

Fındıkkabuğu Tabanlı Heterojen Katalizörlerle Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi

Tülin AVCI HANSU*

Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Siirt Üniversitesi, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0001-5441-4696>

Muhammed Raşit ATELGE

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0002-0613-2501>

Mustafa KAYA

Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Siirt Üniversitesi, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0002-0622-3163>

Hilal DEMİR KIVRAK

Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

<https://orcid.org/0000-0001-8001-7854>

Abdulaziz Mohamed ATABANİ

Makine Mühendisliği Bölümü, Yuan Ze Üniversitesi, TAIWAN

<https://orcid.org/0000-0001-6793-5589>

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi

18/03/2025

Kabul Tarihi

10/04/2025

DOI

<https://doi.org/10.7056/2/tubid.1659612>

Özet

Dünyanın enerji gereksinimlerinin çoğunluğu petrokimyasallar, kömür ve doğal gazdan elde edilmektedir. İnsan nüfusu artmaya devam ettikçe, enerji tüketimi bu büyümeyle doğru orantılı olarak artmıştır. Fosil yakıtların hızla tükenmesiyle eş zamanlı olarak, alternatif enerji kaynakları küresel enerji üretiminde giderek daha önemli bir rol üstlenmeye başlamıştır. Yukarıda belirtilen enerji kaynakları arasında rüzgar enerjisi, jeotermal enerji, güneş enerjisi, hidroelektrik enerji, dalga enerjisi, hidrojen enerjisi ve biyokütle enerjisi yer almaktadır. Bunlar arasında biyodizel, biyokütle enerjisinin dikkate değer bir örneğini temsil etmektedir. Biyokütle, özellikle gelişmekte olan ülkelerde geniş bir uygulama yelpazesine sahip kirlenmeyen yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Bu çalışmanın amacı, biyodizel üretimi amacıyla çeşitli yerel biyokütle bazlı katalizörler geliştirmektir. Bu çalışmada, organik atık olarak fındıkkabuğu kullanılmış heterojen katalizöre dönüştürülerek transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda biyodizel elde edilmiştir. Katalizörün yapısı hakkında bilgi almak için FTIR analizi yapılmıştır. Biyodizelin kalitesi ve dönüşümü GC-MS analizi ile belirlenmiştir. Mevcut çalışma, atık fındıkkabuklarının katalizör üretimi için aktif karbona dönüştürülmesini içeren sürdürülebilir ve maliyet etkin bir biyodizel üretim yöntemi önermektedir. Bu katalizörler, daha sonra, biyodizel elde etmek için atık yağların transesterifikasyonunda kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Transesterifikasyon, Katalizör, Biyodizel, Temiz enerji, Geri dönüşüm.

Biodiesel Production from Waste Oils with Hazelnut Shell-Based Heterogeneous Catalysts**Research Article****Received**

18/03/2025

Accepted

10/04/2025

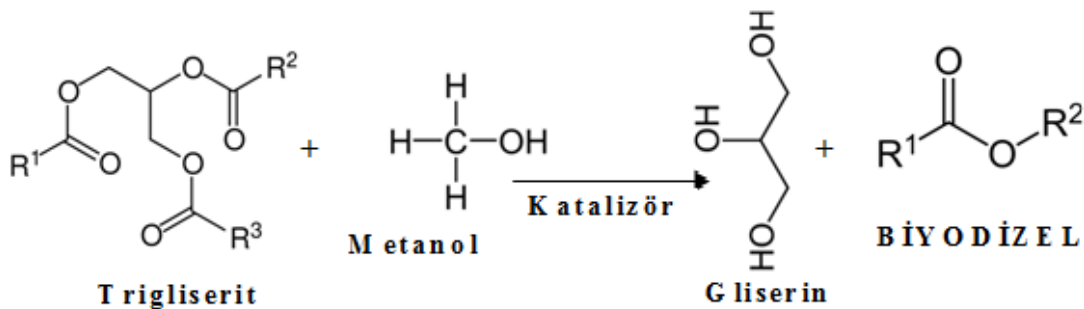
Abstract

The preponderance of the world's energy requirements is derived from petrochemicals, coal, and natural gas. Concurrent with the expanding human population is a corresponding rise in energy consumption. Concurrent with the accelerated consumption of fossil fuels, alternative energy sources have started to assume an increasingly significant role in global energy production. These include wind energy, geothermal energy, solar energy, hydroelectric energy, wave energy, hydrogen energy, and biomass energy. Of these, biodiesel stands as a notable example of biomass energy. Biomass is regarded as a non-polluting renewable energy source with a wide range of applications, especially in developing countries. The objective of this study was to develop various local biomass-based catalysts for biodiesel production. In this study, hazelnut shell was utilized as organic waste and converted into a heterogeneous catalyst, and biodiesel was obtained as a result of a transesterification reaction. The quality and conversion of biodiesel were determined by GC-MS analysis. The present study proposes a sustainable and cost-effective biodiesel production method involving the conversion of waste hazelnut shells into activated carbon for catalyst production. These catalysts were subsequently employed in the transesterification of waste oils, leading to the production of biodiesel.

Keywords: Transesterification, Catalyst, Biodiesel, Clean energy, Recycling.

1. Giriş

Günümüzdeki küresel iklim değişikliği, hava ve su kalitesindeki bozulmalar ve insan sağlığına olan olumsuz etkiler, çevre dostu, emisyon salınımı düşük ve temiz bir alternatif olan biyodizelin kullanımının hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur (1). Enerji alanında bir paradigma değişimi yaşandı, ekonomik ve politik çerçeveler artık fosil bazlı enerji kaynakları yerine alternatif yakıtları tercih ediyor. Özellikle biyodizel, dünya çapında yaygın bir uygulama ile küresel kabul gördü. Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal dönüşümünü içeren transesterifikasyon olarak bilinen bir işlemle üretilen sıvı bir yakıttır. Özellikle biyodizel, geleneksel yakıtlara sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkar ve çevresel etkiyi azaltmak için uygulanabilir bir seçenek sunar (2). Biyodizel üretiminde genellikle bitkisel kaynaklardan elde edilen ayçiçeği yağı, mısır yağı, kanola yağı ve aspir yağı kullanılmaktadır. Ayrıca, alkol olarak kısa zincirli metil alkol tercih edilmektedir.(3, 4). Bu şekilde üretilip kullanılan yağlar maliyetli olmaktadır. Biyodizel üretimi bağlamında, kullanılmış veya yenilenemeyen atık yağların kullanımı uygulanabilir bir seçenek olarak belirlenmiştir. Yapılan araştırmalarda atık yağların kullanımının çevresel etki ve enerji tüketimi açısından ekonomik olarak daha uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Şekil1'de dönüştürülecek yağın katalizör varlığında biyodizele dönüşüm reaksiyonu verilmiştir.



Şekil 1. Transesterifikasyon reaksiyonu

Katalizör, transesterifikasyon reaksiyonunda önemli bir rol oynar. Katalizörün hem yavaş transesterifikasyon reaksiyonunun hızını hem de biyodizel ürün verimini artırdığı gösterilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda bir katalizörün bulunmaması, yüksek sıcaklıklar ve basınçlar gerektirir ve bu da düşük bir reaksiyon hızı ve azalan biyodizel verimiyle sonuçlanır. Sonuç olarak, transesterifikasyon reaksiyonunda bir katalizörün kullanılması zorunludur. Biyodizel üretimi kapsamında homojen sıvı katalizörler yerine tekrar kullanılabilir katı heterojen katalizörlerin kullanılması, başta maliyet düşürme ve transesterifikasyon ve esterifikasyon reaksiyonlarının eş zamanlı kolaylaştırılması olmak üzere çok sayıda avantaj sağlamaktadır. Biyodizel üretimi genellikle homojen katalizörlü sistemlerde transesterifikasyon reaksiyonuyla gerçekleştirilir (5). Ancak, homojen katalizörlerle yapılan biyodizel üretiminde, reaksiyon ortamından katalizörün ayrılmasının zorluğu, biyodizelin safsızlıkları ve serbest su ile yağ asitlerinin varlığında sabun gibi yan ürünlerin oluşması gibi dezavantajlar nedeniyle, araştırmalar yüksek verim sağlayan heterojen katalizörlerin kullanımına odaklanmıştır (6). Bu çalışmanın konusu olan biyokütle tabanlı katı heterojen katalizörler esterifikasyon reaksiyonlarında başarı ile uygulanmaktadır. Konwar ve diğerleri (7) biyodizel üretiminde kullanılan karbon katalizörlerinin bir incelemesi ve alandaki son gelişmelerin bir tartışması yayınlamışlardır. Yazarlar, biyodizel üretim sürecini ekolojik olarak sürdürülebilir, kirlenmemiş ve daha ekonomik hale getirmek için biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından karbon bazlı katalizörler yetiştirmenin önemine özellikle vurgu yapmışlardır. Karbon bazlı katalizörler, atık biyokütle kaynaklarından üretilebilir. Yüksek yüzey fonksiyonel gruplarına sahip olmaları nedeniyle asidik veya bazik özellikler gösterebilirler. Ayrıca, yüksek yüzey alanı ve termal kararlılıkları sayesinde, ideal katalizör ve katalizör destek malzemesi olarak kabul edilmektedirler. Atık yağların doğrudan kanalizasyon sistemine deşarj edilmesi veya bu malzemelerin çöp sahalarına atılmasının, su ve toprak kirliliğine yol açtığı, dolayısıyla su ekosisteminin bütünlüğünü tehlikeye attığı ve sonuç olarak insan sağlığını tehdit ettiği gösterilmiştir. Ayrıca, restoran ve lokantalardaki atık yağların gıda hazırlamada yağ olarak tekrar kullanımının önemli olumsuz etkileri olabilecektir. Ancak atık yağların biyodizel üretiminde hammadde olarak değerlendirilmesi durumunda yukarıda belirtilen sorunlar önemli ölçüde azaltılabilir. Sonuç olarak, atık yağların toplanıp biyodizele dönüştürülmesi oldukça önemlidir. Artan enerji taleplerine paralel olarak her yıl daha fazla miktarda fosil yakıt kullanıldığından atık yağlar, biyodizel üretimi için kolay bulunabilirliği ve maliyet açısından iyi bir alternatiftir (8).

Bu proje kapsamında biyodizel dönüşümünde alkol olarak metil alkol (MeOH) kullanıldı. MeOH kullanımının, piyasada şu anda mevcut olan diğer alkollere kıyasla daha verimli sonuçlar verdiği ve nispeten düşük bir maliyetle elde edildiği gösterilmiştir. Ayrıca, etanol (C_2H_5OH), izopropil alkol (C_3H_7OH) ve butil alkol (C_4H_9OH) gibi alkoller biyodizel üretiminde kullanılır (9). Ancak, çeşitli alkollerin kullanımının reaksiyon koşullarını değiştirdiği ve dolayısıyla biyodizel üretim sürecini karmaşıktırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, alternatif enerji kaynağı olarak sınıflandırılan biyodizelin yakıt özelliklerini iyileştirerek yakıt kalitesini iyileştirmektir. Sentezlenen katalizörler ile en aktif katalizörün üretim basamağı belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, organik atıktan elde edilen ham

petrol ve ucuz, yenilenebilir biyokütleyi heterojen katalizör olarak kullanarak, transesterifikasyon reaksiyonu yoluyla biyodizel elde etmektir. Biyodizelin kalitesi ve içeriği GC-MS analizi ile belirlenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen katalizörlerin yüzey karakterizasyonu FTIR ile yapılmıştır. Katalizörlerin yüzey özellikleri ile biyodizel üretimi arasında bir ilişki kurulacaktır. Bu çalışmada çevre dostu ve ekonomik bir biyodizel üretim yönteminin geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu yöntem, atıkları aktif karbona dönüştürerek katalizör elde etmeyi ve bu katalizörleri atık yağların transesterifikasyonu ile biyodizele dönüştürmeyi içerir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Atık yağların biyodizele dönüşümünde kullanılacak biyokütle olan fındikkabuğu Türkiye'nin Giresun ilinden temin edildi. Aktif karbona dönüştürülme işleminde ön aktivasyon işleminde H_2SO_4 kullanıldı. Tasarlanan ve sentezlenen katalizörün yüzeyi hakkında bilgi almak için FTIR analizi yapıldı. Üretilen biyodizelin içeriğinin belirlenmesi için gaz kromatografi (GC) cihazı kullanılarak belirlendi.

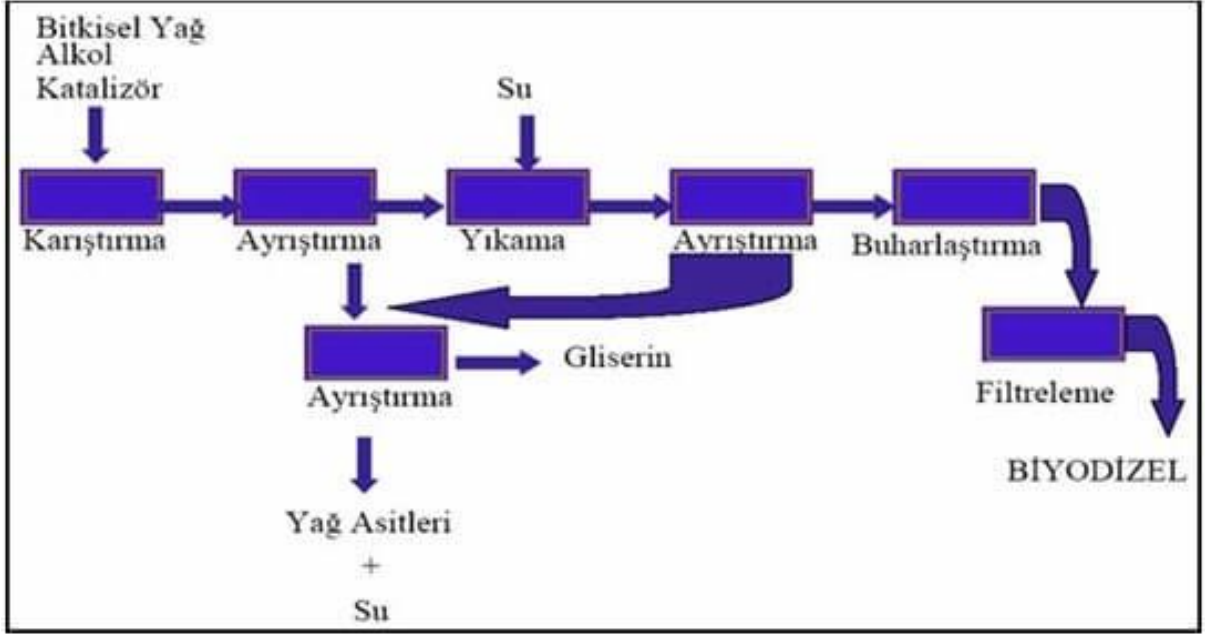
2.2. Yöntem

2.2.1. Katalizör Sentezi

Biyodizelin dönüştürülmesinde kullanılacak olan heterojen katalizörün sentezi iki aşamada gerçekleşmektedir. Katalizör üretiminde organik atık olarak fındikkabuğu kullanılacaktır. Fındikkabuğu atığı Giresun ilinden temin edilmiştir. İlk aşamada biyokütle farklı derişimlerdeki (1, 3, 6 ve 12 M) H_2SO_4 ile aktive edildi. 24 saat 80 °C'de etüvde bekletildi. Daha sonra farklı sıcaklık (400, 600 ve 800 °C) ve sürelerde (30, 60 ve 90 dk) azot gazı ortamında karbonizasyon işlemi ile aktif karbona dönüştürüldü. Elde edilen her bir katalizörün atık yağı biyodizele dönüştürmede kullanılmak üzere saklandı.

2.2.2. Biyodizel Üretimi

Çalışmanın ilk kısmında, biyodizel üretiminde kullanılacak olan biyokütle temelli katalizörün en yüksek aktivitesini gösterdiği ortamın belirlenmesine yönelik deneyler yapıldı. İkinci adım olarak, tasarlanan katalizör kullanılarak atık yağın biyodizele dönüşümünü etkileyen parametreler araştırıldı. Şekil 2'de biyodizel üretim şeması verilmiştir.



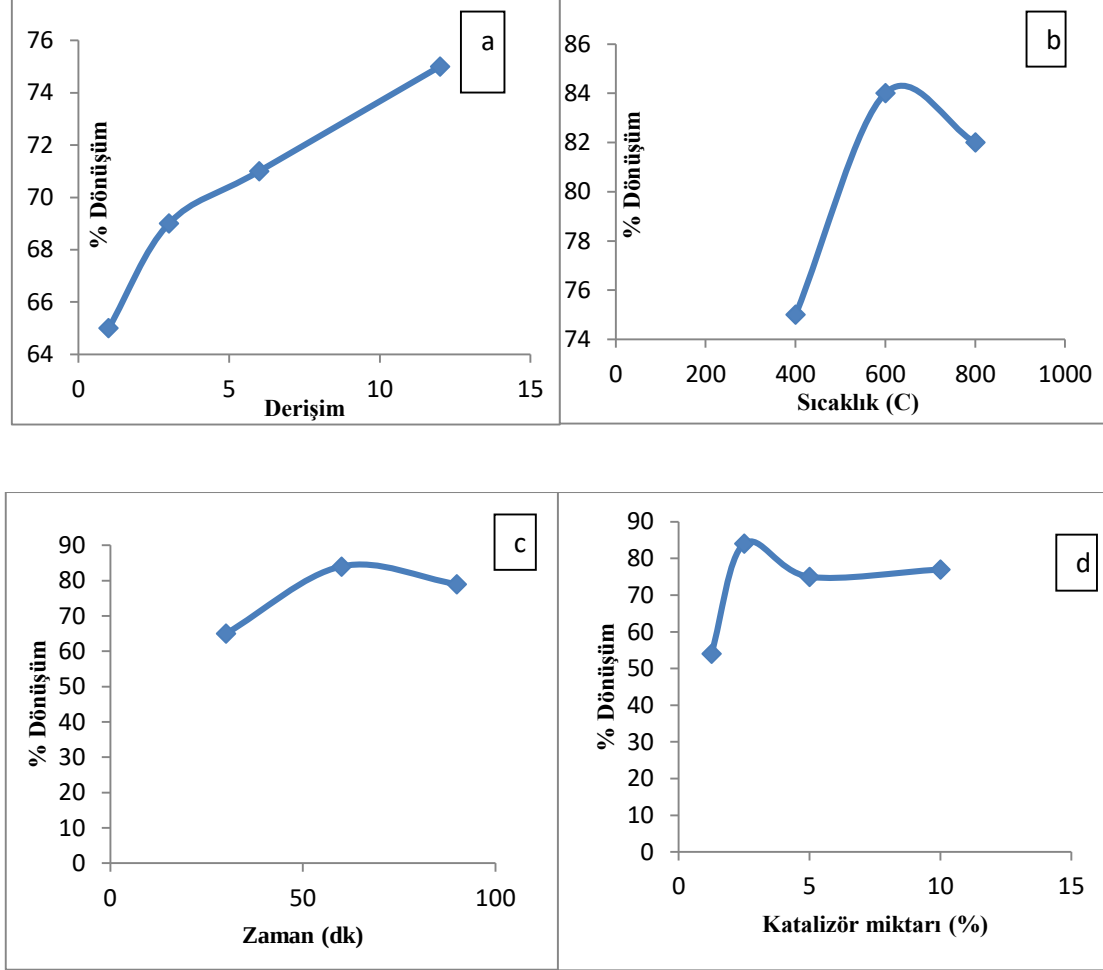
Şekil 2. Biyodizel üretim şeması

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Katalizörün Optimizasyonu

Biyodizel üretiminde kullanılmak üzere tasarlanan katalizörün en aktif olanını belirlemek için asit derişimi, karbonizasyon süresi, karbonizasyon sıcaklığı ve katalizör miktarı gibi parametreler incelenmiştir. Şekil 3a'da fındikkabuğunun farklı derişimlerdeki asitte 24 saat bekletildikten sonra 400 °C'de 1 saat süreyle karbonizasyon işlemi uygulanarak elde edilen katalizörlerin atık yağı biyodizele dönüştürme oranları verilmiştir. Biyodizele dönüştürülecek atık yağın %2.5 'i kadar katalizör 6:1 molar oranındaki alkol: yağ karışımına eklendi. 80°C'de 4-5 saat süreyle reaksiyonun tamamlanması beklendi. Daha sonra elde edilen karışım oda sıcaklığına gelince ayırma hunisine konularak 1 gün bekletildi. Ayırma hunisinde oluşan ikili fazdan ester fazı ayrıştırıldı ve tartıldı. Böylece konulan atık yağın kütleye ne kadarının dönüştüğü hesaplandı. Elde edilen veriler ışığında derişimin dönüşüme olan etkisini gösteren grafik Şekil 3a'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere 12M (derişik) H₂SO₄'te bekletilen fındikkabuğu en yüksek dönüşümü vermiştir. Bütün adımlarda biyodizel üretim koşulları (reaksiyon sıcaklığı 80°C, alkol: yağ oranı (6:1) ve reaksiyon süresi 4-5 saat) değiştirilmemiştir. Karbonizasyon sıcaklığının dönüşüme olan etkisi incelemek için 12 M'lık asitte 24 saat bekletilen numuneler farklı sıcaklıklarda (400, 600 ve 800 °C) 1 saat süre ile karbonizasyona tabi tutuldu. Elde edilen katalizörler atık yağdan biyodizel üretmek için kullanıldı. Yapılan deney sonucunda elde edilen sıcaklığın dönüşüme etkisini veren grafik Şekil 3b'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en yüksek dönüşüm 600°C'de oluşmuştur. Bir sonraki adımda karbonizasyon süresinin etkisini incelemek için katalizör aynı koşullarda 600°C karbonizasyon sıcaklığı farklı karbonizasyon süresinde (30, 60 ve 90dk) azot gazı ortamında karbonizasyona tabi tutuldu. Elde edilen katalizörlerin atık yağı biyodizele dönüştürme oranlarının grafiği Şekil 3c'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en yüksek dönüşüm 60 dk

karbonizasyona tabi tutulan katalizörde görülmüştür. Biyodizel dönüşümde katalizör miktarının dönüşüme etkisini incelemek için kütlece farklı miktarlarda katalizör ilave edilerek deneyler yapıldı. Elde edilen veriler sonucunda katalizör miktarının dönüşüme etkisini veren grafik Şekil 3d’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere en yüksek dönüşümü %2.5 katalizör miktarı vermiştir.



Şekil 3. Biyodizel dönüşümünün derişim(a), karbonizasyon sıcaklığı (b), karbonizasyon süresi (c) ve katalizör miktarına (d) bağıllılığını gösteren grafikler

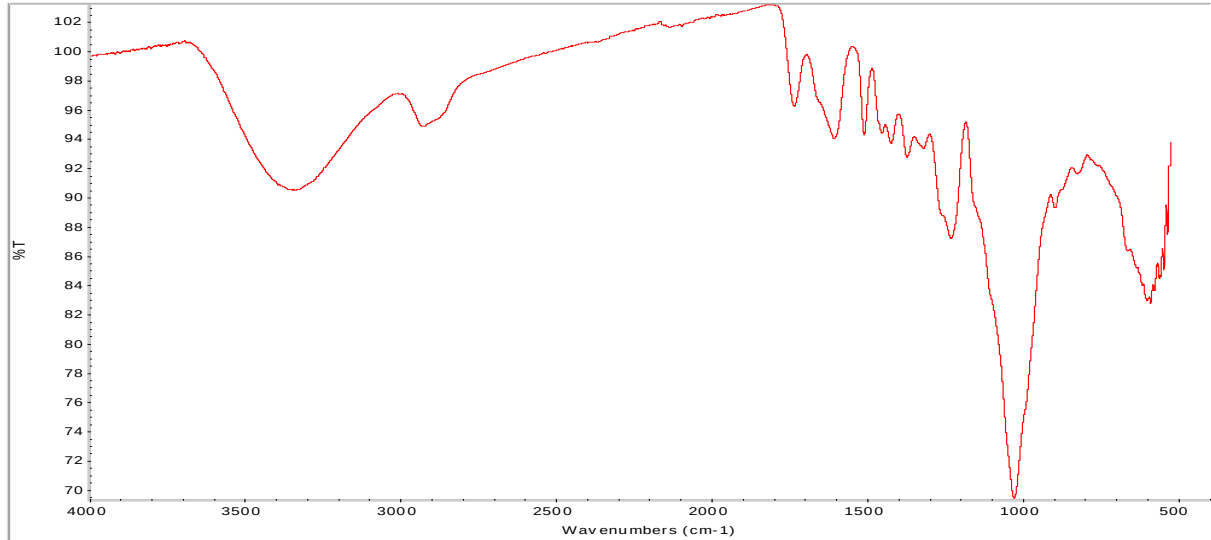
Yapılan deneyler ve analizler sonucunda atık yağdan biyodizel üretiminde kullanılacak olan biyokütle temelli heterojen katalizörün optimum koşulları belirlenmiştir. Bu veriler ışığında 12 M H_2SO_4 te 24 saat 80 °C’de ön aktivasyona tabi tutulan fındikkabuğu daha sonra azot gazı ortamında 600 °C’de 60 dk süre ile karbonizasyona tabi tutularak biyodizel üretim katalizörü elde edilmiştir. % 84 dönüşüm oranıyla biyodizel üretimi gerçekleşmiştir. Üretilen fındikkabuğu katalizörü FKK olarak isimlendirilmiştir. Tablo 1’de literatürdeki farklı yağ kaynakları kullanılarak ve farklı biyokütle tabanlı katalizör varlığında biyodizel üretiminin dönüşüm oranları verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi bu çalışmada kullanılan heterojen katalizörün atık yağı dönüştürme oranı literatürdekilerine kıyasla oldukça iyidir.

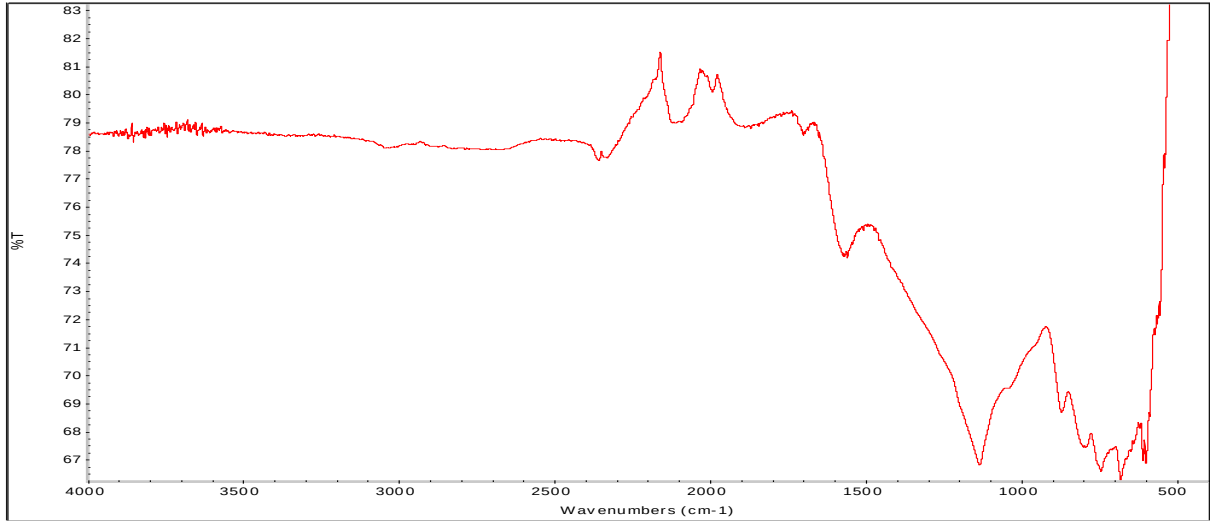
Tablo 1. Literatürdeki biyodizel üretimi için biyokütle kaynaklı heterojen katalizörler ve dönüşüm oranları

Biyokütle	Kullanılan Yağ	Dönüşüm oranı (%)	Referans
Nişasta	Atık yağ	95	(10)
Selüloz	Atık yağ	88	(10)
Sakroz	Atık yağ	80	(10)
Rhizomucormiehei lipazı	Atık soya yağı	70	(11)
Midye kabuğu	Don yağı	90	(12)
Palmiye kabuğu	Atık yağ	82	(13)
Fındıkkabuğu	Atık yağ	84	Bu çalışma

4.2. Katalizörün Karakterizasyonu

Şekil 4 ve 5, ham biyokütle ve fındıkkabuğundan elde edilen numunelerinin FTIR analiz sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak biyokütle ve biyokömür numuneleri OH gerilimleri (3600-3200 cm⁻¹), C=O ve aromatik C=C (1617-1599 cm⁻¹), alifatik C-H (2956-2856 cm⁻¹) bağlarınca zengin olduğu söylenebilir. Numunelerin asidik özellikleri arttıkça OH bandları daha da genişlemiş ve geçirgenlik özellikleri azalmıştır. İşlem görmüş numunede ise halen aromatik bölgede pikler vermektedir.

**Şekil 4.** İşlem görmemiş biyokütlenin (fındıkkabuğu) FTIR analizi



Şekil 5. İşlem görmüş fındıkkabuğu katalizörünün (FKK) FTIR analizi

4.3. Biyodizel karakterizasyonu

Biyokömür katalizörleri kullanılarak üretilen biyodizel numunelerinin GC-MS sonuçlarından elde edilen metil ester yüzdeleri Tablo 2’de verilmektedir. Heterojen katalizör olarak kullanıldığı durumdaki ana metil ester ürünleri hexadekanoik asid metil ester, oktadekanoik asid metil ester, 9-oktadekanoik asid metil ester ve 9,12-oktadekadienoik asid (Z,Z) metil esterleridir(14). Sentezlenen katalizörün kalitesini kıyaslamak için belirlenen koşullarda reaksiyon ortamına NaOH ilavesi yapılarak da sentez gerçekleştirilmiştir. Ortamda NaOH olmadan da tek başına bu çalışma kapsamında üretilen katalizör metil esterleri bakımından oldukça iyidir. Elde edilen sonuç, biyokömür katalizörlerinin biyodizel üretiminde heterojen katı asit katalizörleri olarak rollerindeki etkinliğini göstermektedir. Biyokömür katalizörlerinin dikkate değer bir faydası, çevre dostu olmaları ve reaksiyon ortamından kolayca çıkarılabilmeleridir.

Tablo 2. Biyodizel numunelerinin metil ester yüzdeleri

Numune	Hezadekanoik asid, metil ester (%)	Oktadekanoik asid, metil ester (%)	9-Oktadekanoik asid, metil ester (%)	9,12-Oktadekadienoik asid (Z,Z), metil ester (%)
Saf numune (atık yağ)	12.30	8.29	2.75	21.49
FKK (NaOH var)	11.05	3.17	35.59	50.18
FKK (NaOH yok)	11.16	4.42	28.88	32.57

4. Sonuçlar

Birincil enerji kaynakları nihayetinde tükenebilir olduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ihtiyaç küresel enerji taleplerini karşılamada çok önemlidir. Biyokütle enerjisinin bir alt kategorisi olan biyodizel, çevresel olarak sürdürülebilir bir yakıt seçeneğidir. Biyodizel sistematik olarak üretildiğinde ekonomik kalkınma sağlanacaktır. Yağlara kolaylıkla ulaşılabilindiği için ve biyodizel bölgesel bir enerji kaynağı olmadığı için dünyanın hemen her yerinde üretilebilir. Biyodizel

yakıt, tarım ve hayvansal ürünlerden türetilen bir alternatif enerji kaynağıdır. Azalan petrol kaynaklarının ekonomik etkilerini ve petrol ithalatına bağımlı ülkeler üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak amacıyla alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar yoğunlaşmıştır. Tarım ekonomisinin ve bitkisel yağ endüstrisinin gelişimi biyodizelden önemli ölçüde etkilenecektir. Özellikle biyodizel, toprakta kolayca çözünme kapasitesine sahip toksik olmayan bir enerji kaynağıdır ve bu sayede çevresel kaygılar açısından zararsızlığını garanti eder. Sadece NO_x emisyonları içeren biyodizel, düşük egzoz gazı emisyonlarına sahiptir. CO₂ emisyonlarının olmaması sera etkisi oluşma olasılığını ortadan kaldırır. Biyodizelin dizel motorlara dahil edilmesi herhangi bir değişiklik süreci gerektirmez ve bu da çevresel uyumluluğunu daha da artırır. Bu çalışma, biyokütle enerji kaynaklarından elde edilen biyokömür örneklerinin, biyodizel üretiminde heterojen katı asit katalizörleri olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, yerel enerji biyokütle kaynaklarının, biyodizel üretimi için alternatif bir yakıt olarak kullanılma potansiyelini ön plana çıkarmaktadır. Sonuç olarak, temiz ve yeşil enerji teknolojilerinin daha yaygınlaşmasıyla birlikte, ekonomik süreçler geliştirilebilir ve yerel kaynaklar etkin bir şekilde değerlendirilebilir. Fındikkabuğu atığının katma değeri yüksek olan karbon katalizörlere dönüştürülmesi, bu atıkların madde akım yönetimi ve çevreye olan negatif etkilerinin azaltılması bakımından da çok önemli katkısı olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Siirt Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen 2021-SİÜMÜH-052 kodlu proje kapsamındaki verilerden üretilmiştir. Desteklerinden dolayı BAP birimine teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

1. Raj JVA, Bharathiraja B, Vijayakumar B, Arokiyaraj S, Iyyappan J, Kumar RP. Biodiesel production from microalgae *Nannochloropsis oculata* using heterogeneous Poly Ethylene Glycol (PEG) encapsulated ZnOMn²⁺ nanocatalyst. *Bioresource technology*. 2019;282:348-52.
2. Dinesha P, Kumar S, Rosen MA. Combined effects of water emulsion and diethyl ether additive on combustion performance and emissions of a compression ignition engine using biodiesel blends. *Energy*. 2019;179:928-37.
3. Kumaravel S, Murugesan A, Kumaravel A. Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel for diesel engines—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;60:1678-85.
4. Samad ATP, Putri DN, Perdani MS, Utami TS, Arbianti R, Hermansyah H. Design of portable biodiesel plant from waste cooking oil. *Energy Procedia*. 2018;153:263-8.
5. Mohadesi M, Aghel B, Maleki M, Ansari A. Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor. *Renewable Energy*. 2019;136:677-82.

6. Ma Y, Wang Q, Sun X, Wu C, Gao Z. Kinetics studies of biodiesel production from waste cooking oil using FeCl₃-modified resin as heterogeneous catalyst. *Renewable Energy*. 2017;107:522-30.
7. Konwar LJ, Boro J, Deka D. Review on latest developments in biodiesel production using carbon-based catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;29:546-64.
8. Yaakob Z, Mohammad M, Alherbawi M, Alam Z, Sopian K. Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013;18:184-93.
9. Melero JA, Bautista LF, Morales G, Iglesias J, Sánchez-Vázquez R. Acid-catalyzed production of biodiesel over arenesulfonic SBA-15: Insights into the role of water in the reaction network. *Renewable Energy*. 2015;75:425-32.
10. Deshmane CA, Wright MW, Lachgar A, Rohlfing M, Liu Z, Le J, et al. A comparative study of solid carbon acid catalysts for the esterification of free fatty acids for biodiesel production. Evidence for the leaching of colloidal carbon. *Bioresource technology*. 2013;147:597-604.
11. Tian M, Wang Z, Fu J, Lv P, Liang C, Li Z, et al. N-glycosylation as an effective strategy to enhance characteristics of *Rhizomucor miehei* lipase for biodiesel production. *Enzyme and Microbial Technology*. 2022;160:110072.
12. Hu S, Wang Y, Han H. Utilization of waste freshwater mussel shell as an economic catalyst for biodiesel production. *biomass and bioenergy*. 2011;35(8):3627-35.
13. Abdullah RF, Rashid U, Ibrahim ML, Hazmi B, Alharthi FA, Nehdi IA. Bifunctional nano-catalyst produced from palm kernel shell via hydrothermal-assisted carbonization for biodiesel production from waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;137:110638.
14. Akgül G, Sözer S, Culfa M. Atık Yağlardan Biyodizel Üretiminde Yenilikçi Biyokömür Katalizörü. *TÜBAV Bilim Dergisi*. 2017;10(4):29-39.