOH ile 1 sa transesterifikasyonla %87.4 verim elde etmiştir. Dias ve diğ. (2009) iç yağı ile yaptıkları çalışmada ilk aşamada metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranı ve 60°C, %2 (w/w) H₂SO₄ ile 5 sa esterifikasyon, ikinci aşamada ise 60°C, %3 (w/w) H₂SO₄ ile 3 sa işlem uygulamışlardır. Her iki durumda da ikinci aşamada metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranı ve %1 NaOH kullanılmıştır. Bu koşullarda sırasıyla %95.7 ve %92 verim elde etmişlerdir. Punsuvon ve diğ. (2015) iç yağı ile yaptıkları çalışmada metanol ile 1.1:1 (v/w) oranında %2.4 (w/w) H₂SO₄ ile 1 sa reaksiyon, ikinci aşamada metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranında ve %1 (w/w) KOH ile 1.5 sa reaksiyon süresi sonucunda %86.10 verim elde etmişlerdir. Çanakçı ve Van Gerpen (2001) hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada metanol ile 30:1 alkol:yağ mol oranında ve %5 (w/w) H₂SO₄ ile 48 sa esterifikasyon işlemi uygulamışlardır. Doğrudan asit katalizli çalışmada %98.4 verim elde etmişlerdir. Encinar ve diğ. (2011b) hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada %9 (w/w) H₂SO₄ ve metanol ile 6:1 alkol:yağ mol oranında 48 sa esterifikasyon işlemi uygulamışlardır. Doğrudan asit katalizli bu çalışmada %89.0 verim elde etmişlerdir.

Genel olarak literatürde hayvansal yağlardan biyodizel üretiminde iki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon uygulamalarında esterifikasyon basamağında H₂SO₄ ve transesterifikasyon basamağında KOH katalizörlerinin kullanıldığı, esterifikasyon basamağında 6:1-30:1 ve transesterifikasyon basamağında 6:1-7,5:1 alkol:yağ mol oranlarının ve katalizör olarak H₂SO₄ için yaklaşık %2-10, baz katalizör için %0,5-1,0 (w/w) miktarları; esterifikasyonun 60-65°C’de 1-5 sa, transesterifikasyonun 60-65°C’de 1-2 sa ve iki aşamalı verimlerin genellikle %82-96 aralığında olduğu bildirilmiştir. Bizim çalışmamızda transesterifikasyon basamağı tüm koşullarda 6:1 metanol:yağ mol oranı, %0,5 KOH ve 60°C’de 2 sa olarak sabitlenmiştir. P₁ koşulunda (9:1; %4 H₂SO₄; 6 sa; 80°C) %96,6, P₂ koşulunda (12:1; %3 H₂SO₄; 6 sa; 80°C) %97,9 verim elde edilmiştir. E₁ koşulunda (9:1; %3 H₂SO₄; 5 sa; 75°C) %97,8, E₂ koşulunda (12:1; %2 H₂SO₄; 5 sa;

75°C) %97,5 verim elde edilmiştir. M₁ koşulunda (6:1; %1 H₂SO₄; 4 sa; 60°C) %97,3, M₂ koşulunda (6:1; %1,5 H₂SO₄; 4 sa; 60°C) %98,1, M₃ koşulunda (6:1; %1,75 H₂SO₄; 4 sa; 60°C) %97,5 verim elde edilmiştir. Sonuçlar kullanılan parametrelerin literatürde verilen aralıklarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Etanol ve 2-propanol ile yapılan esterifikasyon işleminde metanole göre yüksek sıcaklık ve süre kullanılmış olup verimlerin metanol koşullarına yakın kaldığı görülmüştür. Metanol ile SYA < %1 hedefine daha az miktar kullanılarak ulaşabilmesi, metanolün daha küçük ve birincil bir alkol olarak asit katalizli esterleşmede daha hızlı ilerlemesi (alkol yapısındaki sterik/kutup etkilerinin hızı metanol > etanol > 2-propanol yönünde artırıp/azaltması) ve reaksiyon ortamının kutupluluğu sayesinde protonlanmış ara türleri daha iyi stabilize etmesiyle açıklanmaktadır (Lilja ve diğ., 2002; Lotero ve diğ., 2005). Asit katalizli Fischer esterleşmelerinde daha az sterik engelli primer alkolün (örnek: metanol) sekonder alkolden (örnek: 2-propanol) daha hızlı esterleştiği belirtilmektedir (Viales-montero ve diğ., 2006).

Çalışmamızda esterifikasyon basamağında alkol seçimi değiştirilerek uygun oran, süre ve asit miktarı kombinasyonları ile SYA < %1 değeri sağlanabilmiştir. SYA < %1 hedefine ulaşabilmek için gereken uygun alkol, katalizör, süre ve sıcaklık sıralaması metanol < etanol < 2-propanol olmuştur. Dolayısıyla esterifikasyon basamağında kimyasal ve enerji tüketimi açısından optimum koşullar metanol ile sağlanmıştır. Bu çalışma ile farklı alkollerin esterifikasyon basamağında reaksiyon koşulları nicel olarak belirlenmiştir. Her üç alkol ile ham madde ve tedarik koşullarına göre proses tasarımı sağlanabilir.

Fan ve diğ., (2024) yaptıkları çalışmada ağır dizel kamyonların taşıt ağırlığı 0-5 ton arasında yaklaşık 10 L/100 km, 60-65 ton arasında ise 60 L/100 km sefer başına yakıt tüketimi belirtilmiştir. Çizelge 4.18’de biyodizel karışım tablosu, Çizelge 4.19’da kullanılan birim fiyat ve emisyon faktörü birim değerleri verilmiştir. Çizelge 4.20’de dizel ve biyodizel yakıtların 100 km’de CO₂ emisyonu ve birim fiyatları verilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre B20’den B100’e kadar dizel yakıta göre CO₂ emisyonu ve yakıt maliyeti azalmaktadır. Hem çevresel etki hemde maliyet açısından biyodizelin özellikle ağır yük araçlarında farklı karışım oranlarında kullanımı herhalukarda avantaj sağlamaktadır.

Çizelge 4. 18. Biyodizel karışım tablosu (Şahin ve Ögüt, 2018)

Biyodizel Adı	Biyodizel Oranı	Dizel Oranı
B20	%20 Biyodizel	%80 Dizel
B50	%50 Biyodizel	%50 Dizel
B100	%100 Biyodizel	%0 Dizel

Çizelge 4. 19. Dizel ve biyodizelin birim fiyat/emisyon faktörü

Yakıt	Birim Fiyat (\$/L)	Emisyon faktörü (kg CO ₂ /L)	Emisyon faktörü kaynak
Dizel	1,44*	2,65	(GHG Protocol, 2025)
Biyodizel	0,89**	0,7	(Mata ve diğ., 2014; Xu ve diğ., 2022)

*1L dizel; ₺57,56 - \$/L; \$:40₺ kabul edilmiştir.

**Bu çalışma (M₁+30P-6)

Çizelge 4. 20. Dizel ve biyodizelin CO₂ emisyonu (kg/100 km) ve birim maliyeti (Fan ve diğ., 2024)

Yük durumu	Yakıt türü	Toplam tüketim (L/100 km)*	Dizel (L/100 km)	Biyodizel (L/100 km)	Toplam fosil CO ₂ (kg/100 km)	Toplam yakıt maliyeti (\$/100 km)
Hafif yük (0-5 ton)	100% Dizel	10	10	0	26,5	14,4
Hafif yük (0-5 ton)	B20	10	8	2	22,6	13,3
Hafif yük (0-5 ton)	B50	10	5	5	16,75	11,65
Hafif yük (0-5 ton)	B100	10	0	10	7	8,9
Ağır yük (60-65 ton)	100% Dizel	60	60	0	159	86,4
Ağır yük (60-65 ton)	B20	60	48	12	135,6	79,8
Ağır yük (60-65 ton)	B50	60	30	30	100,5	69,9
Ağır yük (60-65 ton)	B100	60	0	60	42	53,4

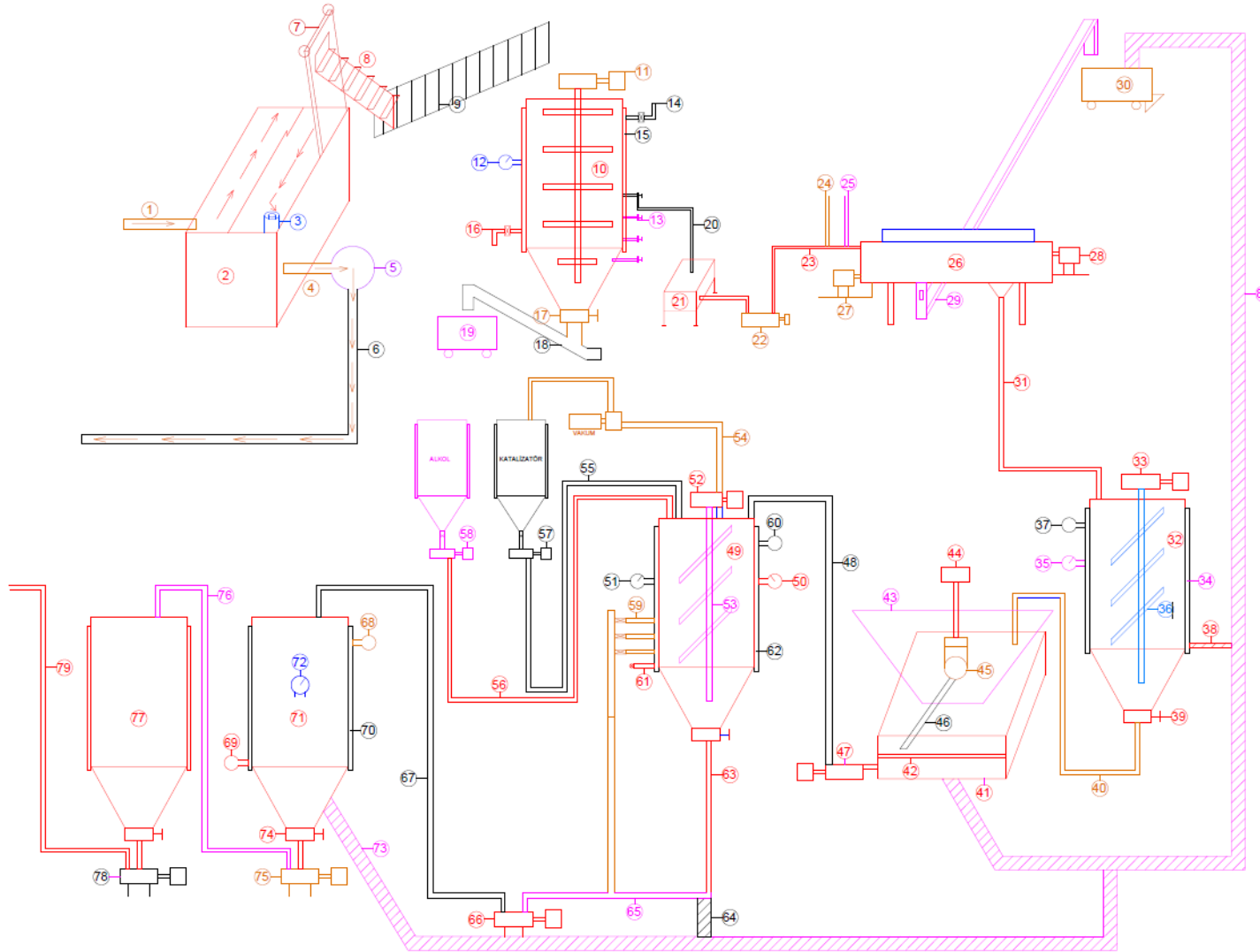
*Yakıt tükemi dizel ve biyodizel için emisyon ve birim maliyet karşılaştırması için aynı alınmıştır.

4.4. Yatırım ve Sistem Tasarım

Çalışmada günlük 1 ton ham atık yağdan ön işlem ve biyodizel üretimi için tasarlanan endüstriyel ölçekli tesis yatırım detayı ve maliyeti Çizelge 4. 21 ve akış diyagramı Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4. 21. Yapılan deneysel çalışmalara dayanarak 1 ton/gün ham atık yağdan 756 L biyodizel eldesi için gerçek ölçekli bir tesis bileşenleri ve yatırım maliyeti

No	Ekipman	YATIRIM (1 ton/gün)			Toplam (\$)
		Kapasite/Özellik	Adet	Birim Maliyet (\$)	
1	Elavatör		1	500	500
2	Atık yağ taşıyıcı bant		1	500	500
3	Atık yağ silosu	3 ton	1	1.250	1.250
4	Faz ayırma tankı besleme helezonu	220 mm	1	500	500
5	Faz ayırma tankı	1,5 ton	1	3.750	3.750
6	Faz ayırma tankı posa helezonu	220 mm	1	250	250
7	Posa toplama kovası	500L	1	125	125
8	Faz ayırma boşaltma tankı	100	1	50	50
9	Dekantör besleme pompası	2,2 kW, 1,5 ton/sa, loblu	1	1.000	1.000
10	Dekantör		1	30.000	30.000
11	Dekantör altı posa helezonu	200 mm	1	250	250
12	Yarı mamul tankı	1,5 ton	1	2.500	2.500
13	Sıyırıcılı süzdürme tankı	1,5 ton	1	750	750
14	Biyodizel reaktörü	1,5 ton	1	3.750	3.750
15	Biyodizel reaktörü boşaltma pompası	2,2 kW, 10 ton/sa, çarklı	1	1.000	1.000
16	Kimyasal tankları	100L	2	250	500
17	Kimyasal dozaj pompaları		2	125	250
18	Yarı mamul dinlendirme tankı	1,5 ton	1	2.500	2.500
19	Posa toplama helezonu	220 mm	1	1.000	1.000
20	Stok tankı	32 ton	1	3.000	3.000
21	Tanker dolum pompası	5,5 kw, 20 ton/sa, çarklı, 2"	1	1.250	1.250
22	Boru ve fittings malzemeleri		1	2.500	2.500
23	Saha beton uygulamaları	300 m ² , 20 cm	1	4.500	4.500
Toplam yatırım maliyeti (\$):					61.675



LEJANT BİLGİLERİ

1	ATIK SU GİRİŞİ	41	SÜZDÜRME TANKI
2	ÇÖKERTME HAVUZU	42	SÜZGEÇ
3	AYIRICI SIKLON	43	SÜZDÜRME HONİSİ
4	YAĞDAN AYIRIŞMIŞ ATIKSU	44	SIYIRICI REDÜKTÖRÜ
5	RÖGAR	45	KATI FAZ SIYIRICI
6	ATIKSU HATTI	46	SIYIRICI PADILI
7	ELEVATÖR	47	SÜZÜLMÜŞ YAĞ TRANSFER POMPASI
8	ELEVATÖR SAVAĞI	48	İKİNCİ REAKTÖR BESLEME HATTI
9	TAŞIYICI KONVEYÖR BANDI	49	BİYODİZEL REAKTÖRÜ
10	REAKTÖR	50	BASINÇ GÖSTERGESİ (BAROMETRE)
11	KARIŞTIRICI REDÜKTÖR	51	TERMOMETRE
12	TERMOMETRE	52	KARIŞTIRICI REAKTÖR
13	NUMUNE MUSLUKLARI	53	HIZLI KARIŞTIRICI
14	BUHAR GİRİŞİ	54	ALKOL GERİKAZANIM HATTI
15	BUHAR ÇIKIŞI	55	ALKOL BESLEME HATTI
16	BUHAR ÇIKIŞI	56	KOSTİK BESLEME HATTI
17	POŞA VANASI	57	ALKOL BESLEME POMPASI
18	ATIK HELEZONU	58	KOSTİK BESLEME
19	ÇÖP ARABASI	59	TORTU GÖZLEM VANALARI
20	YAĞ ÇIKIŞI	60	BUHAR GİRİŞİ HATTI
21	YAĞ TANKI	61	BUHAR ÇIKIŞI HATTI
22	DEKANTÖR BESLEME POMPASI	62	BUHAR ÇIKIŞI
23	DEKANTÖR BESLEME HATTI	63	TORTU VANASI
24	YAVAŞ YIKAMA	64	TORTU AKTARMA VANASI
25	HIZLI YIKAMA	65	BYPASS HATTI
26	DEKANTÖR	66	BEKLETME TANKI TRANSFER POMPASI
27	DEKANTÖR ANA MOTORU	67	BEKLETME TANKI BESLEME HATTI
28	DEKANTÖR İÇİ HELEZON MOTORU	68	BUHAR GİRİŞİ
29	POŞA ÇIKIŞ HELEZONU	69	KONDENS ÇIKIŞ
30	YAĞ DEPOLAMA	70	BUHAR ÇIKIŞI
31	DEKANTÖR YAĞ ÇIKIŞI	71	BEKLETME TANI
32	YARI MAMUL DEPOLAMA TANKI	72	TERMOMETRE
33	KARIŞTIRICI REDÜKTÖRÜ	73	GLİSERİN AKTARMA HELEZONU
34	BUHAR ÇIKIŞI	74	BOŞALTIMA VANASI
35	TERMOMETRE	75	BİYODİZEL TANKI BESLEME POMPASI
36	İÇ KARIŞTIRMA PADILLARI	76	BİYODİZEL AKTARMA HATTI
37	BUHAR GİRİŞİ	77	BİYODİZEL TANKI
38	BUHAR ÇIKIŞI	78	SEVKİYAT POMPASI
39	BOŞALTIMA VANASI	79	SEVKİYAT BORU HATTI
40	AKTARMA HATTI	80	YEM HAMMADE TAŞINIMI

Şekil 4. 2. Akış diyagramı

4.5. Biyodizel Üretim Maliyet Hesabı

Elde edilen biyodizel için optimum koşulların belirlenmesinde EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarını sağlayan biyodizellere ait birim maliyetler Çizelge 4.22, 4.23 ve 4.24'te verilmiştir. Literatürde optimum koşulların belirlenmesinde verim (%) ve maliyet (\$/L) birlikte esas alındığından bu çalışmada da karşılaştırmalar aynı birimler üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre düşük maliyetli en yüksek biyodizel verimi katı yağdan iki aşamalı işlemde M₂ koşulunda elde edilmiştir. Bu koşulda birim maliyet 0,40 \$/L'dır. Benzer verim sağlayan M₁ koşulunda birim maliyet 0,38 \$/L olarak daha düşük elde edilmiştir. Bu durum verimde sadece %0,8'lik bir fark olmasına rağmen maliyette avantaj sağlamaktadır. Etanol ve 2-propanol kullanılan aynı koşullarda verim benzer düzeyde kalmış ancak birim maliyet uygulanabilir seviyeye (etanol:0,55-0,52 \$/L, 2-propanol:0,76-0,82 \$/L) yükselmiştir. Katı yağdan biyodizel değerlendirmesi sonucunda verim-maliyet dengesi açısından en uygun koşulun metanol ile 6:1 mol oranında %1 (w/w) H₂SO₄ kullanılarak 4 sa yapılan esterifikasyon, ardından 2 sa bazik transesterifikasyon olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.22 ve 4.23). Bu koşul (M₁), endüstriyel ölçekte verim, ekonomik sürdürülebilirlik ve alkolün önemli bir kısmının distilasyon ile geri kazanılabilirliği açısından en avantajlı çözüm olarak değerlendirilmiştir. Alternatif olarak da E₁ ve P₂ biyodizelleri değerlendirilebilir bulunmuştur.

Sıvı yağdan en uygun biyodizel maliyet açısından metanol ve etanol bazlı 40M-6 ve 30E-6 biyodizellerinin birim maliyetleri sırasıyla 1,0 ve 1,24 \$/L ile minimum gerçekleşmiştir (Çizelge 4.24). Fakat 30E-6 için biyoetanol kullanımı ile birim maliyetin 1,00 \$/L'nin altına düşürülmesi mümkün olduğu için en uygun biyodizel üretim koşulu 30E-6 olarak değerlendirilmiştir. Buna ilaveten benzer şekilde biyopropanol kullanımı ile 20P-6 biyodizel birim maliyetinin de uygulanabilir fiyat aralığına getirilmesi mümkün olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4. 22. Katı yağdan iki aşamalı esterifikasyon ve transesterifikasyon ile elde edilen biyodizelin verim ve birim maliyeti (\$/L; \$:40₺)

Koşul	1. Aşama (Asit) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa)	2. Aşama (Baz) Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa)	Verim (%)	Birim Maliyet (\$/L)
M ₁	Metanol / 6:1 / %1 H ₂ SO ₄ / 4	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	97,3	0,38
M ₂	Metanol / 6:1 / %1,5 H ₂ SO ₄ / 4	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	98,1	0,40
M ₃	Metanol / 6:1 / %1,75 H ₂ SO ₄ / 4	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	97,5	0,41
E ₁	Etanol / 9:1 / %3 H ₂ SO ₄ / 5	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	97,8	0,55
E ₂	Etanol / 12:1 / %2 H ₂ SO ₄ / 5	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	97,5	0,52
P ₁	2-Propanol / 9:1 / %4 H ₂ SO ₄ / 6	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	96,6	0,82
P ₂	2-Propanol / 12:1 / %3 H ₂ SO ₄ / 6	Metanol/ 6:1 / %0,5 KOH / 2	97,9	0,76

Çizelge 4. 23. Katı yağdan doğrudan asit katalizli ile elde edilen biyodizelin verim ve birim maliyeti (\$/L; \$:40₺)

Koşul	Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa)	Verim (%)	Birim Maliyet (\$/L)
D-M ₃	Metanol / 30:1 / %7 H ₂ SO ₄ / 48	96	0,95
	Metanol / 30:1 / %9 H ₂ SO ₄ / 48	97	1,01
D-E ₃	Etanol / 30:1 / %7 H ₂ SO ₄ / 48	91	1,50
	Etanol / 30:1 / %9 H ₂ SO ₄ / 48	95	1,51
D-P ₃	2-Propanol / 30:1 / %7 H ₂ SO ₄ / 48	92	2,56
	2-Propanol / 30:1 / %9 H ₂ SO ₄ / 48	94	2,58

Çizelge 4. 24. Sıvı yağdan baz kataliz ile elde edilen biyodizelin verim ve birim maliyeti (\$/L; \$:40₺)

Koşul	Alkol / Alkol:Yağ / Katalizör (w/w) / Süre (sa)	Verim (%)	Birim Maliyet (\$/L)
35M-6	Metanol / 35:1 / %0,8 KOH / 6	79,8	0,97
40M-6	Metanol / 40:1 / %0,8 KOH / 6	83,1	1,00
30E-6	Etanol / 30:1 / %0,8 KOH / 6	92,3	1,24
35E-6	Etanol / 35:1 / %0,8 KOH / 6	95,6	1,35
40E-6	Etanol / 40:1 / %0,8 KOH / 6	97,3	1,46
20P-6	2-Propanol / 20:1 / %0,8 KOH / 6	86,2	1,78
25P-4	2-Propanol / 25:1 / %0,8 KOH / 4	91,2	2,01
25P-6	2-Propanol / 25:1 / %0,8 KOH / 6	92,4	1,98
30P-4	2-Propanol / 30:1 / %0,8 KOH / 4	94,2	2,27
30P-6	2-Propanol / 30:1 / %0,8 KOH / 6	97,2	2,20
35P-6	2-Propanol / 35:1 / %0,8 KOH / 6	97,8	2,50
40P-6	2-Propanol / 40:1 / %0,8 KOH / 6	98,1	2,80

Çalışma sonucu en uygun koşul seçilen M₁ ve alternatif olarak en yakın birim maliyetli değerlendirilebilecek P₂ ve E₁ koşullarına ait yakıt özellikleri Çizelge 4.25'te verilmiştir.

Çizelge 4. 25. M₁, P₂ ve E₁ yakıt özellikleri

Parametre	EN 14214	ASTM D6751	Birim	M ₁	P ₂	E ₁
Ester İçeriği	≥ 96,5	-	% (m/m)	97,5	96,9	97,1
Yoğunluk (15°C)	0,860 - 0,900	-	g/cm ³	0,872	0,881	0,882
Kinematik Viskozite (40°C)	3,5 - 5,0	1,9 - 6,0	mm ² /s	4,42	4,91	4,85
Parlama Noktası	≥ 120	≥ 93	°C	167,8	171,5	169,7
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	İklim koşullarına bağlıdır	-	°C	7,2	8,3	7,4
Oksidasyon Kararlılığı (110°C)	≥ 8,0	≥ 3	sa	10,8	11,4	10,3
İyot Sayısı	≤ 120	-	g I ₂ /100g	42,5	46,4	45,9
Asit Sayısı	≤ 0,50	≤ 0,50	mg KOH/g	0,39	0,45	0,41
Setan Sayısı	≥ 51	≥ 47	-	64,34	63,74	63,86
Molekül ağırlığı	-	-	g/mol	287,37	287,16	287,05

Tekli doymamış yağ asitlerinin oranları biyodizelin soğuk hava koşullarındaki akıcılık özelliklerini olumlu yönde etkilerken doymuş yağ asitleri oksidatif kararlılık açısından avantaj sağlamaktadır. Yakıt analizlerine göre ise %97,5 ester içeriği ile EN 14214 standardında belirtilen ≥ 96,5 sınırını sağlamaktadır. Yoğunluk (15°C'de 0,872 g/cm³) ve viskozite (4,42 mm²/s) sonuçları hem Avrupa hem de Amerika biyodizel standartlarıyla uyumludur. Parlama noktası 167,8°C değeri ile güvenli depolama ve taşımaya uygundur. Setan sayısı 64,34 ile yüksek tutuşma kalitesi sunmaktadır. Asit sayısı (0,39 mg KOH/g) ve iyot sayısı (42,5 g I₂/100g) da sınır değerlerin altında kalmakta ve oksidatif stabilite için avantaj sağlamaktadır. Soğuk filtre tıkanma noktası 7,2°C olup bu değer ılıman iklim koşullarında kabul edilebilir düzeydedir. Ancak daha düşük sıcaklıklarda kullanım için katkı maddesi uygulamaları gerekebilir.

Çizelge 4.26'da Avrupa, ABD ve Türkiye için farklı biyodizel/karışım türlerine ait litre başına fiyat aralıkları (\$/L) verilmiştir.

Çizelge 4. 26. Avrupa, ABD ve Türkiye biyodizel birim fiyatları

Bölge	Ürün Türü	\$/L	Kaynak
Avrupa	YAME 0 ¹	1,170-1,179	(Argusmedia.com, 2023)
	RME ²	1,195-1,204	
	UCOME ³	1,279-1,288	
ABD	SME (B100) ⁴	0,742-1,038	(Center for Agricultural and Rural Development, 2025)
Türkiye	BİYODİZEL İHTİVA EDEN MOTORİN ⁵	1,289-1,373	(7 Kıta Petrolcülük Dağıtım ve Pazarlama A.Ş., 2025)
M ₁	1. Metanol:yağ 6:1, %1 H ₂ SO ₄ , 60°C, 4 sa, 2. Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa	0,38	Bu çalışma
E ₁	1. Etanol:yağ 9:1, %3 H ₂ SO ₄ , 75°C, 5 sa 2. Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa	0,55	
P ₂	1.2-propanol:yağ 12:1, %3 H ₂ SO ₄ , 80°C, 6 sa 2. Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa	0,76	
40M-6	Metanol:yağ 40:1, 6 sa	1,00	
30E-6	Etanol:yağ 30:1, 6 sa	1,24	
20P-6	2-propanol:yağ 20:1, 6 sa	1,78	

¹YAME 0: Yağ Asidi Metil Esteri - "0" EN 14214'e göre iklim/sınıf belirtmektedir.

²RME: Rapeseed Methyl Ester - kolza/kanola yağı metil ester.

³UCOME: Used Cooking Oil Methyl Ester - kullanılmış kızartma yağı metil ester.

⁴SME (B100): Soybean Methyl Ester - soya yağı metil ester; B100 yakıtın %100 biyodizel (karışım yapılmamış) olduğunu göstermektedir.

⁵Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, *Motorin Türlerine Biyodizel Harmanlanması Hakkında Tebliğ*, Resmi Gazete, 16.06.2017, Sayı 30098 (son değişiklik: 03.11.2023, Sayı 32358). Biyodizel harmanlanarak kullanılmakta olup birim fiyat Tebliğe istinaden harmanlanmış motorin üzerinden verilmiştir.

Çizelge 4.26'ya göre Avrupa'da YAME için 1,170-1,179 \$/L, RME için 1,195-1,204 \$/L ve UCOME için 1,279-1,288 \$/L aralığında değerler bildirilmektedir. En yüksek fiyatın UCOME'da, en düşük seviyenin ise YAME'de olduğu görülmektedir. ABD'de SME (B100) için verilen 0,742-1,038 \$/L aralığına göre genel olarak Avrupa ve Türkiye'de raporlanan aralıklara kıyasla daha düşük bir değerdedir. Türkiye'de biyodizel ihtiva eden motorin için 1,289-1,373 \$/L fiyatının Avrupa'daki özellikle UCOME benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte karşılaştırmalar dönem ve ürün kapsamı açısından sınırlıdır. M₁ (0,38 \$/L) ve E₁ (0,55 \$/L) koşullarının maliyeti hem ABD (0,742-1,038 \$/L) hem Avrupa (1,170-1,288 \$/L) biyodizel fiyatlarının ve Türkiye'de biyodizel içeren motorin maliyetinin (1,289-1,373 \$/L) altında kalarak en ekonomik seçenekler olmuştur. P₂ (0,76 \$/L) ve 40M-6 (1,00 \$/L) maliyetleri ABD aralığı içinde olup Avrupa ve Türkiye aralığının altında kalmıştır. 30E-6 (1,24 \$/L) Avrupa'daki YAME/RME üstünde, UCOME ve Türkiye aralığının altında ve ABD aralığının üstündedir. 20P-6 (1,78 \$/L) ise tüm referansların üstünde kalarak en yüksek maliyetli koşul olmuştur.

M₁ koşulunda (6:1 metanol:yağ mol oranı, %1 H₂SO₄, 4 sa esterifikasyon ve 6:1 metanol:yağ mol oranı, 2 sa %0,5 KOH ile transesterifikasyon) elde edilen 0,872 g/cm³ yoğunluk ve 4,42 mm²/s viskozite değerleri hayvansal yağlardan üretilen farklı çalışmalarda biyodizel değerleri ile karşılaştırılmıştır (Çizlege 4.27). Keskin (2018) çalışmasında 11:1 metanol:yağ mol oranı ve %2 H₂SO₄ ile yapılan tek aşamalı transesterifikasyon sonucu 0,882 g/cm³ yoğunluk ve 4,29 mm²/s viskozite değerleri elde etmiştir. M₁ koşuluna kıyasla bu değerler yoğunluk açısından benzer, viskozite açısından ise 0,13 mm²/s düşüktür. Keskin'in çalışmasında daha yüksek kimyasal kullanmış olmasına rağmen M₁ koşulu benzer kaliteyi daha düşük kimyasal sarfiyatı ile sağlayabilmektedir. Awad ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada 30:1 metanol:yağ mol oranı ve %3,6 H₂SO₄ ile 5 sa'lik esterifikasyon yaparak 0,87 g/cm³ yoğunluk ve 5,7 mm²/s viskozite elde etmişlerdir. M₁ koşulu benzer yoğunlukla birlikte 1,28 mm²/s daha düşük viskozite sağlamıştır. Alptekin ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada metanol ile 30:1 metanol:yağ mol oranı, %10 H₂SO₄ ile esterifikasyon yapmış ve 0,889 g/cm³ yoğunluk ve 5,34 mm²/s viskozite elde etmişlerdir. Bu değerler M₁ koşulu ile karşılaştırıldığında sırasıyla 0,017 g/cm³ daha yüksek yoğunluk ve 0,92 mm²/s daha yüksek viskozite elde edilmiştir. Emiroğlu ve diğ. (2018) 11:1 metanol:yağ mol oranı, %2,5 H₂SO₄ ve KOH ile iki aşamalı işlem sonucunda 0,885 g/cm³ yoğunluk ve 4,49 mm²/s viskozite elde etmişlerdir. Bu değerlerle karşılaştırıldığında M₁ koşulu 0,013 g/cm³ daha düşük yoğunluk ve 0,07 mm²/s daha düşük viskoziteye sahiptir. Panneerselvam ve Miranda (2011) yaptıkları çalışmada 6:1 metanol:yağ mol oranı ve %1 H₂SO₄ ile 1,5 sa esterifikasyon sonucunda 0,882 g/cm³ yoğunluk ve 4,75 mm²/s viskozite elde etmişlerdir. Bu değerler M₁'e kıyasla yoğunlukta 0,01 g/cm³, viskozitede ise 0,33 mm²/s daha yüksektir. Bhatti ve diğ. (2008) 30:1 metanol oranı ve %25 H₂SO₄ ile 24 sa doğrudan asit katalizli işlemde 0,856 g/cm³ yoğunluk ve 5,9 mm²/s viskozite elde etmişlerdir. Bu değerler M₁'e göre yoğunlukta 0,016 g/cm³ daha düşük, viskozitede ise 1,48 mm²/s daha yüksektir.

Çizelge 4. 27. Biyodizel içerik karşılaştırma tablosu

Hammadde	Parlama noktası (°C)	Soğuk filtre tıkanma noktası (SFTN, °C)	Asit sayısı (mg KOH/g)	İyot sayısı (g I ₂ /100 g)	Setan sayısı	Molekül ağırlığı (g/mol)	Kaynak
Hayvansal atık yağ	167,8	7,2	0,39	42,5	64,34	287,37	Bu çalışma (M ₁)
Hayvansal atık yağ	-	-	-	-	58,8	-	Öner ve Altun, 2009
Sığır donyağı	-	10	-	-	-	-	Mata ve diğ., 2010
Sığır donyağı	152	15	-	-	-	-	Teixeira ve diğ., 2010
Hayvansal atık yağ	175	8	0,23	66,7	-	-	Encinar ve diğ., 2011
Dana yağı	-	-	-	-	-	251,07	Sander ve diğ., 2018
Sığır yağı	-	-	-	-	-	264,88	Sander ve diğ., 2018
İçyağ	-	-	-	-	-	258,15	Sander ve diğ., 2018
Sığır içyağı	190	-	0,9	-	-	-	Hariprasath ve diğ., 2019
Hayvansal atık yağ	173,5	-	-	-	-	-	Keskin ve diğ., 2020
Mezbaha atıkları	-	-	-	-	66	-	Srinivasan ve diğ., 2020
Domuz içyağı	175	-	0,22	66,7	56	-	Toldrá-Reig ve diğ., 2020
Koyun donyağı	≥160	-	0,167	126	-	-	Toldrá-Reig ve diğ., 2020
Sığır donyağı	172	-	0,20	44,4	59	-	Toldrá-Reig ve diğ., 2020

Çizelge 4.27'ye göre bu çalışmada (M₁) ölçülen parlama noktası (167,8°C) hayvansal kökenli biyodizeller için literatürde bildirilen 152-190°C aralığıyla uyumlu olup güvenli depolama açısından yeterlidir. SFTN (7,2°C) sığır donyağı biyodizeli için verilen 10-15°C değerlerinden daha iyi, atık hayvansal yağ için bildirilen 8°C'ye ise yakındır. Asit sayısını 0,39 mg KOH/g ölçülmüş ve EN 14214 sınırı (<0,5 mg KOH/g) altında kalmış, literatürdeki değerlere yakınlık göstermektedir. İyot sayısı 42,5 g I₂/100 g ile sığır donyağına yakın ve domuz içyağı/atık yağ ya da koyun donyağı için belirtilen değerlerin altında olup daha doymuş bir YAME içeriğini göstermektedir. Bu durum ise oksidatif kararlılık ve setan sayısı açısından avantaj, soğuk akışta ise sınırlayıcı etki oluşturma eğilimindedir. Setan sayısı 64,34 sonucu mezbaha atıkları ile benzer olup diğer hayvansal kökenli biyodizellerde ki değerlere yakındır. Elde edilen setan sayısı ateşleme kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde çalışma sonuçları literatürle uyumlu olup güvenlik, ateşleme kalitesi ve oksidatif kararlılık

açısından uygun bir profil sunmaktadır. Soğuk iklimlerde tek başına kullanım için katkı maddesi veya uygun harmanlama gibi uygulamalarla SFTN'nin iyileştirilmesi önerilmektedir. Parlama noktası, yakıt buharlarının kapalı kapta bir tutuşturucuya maruz kaldığında alev alabileceği en düşük sıcaklıktır (Mata ve diğ., 2010). Biyodizel yakıtlarının parlama noktası dizel yakıtlara göre daha yüksektir. Biyodizelin depolanması, taşınması ve işlenmesi süreçlerinde daha yüksek güvenlik düzeyi sağlanması için önemli bir parametredir (Barabás ve diğ., 2010). Parlama noktası, transesterifikasyonla elde edilen biyodizeldeki atık alkol miktarının bir ölçütü olarak da kabul edilmektedir ve yakıtın kalite ve saflık düzeyini doğrulamak için kullanılmaktadır (Sarin, 2012). SFTN, yakıtın kristalleşmeye başladığı ve bu kristallerin yakıt filtrelerini tıkararak yakıt akışını engellediği en düşük sıcaklık değeri olarak tanımlanmaktadır. Bu özellik, düşük ortam sıcaklıklarında yakıtın akış davranışını belirleyen temel bir göstergedir. Özellikle soğuk iklim koşullarına sahip bölgelerde çevre sıcaklığının kristalleşme için yeterince düşük değerlere düşmesi nedeniyle SFTN motor çalışması ve yakıt sisteminin güvenilirliği açısından önemlidir (Al-Shanableh ve diğ., 2023). İyot sayısı, biyodizelin doymamışlık derecesinin belirlenmesinde kullanılan bir parametre olup standart koşullarda 100 gr biyodizelin absorbe ettiği iyot miktarını ifade etmektedir (Sarin, 2012). Oksidasyon stabilitesi, yakıtın havadaki oksijenle zaman içinde bozulmaya karşı direncidir. Doymamış yağ asidi metil esterleri oksitlenince önce hidroperoksitler, sonra aldehit/asit ve polimerik ürünler oluşur ve bu da asit sayısını ve viskoziteyi artırır, saklama sırasında çamur ve depozit yaparak filtre tıkanmaları ve enjektör sorunlarına yol açabilir (Waynick, 2005; Zuleta ve diğ., 2012). Setan sayısı, yakıtın tutuşma kalitesini ifade eden ve yakıtın kendi kendine tutuşma eğilimini ölçen bir göstergedir. Bu parametre, kompresyonla ateşlemeli motorlarda yanma sürecinin karakteristiğini belirleyen önemli bir kalite parametresidir (Aradi ve Ryan, 1995). Doymuş yağ asitlerince zengin hammaddelerden üretilen biyodizellerin setan sayısı, doymamışlık düzeyi daha yüksek hammaddelerden üretilen yakıtlara kıyasla daha yüksektir (Knothe ve diğ., 2003).

Çizelge 4.28'de literatürde çalışması yapılmış olan bazı hayvansal yağlardan üretilen biyodizele ait yağ asidi metil esteri içerikleri verilmiştir.

Çizelge 4. 28. M₁ (1.aşama: Metanol:yağ 6:1, %1 H₂SO₄, 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C) yağ asidi metil esteri bileşenleri ve karşılaştırma

Hammadde	C14:0	C14:1	C15:0	C15:1	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	Kaynak
Hayvansal atık yağ	2,28	0,23	0,39	0,2	28,39	3,14	1,2	0,47	20,09	41,36	1,9	0,18	0,09	0,08	Bu çalışma (M ₁)
Koyun iç yağı	0,79	-	0,86	-	28,1	0,42	0,14	-	27,2	31,28	1,59	-	0,61	-	Bhatti ve diğ. (2008)
İç yağı	2,76	-	0,79	-	24,47	2,14	1,59	-	35,7	29,66	0,74	-	0,25	-	Moraes ve diğ. (2008)
Sığır iç yağı	2,72	-	0,39	-	25,33	2,02	1,67	-	34,7	29,87	0,75	-	0,28	-	da Cunha ve diğ. (2009)
Hayvansal atık yağ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,78	-	-	-	-	Sander ve diğ. (2018)
Dana iç yağı	5,75	-	0,29	-	23,17	3,16	0,7	-	13	-	6,31	-	0,15	-	Sander ve diğ. (2018)
Domuz iç yağı	1,14	-	0,08	-	19,79	2,05	-	-	11,81	-	10,87	-	0,23	-	Sander ve diğ. (2018)
Sığır iç yağı	-	-	0,41	-	31,38	1,82	1,21	-	25,24	-	1,43	-	0,28	-	Sander ve diğ. (2018)

Çizelge 4.28'e göre oleik asit metil esteri (C18:1) bu çalışmada %41,36 oranındadır. Bu değer, Bhatti ve diğ., (2008) koyun iç yağı ile yaptıkları çalışma sonucunda ki %31,28 ve da Cunha ve diğ., (2009) sığır iç yağı ile yaptıkları çalışma sonucunda ki %29,87 değerlerine göre daha yüksektir. Moraes ve diğ., (2008) iç yağı ile yaptıkları çalışmada ise bu oran %29,66'dır. Sander ve diğ., (2018) atık hayvansal yağ ile yaptıkları çalışmada %37,78 ile benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlar çalışmamızdaki oleik asit oranının karşılaştırılan çalışmalardan Sander ve diğ. (2018) hayvansal atık yağ ile yaptıkları çalışma sonucu değeri ile benzerlik göstermekte olup diğer çalışmalara göre ise yüksek değere sahiptir. Palmitik asit metil esteri (C16:0) oranı yaptığımız çalışmada %28,39'dur. Bu değer, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %28,10 olarak bildirilen değere benzer, Moraes ve diğ., (2008) tarafından %24,47, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %25,33, Sander ve diğ., (2018) tarafından dana yağı %23,17 ve domuz yağı %19,79 olarak bildirilen değerlere göre daha yüksek, Sander ve diğ., (2018) tarafından sığır iç yağı %31,38 olarak bildirilen değerden daha düşüktür. Genel olarak değerlendirildiğinde çalışmamızdaki palmitik asit içeriği karşılaştırılan literatür değerleri ile uyumludur. Stearik asit metil esteri (C18:0) çalışmamızda %20,09 oranındadır. Bu oran, Moraes ve diğ., (2008) tarafından %35,70, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %34,70, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %27,20, Sander ve diğ., (2018) tarafından sığır iç yağı %25,24 olarak bildirilen değerlerin altındadır. Sander ve diğ., (2018) tarafından domuz %11,81 ve dana iç dana iç yağı %13,00 değerlerinin üstünde kalmıştır. Palmitoleik asit metil esteri (C16:1), çalışmamızda %3,14 olarak ölçülmüştür. Bu oran, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %0,42 olarak bildirilmiş olup oldukça düşüktür. Moraes ve diğ., (2008) tarafından %2,14, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %2,02 olarak bildirilen değerlerin üstünde kalmıştır. Sander ve diğ., (2018) dana iç yağı %3,16 ile neredeyse aynı bulunmuş, sığır iç yağı %1,82 ve domuz iç yağı %2,05 olarak daha düşük değerler belirtilmiştir. Linoleik asit metil esteri (C18:2), çalışmamızda %1,90 oranındadır. Bu değer, Moraes ve diğ., (2008) tarafından %0,74, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %0,75, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %1,59, Sander ve diğ., (2018) tarafından sığır yağı %1,43 olarak bildirilen değerlerden yüksek olup Sander ve diğ., (2018) tarafından domuz yağı %10,87, dana yağı %6,31 olarak bildirilen değerlerden düşük çıkmıştır. Heptadekanoik asit metil esteri (C17:0), çalışmamızda %1,20 olarak belirlenmiştir. Bu değer, Moraes ve diğ., (2008) tarafından %1,59, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %1,67 olarak bildirilen değerlerin altında. Bhatti ve diğ., (2008) tarafınadn %0,14, Sander ve diğ., (2018) tarafından dana iç yağı %0,70, domuz yağı %0,41 sonuçlarından yüksek ve sığır yağı

%1,21 sonucu ile benzerdir. Miristik asit metil esteri (C14:0), çalışmamızda %2,28 oranındadır. Bu oran, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %0,79 olarak belirlenmiştir. Moraes ve diğ., (2008) %2,76 ve da Cunha ve diğ., (2009) %2,72 olarak bildirilen oranlarla benzerlik göstermektedir. Sander ve diğ., (2018) tarafından dana yağında %5,75 ile daha yüksek, domuz yağında ise %1,14 ile daha düşük değerler belirtmişlerdir. Pentadekanoik asit metil esteri (C15:0) değeri çalışmamızda %0,39'dur. Moraes ve diğ., (2008) tarafından %0,79, Bhatti ve diğ., tarafından (2008) %0,86 olarak belirtilen değerlerden düşük, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %0,39, Sander ve diğ., (2018) tarafından sığır iç yağı %0,41 olarak belirtilen değerlerle benzer sonuç elde edilmiştir. Sander ve diğ., (2018) tarafından dana %0,29 ve domuz yağında %0,08 olarak bildirilen değerlerden yüksek sonuç elde edilmiştir. Arakidik asit metil esteri (C20:0), çalışmamızda %0,09 oranındadır. Bu değer, Sander ve diğ., (2018) tarafından dana yağı %0,15 olarak bildirilen değere yakın, Moraes ve diğ., (2008) tarafından %0,25, Bhatti ve diğ., (2008) tarafından %0,61, da Cunha ve diğ., (2009) tarafından %0,28, Sander ve diğ., (2018) tarafından sığır yağında %0,28 ve domuz yağında %0,23 olarak belirtilen değerlerden oldukça düşüktür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada entegre et ve süt tesisi proses atıksuyundan elde edilen hayvansal yağdan üretilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ve parametreler literatürdeki hayvansal yağlar kullanılarak üretilmiş farklı biyodizel örnekleriyle karşılaştırılmıştır.

5.1. Sonuçlar

Çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

1. Atıksudan yağ ayırma için uygulanan yoğunluk farkıyla ayırma, dekantör santrifüj ve çöktürmeli filtrasyon ön işlemleri sonucunda 35 kg ham numuneden sırasıyla 13-17 kg katı yağ (%37-49) ve 5-7 kg sıvı yağ (%14-20) elde edilmiştir. Ön işlemler aşamasında toplam 11-17 kg (%31-49) katı atık ve su uzaklaştırılmıştır.
2. Yoğunluklarına göre ayırma ön işleminde 100°C, 20 dk eritme ve 1,5 sa sedimantasyon ile 22-27 kg kullanılabilir üst faz yağ elde edilmiştir. TKM alt fazda %76-84, orta fazda %8-13; UKM alt fazda %43-61, orta fazda %3-8; yağ içeriği alt fazda %0,6-0,9 ve orta fazda %0,5-0,3 aralıklarında elde edilmiştir.
3. EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarına uygunluk değerlendirmesi baz katalizli için Çizelge 5.1, doğrudan asit katalizli için Çizelge 5.2 ve iki aşamalı esterifikasyon-transesterifikasyon için Çizelge 5.3'te verilmiştir. Türkiye'de EN 14214 standardının geçerli olması nedeniyle biyodizel eldesinde en önemli parametre viskozite olarak belirlenmiştir.
4. Sıvı yağdan her iki standardı sağlayan biyodizel elde koşulları (2-propanol (20:1-6 sa; 25:1-4/6 sa; 30:1-4/6 sa; 35-40:1-6 sa), etanol (30:1-6 sa; 35-40:1-6 sa) ve metanol (35-40:1-6 sa)), elde edilen biyodizellerden en uygun maliyetlileri ise metanol:yağ 40:1 6sa (1,00 \$/L) ve etanol:yağ 30:1 6 sa (1,24 \$/L) olarak elde edilmiştir.
5. Katı yağdan metanol kullanarak her iki standardı sağlayan biyodizel elde koşulları: doğrudan asit katalizli; metanol:yağ 30:1, %7-9 H₂SO₄, 48 sa, 60°C koşullarında 0,95–1,01 \$/L ve iki aşamalı; 1. aşama metanol:yağ 6:1, %1-1,75 H₂SO₄, 60°C, 4 sa, 2. aşama metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa koşullarında 0,38-0,41 \$/L'dir.
6. Katı yağdan etanol kullanılarak her iki standardı sağlayan biyodizel elde koşulları: doğrudan asit katalizli; etanol:yağ 30:1, %7-9 H₂SO₄, 48 sa, 75°C koşullarında 1,50-1,51

- \$/L ve iki aşamalı; 1. aşama etanol:yağ 9:1, %3 H₂SO₄ / 12:1 %2 H₂SO₄, 75°C, 5 sa, 2. aşama metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa koşullarında 0,52-0,55 \$/L.
7. Katı yağdan 2-propanol kullanılarak her iki standardı sağlayan biyodizel elde koşulları: doğrudan asit katalizli; 2-propanol:yağ 30:1, %7-9 H₂SO₄, 48 sa, 80°C koşullarında 2,56-2,58 \$/L ve iki aşamalı; 1. aşama 2-propanol:yağ 9:1, %4 H₂SO₄ / 12:1, %3 H₂SO₄, 80°C, 6 sa, 2. aşama metanol:yağ 6:1, %0,5 KOH, 60°C, 2 sa koşullarında 0,76-0,82 \$/L.
8. Gerçek ölçekli üretim için endüstriyel tesis iş akış şeması oluşturulmuş ve yatırım maliyeti 61675 \$ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5. 1. Sıvı yağda baz kataliz uygulamalı transesterifikasyon sonuçları

Koşul	Sistem Baz katalizli	Alkol:Yağ Mol Oranı	Reaksiyon Süresi (sa)	EN 14214	ASTM D6751
20P-4	2-Propanol	20:1	4	Uygun	Uygun
20P-6		20:1	6	Uygun	Uygun
25P-2		25:1	2	Uygun Değil	Uygun
25P-4		25:1	4	Uygun	Uygun
25P-6		25:1	6	Uygun	Uygun
30P-2		30:1	2	Uygun Değil	Uygun
30P-4		30:1	4	Uygun	Uygun
30P-6		30:1	6	Uygun	Uygun
35P-6		35:1	6	Uygun	Uygun
40P-6		40:1	6	Uygun	Uygun
20E-6	Etanol	20:1	6	Uygun Değil	Uygun
25E-4		25:1	4	Uygun Değil	Uygun
25E-6		25:1	6	Uygun Değil	Uygun
30E-4		30:1	4	Uygun Değil	Uygun
30E-6		30:1	6	Uygun	Uygun
35E-6		35:1	6	Uygun	Uygun
40E-6		40:1	6	Uygun	Uygun
20M-6	Metanol	20:1	6	Uygun Değil	Uygun
25M-4		25:1	4	Uygun Değil	Uygun
25M-6		25:1	6	Uygun Değil	Uygun
30M-4		30:1	4	Uygun Değil	Uygun
30M-6		30:1	6	Uygun Değil	Uygun
35M-6		35:1	6	Uygun	Uygun
40M-6		40:1	6	Uygun	Uygun

Çizelge 5. 2. Katı yağda tek basamak asit katalizli esterifikasyon sonuçları

Koşul	Sistem Doğrudan asit katalizli	Alkol:Yağ Mol Oranı	Reaksiyon Süresi (sa)	Koşul Açıklaması	EN 14214	ASTM D6751
D-P ₁ (%5)	2-Propanol	20:1	48	2-Propanol, %5 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₁ (%7)				2-Propanol, %7 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₁ (%9)				2-Propanol, %9 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₂ (%5)		25:1		2-Propanol, %5 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₂ (%7)				2-Propanol, %7 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₂ (%9)				2-Propanol, %9 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₃ (%5)		30:1		2-Propanol, %5 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-P ₃ (%7)				2-Propanol, %7 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun	Uygun
D-P ₃ (%9)				2-Propanol, %9 H ₂ SO ₄ , 80°C, 48 sa	Uygun	Uygun
D-E ₁ (%5)	Etanol	20:1	48	Etanol, %5 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₁ (%7)				Etanol, %7 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₁ (%9)				Etanol, %9 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₂ (%5)		25:1		Etanol, %5 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₂ (%7)				Etanol, %7 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₂ (%9)				Etanol, %9 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₃ (%5)		30:1		Etanol, %5 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-E ₃ (%7)				Etanol, %7 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun	Uygun
D-E ₃ (%9)				Etanol, %9 H ₂ SO ₄ , 75°C, 48 sa	Uygun	Uygun
D-M ₁ (%5)	Metanol	20:1	48	Metanol, %5 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₁ (%7)				Metanol, %7 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₁ (%9)				Metanol, %9 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₂ (%5)		25:1		Metanol, %5 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₂ (%7)				Metanol, %7 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₂ (%9)				Metanol, %9 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₃ (%5)		30:1		Metanol, %5 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun Değil	Uygun
D-M ₃ (%7)				Metanol, %7 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun	Uygun
D-M ₃ (%9)				Metanol, %9 H ₂ SO ₄ , 60°C, 48 sa	Uygun	Uygun

Çizelge 5. 3. Katı yağda iki aşamalı esterifikasyon+transesterifikasyon uygulama sonuçları

Koşul	Sistem İki kademeli (asit + baz)	Koşul Açıklaması	EN 14214	ASTM D6751
P ₁	2-Propanol + Metanol	1. aşama: 2-Propanol 9:1, %4 H ₂ SO ₄ , 6 sa, 80°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
P ₂		1. aşama: 2-Propanol 12:1, %3 H ₂ SO ₄ , 6 sa, 80°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
E ₁	Etanol + Metanol	1. aşama: Etanol 9:1, %3 H ₂ SO ₄ , 5 sa, 75°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
E ₂		1. aşama: Etanol 12:1, %2 H ₂ SO ₄ , 5 sa, 75°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
M ₁	Metanol + Metanol	1. aşama: Metanol 6:1, %1 H ₂ SO ₄ , 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
M ₂		1. aşama: Metanol 6:1, %1,5 H ₂ SO ₄ , 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun
M ₃		1. aşama: Metanol 6:1, %1,75 H ₂ SO ₄ , 4 sa, 60°C; 2. aşama: Metanol 6:1, %0,5 KOH, 2 sa, 60°C	Uygun	Uygun

5.2. Öneriler

Elde edilen sonuçlarla biyodizelin entegre et ve süt tesisi atıksuyundan uygun maliyetle EN 14214 standardında biyodizel eldesinin farklı yöntemlerle uygulanabileceği ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın akademik ve endüstriyel devamında;

- Elde edilen biyodizel örneklerinin yakıt karakterizasyonu, motor deneyi, emisyon analizlerinin yapılması,
- Aynı koşullarda biyoetanol ve biopropanol kullanılarak verim ve maliyetin değerlendirilmesi,
- Üretim sürecinde bütün faktörlerin göz önüne alındığı Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) ve Tekno-Ekonomik Analizin (TEA) gerçekleştirilmesi,
- Baz alınan tesis bünyesinde bütünleşik sistem yapılarak biyogaz entegrasyonu veya gliserolün araştırılması,
- Baz alınan tesis bünyesinde biyodizel ve biyogaz entegre sistem araştırılması,
- Gliserolün kimyasal/biyoteknolojik değerlendirilmesi

önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Acaroğlu, M. (2003). *Alternatif enerji kaynakları*. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- Acaroğlu, M. (2008). Türkiye’de biyokütle-biyometanol ve biyomotorin kaynakları ve biyoyakıt enerjisinin geleceği. *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES’2008)*, ss. 351–362, İstanbul, Türkiye.
- Acharya, B., Guru, P. S., & Dash, S. (2016). Tween-80–n-butanol/isobutanol–(Diesel+Kerosene)–Water microemulsions–Phase behavior and fuel applications. *Fuel*, 171, 87–93.
- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(3), 205–212.
- Adewale, P., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 574–588.
- Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233–271.
- Akbal, O. (2013). *Ağır ticari taşıt dizel motoru SCR sisteminin sıcaklık modellemesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Lisansüstü Programı, İstanbul.
- Akgün, G., Bayındır, H., Aydın, H., & Düz, Z. (2009). Hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve teknik değerlerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma. *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, s. 131–136.
- Akhlaghi, N., & Najafpour-Darzi, G. (2020). A comprehensive review on biological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 22492–22512.
- Akyarlı, A., Alpaslan, N., Çiçek, T., Diktaş, E., Elmacı, Y., Karagözlü, C., Öztüre, N., Sayın, R., Sezerman, U., & Sındır, K. O. (2004). Biyodizel yakıtın uluslararası standartlarda üretimi. In *Biyoenerji 2004 Sempozyumu bildirileri* (ss. 3–10). İzmir, Türkiye.
- Al-Asheh, S., Banat, F., & Al-Lagtah, N. (2004). Separation of ethanol–water mixtures using molecular sieves and biobased adsorbents. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(7), 855–864.
- Al-Shanableh, F., Bilin, M., Evcil, A., & Savas, M. A. (2023). Estimation of cold flow properties of biodiesel using ANFIS-based models. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2), 5440–5457.
- Al Azad, S., Wuen, L. Y., & Lal, M. T. B. M. (2019). Potential of fish wastes as feedstock for biodiesel. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 10(5), 109–118.
- Alhassan, F. H., & Uemura, Y. (2016). Isopropanolysis of Cottonseed Oil to Biodiesel via Potassium Hydroxide Catalyst. *Procedia Engineering*, 148, 473–478.
- Ali Ijaz Malik, M., Zeeshan, S., Khubaib, M., Ikram, A., Hussain, F., Yassin, H., & Qazi, A. (2024). A review of major trends, opportunities, and technical challenges in biodiesel production from waste sources. *Energy Conversion and Management: X*, 23(July), 100675.
- Alleman, T. L., McCormick, R. L., Christensen, E. D., Fioroni, G., Moriarty, K., & Yanowitz, J. (2016). *Biodiesel handling and use guide*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Almohasin, J. A., Balag, J., Miral, V. G., Moreno, R. V., Tongco, L. J., & Lopez, E. C. R. (2023). *Green Solvents for Liquid – Liquid Extraction : Recent Advances and Future Trends*. 1–11.

- Alptekin, E. (2013). *Hayvansal atık yağlardan biyodizel üretimi ve bir dizel motorda kullanımının incelenmesi* (Doktora tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Kocaeli.
- Alptekin, E., & Canakci, M. (2011). Optimization of transesterification for methyl ester production from chicken fat. *Fuel*, 90(8), 2630–2638.
- Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2012). Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production. *Fuel*, 95, 214–220.
- Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2014). Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. *Waste Management*, 34(11), 2146–2154.
- Altınsoy, A. S. (2007). *Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye'deki kaynakların incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Altun, Ş., & Cengiz, Ö. (2008). Hayvansal iç yağlardan transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretilmesi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 116–120.
- Anastopoulos, G., Zannikou, Y., Stournas, S., & Kalligeros, S. (2015). Transesterification of vegetable oils with ethanol and characterization of the key fuel properties of ethyl esters. *Energies*, 2(2), 362–376.
- Andreatta, A., Casás, L., Hegel, P., Bottini, S., & Brignole, E. (2008). Phase Equilibria in Ternary Mixtures of Methyl Oleate, Glycerol, and Methanol. *Industrial & Engineering Chemistry Research - ind eng chem res*, 47.
- Anye, G. M. T. B., Bosman, C. C. E., & Zhang, Z. M. D. (2024). Towards industrial biological hydrogen production : a review. In *World Journal of Microbiology and Biotechnology* (Vol. 40, Issue 1). Springer Netherlands.
- Aradi, A. A., & Ryan, T. W. (1995). *Cetane effect on diesel ignition delay times measured in a constant volume combustion apparatus*. SAE Technical Paper.
- Argus Media. (2023). *Argus International LPG: Daily international LPG prices and market commentary* (Issue 23-61). Argus Media.
- Arnaud, E., Trystram, G., Relkin, P., & Collignan, A. (2006). Thermal characterization of chicken fat dry fractionation process. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 390–397.
- Aslan, F., Mürtezaoğlu, K., & Melikoğlu, M. (2024). Techno-economic analysis and calculation of environmental impacts of biodiesel production from animal fat wastes in Turkey. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(4).
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, Hh., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3275–3285.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Aziz, A. A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Aziz, A. A. (2011). Biodiesel separation and purification: A review. *Renewable Energy*, 36(2), 437–443.
- Awad, S., Paraschiv, M., Varuvel, E. G., & Tazerout, M. (2013). Optimization of biodiesel production from animal fat residue in wastewater using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 129, 315–320.

- Aydın, F., Hidayet, O., & Hüseyin, Ö. (2023). Investigation of the usability of biodiesel from horse oil in diesel engines. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 37(1), 155–166.
- Aydın, H. (2007). *Pamuk yağı biyodizelinin bir dizel motorunda motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Diyarbakır.
- T.C. Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). *Motorlu araçlar teknolojisi: Egzoz emisyon kontrolü* (525MT0300). Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.
- Balat, M., & Balat, H. (2010). Progress in biodiesel processing. *Applied Energy*, 87(6), 1815–1835.
- Balcı, A. B. (2009). *Menengiç yağından elde edilen biyodizelin ve karışımlarının yakıt özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Barabás, I., Todoruț, A., & Băldean, D. (2010). Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends. *Fuel*, 89(12), 3827–3832.
- Basu, P., & Kaushal, P. (2023). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction: Practical Design, Theory, and Climate Change Mitigation* (4th ed.). Academic Press. <https://shop.elsevier.com/books/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction/basu/978-0-443-13784-6>
- Batista, M. M., Guirardello, R., & Krähenbühl, M. A. (2015). Determination of the Hansen Solubility Parameters of Vegetable Oils, Biodiesel, Diesel, and Biodiesel–Diesel Blends. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92(1), 95–109.
- Bayraç, H. N. (2009). Küresel Enerji Politikaları Ve Türkiye: Petrol Ve Doğal Gaz Kaynakları Açısından Bir Karşılaştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(1), 115–142.
- Behçet, R., Oktay, H., Çakmak, A., & Aydın, H. (2015). Comparison of exhaust emissions of biodiesel–diesel fuel blends produced from animal fats. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 157–165.
- Benjumea, P. N., Agudelo, J. R., & Ríos, L. A. (2007). Cold flow properties of palm oil biodiesel. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 42, 94–104.
- Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Faruq, U., & Sheikh, M. A. (2008). Acid and base catalyzed transesterification of animal fats to biodiesel. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 27(4), 41–48.
- Bhatti, H. N., Hanif, M. A., & Qasim, M. (2008). Biodiesel production from waste tallow. *Fuel*, 87(13–14), 2961–2966.
- Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., & Ata-ur-Rehman. (2008). Biodiesel production from waste tallow. *Fuel*, 87(13–14), 2961–2966.
- Biyodizel Sanayi Derneği. (2019). *Biyodizel Endüstri Raporu 1: Sürdürülebilir bir gelecek için yerli yeşil yakıt biyodizel*. İzmir: Biyodizel Sanayi Derneği.
- Boichenko, S., Yakovlieva, A., & Zubenko, S. (2025). *Physical, Chemical, and Performance Properties of Biodiesel Fuels: A Comparative Study of Lipid-Based Feedstocks*. 1–25.
- Bond, K. (2020). vision: Why you should see peak fossil fuels coming. *Carbon Tracker, London*.
- Boocock, D. G. B., Konar, S. K., Mao, V., Lee, C., & Buligan, S. (1998). Fast formation of high-purity methyl esters from vegetable oils. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(9), 1167–1172.
- Borat, O., Balcl, M., & Sürmen, A. S. (1992). Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği. *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları-3, Ankara*, 1–4.

- Bousbaa, H., Awad, S., Tazerout, M., & Liazid, A. (2012). Investigations on a compression ignition engine using animal fats and vegetable oil as fuels. *Journal of Energy Resources Technology*, 134(2), 022202.
- Bridgwater, A. V. (2011). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
- Calliauw, G. (2025). Dry Fractionation. In *AOCS Lipid Library*. American Oil Chemists' Society. <https://www.aocs.org/resource/dry-fractionation/>
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. (1999). Biodiesel production via acid catalysis. *Transactions of the ASAE*, 42(5), 1203–1210.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. (2001). Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1429.
- Canakci, M., & Van Gerpen, J. H. (2003). Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 937.
- Carlucci, C. (2022). An overview on the production of biodiesel enabled by continuous flow methodologies. *Catalysts*, 12(7), 717.
- Çengelci, E. (2011). *Hayvansal yağlardan elde edilen biyodizelin motor performans ve emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Center for Agricultural and Rural Development. (2025). *Historical Operating Margins: Biodiesel*. <https://www.card.iastate.edu/tools/operating-margins/biodiesel/>
- Chamara, I., Nilmalgoda, H., & Wimalasiri, E. (2025). Efficient Free Fatty Acid Reduction in Palm Oil Mill Effluent (POME) for Biodiesel Production: Challenges and Optimization Strategies. *Challenges*, 16(2), 28.
- Changlin, Y., Yoshiyuki, K., Ryoji, K., & Kei, M. (2000). Effects of Fuel Properties on Combustion and Emissions of a Direct-Injection Diesel Engine. *Bulletin of the Marine Engineering Society in Japan*, 28(2), 1–8.
- Chavarria-Hernandez, J., Ordóñez, L., Barahona-Pérez, L. F., Castro-Gomez, M., & Paredes-Cervantes, S. (2017). Perspectives on the utilization of waste fat from beef cattle and fowl for biodiesel production in Mexico. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(5), 899–905.
- Chem-Supply. (2007). *Isopropyl Alcohol Product Number 323*. <https://shop.chemsupply.com.au/documents/323.pdf>
- Cheng, J., Huang, R., Li, T., Zhou, J., & Cen, K. (2014). Biodiesel from wet microalgae: Extraction with hexane after the microwave-assisted transesterification of lipids. *Bioresource Technology*, 170, 69–75.
- Chew, T. L., & Bhatia, S. (2008). Catalytic processes towards the production of biofuels in a palm oil and oil palm biomass-based biorefinery. *Bioresource Technology*, 99(17), 7911–7922.
- Chumsantea, S., Aryusuk, K., Lilitchan, S., Jeyashoke, N., & Krisnangkura, K. (2012). Reducing oil losses in alkali refining. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(10), 1913–1919.
- Costa Neto, P. R., Rossi, L. F. S., Zagonel, G. F., & Ramos, L. P. (2000). Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. *Química Nova*, 23, 531–537.
- Csernica, S., & Hsu, J. (2010). Reverse-Phase Ternary Phase Diagram, Tie Lines, and Plait Point for Commercial Biodiesel–Glycerol–Methanol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50.
- Cunha Jr, A., Feddern, V., Marina, C., Higarashi, M. M., De Abreu, P. G., & Coldebella, A. (2013). Synthesis and characterization of ethylic biodiesel from

- animal fat wastes. *Fuel*, 105, 228–234.
- da Cunha, M. E., Krause, L. C., Moraes, M. S. A., Faccini, C. S., Jacques, R. A., Almeida, S. R., Rodrigues, M. R. A., & Caramão, E. B. (2009). Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 570–575.
- Dağ, C. (2013). *Biyodizel su karışımlarının dizel motor performansı ve emisyonu üzerine etkilerinin deneysel incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı, İstanbul.
- Darnoko, D., & Cheryan, M. (2000). Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77, 1263–1267.
- Demir, C. (2006). Biyodizel Standartları ve Analiz Yöntemleri. *Biyoyakıt Dünyası Dergisi*, 1, 48–49.
- Demir, C. (2007). Kızartma yağlarında kalite kontrol parametreleri ve ölçüm yöntemleri. *Biyoyakıt Dünyası Dergisi*, (8), 36.
- Demirbas, A. (2006). Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics. *Energy Conversion and Management*, 47(15–16), 2271–2282.
- Demirbas, A. (2009). Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 14–34.
- Demiröz, G. (2010). *Seçici katalitik indirgeme sisteminin ağır taşıt motorlarında kullanımının optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Bilim Dalı, İstanbul.
- Dhar, B. R., & Kirtania, K. (2009). Excess Methanol Recovery in Biodiesel Production Process Using a Distillation Column: A Simulation Study. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 13(2), 55–60.
- Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Almeida, M. F. (2009a). Production of biodiesel from acid waste lard. *Bioresource Technology*, 100(24), 6355–6361.
- Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Almeida, M. F. (2009b). Production of biodiesel from acid waste lard. *Bioresource Technology*, 100(24), 6355–6361.
- Division, E. S. (2008). *Life-Cycle Assessment of Energy and Greenhouse Gas Effects of Soybean-Derived Biodiesel and Renewable Fuels*.
- Doğan, O., Celik, M. B., & Özdalyan, B. (2012). The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 95, 340–346.
- Dogan, T. H., & Temur, H. (2013). Effect of fractional winterization of beef tallow biodiesel on the cold flow properties and viscosity. *Fuel*, 108, 793–796.
- Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gomez, J., & Lopez, F. J. (2003). Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. *Fuel*, 82(11), 1311–1315.
- Dunn, R. O. (2011). Improving the cold flow properties of biodiesel by fractionation. In T.-B. Ng (Ed.), *Soybean: Applications and technology* (ss. 211–240). Rijeka, Croatia: InTech.
- Dwivedi, G., & Sharma, M. P. (2013). Cold flow behaviour of biodiesel-A review. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(4), 827–836.
- Edition, F. (2008). Biodiesel Handling and Use Guide. *Natl. Renew. Energy Lab. Innov. Our Energy Futur*.
- Ejder, S. B. (2007). *Etanol-dizel, biyodizel-dizel yakıt karışımlarının kullanımının motor performansına etkilerinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764.
- Emiroğlu, A. O., Keskin, A., & Şen, M. (2018a). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216, 266–273.
- Emiroğlu, A. O., Keskin, A., & Şen, M. (2018b). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, 216(July 2017), 266–273.
- Encinar, J. M., Nogales-Delgado, S., & Sánchez, N. (2021). Pre-esterification of high acidity animal fats to produce biodiesel: A kinetic study. *Arabian Journal of Chemistry*, 14, 103048.
- Encinar, J. M., Sánchez, N., Martínez, G., & García, L. (2011). Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresource Technology*, 102(23), 10907–10914.
- Er, S., & Özçelik, A. (2016). Ankara'daki sığır besi işletmelerinin ekonomik yapısının faktör analizi ile incelenmesi. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 26(1), 17–25.
- Erdem, K. O. Ç., & Kadir, K. (2015). Enerji kaynakları–yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56(668), 36–47.
- Erdoğan, S., Balki, M. K., Aydın, S., & Sayın, C. (2020). Performance, emission and combustion characteristic assessment of biodiesels derived from beef bone marrow in a diesel generator. *Energy*, 207, 118300.
- Erel, F. P. (2014). *Biyodizel üretiminde ters lojistik uygulamaları* (Yüksek lisans tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Ergün, O. F., & Bayram, B. (2021). Türkiye'de Hayvancılık Sektöründe Yaşanan Değişimler. *Bahri Dağdaş Hayvancılık Araştırma Dergisi*, 10(2), 158–175.
- Eroglu, E., & Melis, A. (2011). Bioresource Technology Photobiological hydrogen production : Recent advances and state of the art. *Bioresource Technology*, 102(18), 8403–8413.
- Erol, A., Kemanoğlu, F., Ay, M. A., & Uysal, B. Z. (2006). Değişik yağlardan elde edilen biyodizellerin karşılaştırılması. *Enerji Bitkileri ve Yeşil Yakıtlar Sempozyumu*, İzmir.
- Erwin, J. (1992). Assay of diesel fuel components properties and performance. *Symposium on Processing and Product Selectivity of Synthetic Fuels, Division of Fuel Chemistry, American Chemical Society, Washington DC, USA*, 23–28.
- Eryılmaz, T. (2009). *Hardal yağı biyodizelinde farklı karışım oranlarının dizel motorlarda performans etkisi* (Doktora tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Konya.
- Eryılmaz, T., Yeşilyurt, M. K., Cesur, C., Yumak, H., Aydın, E., Çelik, S. A., & Yıldız, A. K. (2014). Yozgat ili şartlarında yetiştirilen aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Dinçer çeşidinden üretilen biyodizelin yakıt özelliklerinin belirlenmesi. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 2014(1), 62–75.
- Esipovich, A. L., Kanakov, E. A., Charykova, T. A., Otopkova, K. V., Smirnov, M. A., Mityukova, Y. A., & Belousov, A. S. (2024). A comprehensive study on physicochemical properties of fatty acid esters derived from different vegetable oils and alcohols and their potential application. *Energies*, 17(24), 6407.
- Espinosa, M., Canielas, L., Silvana, M., Moraes, A., Schmitt, C., Assis, R., Rodrigues, S., Regina, M., Rodrigues, A., & Bastos, E. (2009). Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 570–575.

- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. (2024). *Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA)*. Ankara.
- Fadhil, A., & Ahmed, A. (2018). Production of mixed methyl/ethyl esters from waste fish oil through transesterification with mixed methanol/ethanol system. *Chemical Engineering Communications*, 205, 1–10.
- Fan, P., Song, G., Zhai, Z., Wu, Y., & Yu, L. (2024). Fuel consumption estimation in heavy-duty trucks : Integrating vehicle weight into deep-learning frameworks. *Transportation Research Part D*, 130(December 2023), 104157.
- Fournier, J. (2017). Chemical Method for Determining Ester Content in Biodiesel Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term heat demand forecast. *Energy Procedia*, 138, 536–543.
- Gandure, J., Ketlogetswe, C., & Jonas, M. (2017). Production, composition and fuel properties of tallow biodiesel: A case of Botswana. *Energy and Power Engineering*, 9(7), 355–365.
- Gent, S., Twedt, M., Gerometta, C., & Almberg, E. (2017). *Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction: for biofuels and value-added products*. Butterworth-Heinemann.
- Gerpen, J. Van, Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D., & Knothe, G. (2004). Biodiesel production technology. *National Renewable Energy Laboratory*, 1617, 80401–83393.
- Giakoumis, E. G., & Sarakatsanis, C. K. (2018). Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition. *Fuel*, 222, 574–585.
- Goering, C. (1992). *Engine and Tractor Power*. Breton Publishers, Boston, Massachusetts, USA.
- Gokul, R. S., & Jambulingam, R. (2019). Computational analysis of methyl oleate in biodiesel produced from waste beef tallow. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 23(2), 51–59.
- Gotovuša, M., Pucko, I., Racar, M., & Faraguna, F. (2022). Biodiesel produced from propanol and longer chain alcohols—Synthesis and properties. *Energies*, 15(14), 4996.
- Granjo, J. F. O., Nunes, D. S., Duarte, B. P. M., & Oliveira, N. M. C. (2020). A comparison of process alternatives for energy-efficient bioethanol downstream processing. *Separation and Purification Technology*, 238(June 2019), 116414.
- Greenhouse Gas Protocol. (2025). Calculation tools and guidance. GHG Protocol. <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-and-guidance>
- Hansen, C. M. (2007). *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook* (2nd ed.). CRC Press.
- Hansen, C. M. (2025). Surface Energy and Hansen Solubility Parameters. In *Hansen Solubility Parameters*. https://www.hansen-solubility.com/HSP-science/Surface_Energy.php
- Hartwing, A., MAK Commission, & Arand, M. (2024). Triglycerides (lard oil, palm oil, rapeseed oil, soybean oil). *The MAK Collection for Occupational Health and Safety*, 9(2), 1–33.
- Harvey, D. (2019). 12.5: High-performance liquid chromatography. In *Analytical chemistry 2.1*. LibreTexts. https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.1_%28Harvey%29/12%3A_Chromatographic_and_Electrophoretic_Methods/12.05%3A_High-Performance_Liquid_Chromatography
- Haşımoğlu, C. (2005). *Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının*

- performans ve emisyon parametrelerine etkisi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Haşımoğlu, C., İçingür, Y., & Özsert, İ. (2008). Turbo şarjlı bir dizel motorda yakıt olarak biyodizel kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1).
- Haşımoğlu, C., İçingür, Y., & Ögüt, H. (2002). Dizel motorlarında egzoz gazları resirkülasyonunun (EGR) motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, 127–135.
- Helwani, Z., Othman, M. R., Aziz, N., Fernando, W. J. N., & Kim, J. (2009). Technologies for production of biodiesel focusing on green catalytic techniques: a review. *Fuel Processing Technology*, 90(12), 1502–1514.
- Crosier, R. L., & Hendrixon, J. E. (2014). *Brown grease separator* (United States Patent No. US 8,911,513 B2). United States Patent and Trademark Office.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169.
- Homan, T., Shahbaz, K., & Farid, M. M. (2017). Improving the production of propyl and butyl ester-based biodiesel by purification using deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, 174, 570–576.
- Horváth, I. S., Tabatabaei, M., Karimi, K., & Kumar, R. (2016). Recent updates on biogas production – A review. *Biofuel Research Journal*, 3(2), 394–402.
- HSP Basics. (2025). In *Hansen Solubility Parameters WT - Hansen Solubility Parameters*. <https://www.hansen-solubility.com/HSP-science/basics.php>
- Huang, R., Cheng, J., Qiu, Y., Li, T., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Using renewable ethanol and isopropanol for lipid transesterification in wet microalgae cells to produce biodiesel with low crystallization temperature. *Energy Conversion and Management*, 105, 791–797.
- Hub, S. U. U. E. L. (2025). *Energy for Transportation*. Stanford University. <https://understand-energy.stanford.edu/energy-services/energy-transportation>
- Idowu, I., Pedrola, M. O., Wylie, S., Teng, K. H., Kot, P., Phipps, D., & Shaw, A. (2019). Improving biodiesel yield of animal waste fats by combination of a pre-treatment technique and microwave technology. *Renewable Energy*, 142, 535–542.
- Ilavarasi Panneerselvam, S., & Miranda, L. R. (2011). Biodiesel production from mutton tallow. *Proceedings of the 2011 IEEE 1st Conference on Clean Energy and Technology (CET 2011)*, 83–86.
- Invexoil. (2024). *Edible Oil Refining Process*. <https://invexoil.com/edible-oil-refining-process/>
- Işıksoluğu, M. A. (1997). Dizel motorlu taşıtların egzoz gazındaki duman koyuluğu ve ölçümde karşılaşılan sorunlar. *Mühendis ve Makina*, 38(453), 22–24.
- İşler, A., Sundu, S., Tüter, M., & Karaosmanoğlu, F. (2010). Transesterification reaction of the fat originated from solid waste of the leather industry. *Waste Management*, 30(12), 2631–2635.
- Janaun, J., & Ellis, N. (2010). Perspectives on biodiesel as a sustainable fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1312–1320.
- Jayasinghe, P., & Hawboldt, K. (2012). A review of bio-oils from waste biomass: Focus on fish processing waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 798–821.
- Jayathilakan, K., Sultana, K., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2012). Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries:

- a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 278–293.
- Jeong, C. S., & Kang, J. (2000). Effects of fuel composition and properties on autoignition of automotive diesel engine. *Applied Chemistry*, 4(1), 125–128.
- Jin, Y., Cha, J., Jeong, W., Lee, M., Cho, B., Nisha, B., Jin, H., Eun, S., & Ok, S. (2022). Bioresource Technology Bio-isopropanol production in *Corynebacterium glutamicum* : Metabolic redesign of synthetic bypasses and two-stage fermentation with gas stripping. *Bioresource Technology*, 354(February), 127171.
- Karaca, E., & Aytac, S. (2007). Yağ bitkilerinde yağ asitleri kompozisyonu üzerine etki eden faktörler. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(1), 123–131.
- Karaosmanoğlu, F. (2002). Türkiye için çevre dostu-yenilenebilir bir yakıt adayı: biyomotorin. *Ekojenerasyon Dünyası-Kojenerasyon Dergisi*, ICC1, 50–56.
- Karmakar, B., & Halder, G. (2021). Accelerated conversion of waste cooking oil into biodiesel by injecting 2-propanol and methanol under superheated conditions : A novel approach. *Energy Conversion and Management*, 247(September), 114733.
- Kastratović, V., & Bigović, M. (2018). Esterification of stearic acid with lower monohydroxylic alcohols. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 24(3), 283–291.
- Kaya, A. (2007). *Kızartma atığı yağlarından süperkritik alkol transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel elde edilmesi* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Kaya, M. (2010). *Biyodizel-dizel karışımı kullanılan bir dizel motorda püskürtme basıncının performans ve emisyonlara etkisi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Keleş, R., & Hamamcı, C. (2002). Çevrebilim (4. Baskı). *Ankara: İmge Kitabevi*.
- Kerihuel, A., Kumar, M. S., Bellettre, J., & Tazerout, M. (2005). Use of animal fats as CI engine fuel by making stable emulsions with water and methanol. *Fuel*, 84(12–13), 1713–1716.
- Kerihuel, A., Kumar, M. S., Bellettre, J., & Tazerout, M. (2006). Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel–Part 1: Formulations and influential parameters. *Fuel*, 85(17–18), 2640–2645.
- Keskin, A. (2005). *Tall yağı esaslı biyodizel ve yakıt katkı maddesi üretimi ve bunların dizel motor performansı üzerindeki etkileri* (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Keskin, A. (2018). Two-step methyl ester production and characterization from the broiler rendering fat: The optimization of the first step. *Renewable Energy*, 122, 216–224.
- Kirubakaran, M., Arul Mozhi Selvan, V., Singh, S. K., Chauhan, A., Sarkar, B., Ashfaq Ahmed, S., Elahi M. Soudagar, M., Rahamathullah, I., Sathik Basha, J., Yunus Khan, T. M., Javed, S., Elfasakhany, A., Kalam, M. A., E.R. Akhabue, Eyibio, U. P., Ukanwa, K. S., Adepoju, T. F., Amabogha, B., & Balogun, T. A. (2023). Strategy planning for sustainable biodiesel supply chain produced from waste animal fat. *Fuel*, 332(October 2017), 100347.
- Kiss, A. A., & Ignat, R. M. (2012). Enhanced methanol recovery and glycerol separation in biodiesel production – DWC makes it happen. *Applied Energy*, 99, 146–153.
- Knothe, G. (2005). Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1059–1070.
- Knothe, G., Dunn, R. O., & Bagby, M. O. (1997). Biodiesel: the use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels. *ACS Symposium Series*, 666, 172–208.

- Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krah, J. (2005). *The biodiesel handbook*. Champaign, IL: AOCS Press.
- Knothe, G., Matheaus, A. C., & Ryan III, T. W. (2003). Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester. *Fuel*, 82(8), 971–975.
- Knothe, G., Van Gerpen, J. H., & Krah, J. (2005). *The biodiesel handbook* (Vol. 1). AOCS press Champaign, IL.
- Koç, M. (2011). *Biyodizel üretimine uygun Türkiye'de yetişen ve yetiştirilecek bitkilerin ve biyodizel teknolojilerinin belirlenmesi* (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Koca Yenioglu, V. (2009). *Biyodizel sentezi ve katkı maddelerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Kolet, M., Zerbib, D., Nakonechny, F., & Nisnevitch, M. (2020). Production of biodiesel from brown grease. *Catalysts*, 10(10), 1189.
- Krieger, R. B. (1966). The computation of apparent heat release for internal combustion engines. *ASME Paper 66-WA/DGP-4*.
- Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J., & Tazerout, M. (2005). Experimental investigations on the use of preheated animal fat as fuel in a compression ignition engine. *Renewable Energy*, 30(9), 1443–1456.
- Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J., & Tazerout, M. (2006). A comparative study of different methods of using animal fat as a fuel in a compression ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 128(4), 907–914.
- Kusdiana, D., & Saka, S. (2004). Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*, 91(3), 289–295.
- Laboratory, N. R. E. (2008). *Biodiesel Handling and Use Guide: Fourth Edition*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <http://www.osti.gov/bridge>
- Lam, M. K., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2010). Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review. *Biotechnology Advances*, 28(4), 500–518.
- Lang, X., Dalai, A. K., Bakhshi, N. N., Reaney, M. J., & Hertz, P. B. (2001). Preparation and characterization of bio-diesels from various bio-oils. *Bioresource Technology*, 80(1), 53–62.
- Larimi, A., Harvey, A. P., Phan, A. N., Beshtar, M., Wilson, K., & Lee, A. F. (2024). Aspects of Reaction Engineering for Biodiesel Production. *Catalysts*, 14(10).
- Lee, D.-W., Park, Y.-M., & Lee, K.-Y. (2009). Heterogeneous base catalysts for transesterification in biodiesel synthesis. *Catalysis Surveys from Asia*, 13, 63–77.
- Lee, I., Johnson, L. A., & Hammond, E. G. (1995). Use of branched-chain esters to reduce the crystallization temperature of biodiesel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 72, 1155–1160.
- Li, D., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-gao, Z., & Jian-Guang, Y. (2005). Physico-chemical properties of ethanol–diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy*, 30(6), 967–976.
- Li, Y., Meng, L., Nithyanandan, K., Lee, T. H., Lin, Y., & Lee, C. F. (2016). Combustion, performance and emissions characteristics of a spark-ignition engine fueled with isopropanol- n -butanol-ethanol and gasoline blends. *Fuel*, 184, 864–872.
- Lilja, J., Murzin, D. Y., Salmi, T., Aumo, J., Maäki-Arvela, P., & Sundell, M. (2002). Esterification of different acids over heterogeneous and homogeneous catalysts and

- correlation with the taft equation. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 182(183), 555–563.
- Lim, B. P., Maniam, G. P., & Hamid, S. A. (2009). Biodiesel from adsorbed waste oil on spent bleaching clay using CaO as a heterogeneous catalyst. *European Journal of Scientific Research*, 33(2), 347–357.
- Limmatvapirat, C., Limmatvapirat, S., Krongrawa, W., Ponphaiboon, J., Witchuchai, T., Jiranuruxwong, P., Theppitakpong, P., & Pathomcharoensukchai, P. (2021). Beef tallow: Extraction, physicochemical property, fatty acid composition, antioxidant activity, and formulation of lotion bars. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 11(9), 018–028.
- Lin, C.-W., & Tsai, S.-W. (2015). Production of biodiesel from chicken wastes by various alcohol-catalyst combinations. *Journal of Energy in Southern Africa*, 26(1), 36–45.
- Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., & Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031.
- Lísa, M., Netušilová, K., Franěk, L., Dvořáková, H., Vrkoslav, V., & Holčápek, M. (2011). Characterization of fatty acid and triacylglycerol composition in animal fats using silver-ion and non-aqueous reversed-phase high-performance liquid chromatography/mass spectrometry and gas chromatography/flame ionization detection. *Journal of Chromatography A*, 1218(42), 7499–7510.
- Lopez, A., Mascolo, G., Mininni, G., & Pastore, C. (2016). Efficient solvent-less separation of lipids from municipal wet sewage scum and their sustainable conversion into biodiesel. *Renewable Energy*, 90, 55–61.
- Lotero, E., Liu, Y., Lopez, D. E., Suwannakarn, K., Bruce, D. A., & Goodwin, J. G. Jr. (2005). Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(14), 5353–5363.
- Lowry, J. (2017). Avoiding Carbon Apocalypse Through Alternative Energy. *Palomar Library*, 1.
- Lu, J., Nie, K., Xie, F., Wang, F., & Tan, T. (2007). Enzymatic synthesis of fatty acid methyl esters from lard with immobilized *Candida* sp. 99-125. *Process Biochemistry*, 42(9), 1367–1370.
- Luther, W., Eickenbusch, H., Kaiser, O. S., & Brand, L. (2015). *Application of nanotechnologies in the energy sector*. Hessen Trade & Invest GmbH.
- M. Victoria Ruíz-Méndez; M. Carmen Dobarganes. (2019). *Oil Refining*. <https://www.aocs.org/resource/oil-refining>
- Ma, F., & Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15.
- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 497–509.
- Maia, A. C. de S., Silva, I. S. e., & Stragevitch, L. (2013). Liquid-Liquid Equilibrium of Methyl Esters of Fatty Acid / Methanol / Glycerol and Fatty Acid Ethyl Esters / Ethanol / Glycerol: A Case Study for Biodiesel Application. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4(5), 285–289.
- Manuale, D. L., Torres, G. C., Badano, J. M., Vera, C. R., & Yori, J. C. (2013). Adjustment of the biodiesel free fatty acids content by means of adsorption. *Energy and Fuels*, 27(11), 6763–6772.
- Martínez, E. N., Muíño, R., Hernández Bermúdez, J., Díaz González, L., Benedito, J. L., & Castillo, C. (2025). Milk fat depression in dairy cattle: Etiology, prevention,

- and recovery approaches. *Ruminants*, 5(3), 38.
- Martini, S., Awad, T., & Marangoni, A. G. (2006). Structure and properties of fat crystal networks. In *Modifying Lipids for Use in Food*.
- Mata, T. M., Cardoso, N., Ornelas, M., Neves, S., & Caetano, N. S. (2010). Sustainable production of biodiesel from tallow, lard and poultry fat and its quality evaluation. *Chemical Engineering Transactions*, 19(January), 13–18.
- Mata, T. M., Mendes, A. M., Caetano, N. S., & Martins, A. A. (2014). Properties and sustainability of biodiesel from animal fats and fish oil. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 175–180.
- Meat, A., & Corporation, P. (2015). *Cost Benefit Analysis of Dewatering Abattoir Sludge Using Three-way Decanters*. 1–35.
- Meher, L. C., Sagar, D. V., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248–268.
- Mishra, V. K., & Goswami, R. (2018). A comprehensive review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*, 9(2), 273–289.
- Miyuranga, K. A. V., Arachchige, U. S. P. R., Jayasinghe, R. A., & Samarakoon, G. (2022). Purification of Residual Glycerol from Biodiesel Production as a Value-Added Raw Material for Glycerolysis of Free Fatty Acids in Waste Cooking Oil. *Energies*, 15(23).
- Mohamed, S., Aghareed, F., Shereen, M. T., Hamid, M. S. A., & Osman, R. M. (2024). Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production , challenges , and prospects : a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(9), 12722–12747.
- Mohtasham, J. (2015). Renewable energies. *Energy Procedia*, 74, 1289–1297.
- Monirul, I. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. M., Rashedul, H. K., Rashed, M. M., Imdadul, H. K., & Mosarof, M. H. (2015). A comprehensive review on biodiesel cold flow properties and oxidation stability along with their improvement processes. *RSC Advances*, 5(105), 86631–86655.
- Moraes, M. S. A., Krause, L. C., da Cunha, M. E., Faccini, C. S., de Menezes, E. W., Veses, R. C., Rodrigues, M. R. A., & Caramão, E. B. (2008). Tallow biodiesel: properties evaluation and consumption tests in a diesel engine. *Energy & Fuels*, 22(3), 1949–1954.
- Mrad, N., Varuvel, E. G., Tazerout, M., & Aloui, F. (2012). Effects of biofuel from fish oil industrial residue–Diesel blends in diesel engine. *Energy*, 44(1), 955–963.
- Murase, M., & Nakamura, D. (2023). Hansen Solubility Parameters for Directly Dealing with Surface and Interfacial Phenomena. *Langmuir*, 39(30), 10475–10484.
- Murugan, S., Ramaswamy, M. C., & Nagarajan, G. (2008). Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 152–159.
- Mutreja, V., Singh, S., & Ali, A. (2011). Biodiesel from mutton fat using KOH impregnated MgO as heterogeneous catalysts. *Renewable Energy*, 36(8), 2253–2258.
- Mythili, R., Venkatachalam, P., Subramanian, P., & Uma, D. (2014). Recovery of side streams in biodiesel production process. *Fuel*, 117(PART A), 103–108.
- Ndiaye, M., Arhaliass, A., Legrand, J., Roelens, G., & Kerihuel, A. (2020). Reuse of waste animal fat in biodiesel: Biorefining heavily-degraded contaminant-rich waste animal fat and formulation as diesel fuel additive. *Renewable Energy*, 145, 1073–1079.
- Nelson, R. G., & Schrock, M. D. (2006). Energetic and economic feasibility associated

- with the production, processing, and conversion of beef tallow to a substitute diesel fuel. *Biomass and Bioenergy*, 30(6), 584–591.
- Jaramillo, P., Kahn Ribeiro, S., Newman, P., Dhar, S., Diemuodeke, O. E., Kajino, T., Lee, D. S., Nugroho, S. B., Ou, X., Hammer Strømman, A., & Whitehead, J. (2022). Transport. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Chapter 10). Cambridge University Press.
- Nişancı, S. (2007). *Biyodizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon üzerine etkilerinin deneysel araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Nur, W., Wan, A., Hakimi, M., Nur, W., & Mazli, A. (2024). Carbon Capture Science & Technology Comparative review of biodiesel production and purification. *Carbon Capture Science & Technology*, 13(July), 100264.
- Odetoeye, T. E., Agu, J. O., & Ajala, E. O. (2021). Biodiesel production from poultry wastes: Waste chicken fat and eggshell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105654.
- Öğüt, H., & Oğuz, H. (2006). *Biyodizel: Üçüncü milenyum yakıtı*. Nobel Yayın.
- Okwundu, O. S., El-Shazly, A. H., & Elkady, M. (2019). Comparative effect of reaction time on biodiesel production from low free fatty acid beef tallow: a definition of product yield. *SN Applied Sciences*, 1(2), 140.
- Ölçüm, T. (2006). *Biyodizel teknolojisi* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Makineleri Programı, İstanbul.
- Ong, L. K., Kurniawan, A., Suwandi, A. C., Lin, C. X., Zhao, X. S., & Ismadji, S. (2013). Transesterification of leather tanning waste to biodiesel at supercritical condition: Kinetics and thermodynamics studies. *The Journal of Supercritical Fluids*, 75, 11–20.
- Panjapakkul, W., & El-Halwagi, M. M. (2018). Technoeconomic analysis of alternative pathways of isopropanol production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(10), 12563–12574.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513–1524.
- Parlak, F. O. (2017). *Dizel motor emisyon düzenlemeleri için LNT'nin matematiksel olarak modellenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Peña-gil, A. D. La, Toro-vazquez, J. F., & Rogers, M. A. (2016). Simplifying Hansen Solubility Parameters for Complex Edible Fats and Oils. *Food Biophysics*, 283–291.
- Pham, T., Huynh Phuong Uyen, N., Imamura, K., Furuta, M., & Maeda, Y. (2021). Transesterification using isopropanol as a co-solvent for the production of green biodiesel fuel. *International Journal of Energy Research*, 46, 4352–4361.
- Philip, F. A., Veawab, A., & Aroonwilas, A. (2014). Simulation analysis of energy performance of distillation-, stripping-, and flash-based methanol recovery units for biodiesel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(32), 12770–12782.
- Prankl, H., & Wörgetter, M. (1996). Influence of the iodine number of biodiesel to the

- engine performance. *Liquid Fuels and Industrial Products from Renewable Resources*, 191–196.
- Punsuvon, V., Nokkaew, R., Somkhang, P., Tapanwong, M., & Karnasuta, S. (2015b). The Optimization of Esterification Reaction for Biodiesel Production from Animal Fat. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 37(8), 846–853.
- Rachmaditasari, R., Darajat, M. I., & Mahfud, M. (2024). Production of biodiesel (isopropyl ester) from coconut oil by microwave assisted transesterification: parametric study and optimization. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(4), 662–672.
- Ramírez-Verduzco, L. F., Rodríguez-Rodríguez, J. E., & del Rayo Jaramillo-Jacob, A. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel*, 91(1), 102–111.
- Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L., & Pérez, Á. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), 261–268.
- Reif, K. (2014). *Diesel engine management: Systems and components*. Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-03980-6, 370 s.
- Robert Bosch GmbH. (2005). *Emissions-control technology for diesel engines*. Robert Bosch GmbH, Germany.
- Sa, N., Encinar, J. M., & Gonza, J. F. (2014). Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures: Influence of methyl esters distribution. *Biomass and Bioenergy*, 63, 22–32.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H. E., & Soruşbay, C. (2013). *İçten yanmalı motorlar*. Birsen Yayınevi.
- Şahin, S., & Ögüt, H. (2018). Investigation of the effects of linseed oil biodiesel and diesel fuel blends on engine performance and exhaust emissions. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 7(4), 149–157.
- Salaheldeen, M., Mariod, A. A., Aroua, M. K., Rahman, S. M. A., Soudagar, M. E. M., & Fattah, I. M. R. (2021). Current state and perspectives on transesterification of triglycerides for biodiesel production. *Catalysts*, 11(9), 1–37.
- Sander, A., Antonije Koščak, M., Kosir, D., Milosavljević, N., Parlov Vuković, J., & Magić, L. (2018). The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality. *Renewable Energy*, 118, 752–760.
- Şanlı, H., & Canakci, M. (2008). Effects of Different Alcohol and Catalyst Usage on Biodiesel Production from Different Vegetable Oils. *Energy & Fuels*, 22.
- Sarin, A. (2012). *Biodiesel: production and properties*. Royal Society of Chemistry.
- Schwab, A. W., Nielsen, H. C., Brooks, D. D., & Pryde, E. H. (1983). Triglyceride/aqueous ethanol/1-butanol microemulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 4(1), 1–17.
- Semwal, S., Arora, A. K., Badoni, R. P., & Tuli, D. K. (2011). Biodiesel production using heterogeneous catalysts. *Bioresource Technology*, 102(3), 2151–2161.
- Şen, S. (2012). *Hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve dizel motor performans ve emisyonlarına etkisinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Shalom, J. B., & Saba, I. (2024). Environmental and economic impacts of using waste animal fats for biodiesel (EasyChair Preprint No. 13612). EasyChair.
- Sharma, Y. C., Singh, B., & Upadhyay, S. N. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87(12), 2355–2373.

- Sia, C. B., Kansedo, J., Tan, Y. H., & Lee, K. T. (2020). Evaluation on biodiesel cold flow properties, oxidative stability and enhancement strategies: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 24(July 2019), 101514.
- Sierra-cantor, J. F., & Guerrero-fajardo, C. A. (2017). *Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content : A review*. 72(April 2016), 774–790.
- Sinichi, S., Boocock, D. G. B., & Diosady, L. L. (2017). Production of Isopropyl and Methyl Esters from Yellow Mustard Oil / IPA Miscellas. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(3), 485–495.
- Solmaz, H., & Çelikten, İ. (2012). Estimation of amount of pollutants generated by vehicles in Turkey until 2030. *Gazi University Journal of Science*, 25(2), 495–503.
- Soriano Jr, N. U., Venditti, R., & Argyropoulos, D. S. (2009). Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification. *Fuel*, 88(3), 560–565.
- Takase, M., & Essandoh, P. K. (2021). Two-step biodiesel production using high free fatty acid containing pig fat. *International Journal of Green Energy*, 18(4), 381–389.
- Tan, S. X., Lim, S., Ong, H. C., & Pang, Y. L. (2019). State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel*, 235, 886–907.
- Taravus, S., Temur, H., & Yartasi, A. (2009). Alkali-catalyzed biodiesel production from mixtures of sunflower oil and beef tallow. *Energy and Fuels*, 23(8), 4112–4115.
- Tashtoush, G. M., Al-Widyan, M. I., & Al-Jarrah, M. M. (2004). Experimental study on evaluation and optimization of conversion of waste animal fat into biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 45(17), 2697–2711.
- Teixeira, L. S. G., Assis, J. C. R., Mendonça, D. R., Santos, I. T. V, Guimarães, P. R. B., Pontes, L. A. M., & Teixeira, J. S. R. (2009). Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel. *Fuel Processing Technology*, 90(9), 1164–1166.
- Thamsiriroj, T., & Murphy, J. D. (2010). How much of the target for biofuels can be met by biodiesel generated from residues in Ireland? *Fuel*, 89(11), 3579–3589.
- Thanh, L. T., Okitsu, K., Boi, L. Van, & Maeda, Y. (2012). Catalytic technologies for biodiesel fuel production and utilization of glycerol: a review. *Catalysts*, 2(1), 191–222.
- The AOCS Lipid Library. (2013). *AOCS. Animal Fat*. <http://lipidlibrary.aocs.org>
- Thompson, J., & Advisor, T. (2018). *Methanol Recovery From the Biodiesel Production Process*. 36(September).
- Thomsen, V. B. E., & Law, L. (2000). Le Châtelier's principle in the sciences. *Journal of Chemical Education*, 77(2), 173–176.
- Tilki, F., & Çiçek, E. (2003). Biyokütle enerjisi ve enerji ormancılığı. *Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesi Dergisi*, 4(1), 33–40.
- Tippayawong, N., & Chumjai, P. (2012). Characterization and performance of biofuel from passion fruit processing residues. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 2, 24–26.
- Toldrá-Reig, F., Mora, L., & Toldrá, F. (2020). Trends in biodiesel production from animal fat waste. *Applied Sciences*, 10(10), 3644.
- Tong, D., Hu, C., Jiang, K., & Li, Y. (2011). Cetane number prediction of biodiesel from the composition of the fatty acid methyl esters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 88(3), 415–423.
- Tran, T., & Rousseau, D. (2016). Influence of shear on fat crystallization. *Food*

- Research International*, 81, 157–162.
- Tremblay, Y., Cao, P., & Dube, M. A. (2008). Methanol recycling in the production of biodiesel in a membrane reactor. *Fuel*, 87(6), 825–833.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). Ulaştırma sektörü nihai enerji tüketim istatistikleri, 2023 (Bülten No: 57927). Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Ulastirma-Sektoru-Nihai-Enerji-Tuketim-Istatistikleri-2023-57927>
- Tyson, K. S. (2001). *Biodiesel handling and use guidelines* (NREL/TP-580-30004). National Renewable Energy Laboratory.
- Üçgül, İ., & Akgül, G. (2010). Biyokütle teknolojisi. *Yekarum*, 1(1).
- Ursavaş, N., & Yıldırım, E. (2017). Enerji arz güvenliği riskinin Türkiye'nin makroekonomik dengelerine etkisi. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(4), 55–83.
- Utku, S. (2009). *Biyodizel ve motorin karışımlarının yakıt kalitesi özelliklerinin iyileştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı.
- Uzun, S. (2020). *Dizel bir motorda atık lastikten elde edilen pirolitik yakıtın motor performans ve emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107.
- Van Gerpen, J. (2008). *Biodiesel Production Technology*.
- Van Hoof, V., Van den Abeele, L., Buekenhoudt, A., Dotremont, C., & Leysen, R. (2004). Economic comparison between azeotropic distillation and different hybrid systems combining distillation with pervaporation for the dehydration of isopropanol. *Separation and Purification Technology*, 37(1), 33–49.
- Vellguth, G. (1983). Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines. *SAE Transactions*, 1098–1107.
- Verma, P., Sharma, M. P., & Dwivedi, G. (2015). Operational and environmental impact of biodiesel on engine performance. *International Journal Of Renewable Energy Research*, 5(4), 961–970.
- Viales-montero, A. M. C., Arias-carrillo, M., & Mata-segreda, J. F. (2006). Kinetics of the Fischer esterification of palm fatty acids with isopropanol and butyl-cellosolve. *Ciencia y Tecnología*, 24(2), 175–181.
- Vicente, G., Martinez, M., & Aracil, J. (2007). Optimisation of integrated biodiesel production. Part I. A study of the biodiesel purity and yield. *Bioresource Technology*, 98(9), 1724–1733.
- Viêgas, C. V., Hachemi, I., Freitas, S. P., Mäki-Arvela, P., Aho, A., Hemming, J., Smeds, A., Heinmaa, I., Fontes, F. B., & da Silva Pereira, D. C. (2015). A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of Chlorella alga and its catalytic deoxygenation to renewable diesel. *Fuel*, 155, 144–154.
- Vilas Bôas, R. N., & Mendes, M. F. (2022). A review of biodiesel production from non-edible raw materials using the transesterification process with a focus on influence of feedstock composition and free fatty acids. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 67(1), 5433–5444.
- Wamser, C. C. (2012). Typical Fatty–Acid Compositions of Some Common Fats. In *Chem 336: Organic Chemistry III (Spring 2012)*. Portland State University, Department of Chemistry. <https://web.pdx.edu/~wamser/C336S12/fat.pdf>
- Wang, P. S., Tat, M. E., & Van Gerpen, J. (2005). The production of fatty acid

- isopropyl esters and their use as a diesel engine fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82(11), 845–849.
- Waynick, J. A. (2005). *Characterization of biodiesel oxidation and oxidation products: Technical literature review. Task 1 results* (CRC Project No. AVFL-2b; NREL/TP-540-39096). National Renewable Energy Laboratory; Southwest Research Institute.
- Wu, W., Foglia, T. A., Marmer, W. N., Dunn, R. O., Goering, C. E., & Briggs, T. E. (1998). Low-temperature property and engine performance evaluation of ethyl and isopropyl esters of tallow and grease. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(9), 1173–1178.
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T. R., & Wang, M. (2022). Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7512–7521.
- Yamane, T., Achiha, R., Namioka, T., & Yukumoto, M. (2013). Bubble stripping in closed system to remove residual methanol from crude biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(10), 1183–1192.
- Yang, L., Xing, S., Teng, X., Liu, R., Wang, Z., Lin, B., Lv, P., Al-Haimi, A. A. N. M., Yehia, F., & Luo, W. (2024). Liquid–Liquid Equilibrium Behavior of Ternary Systems Comprising Biodiesel + Glycerol and Triglyceride + Methanol: Experimental Data and Modeling. *Catalysts*, 14(5).
- Yaşar, F. (2016). *Yosun yağından biyodizel üretimi ve bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak kullanılması* (Doktora tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman.
- Yavuz, H., Aksoy, F., Bayrakçeken, H., & Baydır, Ş. A. (2008). Değişik Bitkisel Yağ Metil Esterlerinin Üretilmesi, Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(1), 23–30.
- Yedi (7) Kıta Petrolcülük Dağıtım ve Pazarlama A.Ş. (2025). *Akaryakıt Fiyatları*. <https://7kitadagitim.com/index.php/utts/fiyat/>
- Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33–54.
- Yuvanashree, E., Sivakumar, P., Renganathan, S., Selvakumar, K. V., & Badarinarayana, N. S. (2014). *National Conference on Green Engineering and Technologies for Sustainable Future-2014 Conversion of slaughter house waste into biodiesel catalyzed by bone ash* National Conference on Green Engineering and Technologies for Sustainable Future-2014. 4, 22–25.
- Zhang, Q., Xu, J., Wang, G., Tian, W., & Jiang, H. (2008). Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors: a case study of Hangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 42(20), 4989–5002.
- Zhao, X., Xu, G., Yu, Y., Yan, X., & Zhang, B. (2013). Optimization of transesterification of beef tallow for biodiesel production catalyzed by solid catalysts. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(17), 196–203.
- Zhou, W., & Boocock, D. (2006). Phase behavior of the base-catalyzed transesterification of soybean oil. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83, 1041–1045.
- Zuleta, E. C., Baena, L., & Rios, L. A. (2012). The oxidative stability of biodiesel and its impact on the deterioration of metallic and polymeric materials: A review. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 23(12), 2159–2175.