



**PATATES KABUĞU ATIKLARININ TERMAL
KİNETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tuna SONKAYA

Danışman: Doç. Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2023

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**PATATES KABUĞU ATIKLARININ TERMAL KİNETİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Investigation of the Thermal and Kinetic Properties of Potato Peel Waste)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuna SONKAYA

Danışman: Doç. Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN

Erzurum
Kasım 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Tuna Sonkaya tarafından hazırlanan “Patates Kabuğu Atıklarının Termal Kinetik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışması 21 / 11 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Dr.ÖĞr.Üyesi Mehtap AYGÜN ÇAĞLAR
Erzurum Teknik Üniversitesi

Danışman: DoÇ.Dr.Hatice BAYRAKÇEKEN
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr.ÖĞr.Üyesi Meltem KIZILCA ÇORUH
Atatürk Üniversitesi

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Hatice Bayrakçıken danışmanlığında sunulan “Patates Kabuğu Atıklarının Termal Kinetik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	7	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	10	35
Bulgular ve Tartışma	19	20
Tartışma	7	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Tuna Sonkaya	Doç. Dr. Hatice Bayrakçıken
21.11.2023	21.11.2023
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hayat bulmasında, gerek lisans gerekse yüksek lisans eğitimimde kıymetli bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen, her kelimesinin hayatıma kattığı değeri ömrümce hatırlayacağım saygıdeğer danışman hocam; Doç. Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN'e, çalışmam boyunca benden yardımlarını esirgemeyen Saygıdeğer Kimya Mühendisliği bölümü Hocalarıma, Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN'e, Prof. Dr. Ayşe Vildan BEŞE'ye çalışma süresince desteklerini her zaman hissettiğim kıymetli ailem ve güzel kızım Umay SONKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tuna SONKAYA



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PATATES KABUĞU ATIKLARININ TERMAL KİNETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tuna SONKAYA

Danışman: Doç. Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN

Amaç: Biyokütle enerjisi çevresel sürdürülebilirlik, enerji güvenliği ve atık yönetimi gibi konularda önemli bir yere sahiptir. Yenilenebilir ve çevre dostu bir seçenek olarak değerlendirilir ve enerji ihtiyacının karşılanmasında sürdürülebilir bir gelecek için iyi bir alternatif sunar. Bu çalışmada Patates kabuğunun termal bozunması incelenerek aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

Yöntem: Patates kabuğunun oksijenli ortamda farklı sıcaklık hızlarında ısıtılarak TG ve DTG eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen sonuçlardan aktivasyon enerjileri üç farklı yöntem (KAS, FWO ve STK) kullanılarak hesaplanmıştır. Patates kabuklarının termal bozunması iki basamakta meydana geldiği görülmüştür.

Bulgular: Isıtma hızının bozunma sıcaklıklarını etkilediği, bozunma sıcaklıklarının artan ısıtma hızıyla beraber daha yüksek sıcaklıklara kaydığı görülmüştür.

Patates kabuklarının termal bozunmasının dört farklı ısıtma hızında (1, 2.5, 5 ve 10 K dak⁻¹) TG ve DTG eğrilerinden elde edilen verilerle bozunma eğrilerinden ortalama aktivasyon enerjileri KAS, FWO ve STK yöntemleriyle hesaplandı. İlk basamak için sırasıyla 244.00, 234.99 ve 245.29 kJ mol⁻¹ olarak hesaplandı. I. Basamak için kontrol mekanizmasının üç boyutlu difüzyon (Zhuravlev eşitliği) $D_5 [(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$ olduğu bulunmuştur.

II. Basamak için ortalama aktivasyon enerjileri KAS, FWO ve STK yöntemlerinden sırasıyla 288.57, 277.85 ve 307.66 kJ/mol olarak hesaplandı. II. Basamak için kontrol mekanizmasının bir boyutlu difüzyon $D_1 \alpha^2$ olduğu hesaplanmıştır.

Sonuç: Hammaddenin fosil yakıtlar için iyi bir alternatif olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif selüloz, patates kabuğu, TG, Oksidasyon

Kasım 2023, 63 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE THERMAL AND KINETIC PROPERTIES OF POTATO PEEL WASTE

Tuna SONKAYA

Supervisor: Doç. Dr. Hatice BAYRAKÇEKEN

Purpose: Biomass energy has an important place in issues such as environmental sustainability, energy security and waste management. It is considered a renewable and environmentally friendly option and offers a good alternative for a sustainable future in meeting energy needs. In this study, activation energy was calculated by examining the thermal decomposition of potato peel.

Method: TG and DTG curves were obtained by heating potato peels in an oxygenated environment at different temperature rates. From the results obtained from these curves, activation energies were calculated using three different methods (KAS, FWO and CSO). It has been observed that thermal decomposition of potato peels occurs in two steps.

Findings: It was observed that the heating rate affected the decomposition temperatures, and the decomposition temperatures shifted to higher temperatures with increasing heating rate.

The data obtained from the TG and DTG curves of the thermal decomposition of potato peels at four different heating rates (1, 2.5, 5 and 10 K min⁻¹) and the average activation energies from the decomposition curves were calculated by KAS, FWO and STK methods. For the first step, it was calculated as 227.63, 234.99 and 227.47 kJ mol⁻¹, respectively. The control mechanism for Step I was found to be three-dimensional diffusion (Zhuravlev equation) $D_5 [(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$.

II. The average activation energies for the step were calculated as 266.6, 291.85 and 307.66 kJ/mol from the KAS, FWO and STK methods, respectively. The control mechanism for the step II was calculated to be one-dimensional diffusion $D_1 \alpha^2$.

Results: It is estimated that the raw material is a good alternative for fossil fuels.

Keywords: Alternative cellulose, potato peel, TG, Oxidation

November 2023, 63 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ	1
KURAMSAL TEMELLER.....	11
Enerji.....	11
Enerji Kaynakları.....	11
Geleneksel enerji kaynakları	11
Yenilenebilir enerji kaynakları	12
Biyokütle enerjisi.....	12
Biyokütle bileşimi.....	13
Lignoselülozik Biyokütle Bileşimi	14
Selüloz.....	15
Hemiselüloz	16
Lignin	17
Biyokütle Kaynağı Olarak Kullanılan Maddeler.....	18
Patates Bitkisi	19
Patates Kabuğunun Kimyasal Bileşimi.....	19
Türkiye’de Patates	20
MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
Materyal	22
Termal Analiz Yöntemleri	22
Termogravimetrik Analiz (TGA)	22
Diferansiyel Termal Analiz (DTA).....	23
Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)	24
Fourier Transform İnfrared Spektrometresi (FTIR)	24
Kinetik Model.....	25

Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose Modelleri (KAS).....	26
Starink Modeli	27
$g(\alpha)$ reaksiyon mekanizmasının tahmini	27
BULGULAR ve TARTIŞMA	29
Kullanılan Örneklerin Karakterizasyonu	29
FTIR analizi.....	29
Termal Analiz	30
Kinetik Parametrelerin Hesaplanması.....	34
SONUÇLAR.....	44
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	51



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Katı-hal Bozunma Reaksiyonları İçin Mekanizmalar.....	28
Tablo 2. I. Bölgede Patates Kabuğunun Termal Bozunmasında KAS, FWO ve STK Yöntemleriyle Hesaplanan Aktivasyon Enerjileri (E_a), Frekans Faktörü (A) ve Korelasyon Katsayısı (R^2)	39
Tablo 3. II. Bölgede Patates Kabuğunun Termal Bozunmasında KAS, FWO ve STK Yöntemleriyle Hesaplanan Aktivasyon Enerjileri (E_a), Frekans faktörü (A) ve Korelasyon Katsayısı (R^2)	40
Tablo 4. Patates Kabuğunun 1, 2.5, 5 ve 10 K/dak Isıtma Hızlarında I. Bölge İçin Farklı Katı Hal Mekanizmalarından Elde Edilen Aktivasyon Enerjileri.....	42
Tablo 5. Patates Kabuğunun 1, 2.5, 5 ve 10 K/dak Isıtma Hızlarında II. Bölge İçin Farklı Katı Hal Mekanizmalarından Elde Edilen Aktivasyon Enerjileri.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Lignoselülozik biyokütlelerin genel bileşimleri	14
Şekil 2. Selülozun yapısı (Marsh, 2007).....	15
Şekil 3. Patates kabuğunun FTIR spektrumu	30
Şekil 4. Patates kabuğunun TG eğrileri	32
Şekil 5. Patates kabuğunun DTG eğrileri.....	32
Şekil 6. Patates kabuğunun DSC eğrileri	33
Şekil 7. Patates kabuğunun DDSC eğrileri	33
Şekil 8. I.Bölge sıcaklığa karşı dönüşüm değerleri	35
Şekil 9. II.Bölge sıcaklığa karşı dönüşüm değerleri.....	35
Şekil 10. I. Bölge KAS yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	36
Şekil 11. I. Bölge FWO yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	37
Şekil 12. I. Bölge STARINK yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	37
Şekil 13. II. Bölge KAS yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	38
Şekil 14. II. Bölge FWO yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	38
Şekil 15. II. Bölge STK yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri.....	39
Şekil 16. Patates kabuğunun bozunmasında I.Bölgeye ait aktivasyon enerjisi eğrisi	40
Şekil 17. Patates kabuğunun bozunmasında II.Bölgeye ait aktivasyon enerjisi eğrisi.....	41

KISALTMA VE SİMGELER DİZİNİ

Simgeler

%	: Yüzde
°C	: Santigrat derece
Dk	: Dakika
G	: Gram
K	: Kelvin
Kj	: Kilo joule
Kw	: Kilo Watt
ml	: Mililitre
Mw	: Megawatt

Kısaltmalar

A	: Frekans faktörü
A	: Arrhenius kanunuyla tanımlanan hız sabiti
DDSC	: Diferansiyel taraflı taramalı kalorimetre
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
DTG	: Diferansiyel termalgramivetri
Ea	: Aktivasyon enerjisi
$g(\alpha)$	: Reaksiyonun bozunma fonksiyonunu
$F(\alpha)$	: Reaksiyon model fonksiyonu
FWO	: Flynn-Wall-Ozawa
$K(T)$	: Arrhenius kanunuyla tanımlanan hız sabiti
KAS	: Kissinger-Akahira-Sunose
m_f	: Yanma sonucunda ki kütle
m_o	: Başlangıçta ki kütle
m_t	: t zamanında ki kütle
R	: Gaz sabiti
STK	: Starink
T	: Zaman
T	: Ölçülen sıcaklık değeri (kelvin değerinde)
TG	: Termalgravimetri
α	: Dönüşüm oranı

GİRİŞ

Günümüzde enerji kaynaklarına olan talep, nüfus artışı, sanayileşme ve kalkınma gibi faktörlerin etkisiyle sürekli olarak artmaktadır. Geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı ve çevreye zarar veren doğası, enerji üretimi için alternatif ve sürdürülebilir çözümler arayışını hızlandırmıştır. Bu bağlamda, biyokütle enerjisi, çevresel etkileri daha az olan ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Enerji kaynaklarının kullanımı, ülkelerin enerji politikalarına, kaynaklarının bulunabilirliğine, ekonomik faktörlere ve çevresel etkilere bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte fosil yakıtlar enerji sektöründe %80'in üzerinde ezici bir paya sahiptir.(Alhumade et al., 2019) Dünya petrol rezervlerinin sınırlı olduğu göz önüne alındığında fosil kaynaklara alternatif olarak sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışı hızlanmıştır. Türkiye, enerji ihtiyacının karşılanmasında dışa bağımlılık sorunuyla karşı karşıya olan bir ülkedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılık, enerji güvenliği açısından ciddi riskler oluştururken, çevresel etkileri de göz ardı edilemez bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme ve enerji portföyünün çeşitlendirilmesi, Türkiye'nin enerji sektöründe sürdürülebilir bir dönüşüm sağlaması açısından kritik bir öneme sahiptir. Ülkemiz, zengin tarımsal kaynakları ve orman varlığıyla biyokütle kaynakları açısından zengin bir potansiyele sahiptir. Tarımsal atıklar, odun artıkları, hayvansal atıklar ve endüstriyel yan ürünler gibi çeşitli biyokütle kaynakları, enerji üretimi için kullanılabilir. Hem enerji bağımsızlığı hem de atık yönetimi açısından biyokütle enerjisi büyük avantajlar sunmaktadır. Biyokütle, temiz, bol ve kolay erişilebilir olmasının yanı sıra daha düşük nitrojen ve kükürt içeriğine sahip olması bakımından sürdürülebilir bir çevre için önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Biyokütle terimi Yunanca bios (yaşam) ve mass (kütle) sözcüklerinden oluşmuştur (Açıkalm, 2010). Biyokütle fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğal gaz) hariç canlı veya yakın zamanda canlı organizmalardan elde edilen tüm biyolojik organik materyalleri tanımlar (Lewandowski, 2017).

Ateşin keşfinden bugüne kadar insanoğlunun en eski enerji kaynaklarından biri olan biyokütle enerjisi biyokütle maddelerden edilen enerjidir (Abbasi et al., 2011). Fotosentez yapan canlılar (bitki alg bakteri vb deniz ve göllerde yaşayan makro ve mikro algler, yosunlar, otlar, su sümbülleri, sazlar ve bazı mikroorganizmalar oluştururlar ihtiyaç duydukları ışık enerjisini güneşten alır (Vassilev et al., 2010). Yanma esnasında ısı ve karbondioksitin açığa çıktığı göz önünde bulundurulursa biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımı fotosentezin tersi bir mekanizmadır (Twidell, 1998).

Biyokütle enerjisini, kaynak olarak kullanılan organik maddelerin yanması veya fermentasyonu ile elde edilen bir enerji olarak tanımlamak mümkündür. Bitkiler, hayvan atıkları, odun ve tarımsal ürün artıkları gibi biyolojik kökenli atıklardan elde edilebildiğinden ulaşılması kolaydır. Biyokütle enerjisine kaynaklık eden biyokütlenin yılda 220 milyar ton üretimi olduğu tahmin edilmektedir. Biyokütle enerjisi, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kabul edilir ve fosil yakıtların kullanımına kıyasla daha sürdürülebilir bir seçenektir (El Bassam, 2010). Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılması çeşitli avantajlara sahiptir ve bu avantajlar, biyokütlenin sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak popülerliğini arttırmaktadır. Dünyadaki biyokütle enerjisinin 9/10 'unun halen atıl durumda olduğu göz önüne alındığında biyokütle gelecek vaat eden bir kaynaktır (Reddy, 1994). Biyokütle, sürekli olarak yenilenebilir kaynaklardan elde edilen organik malzemelerden oluşur ve katı, sıvı, ve gaz ürünler elde edilebilen yegâne enerji kaynağıdır (Bridgwater & Peacocke, 2000a). Bitkilerin yeniden yetişmesi ve organik atıkların sürekli olarak oluşması nedeniyle biyokütle enerjisi, fosil yakıtlar gibi sınırlı kaynaklara bağımlılığı azaltır (Thomas, 2007'a). Biyokütle enerjisi, organik maddelerin yanmasıyla enerji ürettiği için, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon salınımı sağlar. Bitkiler, büyümeleri sırasında atmosferden CO₂ emerler ve biyokütle enerjisi üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı, bitkiler tarafından emilen miktarla dengelenir. Bu nedenle biyokütle enerjisi, net olarak atmosferdeki karbondioksit seviyesini artırmaz (Seo et al., 2010). Biyokütle enerjisi üretimi için kullanılan organik atıklar, aynı zamanda çöp ve atık yönetiminde de kullanılabilir. Tarımsal artıklar, ahşap atıklar ve hayvan gübresi gibi organik maddeler, biyokütle enerjisi üretimi için kullanılarak çevreye zarar vermeden değerlendirilebilir (Haggerty, 2011). Biyokütle maddeler, temel kaynağı güneş enerjisi olmaları bakımından bol ve ucuzdurlar ayrıca fosil yakıtlar gibi rezervlerinde azalma meydana gelmesi ve tükenmesi muhtemel değildir (Thomas, 2007b). Biyokütle maddelerin, hemen hemen Dünyanın her yerinde doğal olarak bulunur ve yetiştirilir erişilebilirliği yüksektir (Bhattacharya et al., 2000). Ülkelere kendi sınırları içinde biyokütle üretebilme imkânı sağladığından ülkeler arası enerji anlaşmazlıkların azaltılmasına yardımcı olur (Schobert, 2002). Fakat biyokütle enerjisi kullanımının bazı sınırlılıkları vardır. Biyokütle üretimi için büyük miktarlarda bitki veya atık malzeme gereklidir. Bu, tarım arazilerinin kullanılmasını gerektirebilir ve gıda üretimiyle rekabet edebilir. Ayrıca, biyokütle bitkilerinin yetiştirilmesi için su ve gübre gibi kaynaklar da gerekebilir. Biyokütle enerjisi üretimi sırasında ortaya çıkan emisyonlar, hava kalitesini etkileyebilir. Biyokütle, hem biyokütle üretimi hem de alkollere dönüştürülmesi açısından hala pahalı bir enerji kaynağıdır. Biyokütlenin ham halde depolanması zordur. Fazla odun toplamak ormanları yok edebilir. Bitki ve hayvan atıkları yakıt olarak kullanıldığında toprağa gübre

olarak eklenemezler. Gübresiz toprak besin maddelerini tüketir ve daha az ürün verir (Sriram & Shahidehpour, 2005).

Biyokütlelerin yapısında bulunan oksijen, yakıt olarak kullanılabilen kısımlar olan karbon ve hidrojen içeriğini azaltmaktadır. Bu nedenle biyokütle maddeler fosil yakıtlara göre daha düşük enerji içeriğine sahiptirler (White & Plaskett, 1981). Genellikle nem içerikleri yüksektir bu durum enerji kaybına neden olacağından yakma proseslerinde direkt kullanılmazlar. Depolanmaları içerdikleri nem nedeniyle çürümeye yatkın olduklarından zordur. Biyokütle maddeler genellikle düşük yığın yoğunluğuna sahiptir bu özellikleri sebebiyle yakılmaları, depolanmaları ve işlenmeleri büyük ölçekte ekipman ve alan gerektirir. Ayrıca, geniş alanlara yayılı olmaları toplanmaları maliyetli ve zordur (Ganesh & Banerjee, 2001).

Termo-kimyasal dönüşüm işlemleri, enerji açısından zengin yararlı ürünlere dönüşüm sağlayarak atık biyokütleyi değerlendirmenin temel yaklaşımlarını içerir. Bu dönüşüm sürecinde iki ana yöntem kullanılır. İlk yöntemde, biyokütle gazlaştırılarak hidrokarbonlara dönüştürülür. İkinci yaklaşımda ise, biyokütle yüksek sıcaklıkta piroliz, yüksek basınçlı sıvılaştırma, ultra piroliz veya süperkritik ekstraksiyon gibi yöntemlerle doğrudan sıvılaştırılır. Dönüşüm prosesinin seçimi ise biyokütle hammaddesinin türü, miktarı, arzu edilen enerji formu, son kullanım gereklilikleri, çevre standartları, ekonomik koşullar ve projeye özel faktörlere bağlı olarak belirlenir (Goyal et al., 2008).

Termokimyasal prosesler esas olarak termokimyasal dönüşüm ve biyokimyasal dönüşüm olarak iki kategoriye ayrılır (Porpatham et al., 2012). Termokimyasal dönüşüm prosesleri yakma, piroliz, gazlaştırma ve sıvılaştırma olarak kategorize edilebilir.

Yakma, biyokütle enerjisinden faydalanabilmek için kullanılan en eski tekniktir. Bir yakıt ile oksidan arasında ısı üretimi ve kimyasal dönüşüm ile sonuçlanan ekzotermik reaksiyonlar dizisi olan Yanma olayı düşük maliyetli, mekanizması bilinen oldukça güvenli bir yöntemdir (Özay et al., n.d.). Yakma biyokütle enerjisini buhar çevrimleri yardımıyla ısı veya elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılır. Bu prosesin ısı verimi biyokütlenin sahip olduğu nem ile doğrudan bağlantılıdır. Biyokütle enerji üretimi için kullanılacak ise nem içeriğinin %50'yi geçmemesi tercih edilir. Nem içeriği %50 'nin üzerinde olan biyokütle maddenin ısı değeri, nemi buharlaştırmak için sarf edilen ısıdan daha düşük olabilir. İçeriğinin %50'si nem olan bir biyokütle maddesi, yakma işleminde %25 hava fazlası kullanılırsa ısı verim %20-22 civarında olur (Jiménez & González, 1991). Yanma verimi biyokütlenin yapısal özelliklerine sabit karbon/uçucu madde oranı, reaktiflik, parçacık boyutuna bağlı olmakla beraber reaksiyon sıcaklığı ve süresine, yeterli oksijen ve türbülans varlığı gibi parametrelere

de bağılıdır. Doğrudan yakma sonucu üretilen enerji; endüstride, elektrik üretiminde, ısınmada veya buhar elde edilmesinde kullanılabilir (Artok & Schobert, 2000a, 2000b). Biyokütleden enerji elde etmede kullanılan en yaygın yöntem doğrudan yakmadır. Yanma olayı bir yakıt ile oksidan arasında ısı üretimi ve kimyasal dönüşüm ile sonuçlanan ekzotermik reaksiyonlar dizisidir. Biyokütlenin yanması olayında oksijen ya da hava ortamında, karbon, hidrojen, oksijen ve yamcı özellikteki kükürt ve azot bileşiklerinin oksidasyon reaksiyonları ile ısı üretilir. Biyokütlenin doğrudan yakılması yerine entalpi yoğunluğu yüksek ürünlere dönüştürülmesi hem taşıma hem de yüksek enerji değeri elde etmek açısından önemlidir (Durak, 2019).

Gazlaştırma, katı veya sıvı bir malzemenin yüksek sıcaklık ve oksijenli veya oksijensiz ortamda gazlara dönüştürüldüğü termokimyasal bir dönüşüm işlemidir. Bu işlem sırasında malzeme, genellikle sentez gazı adı verilen hidrojen (H_2), karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO_2) gibi gazların karışımını üretir (Goyal et al., 2008). Gazlaştırma, enerji üretimi, kimyasal ürünlerin sentezi ve atık bertarafı gibi birçok farklı amaç için kullanılabilir. Gazlaştırma işlemi için gereken sıcaklık, malzemenin cinsine ve reaksiyonlara bağlı olarak değişebilir. Genellikle yüksek sıcaklıklar ($800^{\circ}C$ - $1500^{\circ}C$) tercih edilir. Biyokütle maddenin ısıtılması sonucunda gaz, katı ve birincil katran oluşumu meydana gelir. Birincil katran, gazlara, ikincil ve üçüncül katranlara ayrışarak dönüşür. İkincil ve üçüncül katranlar daha fazla parçalanarak ayrışır. Gazı alınmış katının heterojen reaksiyonları ve gaz fazındaki homojen reaksiyonlar gerçekleşir. Piroliz sonucu oluşan katının kısmi oksidasyonu ve yanabilir gazların oksidasyonu gerçekleşir (Pandey, 2008; Zhen, 1993). Gazlaştırma parametreleri hedef ürün üzerinde etkilidir. Reaktör tasarımı, gazlaştırma basıncı reaksiyon hızını ve gaz oluşumunu etkiler. Yüksek basınçlar genellikle daha yüksek gaz verimliliği sağlar. Oksijenli gazlaştırmada kullanılan oksijen miktarı, reaksiyon türüne ve hedeflenen ürünlere göre değişebilmektedir.

Termokimyasal sıvılaştırma, katı veya sıvı bir malzemenin yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında sıvı yakıtlara veya kimyasal ürünlere dönüştürüldüğü bir dönüşüm işlemidir. Sıvılaştırma işlemini daha düşük hız ve kesikli reaktörde gerçekleşen piroliz olarak da tanımlamak mümkündür (Demirbaş, 2001). Bu işlem genellikle biyokütle, kömür, atıklar veya bazı hidrokarbon kaynakları gibi farklı malzemelerden sıvı yakıtlar veya kimyasal ürünler üretmek için kullanılır. Sıvılaştırma prosesinde yüksek sıcaklık ve basınç, malzemenin sıvılaştırma reaksiyonlarını hızlandırır. Genellikle ısıtma değeri yüksek ürünler elde etmek için yüksek sıcaklıklar tercih edilir. Malzeme türü ve reaksiyon koşullarına uygun olarak farklı reaktör tipleri, işlem verimliliği üzerinde etkilidir. Termokimyasal sıvılaştırma işlemi, sıvı yakıtların veya kimyasal ürünlerin üretimi için potansiyel taşıır.

Piroliz, organik malzemelerin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda termal ayrışmasıyla gerçekleşen biyokütlenin katı, sıvı ve gaz fazında ürünlere dönüştüğü kimyasal bir süreçtir (Soria-Verdugo et al., 2020'a). Piroliz işlemi; verimliliğini artırmak, ürün bileşimi üzerinde kontrol sağlamak ve enerji potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için çeşitli tekniklerle uygulanmaktadır. Piroliz işlemi atık biyokütlenin ekonomik olarak değerlendirilmesi, enerji üretimi için çevre dostu bir yol, yenilenebilir enerji kaynağı sağlaması ve karbon ayak izinin azaltılması için avantajlı olmakla birlikte işlem parametrelerinin ve tekniklerinin optimize edilmesini gerektiren oldukça karmaşık bir süreçtir. Piroliz işleminde kullanılan ekipman, amaçlanan ürün bileşimi ve enerji verimliliği gibi faktörlere bağlı olarak optimize edilmelidir (Soria-Verdugo et al., 2020b).

Piroliz işleminde kullanılan sıcaklık, en önemli parametrelerden biridir. Yüksek sıcaklık, biyokütlenin termal ayrışmasını hızlandırır ve gaz fazında daha fazla ürün oluşumuna neden olur. Genellikle 400 ila 800°C arasında değişen sıcaklık aralığı tercih edilir. Daha yüksek sıcaklıklar daha fazla gaz üretimi sağlarken, daha düşük sıcaklıklar daha fazla sıvı ve katı ürün oluşumuna yol açabilir (Garcia-Perez et al., 2008; Horne & Williams, 1996). Isıtma hızı, piroliz işlemindeki sıcaklık artış hızını ifade eder. Hızlı ısıtma, daha fazla gaz oluşumuna ve daha kısa piroliz süresine neden olabilir. Yavaş ısıtma, sıvı ve katı ürün oluşumunu artırabilir. Isıtma hızı, piroliz reaktörünün tasarımına ve kullanılan ısıtma yöntemine bağlı olarak değişebilir (Akhtar & Amin, 2012). Piroliz işlemi genellikle oksijensiz ortamda gerçekleştirilir, bu nedenle basınç önemli bir faktördür. Yüksek basınç, gaz üretimini artırabilir ve piroliz sürecini hızlandırabilir. Düşük basınç, sıvı ve katı ürün oluşumunu artırabilir. Basınç, piroliz reaktörünün tasarımına bağlı olarak kontrol edilebilir (Blackadder & Rensfelt, 1985; Mok & Antal Jr, 1983). Tutuşma süresi, biyokütlenin piroliz reaktöründe kalacağı süreyi ifade eder. Uzun tutuşma süresi, daha fazla termal ayrışma ve ürün oluşumuna yol açabilir. Ancak, aşırı uzun tutuşma süresi, ürünlerin yanmasına neden olabilir. Tutuşma süresi, piroliz reaktörünün boyutuna ve akış hızına bağlı olarak ayarlanabilir (Zhao et al., 2018). Parçacık boyutunun ısı transferi üzerinde doğrudan etkisi vardır ve zayıf ısı iletkenliğine sahip olan biyokütle, piroliz işleminde ısı transferi güçlükleriyle karşı karşıyadır. Parçacık boyutu Biyo-yağ verimini ve özelliklerini etkiler. Piroliz reaksiyonlarının kalma sürelerinin optimizasyonu bakımından parçacık boyutu dağılımı önemli bir yere sahiptir (Aysu & Küçük, 2014). Piroliz işlemi etkileyen önemli bir faktör de biyokütlenin bileşimidir. Biyokütlenin içerdiği lignin, selüloz, hemiselüloz ve diğer organik bileşenler, piroliz ürünleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Farklı biyokütle kaynakları farklı bileşime sahip olabilir, bu da piroliz ürünlerinin bileşimini ve enerji potansiyelini etkileyebilir (Caballero et al., 1997). Ayrıca piroliz işlemi, katalizörlerin varlığı veya eklenmesiyle de etkilenebilir. Katalizörler, piroliz reaksiyon hızını artırabilir, ürün dağılımını değiştirebilir ve

yanma sürecini iyileştirebilir. Özellikle katalitik piroliz, katalizörlerin kullanıldığı bir yöntemdir ve daha yüksek ürün kalitesi ve enerji verimliliği sağlayabilir (Bridgwater, 1996).

Biyokütle pirolizi, enerji üretimi, atık yönetimi, karbon azaltma ve çevresel sürdürülebilirlik gibi konularda önemli faydalar sağlar. Fakat pirolizi işlemi karmaşık bir süreçtir ve optimize edilmesi gereken birçok parametreyi içerir. Piroliz sıcaklığı, piroliz süresi, biyokütle partikül boyutu ve reaktör tasarımı gibi faktörler, işlemin verimliliğini etkileyen önemli parametrelerdir ve araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu sürecin daha verimli, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir hale getirilmesi üzerine odaklanmıştır (Pecha et al., 2019). Termal bakımdan, biyokütle pirolizi dört aşamaya ayrılabilir. Kurutma, nemin bağlanmadığı düşük sıcaklıklarda ilk aşamada gerçekleşir ve nem uzaklaştırılır. İkinci aşamada, biyokütle buharlaşması 100-200 °C aralığındaki düşük sıcaklıklarda yavaş ilerler, düşük molekül ağırlıklı gazların (örn., CO ve CO₂) ve az miktarda asetik asidin salınır. Üçüncü aşamada, geniş devolatilizasyon, büyük biyokütle moleküllerinin kömüre ayrıştığı 200-600 °C aralığında yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Katranın ikincil kömüre ve yoğunlaşamayan gazlara (H₂, CO, CH₄, CO₂, vb.) ikincil devolatilizasyonu sıcaklığın genellikle 300-900 °C olduğu son aşamada gerçekleşir (Sun et al., 2016). Biyokütle pirolizi, farklı yöntemler ve teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Biyokütle piroliz yöntemleri: Yavaş piroliz, Hızlı Piroliz, Flash Piroliz, Katalitik Piroliz, Mikrodalga Piroliz olarak literatürde yer almaktadır.

Yavaş piroliz yöntemi, biyokütlenin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda doğrudan termal ayrışmasını içeren bir piroliz işlemidir. Bu piroliz yönteminde yavaş bir ısıtma hızı (0,1–1 °C/s), uzun süreli kalış süresi (5–30 dakika) ve ortam sıcaklığı (400–500 °C) sahiptir. Kömür veya odun kömürü, yavaş pirolizin ana ürünüdür (Demirbas & Arin, 2002). Bu yöntem, biyokütlenin sabit yataklı veya döner yataklı piroliz reaktörlerinde termal ayrışmaya tabi tutulmasıyla gerçekleştirilir. Yavaş pirolizde kullanılan piroliz reaktörleri genellikle sabit yataklı veya döner yataklı reaktörlerdir. Sabit yataklı reaktörlerde, biyokütle yatağının üzerinden gaz geçirilerek piroliz işlemi gerçekleştirilir. Döner yataklı reaktörlerde ise biyokütle, döner bir tambur içinde dönerek piroliz reaksiyonuyla temas eder. Reaktör tasarımı, biyokütle partikül boyutu, gaz akışı ve sıcaklık kontrolü gibi faktörlere bağlı olarak optimize edilir. Yavaş piroliz işlemi, oksijenin olmadığı bir ortamda gerçekleştirilir. Bu, biyokütlenin doğrudan termal ayrışmaya uğramasını sağlar ve yanma reaksiyonlarını önler. Oksijenin olmaması, gaz üretimini artırırken sıvı ve katı ürünlerin oluşumunu destekler. Piroliz işleminde kullanılan sıcaklık, önemli bir parametredir ve reaksiyon hızını etkiler. Yüksek sıcaklık, termal ayrışma reaksiyonunun hızlanmasını sağlar ve gaz üretimini artırır. Daha düşük sıcaklıklar ise daha fazla sıvı ve katı ürün oluşumuna neden olabilir. Piroliz süresi, biyokütlenin piroliz

reaktöründe kalacağı süreyi ifade eder. Piroliz süresi, reaktör tasarımı ve işletme parametrelerine bağlı olarak değişir. Süre, biyokütle partikül boyutu, ısıtma hızı ve piroliz reaktöründeki akış hızı gibi faktörlere bağlı olarak ayarlanabilir (Grassi & Bridgewater, 1991). Yavaş piroliz yöntemi, genellikle gaz, sıvı ve katı ürünlerin bir karışımını üretir. Gaz fazında ürünler arasında hidrojen, metan, karbon monoksit ve karbondioksit bulunur. Sıvı fazında ise biyoyakıtlar, aromatik bileşikler ve fenoller gibi ürünler elde edilebilir. Katı fazda ise karbon siyahı veya biyokömür olarak bilinen bir yan ürün elde edilebilir.

Hızlı piroliz, biyokütle materyalini yüksek sıcaklıkta hızlı bir şekilde termal ayrışmaya tabi tutan bir piroliz işlemidir. Bu yöntemde, biyokütle yüksek sıcaklıklarda ve sınırlı oksijen ortamında hızla ısıtılır. Hızlı piroliz, daha yüksek çalışma sıcaklığı aralığına (800–1250 °C), daha yüksek ısıtma hızı (10–200°C) ve çok kısa kalma süresine (1–10 s) sahiptir. (Mohan et al., 2006) Hızlı piroliz işlemi için genellikle akışkan yataklı reaktörler veya döner çanaklı reaktörler gibi özel tasarım reaktörler kullanılır. Bu reaktörler, biyokütleyi hızlı bir şekilde ısıtmak ve termal ayrışmayı gerçekleştirmek için optimize edilmiştir. Bu yüksek sıcaklıklar, biyokütle materyalinin hızlı bir şekilde termal ayrışmasını sağlar ve gaz üretimini artırır. Bu işlem, kısa sürelerde birkaç saniye ile birkaç dakika arasında tamamlanır. Hızlı piroliz işlemi sonucunda gaz ürünleri elde edilir (Bridgewater, 2008; Bridgewater & Peacocke, 2000b). Bu gazlar arasında hidrojen, metan, karbon monoksit ve karbondioksit bulunabilir. Gaz ürünleri, enerji üretimi veya kimyasal işlemler için kullanılabilir. Hızlı piroliz işlemi sırasında katı ürün de elde edilir. Bu ürün, genellikle biyokömür olarak adlandırılır. Biyokömür, karbon içeriği yüksek, poroz bir katıdır ve toprak iyileştirmesi, enerji üretimi veya endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklar ve kısa sürelerde gerçekleşmesi, daha hızlı bir işlem olması ve daha yoğun gaz üretimi sağlaması bakımından biyokütle kaynaklarının enerji dönüşümü ve biyokömür üretimi için önemli bir yöntemdir (Bolan et al., 2022).

Flaş piroliz, piroliz işleminin hızlandırıldığı ve daha yüksek sıcaklıklar kullanıldığı bir tür pirolizdir. Flaş piroliz, genellikle biyokütle, plastik atıklar veya lastikler gibi karbon içeren malzemelerin geri dönüşümünde kullanılır. İşlem, yaklaşık 450 ila 600°C arasında gerçekleştirilir ve reaksiyon süresi saniyelerle ifade edilir (Basu, 2010). Bu hızlı ısınma ve soğuma süreçleri, malzemelerin termal parçalanmasını hızlandırır ve daha yüksek verimli ürünlerin elde edilmesini sağlar. Yüksek sıcaklıklar ve hızlı reaksiyon süreleri, daha yüksek ürün verimleri elde etmek için piroliz sürecini optimize eder. Flaş piroliz, gazlar, sıvılar ve katı ürünlerin bir karışımını üretebilir. Bu ürünler arasında biyokütle kömürü, biyokatran, biyokarışım yakıtlar, biyokömür, hidrokarbon gazları ve kimyasal maddeler bulunur. Flaş piroliz sürecinde açığa çıkan gazlar yakıt olarak kullanılabilir. Bu, enerji geri kazanımını artırır

ve piroliz sürecini sürdürülebilir hale getirir. Piroliz, plastik atıklar ve lastikler gibi zor geri dönüştürülebilen malzemelerin bertarafında etkili bir yöntemdir. Malzemeler, daha az hacimli ve daha kolay yönetilebilir ürünlere dönüştürülür. Yüksek sıcaklıklar ve hızlı reaksiyon süreleri, sürecin kontrolünü zorlaştırabilir. Optimal sıcaklık, basınç ve süre koşullarının belirlenmesi önemlidir. Flaş piroliz, karbon içeren atıkların bertarafı ve enerji geri kazanımı gibi uygulamalarda potansiyel olarak faydalıdır.

Katalitik piroliz, biyokütle materyalini yüksek sıcaklıkta ve katalizörlerin varlığında termal ayrışmaya tabi tutan bir piroliz işlemidir. Bu yöntemde, biyokütle özel bir katalizörle birlikte yüksek sıcaklıkta ısıtılır. Katalitik piroliz işlemi, yavaş pirolizden farklı olarak, katalizörün varlığı sayesinde daha verimli ve kontrol edilebilir bir termal ayrışma sağlar. Katalitik pirolizde, genellikle metal veya metal oksit katalizörleri kullanılır. Bu katalizörler, piroliz reaksiyonlarını hızlandırmak ve yan ürünlerin oluşumunu kontrol etmek için kullanılır (Dai et al., 2020). Genellikle 400 ila 600°C arasında orta sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığı, biyokütle materyalinin termal ayrışmasını sağlamak için yeterli olacak kadar yüksektir. Hızlı pirolize göre daha uzun sürede gerçekleştirilir. Süre, katalizörün aktivitesine, reaksiyon hızına ve istenen ürün bileşimine bağlı olarak değişebilir. Katalitik piroliz işlemi sonucunda gaz, sıvı ve katı ürünler elde edilebilir. Katalizörlerin varlığı, gaz ve sıvı ürünlerin oluşumunu etkileyerek istenen ürün bileşimini optimize etmeye yardımcı olur. Elde edilen gaz ürünleri arasında hidrojen, metan, etilen ve benzen gibi bileşikler bulunabilir. Bu gazlar, enerji üretimi veya kimyasal üretim gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Bu yöntem ile sıvı ürünler de elde edilebilir. Bu sıvılar genellikle bio-yağlar olarak adlandırılır ve biyodizel veya biyojet yakıtı gibi çeşitli yakıt türlerinin üretiminde kullanılabilir (Yin et al., 2020). Katalitik piroliz, yavaş piroliz yöntemlerine kıyasla daha verimli ve kontrol edilebilir bir termal ayrışma sağlayarak biyokütlenin enerji dönüşümünde önemli bir rol oynar. Katalizörlerin kullanımı, ürün bileşimini optimize etmeye ve yan ürünlerin oluşumunu azaltmaya yardımcı olur. Bu nedenle, katalitik piroliz, biyokütle kaynaklarının sürdürülebilir enerji üretimi için önemlidir.

Mikrodalga pirolizi, biyokütle veya diğer organik materyallerin mikrodalga ışınlarının etkisi altında termal ayrışmaya tabi tutulduğu bir piroliz yöntemidir. Bu yöntemde, mikrodalga enerjisi, biyokütlenin içine nüfuz eder ve iç ısınmayı sağlar. Mikrodalga pirolizi, mikrodalga ışınlarının elektromanyetik enerji transferi prensibine dayanır. Mikrodalga enerjisi, biyokütleyle uygulandığında moleküler titreşimlere ve sürtünme ısısına yol açar. Bu, biyokütle içindeki su ve organik bileşenlerin hızlı bir şekilde ısınmasına ve termal ayrışmanın gerçekleşmesine neden olur (Sobhy & Chaouki, 2010). Mikrodalga pirolizi için özel olarak tasarlanmış mikrodalga

reaktörleri kullanılır. Reaktör, mikrodalga enerjisinin homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlayan bir yapıya sahiptir. Reaktör, biyokütlenin içine yerleştirilir ve mikrodalga enerjisi uygulanarak termal ayrışma gerçekleştirilir. Bu piroliz yönteminde sıcaklık ve süre, işlem parametrelerini belirler. Sıcaklık, mikrodalga gücüne ve işlem süresine bağlı olarak değişebilir. Süre, biyokütlenin tam ayrışması için gereken süreyi temsil eder. Mikrodalga pirolizi genellikle daha kısa sürelerde gerçekleşir. Proses parametrelerine göre işlem sonucunda gaz, sıvı ve katı ürünler elde edilebilir (Wang et al., 2015). Gaz ürünleri arasında hidrojen, metan, karbon monoksit ve karbondioksit bulunabilir. Sıvı ürünler, genellikle bio-yağlar veya biyo-katranlar olarak adlandırılır. Katı ürünler ise genellikle biyokömür olarak bilinir. Bu piroliz, yavaş piroliz yöntemlerine kıyasla bazı avantajlara sahiptir. Bunlar arasında daha hızlı işlem süresi, daha yüksek ısı verimliliği, daha düşük enerji tüketimi ve daha iyi ürün kalitesi sayılabilir. Mikrodalga enerjisinin hızlı bir şekilde ısı transferi sağlaması ve homojen ısınma sağlaması da bir avantajdır (Yu et al., 2007). Mikrodalga ısıtma, anlık açma/kapama kontrolü ile kullanım kolaylığı sağlar, ürünlerin verimini ve kalitesini artırır. Ayrıca, tehlikeli ürün oluşumunu azaltır ve emisyon kirleticilerini en aza indirerek tekniği çevre dostu yapar. Mikrodalga pirolizi, biyokütle kaynaklarının termal ayrışmasında hızlı, verimli ve kontrollü bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Biyokütle oksidasyonu, çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçleri içeren son derece karmaşık bir süreçtir. Oksidasyon işlemi genellikle altı adımdan oluşan bir oksidasyon yolunu takip eder. Sırasıyla su buharlaşması, organik maddenin uçucu ve sabit karbona dönüşümü, uçucu maddenin yağ ve gazlara ayrışması, ayrışma sonucunda oluşan bazı gazların oksidasyonu, sabit karbonun oksidasyonu ve katı kalıntı ve gazların dekarbonizasyonu. Bu birincil ve ikincil reaksiyonların birçoğu, farklı termal ve oksitleyici reaktiviteye sahip kimyasallar dahil olmak üzere çoğu endüstride eş zamanlı olarak meydana gelir. Farklı biyokütlelerin oksidasyon sürecindeki davranışları bu nedenle farklılık gösterir ve öngörülmesi zor olabilir (Zanoni et al., 2012).

Biyokütle oksidasyonu genellikle üç farklı yöntemle gerçekleştirilir: termal oksidasyon, biyolojik oksidasyon ve kimyasal oksidasyon. Biyokütlelerin termal oksidasyonunda, biyokütlenin yakılması yoluyla oksidasyon gerçekleştirilir. Biyokütlenin doğrudan yanması veya gazlaştırılması gibi yöntemler kullanılabilir. Biyolojik oksidasyonda ise biyokütlenin mikroorganizmalar tarafından parçalanması ve metabolik tepkimeler yoluyla oksidasyon gerçekleştirilir. Biyokütlenin mikroorganizmalar tarafından fermentasyon, çürüme veya biyogaz üretimi gibi süreçlerle parçalanması sonucunda metan, karbondioksit ve diğer gazlar açığa çıkar. Kimyasal oksidasyon, biyokütlenin kimyasal reaksiyonlarla oksitlenmesini ifade

eder. Örneğin, biyokütledeki organik bileşiklerin asitler veya oksitleyici maddelerle tepkimeye girmesi sonucunda oksidasyon gerçekleşebilir. Bu yöntem genellikle biyokütle etanolün oksidasyonunda veya biyokütleden biyokimyasal ürünlerin eldesinde kullanılır.

Bu çalışmada, Dünyada ve Türkiye’ bolca yetiştirilen ve tüketilen patatesin, patates işleme sürecinde ortaya çıkan ve genellikle kullanılmayan kabukları öğütülerek elde edilen yüzey alanı arttırılmış hammaddenin oksidasyonu sonucu termal bozunması ele alınmıştır. Patates kabuğunun termal dönüşümü, farklı sıcaklık hızlarında incelenmiştir. Bu bozunma sonucu elde edilen veriler ışığında ilgili malzemenin aktivasyon enerjisi saptanmaya çalışılmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Enerji

Bilimsel olarak, iş yapma yeteneği veya sistemin durumunu değiştirme kapasitesi olarak tanımlanan enerji sistemlerin çalışmasını sağlayan ve etkileşimlerin sonucunda ortaya çıkan bir özelliktir. Dünya enerji ihtiyacı, her yıl artan bir trend göstermektedir. Kasım 2023 itibarıyla 8 milyar olan Birleşmiş Milletlere göre 2030'da 8,5 milyar, 2050'de 9,7 milyar olacağı tahmin edilen Dünya nüfusu beraberinde getirdiği ekonomik büyüme ile enerji talebinde sürekli bir artışa yol açmaktadır.

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji talebi hızla yükselmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, 2040 yılına kadar dünya enerji talebinin %25-30 oranında artması beklenmektedir.

Dünya enerji tüketiminin yaklaşık %80'i fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Bu oranda petrolün %33, kömürün %27 ve doğal gazın %20 civarında bir payı vardır. Enerji talebi hızla artarken, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel etkileri, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesini ve sürdürülebilir enerji dönüşümünü gerektirir. Enerji verimliliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji altyapısının geliştirilmesi ve enerji erişiminin sağlanması, enerji sorununun çözümünde önemli adımlardır.

Enerji Kaynakları

Geleneksel enerji kaynakları

Geleneksel enerji kaynakları, uzun süredir kullanılan ve dünya enerji tüketiminin büyük bir kısmını karşılayan kaynaklardır. Fosil yakıtlar, petrol, doğal gaz ve kömür gibi jeolojik süreçler sonucu oluşan organik maddelerden elde edilir. Petrol, ulaşım, sanayi ve enerji üretimi gibi birçok alanda kullanılırken, doğal gaz hem enerji üretimi hem de ısıtma ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Kömür ise elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu geleneksel enerji kaynakları, dünya enerji talebini karşılamada önemli bir role sahiptir. Ancak fosil yakıtların sınırlı rezervleri, çevresel etkileri ve iklim değişikliği gibi sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişi teşvik etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada sınırsız veya sürdürülebilir bir şekilde yenilenebilen kaynaklardır. Bu kaynaklar, fosil yakıtların aksine çevre dostu, düşük sera gazı emisyonlu ve enerji güvenliğini artıran seçenekler olarak kabul edilir. Güneş enerjisi, güneş ışığından elde edilen enerjidir. Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller veya güneş termal kolektörler aracılığıyla elektrik ve ısı olarak kullanılabilir. PV paneller, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürerek elektrik üretirken, güneş termal kolektörler, güneş ışığını su veya hava gibi bir akışkanı ısıtmak için kullanır.

Rüzgâr enerjisi, rüzgârın kinetik enerjisinden elde edilen enerjidir. Rüzgâr türbinleri, rüzgârın dönerek mekanik enerjiye dönüşmesiyle elektrik üretir. Rüzgâr enerjisi, geniş açık alanlarda, kıyı bölgelerinde veya denizdeki rüzgâr çiftliklerinde kullanılır. Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel enerjisinden elde edilen enerjidir. Barajlar veya akışkanlı türbinlerle suyun enerjisi kullanılarak elektrik üretilir. Büyük nehirlerde ve göllerde hidroelektrik santralleri kurulabilir. Biyokütle enerjisi, organik madde ve biyolojik atıkların yanması, fermentasyonu veya kimyasal dönüşümüyle elde edilen enerjidir. Odun, tarımsal atıklar, biyogaz, biyodizel ve etanol gibi biyoyakıtlar biyokütle enerjisi kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Biyokütle enerjisi, enerji üretimi ve ısıtma gibi birçok alanda kullanılabilir. Gel-git ve deniz akıntısı enerjisi, denizlerdeki gel-git veya akıntıların kinetik enerjisinden elde edilen enerjidir. Özel türbinlerle deniz akıntılarının veya gel-git hareketinin enerjisi elektrik üretmek için kullanılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir bir enerji geleceği için önemli bir role sahiptir. Hükümetler, teşvik programları, politikalar ve düzenlemeler aracılığıyla yenilenebilir enerji kullanımını desteklenmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, enerji güvenliğini artırır, çevresel etkileri azaltır ve iklim değişikliğiyle mücadeleye yardımcı olur. Ayrıca, ekonomik büyümeyi destekleyen ve yeni istihdam olanakları sağlayan bir sektör olarak da büyük potansiyele sahiptir.

Biyokütle enerjisi

Biyokütle enerjisi, biyolojik kaynaklardan elde edilen enerjidir. Bu enerji kaynağı, bitkisel ve hayvansal atıklar, odun, tarımsal ürün artıkları, organik atıklar, biyogaz ve biyoyakıtlar gibi biyolojik kaynaklardan elde edilen biyokütle kullanılarak üretilir. Biyokütle enerjisi için kullanılan kaynaklar oldukça çeşitlidir. Bunlar arasında tarımsal ürün artıkları (samangiller, kabuklu yemiş kabukları, pirinç kabuğu vb.), odun ve odun atıkları, endüstriyel ve evsel atıklar, tarımsal ürünler (mısır, buğday, şeker kamışı gibi), enerji bitkileri (mısır, sünger, ayrık otu, enerji pancarı gibi) ve hayvansal atıklar (atık hayvan gübresi, kanatlı hayvan gübresi vb.) bulunur. Biyokütle, bitkisel ve hayvansal atıklar gibi sınırsız bir kaynaktır ve

sürekli olarak yenilenebilir. Biyokütle enerjisi, fosil yakıtlara göre daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir. Bu, küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir faktördür. Biyokütle enerjisi, organik atıkların bertaraf edilmesinde etkili bir yöntemdir. Atık malzemelerin enerjiye dönüştürülerek çevreye olan etkileri azaltılır. Biyokütle enerjisi, yerel ve bölgesel enerji güvenliğini artırır. Ülkeler, kendi biyokütle kaynaklarını kullanarak enerji ihtiyaçlarını karşılayabilir ve enerji ithalatına olan bağımlılıklarını azaltabilir.

Biyokütle enerjisi kullanımıyla ilgili bazı zorluklar ve sınırlamalar vardır. Biyokütle, tarım arazileri ve su kaynakları gibi diğer kullanımlarla rekabet edebilir. Bu nedenle, sürdürülebilir biyokütle üretimi ve kaynak yönetimi önemlidir. Biyokütle enerjisi üretimi, verimlilik açısından geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla daha düşük olabilir. Verimliliği artırmak için yeni teknolojiler ve süreçler geliştirilmektedir. Biyokütle enerjisi maliyeti, teknoloji ve biyokütle kaynaklarının yerel mevcudiyeti gibi ekonomik faktörlere bağlıdır. Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji portföyünün önemli bir parçasıdır ve enerji üretimi, atık yönetimi ve sürdürülebilirlik açısından potansiyel sunar. Ancak, kaynakların sürdürülebilir kullanımı ve teknolojik gelişmelerin sürekli takibi önemlidir.

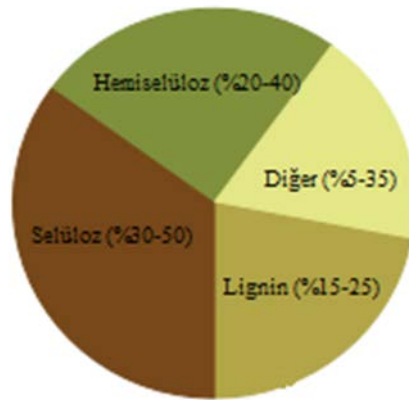
Biyokütle bileşimi

Biyokütle bileşimi, biyolojik kaynaklardan elde edilen biyokütlenin içerdiği bileşenlerin miktarını ve oranını ifade eder. Bu bileşenler genellikle bitki ve hayvan atıklarından veya enerji üretimi için kullanılan biyokütle kaynaklarından elde edilen materyallerden oluşur. Biyokütle bileşimi, biyokütlenin enerji potansiyeli ve işlenme yöntemleri için önemli bir faktördür. Biyokütle, genellikle bitkilerden elde edilen organik maddelerden oluşur. Selüloz bitkilerde bulunan ve hücre duvarlarının ana bileşeni olan kompleks bir karbonhidrattır. Selüloz, odun, saplar, yapraklar ve bitki dokularında bulunur. Hemiselüloz, selüloza benzer şekilde bitkilerde bulunan bir karbonhidrat türüdür. Odun, saman ve bazı bitki saplarından elde edilebilir. Lignin bitki hücre duvarlarında bulunan bir polimerdir. Lignin, bitki dokusuna sağlamlık ve direnç sağlar. Odunun büyük bir kısmı lignindir. Nişasta bitkilerde depolama amacıyla üretilen bir karbonhidrattır. Nişasta, tohumlar, yumrular ve bazı kökler gibi bitkilerin enerji depolama organlarında bulunur. Lipitler bitkilerde bulunan yağ ve yağ benzeri bileşiklerdir. Tohumlarda, yapraklarda ve diğer bitki dokularında bulunabilirler. Proteinler bitkilerde bulunan temel yapı taşlarıdır. Proteinler, bitkilerin büyümesi, gelişmesi ve metabolik işlevlerini yerine getirmesi için gereklidir. Biyokütlenin bileşimi, kullanılan bitki türüne, bitki materyalinin kaynağına ve işlenme yöntemine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, odun bazlı biyokütle daha yüksek lignin içeriğine sahipken, bitki atıklarından elde edilen biyokütle daha yüksek selüloz içeriğine sahip olabilir. Biyokütle bileşimi, biyokütlenin enerji üretimi, biyoyakıt üretimi veya

kimyasal maddelerin sentezi gibi çeşitli uygulamalar için önemlidir. Bu bilgiler, biyokütle kaynaklarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasına yardımcı olurken, sürdürülebilir enerji ve malzeme üretimine katkıda bulunabilir.

Lignoselülozik Biyokütle Bileşimi

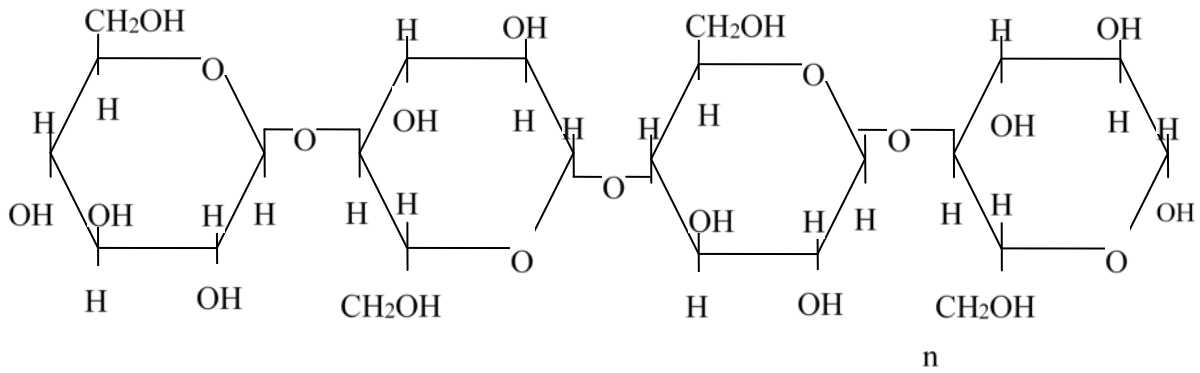
Lignoselüloz, bitkilerin hücre duvarlarında bulunan kompleks bir bileşiktir ve selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi bileşenleri içerir (Collard & Blin, 2014). Lignoselülozun ana bileşeni olan selüloz, β -1,4 glikozidik bağlarla bir araya gelen uzun zincirli bir polisakkarittir. Düzgün bir şekilde düzenlenmiş kristal yapısıyla karakterizedir ve hidrojen bağları aracılığıyla sıkıca paketlenmiş lifli bir yapı oluşturur. Bu nedenle selüloz, doğal polimerler arasında en sağlam yapısal malzemelerden biridir. Lignoselüloz içerisinde yer alan diğer bir bileşen hemiselülozdur. Hemiselülozlar, genellikle β -1,4 glikozidik bağlara sahip olmayan ve çeşitli şeker birimlerinin karışımını içeren heterojen polisakkaritlerdir. Selülozdan daha az kristalize olma eğilimindedirler ve suya karşı daha fazla çözünürlük gösterirler. Lignoselülozun üçüncü temel bileşeni olan lignin, bitki hücrelerinin yapısal bütünlüğünü sağlamakla görevlidir. Lignin, aromatik alkol ve fenolik bileşiklerin karmaşık bir ağı olan 3D ağ şeklinde düzenlenmiş polimerik bir yapıdır. Lignin, güçlü bir şekilde çapraz bağlanır ve selüloz ve hemiselülozun etrafını saran matrisin bir parçasını oluşturur (Rukiye Çalışkan Didem Sutay Kocabaş, 2019). Lignoselüloz, birçok endüstriyel uygulama için potansiyel olarak değerli bir kaynaktır. Biyokütle işleme ve biyokütleden enerji üretimi gibi süreçlerde kullanılabilir (Cai et al., 2017). Lignoselüloz, biyokütleden biyoyakıtlar, kimyasal maddeler ve malzemeler üretmek için de dönüştürülebilir. Bununla birlikte, lignoselülozun kullanımı bazı zorluklar içerir çünkü bileşikler karmaşık ve sıkıca bir araya gelmiş bir yapıda bulunur. Bu nedenle, lignoselülozun etkin bir şekilde parçalanması ve kullanılması için uygun işleme teknolojileri geliştirilmektedir.



Şekil 1. Lignoselülozik biyokütlelerin genel bileşimleri

Selüloz

Selüloz yıllık 1.5 Milyon ton üretim ile yer yüzündeki en bol yenilenebilir doğal polimerdir (Coseri, 2017). Selüloz, doğal olarak bitkilerin hücre duvarlarında hemiselüloz ve lignin ile birlikte bulunan bir bileşiktir. Bitkilerde selüloz, hücresel yapıyı desteklemek ve bitkinin büyümesini sağlamak için önemli bir rol oynar (Lee et al., 2014). Bitkide farklı kısımlarda farklı konsantrasyonlarda bulunur. Bitkiler (odun, yıllık ürünler ve tarımsal atık), deniz hayvanları (tunikatlar), algler, mantarlar, bakteriler, omurgasızlar ve amip de selüloz kaynaklarındandır (Brinchi et al., 2013; Jacob & Thomas, 2008). Selüloz, bir polisakkarit olan glukoz moleküllerinin β -1,4 glikozidik bağlarla bir araya gelmesiyle oluşan uzun düz bir zincirdir. Glukoz, altı karbon atomundan oluşan bir şeker molekülüdür. Selüloz, glukoz moleküllerinin β -1,4 glikozidik bağlarla birleşmesiyle oluşur. Bu bağlar, glukozun C1 karbonu ile bir sonraki glukozun C4 karbonu arasında oluşur. Her iki birimden birisi diğerine göre 180° lik bir dönüşle bağlanmıştır. Bunun sonucu olarak selüloz, halkalı glukoz moleküllerinin doğrusal bir zinciridir ve düz şerit benzeri yapıdadır. Bu yapı, selülozun lifli ve düzenli bir yapıya sahip olmasını sağlar. Polimerler, tekrar eden monomerlerden oluşan zincir halindeki moleküllerdir. Doğal bir polimer selülozun kimyasal formülü $(C_6H_{10}O_5)_n$ 'dir. Buradaki n selülozun zincir uzunluğunu temsil eder. Bu birimlerin sayısına polimerizasyon derecesidir. Selülozun molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu, bitki türüne ve kaynağına bağlı olarak değişebilir. Selüloz molekülünde, glukozun hidroksil grupları (OH) yer alır. Bu hidroksil grupları, selülozun kimyasal reaktivitesini ve suya karşı çözünürlüğünü etkiler (Azizi Samir et al., 2005).



Şekil 2. Selülozun yapısı (Marsh, 2007)

Selülozun termal bozunmasının ilk aşamasında, moleküler yapısındaki suyu kaybeder. Bu süreç genellikle $100-150^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir ve selülozun hidrojen bağlarından su molekülleri serbest bırakılır. Su kaybının ardından, selülozun ana bileşeni olan glukoz molekülleri termal ayrışma sürecine girer. Yaklaşık $200-350^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda, selüloz

molekülleri parçalanır ve piroliz ürünleri oluşur. Bu ürünler arasında gazlar (metan, hidrojen, karbon monoksit), katı karbon bileşikleri ve sıvı fazda polimerik yapılar (asidik lignin türevleri, alifatik ve aromatik hidrokarbonlar) bulunabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda (350-600 °C), piroliz ürünleri arasında yer alan karbon bileşikleri reaksiyona girerek katı karbon (biyokömür) oluşturur. Bu aşama, selülozun tamamen ayrıştığı ve çeşitli organik bileşiklerin uçtuğu aşamadır (Van de Velden et al., 2010). Selüloz çok yönlü doğal polisakkarittir ve birçok farklı kullanım alanında önemli bir rol oynamaktadır. Selüloz, kâğıt ve karton üretiminde temel ham madde olarak kullanılır. Tekstil ürünlerinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Viskoz, modal ve lyocell gibi selüloz bazlı elyaflar, yumuşak, nefes alabilen ve emici özelliklere sahip kumaşların üretiminde kullanılır. Selüloz, gıda endüstrisinde çeşitli amaçlarla kullanılır. Örneğin, selüloz lifleri, gıdalara lif eklenmesi amacıyla kullanılır. Ayrıca, selülozdan yapılan mikrokristalin selüloz, emülsiyon stabilizatörü, kıvam artırıcı ve kalori azaltıcı olarak kullanılabilir. İlaç endüstrisinde kullanılan birçok formülasyonun temel bileşenidir. Tabletlerin yapısını sağlamak, ilaçların dozajını düzenlemek ve ilaçların kontrolsüz salınımını sağlamak için selüloz kullanılır. Selüloz bazlı malzemeler, inşaat endüstrisinde yalıtım malzemeleri, kaplamalar, boyalar ve yapıştırıcılar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır. Özellikle selüloz elyafı ve selüloz esaslı izolasyon malzemeleri enerji verimliliği için kullanılır. Kişisel bakım ürünlerinde de selüloz kullanılmaktadır. Örneğin, selüloz elyafları, bebek bezleri, hijyenik pedler ve kâğıt havlular gibi ürünlerde emici özellik sağlamak için kullanılır. Selüloz, biyoplastiklerin üretiminde kullanılan bir malzemedir. Selüloz bazlı biyoplastikler, petrokimyasallara dayalı plastiklerin yerine çevre dostu bir alternatif olarak kullanılabilir. Selülozdan elde edilen fenolik bileşikler, genellikle fenolik asitler, fenolik aldehytler veya fenolik alkollerdir. Fenolik bileşikler, reçinelerin, boya ve kaplamaların, plastiklerin ve ilaçların üretiminde kullanılabilir. Selüloz, doğal, yenilenebilir ve çevre dostu bir malzeme olduğu için birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hemiselüloz

Hemiselüloz, bitkilerin hücre duvarlarında bulunan bir grup heterojen polisakkarittir. Bitki hücre duvarında en çok bulunan ikinci polisakkarittir ve sert ağaçlarda ksilanlar, yumuşak ağaçlarda glukomannanlar olarak bilinirler. Bitkiye yapısal güç sağlamak için selüloz liflerini mikrofibrillere bağlayarak ve lignin ile çapraz bağlanarak karmaşık bir bağ ağı oluştururlar (Xu et al., 2018). Kimyasal olarak çeşitli şeker birimlerinden oluşur ve bitki türüne ve kaynağına bağlı olarak bileşimi değişebilir. Hemiselüloz, çeşitli şeker birimlerinden oluşur. En yaygın olarak glukoz, ksiloz, galaktoz, mannoz, arabinos, glukuronik asit gibi şeker birimleri içerebilir. Bu şeker birimleri, hemiselülozun farklı türlerine ve bitki kaynaklarına bağlı olarak değişir.

Hemiselüloz, genellikle β -1,4 glikozidik bağlarla birleşen şeker birimleri arasında bağlantılar içerir. Ancak bazı hemiselülozlar, β -1,3 veya β -1,6 bağları gibi farklı bağ tiplerini de içerebilir. Bu bağlar, şeker birimlerinin zincir şeklinde bir araya gelmesini sağlar. Hemiselüloz molekülleri genellikle dallanabilir. Yan zincirler, ana zincire bağlı olan ek şeker birimlerinden oluşabilir. Bu dallanmalar, hemiselülozun çözünürlüğünü ve kimyasal reaktivitesini etkileyebilir. Şeker birimleri arasındaki farklı bağ yapıları ve dallanmalar, hemiselülozun su çözünürlüğünü artırır. Selülozdan farklı olarak amorf yapı ve düşük polimerizasyon derecesine sahiptir (Werner et al., 2014). Isıl bozunması selüloza kıyasla daha düşük sıcaklık 220-315°C aralığında yüksek oranda tamamlanır. Dehidrasyon reaksiyonlarının yoğun olduğu sıcaklık 350°C'den düşük sıcaklıklarken yüksek sıcaklıklarda ise depolimerizasyon reaksiyonu yoğundur (H. Yang et al., 2007). Hemiselülozlar, biyoyumumluluk, biyobozunurluk, toksik olmama ve bazı spesifik terapötik aktivitelerin avantajları nedeniyle endüstride kâğıt ve karton üretiminde, gıda endüstrisinde jel oluşturucu, viskozite düzenleyici ve emülsiyon stabilizatörü olarak, biyoetanol ve biyoplastik gibi biyobazlı malzemelerin üretiminde uzun süredir araştırılmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır (J. Yang et al., 2020).

Lignin

Organik karbonun yaklaşık %30'unu oluşturan Lignin lignoselülozik biyokütlenin en bol bulunan ikinci biyopolimeridir. Lignin, bitkilerin hücre duvarlarında bulunur ve bitkilerin büyümesini destekler (Margenot et al., 2020).

Lignin, genellikle selüloz ve hemiselüloz ile birlikte bulunur ve bitkisel liflerin sertlik, dayanıklılık ve direnç özelliklerinden sorumludur. Lignin, yüksek molekül ağırlıklı bir bileşik olup deneysel olarak $C_9H_{10}(OCH_3)_{0.9-1.7}$ kapalı formülü ile ifade edilir (Klass, 1998; Shafizadeh, 1982). Lignin, üç ana monomer birimi olan guaiakol, syringol ve p-hidroksifenilol olmak üzere farklı fenolik bileşiklerden oluşur. Bu monomer birimleri, bitki türüne ve kaynağına bağlı olarak değişir. Lignin, monomer birimlerinin fenolik alkolik formda bir araya gelmesiyle oluşur. Fenolik alkolik birimler, aromatik halkalar ve hidroksil grupları içeren bileşiklerdir. Lignin, fenolik alkolik birimlerin kovalent bağlarla birleşmesiyle karmaşık bir ağ yapısı oluşturur. Lignin, guaiakol ve syringol birimlerinin aryl-eter bağları ve p-hidroksifenilol birimlerinin aryl-alkan bağlarıyla birbirine bağlanır. Karbon-karbon ve eter bağlarıyla birleşen fenil propanlardan oluşan üç boyutlu yapıya sahip olan Lignin yapısında metilendioksit, karboksil, vanilin, metoksil, hidroksil ve doymamış hidrokarbon gruplarını da barındırır (Thring & Breau, 1996; Uçar & Karagöz, 2009). Lignin molekülleri, yan zincirlerin ve dallanmaların varlığıyla karakterizedir. Dallanmalar, lignin molekülünde yan zincirlerin bulunması veya farklı monomer birimlerinin bağlanması şeklinde olabilir. Dallanma, ligninin

çeşitliliğini ve çözünürlüğünü etkileyebilir. Lignin kompleks yapısı hemiselüloz ve selülozdan daha yüksek sıcaklıklarda (200-850 °C) ayrışmasına sebep olur. Lignin ısı bozunma işleminde, dehidrasyon reaksiyonları 700°C'den daha düşük sıcaklıklarda başlangıç kütlelerinin sadece %40' lık kısmını kaybeder ve yüksek sıcaklıklarda monomerlere ayrışır (Brebü & Vasile, 2010'a, 2010b). Lignin, bitki dokularının farklı bölgelerinde ve bitki türlerinde farklılık gösterebilir. Bu nedenle, lignin bileşimi bitki türüne, bitkinin yaşına, büyüme koşullarına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir. Lignin, bitkilerin ikincil hücre duvarlarında bulunan ve endüstriyel uygulamalarda da kullanılan bir bileşiktir. Lignin, kâğıt ve karton üretiminde yan ürün olarak kullanılır. Ayrıca, enerji üretimi, biyobazlı malzeme üretimi ve kimyasal endüstri gibi alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir.

Biyokütle Kaynağı Olarak Kullanılan Maddeler

Biyokütle, biyolojik kaynaklardan elde edilen organik maddelerdir ve enerji üretimi veya biyobazlı ürünlerin üretimi için kullanılabilirler. Biyokütle kaynakları genellikle bitkisel veya hayvansal atıklar, tarımsal ürünler, odun, mikroorganizmalar veya enerji bitkileri gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilir. Odun, biyokütlenin en yaygın ve eski kaynaklarından biridir. Ağaçlardan elde edilen odun, enerji üretimi için yakıt olarak kullanılabilir. Odunun yanması, ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılan biyokütle enerjisi sistemlerinin temelini oluşturur. Tarımsal üretim süreçlerinden kaynaklanan atıklar, biyokütle kaynağı olarak değerlendirilebilir. Pirinç kabukları, mısır sapları, saman, pamuk artıkları ve şeker kamışı artıkları gibi tarımsal atıklar, enerji üretimi veya biyobazlı malzemelerin üretimi için kullanılabilir. Bazı bitki türleri, biyokütle enerjisi üretimi için özellikle yetiştirilen enerji bitkileri olarak bilinir. Bu bitkiler, hızlı büyüme yetenekleri, yüksek verimleri ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle tercih edilir. Mısır, buğday, şeker kamışı, enerji sorgumu, miskantus ve süneotu gibi bitkiler enerji bitkisi olarak kullanılabilir. Atık organik malzemeler, biyokütle kaynağı olarak kullanılabilir. Örneğin, gıda atıkları, ahşap atıklar, yeşil atıklar, hayvansal gübreler ve kanalizasyon çamurları gibi atıklar, enerji üretimi veya biyobazlı ürünlerin üretimi için kullanılabilir. Bazı mikroorganizmalar da biyokütle kaynağı olarak kullanılabilir. Algler, bakteriler ve mantarlar gibi mikroorganizmalar, biyokütle enerjisi üretimi veya biyoplastikler gibi malzemelerin üretimi için kullanılabilir. Bu biyokütle kaynakları, sürdürülebilir enerji üretimi ve biyobazlı malzemelerin kullanımı açısından önemli potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, biyokütle kullanımı, çevresel etkiler, arazi kullanımı, ekonomik faktörler ve sosyal etkiler gibi çeşitli faktörleri dikkate alarak sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmelidir.

Patates Bitkisi

İrlanda veya beyaz patates olarak da bilinen Patates (*Solanum tuberosum*), pirinç, buğday ve mısırdan sonra 370 milyon tondan fazla yıllık üretimiyle dördüncü en önemli gıda mahsulüdür. Tuzlu ve alkali topraklar hariç hemen hemen her tür toprakta yetiştirilir .(Subedi et al., 2019) Patates, nişastadan zengin bir bitki olan Solanaceae ailesine aittir. Patates nişasta deposu olarak bilinir yaklaşık %15-20'si nişastadır. Yaklaşık %70-80'i sudan oluşur ve protein açısından da zengindir. Dünyada patates üretimi 2020 yılında 16,5 milyon hektar alanda 359 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Geçen yıllara kıyasla Hindistan, Mısır ve Ukrayna'nın üretiminde artış gözlenmekte, üretimde Çin %22, Hindistan %14, Ukrayna %6 ve Rusya %5'lik paya sahiptir. Dünya patates üretiminde Türkiye %1'lik pay ile 16'ncı sırada yer almaktadır (statista, 2023). Patates temel bir üründür ve Birleşmiş Milletler tarafından gıda güvenliği ürünü olarak tavsiye edilmektedir. Patates her iklim ve koşulda yetişebilir. Diğer sebzelere göre büyümeleri daha az zaman alır ve daha az girdiye ihtiyaç duyarlar ve tohumluk patates olarak yeniden ekilebilirler. Patates, diğer alternatiflere göre daha küçük bir alan kaplarken, yüksek besin enerjisi ve kompleks karbonhidratlar sağlar. Çiğ patatesin bileşenleri %79 su,%17 karbonhidrat,%2 protein, %2 yağ olarak oranlanabilir. Çiğ patatesin yaklaşık %88'i nişasta olduğundan tüketilmeden önce pişirilmelidir. Patates, temel besin maddeleri bakımından zengindir ve büyüme için gerekli amino asitleri bünyesinde barındırır bu özelliği sebebiyle geleceğin gıdası olarak kabul edilmektedir (Gustavsen, 2021). Patatesin ucuz bir besin kaynağı olmasının yanı sıra endüstri, beslenme ve sağlık içinde faydaları vardır. Örneğin, patates tüketimi kan şekeri kontrol etmeye yardımcı olur, sindirim sistemini iyileştirir, kemik ve kalp sağlığını geliştirir, cilt hasarını önler, bağışıklığı artırmaya yardımcı olur. Patates doğal olarak besleyicidir ve flavonoidler, karotenoidler ve fenolik asitler gibi antioksidanlar bakımından zengindir. Patates endüstride alkol üretimi, kurutulmuş gıda ürünleri, hayvan yemi, nişasta üretimi ve dondurulmuş gıda ürünleri gibi çok sayıda uygulamaya sahiptir (Campos & Ortiz, 2020; Gustavsen, 2021).Gelişmekte olan ekonomilerde fast food endüstrisinin hızla yayılması patates ve işlenmiş ürünlerin tüketimini artırmıştır. Bu atıklar mikrobiyal bozunma eğilimli olması nedeniyle endüstri ciddi bir sorun oluşturmaktadır.

Patates Kabuğunun Kimyasal Bileşimi

Patates kabuğu, patates bitkisinin dış kısmını oluşturan ve çoğunlukla tüketim sırasında çıkarılan bir yan üründür. Patates kabuğu genellikle kahverengi, sarı veya kırmızımsı bir renge sahiptir. Patates çeşidine ve olgunluğuna bağlı olarak renk tonu değişebilir. Kabuk, pürüzlü bir yüzeye sahip olabilir ve üzerinde çukurlar veya çizgiler bulunabilir. Kabuğun dokusu genellikle

kırışık veya düzensiz olabilir. Patates kabuğu kalınlığı, patatesin çeşidine ve büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Genellikle 1-3 mm arasında değişen bir kalınlığa sahiptir.

Patates kabuğu genellikle düşük yoğunluğa sahiptir. Patates kabuğu doğal olarak su içerir ve nem içeriği, patatesin taze veya depolanmış olmasına bağlı olarak değişebilir. Patates kabuğu, genellikle orta derecede sert ve dirençlidir. Patates kabuğu, gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu gözenekler, kabuğun hava ve gaz değişimine izin vermesini sağlar. Bu özellikler, patatesin pişirme ve işleme süreçlerindeki davranışını da etkileyebilir. Kimyasal olarak, patates kabuğu çeşitli bileşenleri içerir. Bunlar arasında nişasta, selüloz, hemiselüloz, proteinler, lifler, mineraller, fenolik bileşikler, karotenoidler ve C vitamini bulunur. Bu bileşenler, patates kabuğunun potansiyel kullanım alanlarını belirler. Endüstride, patates kabuğu çeşitli şekillerde değerlendirilebilir. Patates kabuğu, hayvan yemi olarak kullanılabilir. Kabuğun içerdiği besin maddeleri, hayvanların beslenmesine katkı sağlar. Patates kabuğu, biyokütlenin bir parçası olarak kullanılarak biyogaz üretiminde değerlendirilebilir. Biyogaz, enerji üretimi için kullanılabilir. Patates kabuğu, organik atık malzemelerin kompost haline getirilmesinde kullanılabilir. Kompost, toprağın verimliliğini artırır ve sürdürülebilir tarım uygulamalarına katkı sağlar. Patates kabuğu, bazı gıda işleme süreçlerinde kullanılabilir. Örneğin, kabuklar cips veya atıştırmalık üretiminde kullanılabilir. Patates kabuğu, fenolik bileşikler açısından zengindir. Bu bileşikler, antioksidan özelliklere sahiptir ve gıda veya kozmetik endüstrisinde doğal antioksidan olarak kullanılabilir. Patates kabuğundan elde edilen nişasta, biyoplastik üretiminde kullanılabilir. Bu, evre dostu ambalaj malzemeleri ve plastik ürünlerin üretiminde kullanılan bir alternatif olabilir.

Türkiye’de Patates

Türkiye’de patates üretimi, Osmanlı İmparatorluğu dönemine kadar uzanan bir geçmişe sahiptir. Patates, 18. yüzyılın sonlarında Osmanlı İmparatorluğu’na gelmiştir. İlk olarak Batı Avrupa ülkelerinde yetiştirilen patates, zamanla Osmanlı topraklarına yayılmış ve tarım alanlarında önemli bir yer edinmiştir. Türkiye’de patates üretimi, özellikle 20. yüzyılın başlarından itibaren artış göstermiştir. Patates ekonomik değerı yüksek bir tarım ürünü olması nedeniyle çiftçiler tarafından tercih edilen bir bitki haline gelmiştir. Tarım politikaları ve teknolojik gelişmelerin de etkisiyle Türkiye, dünya patates üretiminde önemli bir konuma gelmiştir. Bugün Türkiye, patates üretiminde Avrupa’nın en büyük üreticilerinden biri konumundadır. Ülkenin çeşitli illerinde patates tarlaları bulunmaktadır ve tarım arazilerinin bir bölümü patates üretimine ayrılmaktadır. Kırklareli, Çanakale, şanlıurfa, Niğe, Nevşehir, Amasya, Konya ve Isparta patates üretimi için öne çıkan illerdendir. Üretim miktarı yıllara göre değişiklik gösterebilmekle birlikte Türkiye genelinde patates üretimi sürekli olarak devam

etmektedir. Patates üretimi, Türkiye'de hem tüketim için kullanılan taze patateslerin yetiştirilmesini içerirken, aynı zamanda endüstriyel işleme yönelik patates çeşitlerinin üretimini de kapsar.



MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Patatesin dış kısmını oluşturan ve genellikle tüketim sırasında çıkarılan bir atık olarak değerlendirildiğinden kolay temini, düşük maliyeti, yenilenebilir enerji kaynağı olması ve endüstride birçok alanda kullanılabilir potansiyele sahip olması sebebiyle biyokütle olarak Patates kabuğu seçilmiştir. Patates kabuğu Türkiye'nin Doğu Anadolu bölgesinde bulunan Erzurum ilinin Pasinler ilçesinden temin edilmiştir.

Kabuğu elde edilecek patates su ile yıkanarak arındırılmış ve kabuğu patatesin etli kısmından soyularak ayrıştırılmıştır. Yüzey alanının artırılması ve homojenizasyon eldesi için numune laboratuvar ortamında kurutulmuş ve öğütülmüştür. Bu öğütme işlemi numuneye gazın temasını kolaylaştırmış ve deneysel verilerde ki sapmaların azalmasını sağlamıştır. Sapmaların azalması yapılan deneyin verimini ve güvenilirliğini arttırmaya yöneliktir.

300 mikron inceliğine öğütülen hammaddemiz 80 derecede kurutularak içeriğinde ki rutubeti uzaklaştırılmıştır.

Termal Analiz Yöntemleri

Uluslararası Termal Analiz ve Kalorimetri Konfederasyonu (ICTAC) tanımına göre termal analiz ; belirli bir atmosferde numunenin sıcaklığı sabitken, bir numunenin fiziksel veya kimyasal özelliğinin zamana veya sıcaklığa karşı izlendiği programlanmış bir grup tekniktir (Langier-Kuzniarowa, 2002). Termal analiz teknikleri maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında geniş bilgi verir. Başlıca termal analiz yöntemleri, Termogravimetrik Analiz (TGA), Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) yöntemleridir.

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz, numuneye uygulanan ısıtma programı sonucu numune kütle değişikliğinin sıcaklığın ya da zamanın bir fonksiyonu olarak ölçüldüğü bir tekniktir (Karathanasis & Harris, 1994'a). Numunenin termal bozunması esnasında gerçekleşen kütle değişimleri, maddenin fiziksel veya kimyasal bağlarının kopması neticesinde meydana gelmektedir. Bu kütle değişimi, zamanın veya sıcaklığın fonksiyonunu temsil edecek eğriler olarak oluşturulabilir (Ehrenstein et al., 2012; Leung & Wang, 1999'a; Skoog et al., 2017).

Numune, fırın içindeki yüksek hassasiyetli bir termo teraziye yüklenir ve ısıtma programı boyunca sürekli olarak tartılır. Termal reaksiyonla ilişkili kütle kaybı, termal bozunma eğrisinin bükülme noktaları arası ölçülür (Karathanasis & Harris, 1994b). Termal bozunma eğrisinin türevini çizerek termal olayları yorumlamak ve çözmek genellikle daha kolaydır.

Ağırlık kalibrasyonu, standart ağırlıklar kullanılarak kolayca gerçekleştirilir ve gerekirse terazi, termogravimetrik analizin ilk aşamasında, fırın boyunca gaz akışının aerodinamik sürüklenmesinin neden olduğu kaldırma kuvveti etkileri için kalibre edilebilir (Crewe et al., 2007). TGA'nın temel kullanımları, bir malzemenin termal kararlılığının ve bileşiminin ölçülmesini içerir. Analizde numune platin veya alümina kroze içerisinde tartılır sonra cihaz içerisindeki fırına yerleştirilerek hassas terazi ile dengeye gelmesi sağlanır. Termal analiz yöntemleri ısıtılan numune hakkında istenen bilgiye bağlı olarak farklı sıcaklık programı ve farklı atmosferler seçilmektedir. Numunenin seçilen atmosfer altında sabit veya doğrusal ısıtma hızı ile tespit edilen sıcaklıklara ısıtılarak gerçekleştirilen analizlerde kütle ve sıcaklık değişimi kaydedilerek termogram verileri elde edilmiş olur. Numune ile ortam gazı arasındaki kütle ve ısı transferlerini en aza indirmek için numune çapı 2 mm'den küçük ve az miktarda olmalıdır. Analizlerden tekrarlanabilir sonuçlar alınması ısıtma hızı, numune kabı, reaksiyon ısısı, fırın atmosferi faktörlerinin değişken olması sebebiyle zordur. Ayrıca termal iletkenliği zayıf olan numunelerden kısıtlı bilgi edinilebilmektedir (Ehrenstein et al., 2012; Leung & Wang, 1999b; Skoog et al., 2017).

Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

Kütle değişiminin olmadığı ya da yetersiz kaldığı termal bozunma eğrisinin açıklayamadığı fiziksel ve kimyasal olayların açıklaması için kullanılan, numune ile referans malzemenin aynı ısıtma veya soğutma programına tabi tutularak iki maddenin arasındaki sıcaklık farkının diferansiyel termokuplar yardımıyla zamana veya sıcaklığa bağlı termal eğrilerin belirlenmesi esasına dayalı diferansiyel termal analiz en basit ve en yaygın kullanılan termal analiz tekniğidir (Brown & Brown, 1988; Plante et al., 2009). Referans madde ve numune bir fırına simetrik olarak yerleştirilir ve aralarındaki sıcaklık farkı iki termokupl ile ölçülür: biri numune tutucunun pota tabanı ile doğrudan temas halinde ve diğeri referans malzeme tutucu ile temas halinde bulunur. Numune ve referans arasındaki ısı farkı, hiçbir termal olay meydana gelmediğinde sıfıra eşit olmalıdır ve bir termal olayın ortaya çıkması durumunda, bir sıcaklık farkı meydana gelir. Sıcaklık farkı, endotermik süreçler için negatif veya ekzotermik olanlar için pozitifdir. Bir DTA eğrisi, sıcaklık farkının referans sıcaklığa veya ısıtma hızı sabitken ısıtma süresine karşı grafiğidir ve belirli bir sıcaklık aralığında meydana gelen termal olayları gösterir. DTA eğrileri TGA eğrilerinin zamana ya da sıcaklığa bağlı türevi

alınarak oluşturulan eğrilerden zamana bağlı olarak kütle kayıp hızı belirlenebilmektedir. Başka bir deyişle TGA eğrilerinden kütle değişimini elde edilirken DTA eğrilerinden kütle kaybı değişim hızı verisine ulaşılır. DTA eğrilerinden toplam kütle kaybının yanı sıra kütle değişim hızının maksimum olduğu sıcaklık, reaksiyon başlangıç sıcaklığı, reaksiyon bitiş sıcaklığı elde edilebilir. DTA eğrileri verilerinden numune bileşiminin tayini, numunenin sıcaklığının artması ile meydana gelen fiziksel değişimleri ve numunenin kimyasal reaksiyonları belirlenebilir. Pik alanları reaksiyon ısısı ve numune miktarı ile paralel değişim gösterir. Tutuşma sıcaklığı ise reaksiyon karakterinin ekzotermikten endotermiğe geçtiği noktalardan elde edilebilir (Çılgı ,2004.; Skoog et al., 2017).

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetre yöntemi bir referans malzemeye göre sıcaklık artışıyla birlikte bir numunede meydana gelen enerji değişikliklerini ölçer.

DSC analizinde kullanılan ekipman DTA analizinden farklıdır, bu analizde numune ve referans için iki ayrı hazne mevcuttur ve her hazne kendi sıcaklık kontrol cihazına sahiptir. Cihaz, ısıtıcı gücünü değiştirerek sürekli olarak bir sıcaklık farkını sıfır değerinde tutar. Endotermik bir işlem, ısıtıcı gücünün artmasına neden olurken, ekzotermik bir işlem numunenin soğumasını sağlamak için programlanmıştır (Gabbott, 2008; Tiwari & Raj, 2015). DSC analiz yöntemi; reaksiyon ısısı, faz değişim ısısı, özgül ısı kapasitesi ve sıcaklığı değişikliklerinin tespitinde kullanılabilir. Numunenin yanma karakterinin endotermik ya da ekzotermik olması da eğrilerden okunabilir(Ehrenstein et al., 2012; Skoog et al., 2017).

Netzsch STA 409 PC Luxx markalı cihaz kullanılarak izotermal olmayan koşullarda termal analiz deneyleri yapılmıştır. Deney atmosferi olarak hava (20 ml/dk) ve hava (80 ml/dk) taşıyıcı gazları kullanılmıştır. Numuneler, yaklaşık 15 mg ağırlığında hazırlanmış ve oda sıcaklığından başlayarak 900 K'e kadar ısıtılmıştır. Isıtma hızları ise 1, 2.5, 5 ve 10 K dk⁻¹ olarak uygulanmıştır.

Fourier Transform İnfrared Spektrometresi (FTIR)

FTIR (Fourier Transform İnfrared Spectroscopy), çeşitli malzemelerin kimyasal yapılarını ve özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. FTIR analizi, bir örneğin kızılötesi bölgedeki emilim veya saçılma spektrumunu ölçerek, moleküler yapıları ve kimyasal bağları belirleme imkânı sunar (Smith, 2003, 2018). FTIR, örnek içindeki kimyasal bağları belirleme konusunda oldukça güçlüdür. Özellikle organik moleküllerdeki C-H, C=O, N-H, O-H gibi bağları tanımlamak için kullanılır. Çiftli bağların varlığını belirleme konusunda etkilidir.

Polimerlerin yapısını ve bileşenlerini belirlemek için FTIR sıkça kullanılır. Polimerlerin sentetik veya doğal olup olmadığını, polimerizasyon derecesini ve bağ yapılarını analiz edebilir.

Patates kabuğunun yapısında bulunan fonksiyonel grupları tanımlamak amacıyla, FTIR (Fourier Transform Infra Red) analizleri yapılmıştır. Numuneler, Atatürk Üniversitesi, DAYTAM'da analiz edilmiştir. Tarama aralığı 4000-400 cm⁻¹'dir.

Kinetik Model

Patates hem tarımsal üretimde hem de gıda endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu sektör, patatesin üretiminden başlayarak işlenmesi, pazarlanması ve tüketilmesi süreçlerini içerir. Patatesin yan ürünleri ve atık yönetimi de bu endüstrinin önemli bir yönünü oluşturmaktadır. Patates endüstrisi hem ekonomik hem de beslenme açısından büyük bir öneme sahiptir. 2021 yılında dünya çapında 376 milyon tonun üzerinde patates üretildi (statista, 2023). Patates endüstrisi gelişmesiyle birlikte taze patates tüketim tercihi işlenmiş patates lehine yön bulmuştur. Tüketime hazır hale getirilinceye değin patatesten elde edilen patates kabuğu atığı, ürüne bağlı olarak %15 ila %40 oranındadır (Schieber et al., 2001; Schieber & Saldaña, 2009) Patates kabuğu atıkları; alkoller, organik asitler, biyoentanol, biyodizel, laktik asit, amilaz, antioksidan, antimikrobiyaller, antikanser ilaçlar, biyoplastik , selüloz nanokristallerle güçlendirilmiş biyokompozitler, kâğıt, tekstil nişasta ve gıda ürünleri, hayvan yemi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Patates kabuğu atığı, endüstride birçok alanda kullanılan ve araştırmaya açık bir malzemedir. Ancak piroliz sürecinde ortaya çıkabilecek zorlukların giderilmesi için patates kabuğunun kinetiği, oluşan ürünler ve piroliz davranışlarının iyi anlaşılması ve ölçülmesi gerekmektedir. (Bridgwater & Peacocke, 2000c; Pütün, 2002)

Piroliz sürecinde, patates kabuğu atığının bozunmaya başladığı sıcaklık ve reaksiyonlar, termogravimetrik analiz (TGA) kullanılarak numune ağırlığındaki değişikliklerle takip edilir. TGA eğrileri üzerinde nicel yöntemler uygulanarak kinetik parametreler elde edilir. Bu parametreler, aktivasyon enerjisi, reaksiyon sırası ve üstel faktörü gibi faktörleri içerir(Bayrakçeken et al., 2017). Aktivasyon enerjisi, reaktivite denkleminde baskın bir faktör olarak görülür (Tiwari & Raj, 2015). Reaksiyonun kinetik parametreleri, birçok koşula bağlı olarak değişebilir, örneğin numune boyutu, numune nemi, ısıtma ortamı ve ısıtma hızları. TGA analizleri ve sonuçları, sürdürülebilir biyoenerji sistemlerinin tasarımı, optimizasyonu ve fizibilitesi hakkında bilgi sağlar. TGA, biyokütle malzemesinin termal bozunma özelliklerini araştırmak ve gerekli kinetik parametreleri hesaplamak için kullanılan bir yöntemidir. Bu teknik, yanma, gazlaştırma ve piroliz gibi biyokütle dönüşümlerini incelemek için kullanılır. Biyokütlenin yanma kinetiğinin incelenmesi, endüstriyel kazanlarda yapılan yanma işlemini anlamak, optimize etmek ve modellemek için önemlidir. Ayrıca, yanma işlemi sırasında

gerçekleşen reaksiyonların mekanizmasını da açıklar (Basu, 2006) Termal bozunmanın kinetik parametreleri, TGA verilerinden türetilen modeller kullanılarak belirlenebilir. Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve STK (Starink) gibi kinetik modeller, patates kabuğu atığının kinetiğini belirlemek için yaygın olarak kullanılır. Bu modeller, patates kabuğu atığının kinetiğini de belirlemek için kullanılmaktadır.

Flynn-Wall-Ozawa (FWO) ve Kissinger-Akahira-Sunose Modelleri (KAS)

FWO ve KAS modelleri termal analiz verilerinden aktivasyon enerjisi (E_a) ve reaksiyon hız sabiti (A) gibi kinetik parametrelerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

FWO modeli, izokonversiyonel analiz için kullanılan bir yöntemdir. Bu modelde, farklı ısıtma hızları altında elde edilen termogravimetri (TG) verileri kullanılarak E_a ve A değerleri hesaplanır (Hatice Bayrakçeken Hüseyin Okur A. Kadir Özer M. Şahin Gülaboğlu, 2014). FWO modeli, $\ln(\beta)$ (β : ısıtma hızı) ve $1/T$ (T : sıcaklık) grafiğinin eğimi kullanılarak E_a 'nın belirlenmesine dayanır. KAS modeli de benzer şekilde izokonversiyonel analiz için kullanılan bir yöntemdir. Bu modelde, farklı sıcaklıklar altında elde edilen TG verileri kullanılarak E_a ve A değerleri hesaplanır. KAS modeli, $\ln(\beta/T^2)$ ve $1/T$ grafiğinin eğimi kullanılarak E_a 'nın belirlenmesine dayanır. Her iki model de yanma kinetiğinin belirlenmesinde etkili ve kullanışlıdır. Bu modeller, biyokütelerin yanma davranışını anlamak, enerji dönüşümlerini incelemek ve yanma sürecini optimize etmek için önemli bir araç sağlar. Bu çalışmada modelsiz olarak bilinen (izokonversiyonel) metotla, TG eğrilerinden okunan veriler ışığında ısıtma hızlarında yanma kinetiği hesaplanmıştır. Biyokütlenin yanma mekanizması kısaca aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$Katı\ Biyokütle = Buharlaşan\ Su + Kömürleşen\ Katı \quad (1)$$

Biyokütle yanma mekanizmasının belirlenmesi ve hesaplanması için;

$$\alpha = (m_o - m_t)/(m_o - m_f) \quad (2)$$

kullanılır.

Yukarıda belirtilen eşitliği formül haline getirerek determinantını alırsak;

$$d(\alpha)/d(t) = K(T)f(\alpha) = A \exp(-E_a/RT)f(\alpha) \quad (3)$$

İzotermal olmayan şartlarda sıcaklık zamanla lineer olarak değişmekte ve,

$$\beta = d(T)/d(t) \quad (4)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Eşitlik (3) ve (4) düzenlenerek integrali alınır;

$$g(\alpha) = \int_0^x \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \left(\frac{A}{\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) d(T) \quad (5)$$

halini alır ve $g(\alpha)$ belli bir sıcaklıkta biyokütlenin bozunma fonksiyonunu ifade eder.

Bu çalışmada, FWO ve KSA metotları tek basamaklı reaksiyon için TG ve DTG eğrilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Böylelikle aktivasyon enerjisi (Ea) ve A sabitleri kolaylıkla belirlenebilmiştir. FWO modeli yardımıyla eşitlik (5)' i çözümlersek;

$$\ln(\beta) = \ln(AEa/Rg(\alpha)) - 5,331 - 1,052(Ea/RT) \quad (6)$$

eşitlik (6)'ı elde edilmiş olur.

Bu durumda $\ln(\beta)$ 'ya karşı ($1/T$) grafiği, farklı ısıtma hızlarında ki dönüşüm oranı hakkında bizlere bilgi verir. Grafiğin lineer çizgisinin eğiminden ise eşik enerjisi Ea değeri hesaplanabilir. (eğim $-1,52 Ea/R$). Kesişim noktasını değerini veren $\ln(AEa/R)$ 'den ise A hesaplanır. Benzer şekilde KAS yöntemiyle Ea ve A hesaplanabilir.

$$\ln(\beta/T^2) = \ln(AR/Eag(\alpha)) - (Ea/RT) \quad (7)$$

Burada $\ln(\beta/T^2)$ 'ye karşı ($1/T$) grafiği çizilerek, eğimden Ea ve kesişim noktasından A değeri hesaplanabilir.

Starink Modeli

Starink modelinin lineer denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^{1,92}}\right) = -10008 \left(\frac{Ea}{RT}\right) + Sabit \quad (8)$$

Starink yöntemi kullanılarak Ea değeri, $1/T$ 'ye karşı $\ln \beta/T^{1,92}$ grafiği oluşturularak elde edilen lineer çizginin eğiminden hesaplanabilir.

$g(\alpha)$ reaksiyon mekanizmasının tahmini

Katı hal bozunma reaksiyonların mekanizması, Ortega tarafından önerilen yöntemlerle tahmin edilmektedir. KAS ve FWO yöntemleriyle elde edilen aktivasyon enerjilerinin

ortalaması alınarak reaksiyon mekanizmasını belirlemek için kullanılmaktadır. Denklem (6) düzenlenerek Denklem (9) elde edilir

$$\ln(\beta) = \ln\left(\frac{AEa}{Rg(\alpha)}\right) - 5,331 - 1,052 \left(\frac{Ea}{RT}\right) \quad (9)$$

Tablo 1. Katı-hal Bozunma Reaksiyonları İçin Mekanizmalar

Mekanizma	Sembol	F(α)	G(α)
Reaksiyon merteye modelleri			
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₁	(1- α)	ln (1- α)
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₂	(1- α) ²	(1- α) ⁻¹ -1
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₃	(1- α) ³	[(1- α) ⁻² -1]/2
Difüzyon modelleri			
Bir boyutlu difüzyon	D ₁	0.5 α	α^2
İki boyutlu difüzyon	D ₂	[-ln(1- α)] ⁻¹	$\alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$
Üç boyutlu difüzyon (Ginstling-Brounshtein eşitliği)	D ₄	(3/2)/[1- α] ^{1/3} -1]	(1-2 α /3)-(1- α) ^{2/3}
Üç boyutlu difüzyon (Zhuravlev eşitliği)	D ₅	(3/2)(1+ α) ^{3/4} [1+ α] ^{-1/3} -1] ⁻¹	[(1- α) ^{-1/3} -1] ²
Sigmoidal oran modelleri			
Büzülmüş geometri şekli (disk simetri)	R ₁	1	A
Büzülmüş geometri şekli (silindirik simetri)	R ₂	2(1- α) ^{-1/2}	1-(1- α) ^{1/2}
Büzülmüş geometri şekli (küre simetri)	R ₃	3(1- α) ^{-1/3}	1-(1- α) ^{1/3}
Çekirdeklenme modelleri			
İki boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=2)	A ₂	2(1- α)[-ln(1- α)] ^{1/2}	[-ln(1- α)] ^{1/2}
Üç boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=3)	A ₃	3(1- α)[-ln(1- α)] ^{2/3}	[-ln(1- α)] ^{1/3}
Dört boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=4)	A ₄	4(1- α)[-ln(1- α)] ^{3/4}	[-ln(1- α)] ^{1/4}
Mample güç kanunu (n = 1/2)	P ₂	2 α ^{1/2}	α ^{1/2}
Mample güç kanunu (n = 1/3)	P ₃	3 α ^{2/3}	α ^{1/3}
Mample güç kanunu (n = 1/4)	P ₄	4 α ^{3/4}	α ^{1/4}

BULGULAR ve TARTIŞMA

Kullanılan Örneklerin Karakterizasyonu

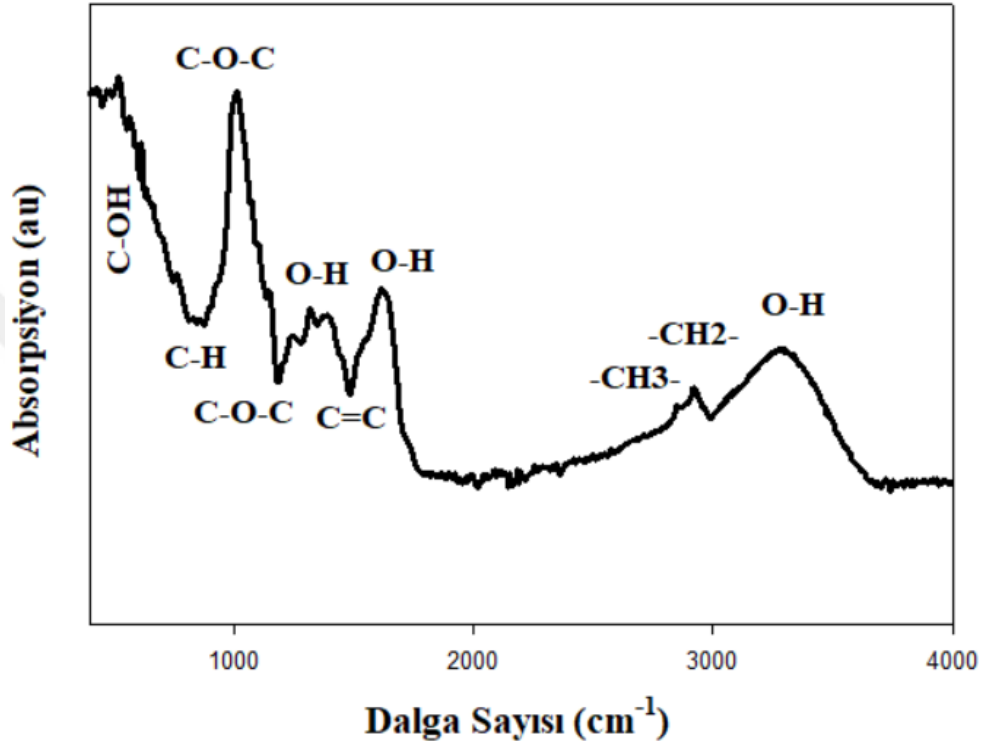
FTIR analizi

Biyokütlesele-atık olan patates kabuğundan sentezlenen selülozun, kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinmek için FTIR analizi gerçekleştirilmiştir.

FTIR analizi, 400 cm^{-1} -4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir ve spektrum Şekil 3’de verilmiştir. Yapılan çalışmalarda, selülozun FTIR spektrumunun, iki ana absorbands bölgesini gösterdiğini rapor etmişlerdir. Bu bölgeler, sırasıyla, yüksek dalga sayılarında (2800-3500 cm^{-1}) ve düşük dalga sayılarında (500-1700 cm^{-1}) bulunmaktadır. (Mohamad Haafiz et al., 2013). 800-1500 cm^{-1} bölgesi, selüloz için eşsiz bir parmak izi bölgesidir. Bu aralıktaki pikler, selülozun sentezlendiği öncü malzemeye ve sentez prosedürüne göre, kimyasal yapısındaki farklılıkları göstermektedir (Chen et al., 2012). Sentezlenen malzeme için 506 cm^{-1} , 560 cm^{-1} , 605 cm^{-1} , 757 cm^{-1} , 890 cm^{-1} , 909 cm^{-1} , 1001 cm^{-1} , 1138 cm^{-1} , 1255 cm^{-1} , 1321 cm^{-1} , 1390 cm^{-1} , 1443 cm^{-1} , 1534 cm^{-1} , 1610 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 2921 cm^{-1} ve 3280 cm^{-1} dalga sayılarında belirgin pikler mevcuttur. 3100-3500 cm^{-1} aralığındaki dalga sayıları, O-H gerilmesini temsil etmektedir. 2850 cm^{-1} (metil ($-\text{CH}_3-$) bandının simetrik gerilme titreşimine) ve 2921 cm^{-1} (metilen ($-\text{CH}_2-$) bandının gerilme titreşimine) bandları ise C-H gerilmesine karşılık gelmektedir (Abdelraof et al., 2019; Chen et al., 2012). 1534 cm^{-1} dalga sayısı, ligninin aromatik hidrokarbonlarından uzanan C=C bağlarına atanmıştır (Doh et al., 2020). Selülozdaki $-\text{CH}_2$ grubunun simetrik bükülmesi, 1443 cm^{-1} ’de gerçekleşmektedir (Trilokesh et al., 2021). 1321 cm^{-1} ve 1390 cm^{-1} dalga sayıları, O-H bükülme titreşimlerini, 1610 cm^{-1} dalga sayısı ve çevresinde gözlenen spektral bantlar, adsorbe edilen suyun O-H bükülmesine atfedilmektedir. Diğer yapılan çalışmalara göre de bu bant, selüloz ve su arasındaki güçlü etkileşim nedeniyle su moleküllerinin bükülme modlarıyla ilgilidir (Mohamad Haafiz et al., 2013). 1321 cm^{-1} ve 1390 cm^{-1} dalga sayıları, O-H bükülme titreşimlerini, 1610 cm^{-1} dalga sayısı ve çevresinde gözlenen spektral bantlar, adsorbe edilen suyun O-H bükülmesine atfedilmektedir. Diğer yapılan çalışmalara göre de bu bant, selüloz ve su arasındaki güçlü etkileşim nedeniyle su moleküllerinin bükülme modlarıyla ilgilidir (Joe et al., 2023). 909 cm^{-1} , 1001 cm^{-1} ve 1138 cm^{-1} dalga sayılarının bulunduğu bölge, metil ve metilenin asimetrik deformasyon titreşimi ve şeker halkasındaki C-O-C’nin gerilme titreşimini temsil etmektedir (Abdelraof et al., 2019).

Yani, 500 cm^{-1} - 1185 cm^{-1} arasındaki dalga sayılarında gözlemlenen en önemli absorpsiyon zirveleri, sırasıyla, selülozdaki glikoz birimleri arasındaki glikosidik bağlantıyı ve piranoz halkasının C-O-C gerilme titreşimini temsil etmektedir (Ramesh & Radhakrishnan, 2019).

890 cm^{-1} 'deki zirve, selülozun yapısındaki C-H titreşimiyle ilişkilidir (Mohamad Haafiz et al., 2013). Ayrıca, 500 - 800 cm^{-1} aralığındaki pikler, C-OH'nin düzlem dışı bükülme moduna atanmıştır (Olad et al., 2020).



Şekil 3. Patates kabuğunun FTIR spektrumu

Termal Analiz

Eşitlik 2'den ve termogravimetrik verilerden yararlanılarak dönüşüm oranı ısıtma hızlarına göre hesaplanmış ve grafik edilmiştir. Bu verilere yanma mekanizmasının tanımlanması ve hammaddeye ait aktivasyon enerjisi gibi değerlerin hesaplanması için ihtiyaç vardır.

Şekil 7 ve Şekil 9 üzerinde gösterildiği gibi izotermal bozunmalar için KAS, FWO ve STK yöntemleri kullanılarak yanma kinetikleri hesaplanmıştır.

Kinetik hesaplanırken α 0,1 – 0,9 aralığında 0,1 arttırılarak ve farklı ısıtma hızlarında denemeler yapılarak deneyin güvenilirliğinin arttırılması hedeflenmiştir

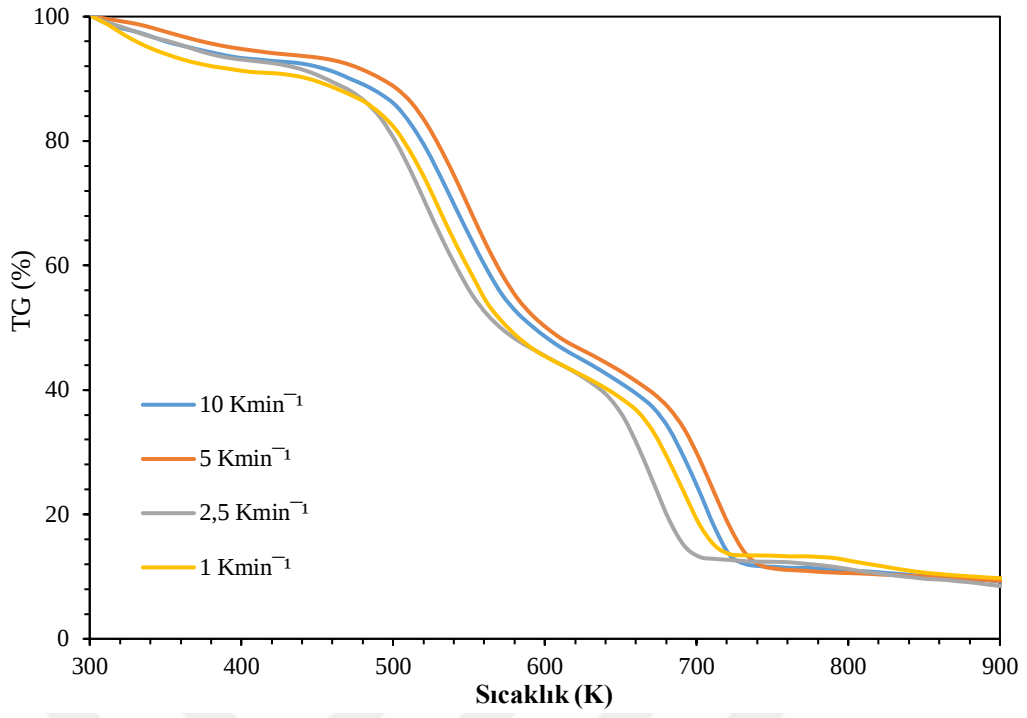
Sonuç olarak aktivasyon enerjisi E_a , KAS, FWO ve STK metotlarının üçünde de yaklaşık değerler olarak hesaplanmıştır. Bu veriler ışığında aktivasyon enerjisi hesaplanırken her üç metotta kullanılabilir.

Hammaddemize ait TG ve DTG eğrileri aşağıda Şekil 4 ve 5’de, DSC eğrileri de Şekil 6’da verilmiştir. Bu grafikte ki veriler ışığında hammaddemize ait termal bozunma ve bozunma kinetiği gibi karakteristik değerler belirlenmiştir.

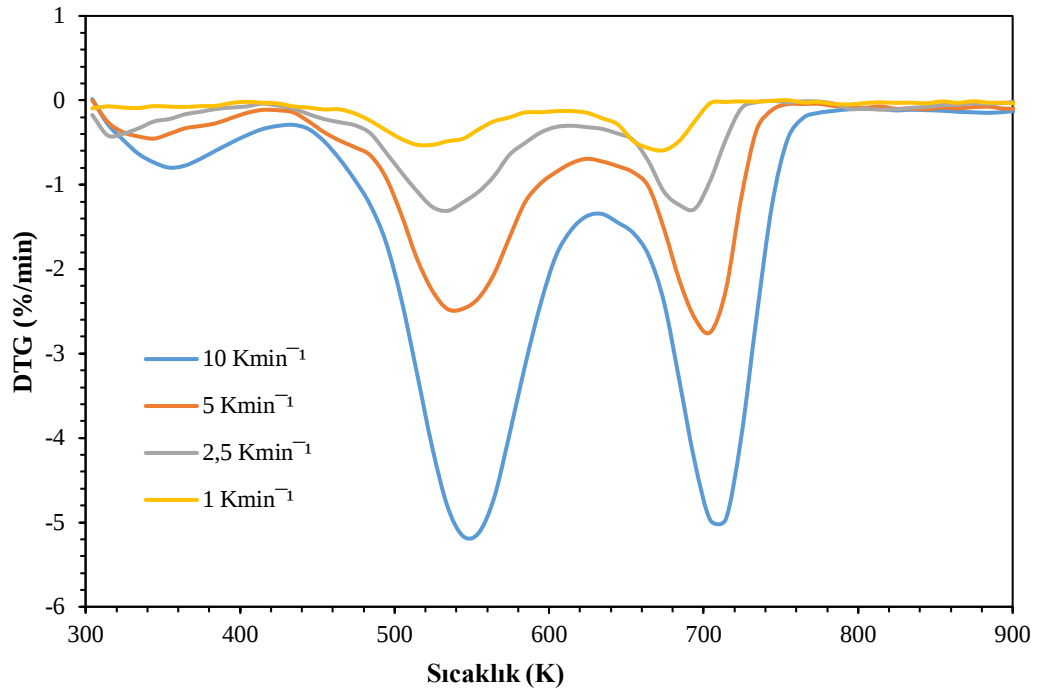
TGA verilerinden anlaşıldığı gibi patates kabuklarında uçucu miktarı fazla bulunmaktadır. Grafiklerden de anlaşılabacağı üzere ilk baştaki kütle kaybı rutubetin uzaklaşmasından kaynaklanan kuruma prosesidir.

Termal bozunma karakteri için, grafiklerde görülen yaklaşık 300 – 411 K arasında ki ani kütle kaybı ise nemin uzaklaşmasından kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Şekil 4’de TG ve Şekil 5’de DTG eğrilerini özel olarak incelediğimizde iki basamaklı bir bozunma çok net bir şekilde görülmektedir. 10 K dak⁻¹ ısıtma hızı için inceleyecek olursak nemin uzaklaşması yaklaşık 411 K de bitiyor. 411-644 K arasında bozunmanın birinci basamağı meydana gelmektedir. Bu bozunma basamağı 554 K’de maksimum pik değerini vermektedir. İkinci bozunma basamağı ise 654 K’de başlayıp 764 K’de sona ermektedir. Bu bozunma basamağı ise 714 K’de maksimum pik değerine ulaşmaktadır. Diğer üç ısıtma hızı içinde aynı bozunma davranışı TG eğrileri üstünde çok net bir şekilde görülmektedir.

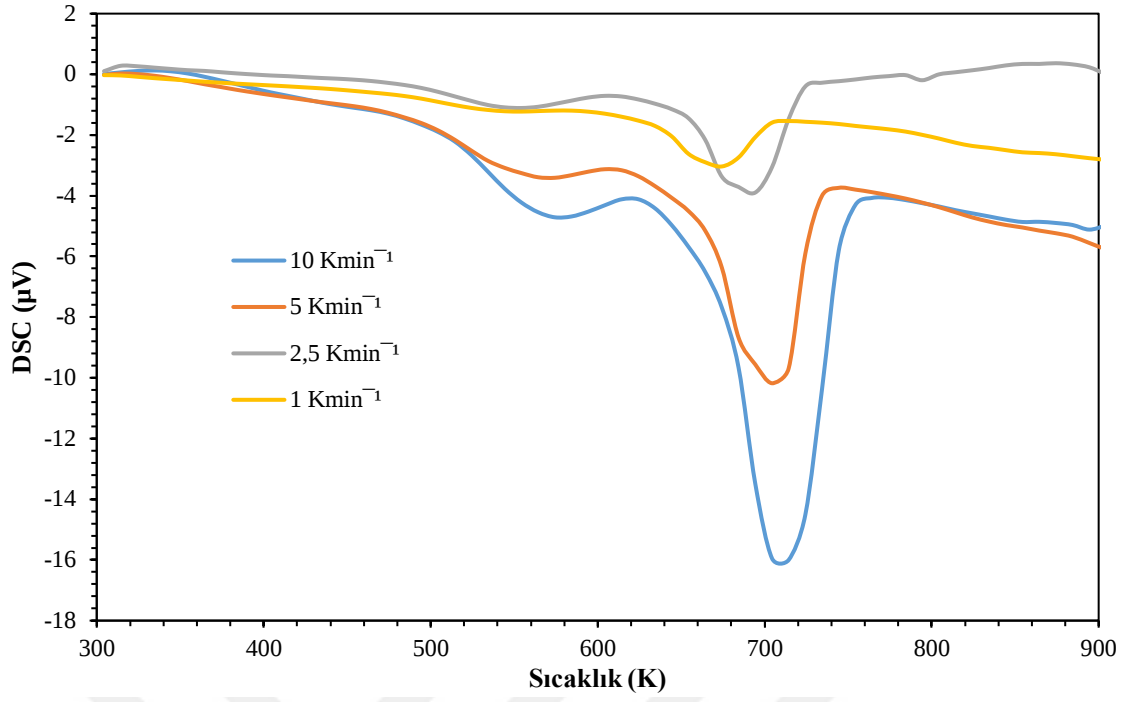
Patates kabuğunun TG ve DTG eğrilerine baktığımızda bu ürünün termal bozunma mekanizmasının sıcaklık hızından etkilendiği görülmüştür. Grafiklere bize ayrıca yanma prosesinde ki en yüksek değerlerin ısıtma hızlarının 1 K dk⁻¹’dan 10 K dk⁻¹’ye arttırıldığında kütle kaybı gibi yanma karakteristiklerinin de arttığı saptanmıştır. Bozunma sıcaklığının artan ısıtma hızıyla beraber daha yüksek sıcaklıklarda kaydığı DTG eğrilerinde çok açık bir şekilde görülmektedir. Düşük ısıtma hızlarında tanecikler arası ısı iletimi belirli bir mekanizmada ve yavaş yavaş gerçekleşeceğinden yanma süresi uzar. Bu durum bizim bulgularımız doğrular. Yüksek ısıtma hızlarında termal şok meydana geldiğinden bozunma ısı da yüksek olur. Ayrıca artan ısıtma hızlarında bozunma eğrilerinin düzleşme eğilimi gösterdiği de görülmektedir.



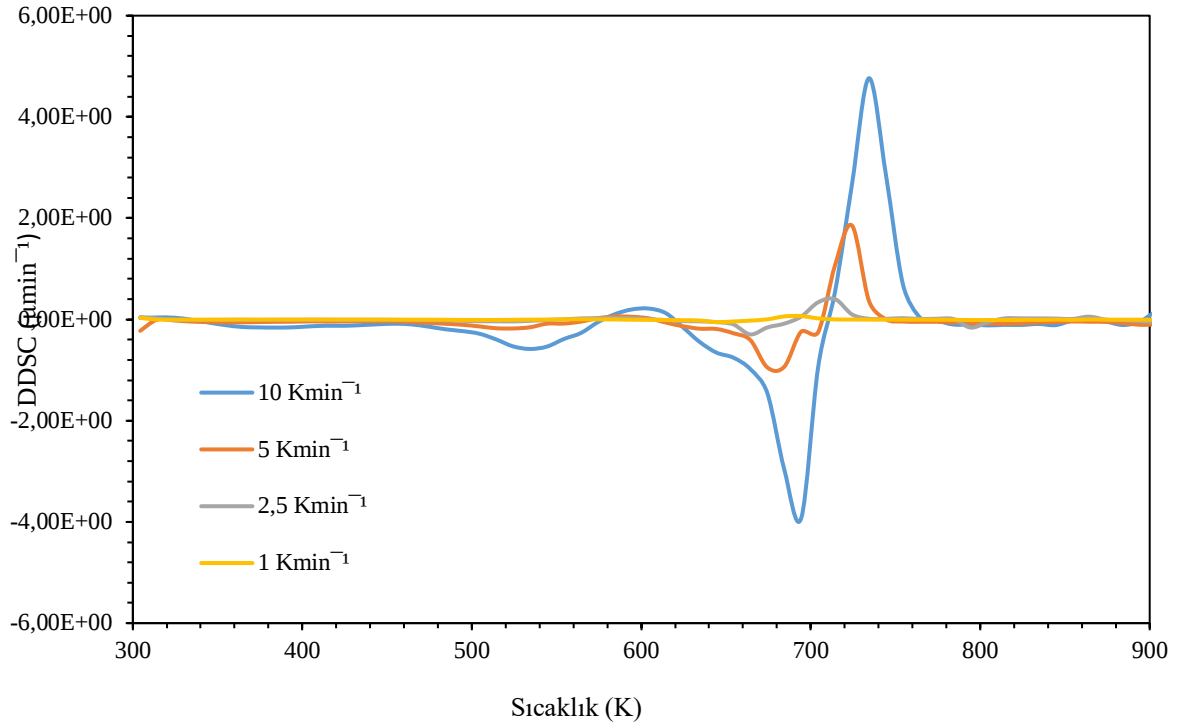
Şekil 4. Patates kabuğunun TG eğrileri



Şekil 5. Patates kabuğunun DTG eğrileri



Şekil 6. Patates kabuğunun DSC eğrileri



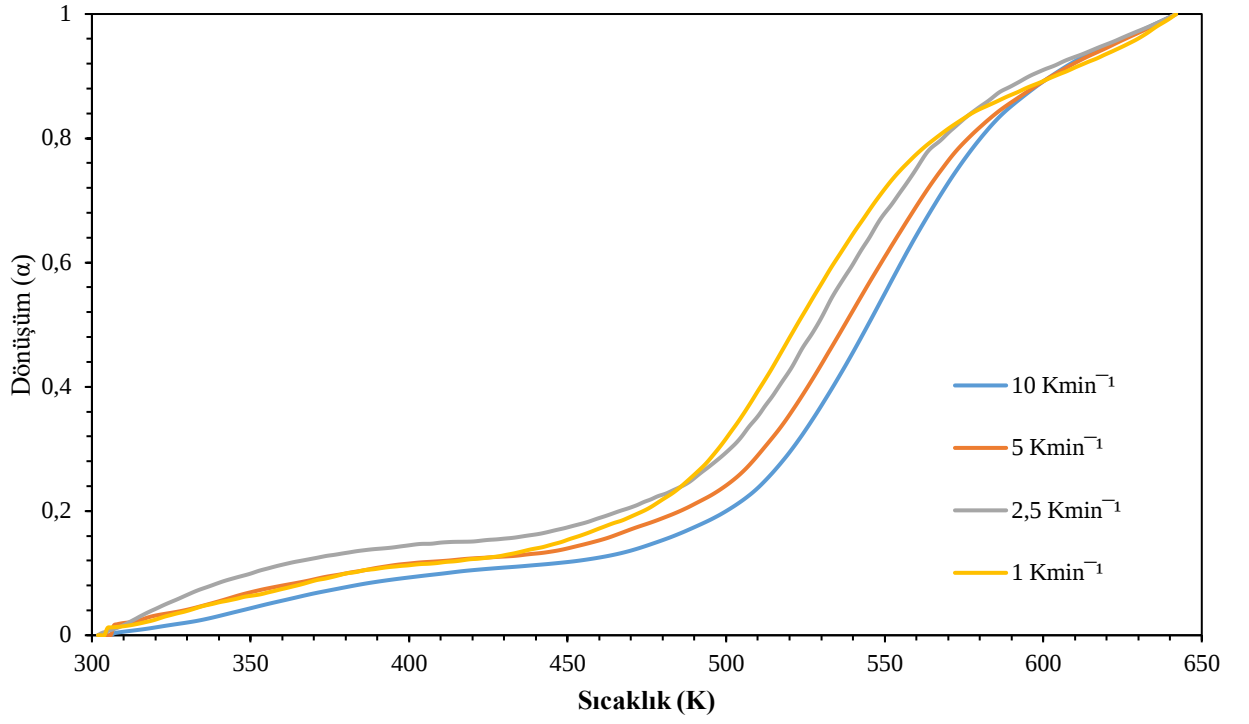
Şekil 7. Patates kabuğunun DDSC eğrileri

Kinetik Parametrelerin Hesaplanması

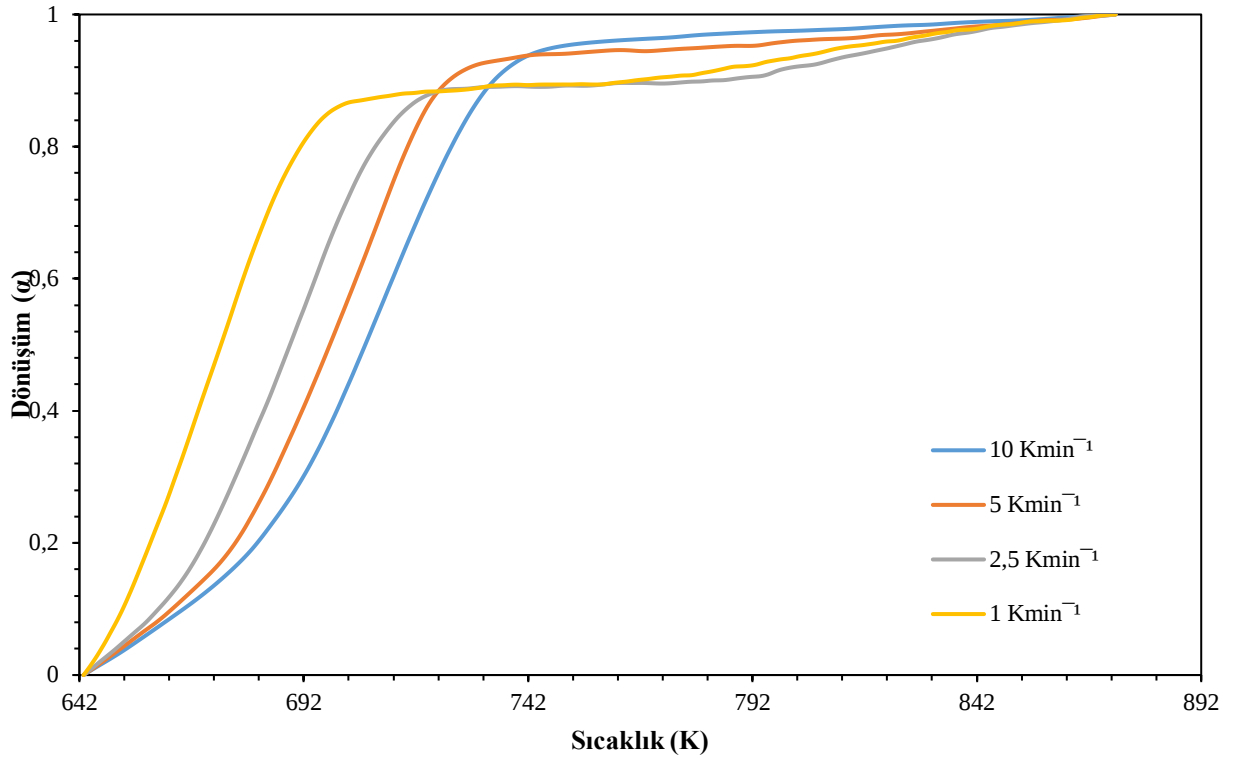
Hammaddemize ait TG ve DTG eğrileri aşağıda Şekil 3 ve 4’de DSC eğrileri de Şekil 5’de verilmiştir. Bu grafikte ki veriler ışığında hammaddemize ait termal bozunma ve bozunma kinetiği gibi karakteristik değerler belirlenmiştir.

Termal bozunma karakteri için, grafiklerde görülen 250 – 330 0C arasında ki ani kütle kaybı ise uçucuların uzaklaşmasından kaynaklandığı açıkça görülmektedir. DTG eğrilerini özel olarak incelediğimizde hemiselüloz ve selülozun iki aşamada parçalandığını görürüz. Artık kısmın ise 411 K’in üzerinde bozunduğu görülmektedir.

Patates kabuğunun TG ve DTG eğrilerine baktığımızda bu ürünün termal bozunma mekanizmasının sıcaklık hızından etkilendiği görülmüştür. Grafiklere bize ayrıca yanma prosesinde ki en yüksek değerlerin ısıtma hızlarının 1 K dk-1’den 10 K dk-1’ye arttırıldığında kütle kaybı gibi yanma karakteristiklerinin de arttığı saptanmıştır. Bozunma sıcaklığının artan ısıtma hızıyla beraber daha yüksek sıcaklıklarda kaydığı DTG eğrilerinde çok açık bir şekilde görülmektedir. Düşük ısıtma hızlarında tanecikler arası ısı iletimi belirli bir mekanizmada ve yavaş yavaş gerçekleşeceğinden yanma süresi uzar. Bu durum bizim bulgularımız doğrular. Yüksek ısıtma hızlarında termal şok meydana geldiğinden bozunma ısı da yüksek olur. Ayrıca artan ısıtma hızlarında bozunma eğrilerinin düzleşme eğilimi gösterdiği de görülmektedir. Bozunmanın iki basamakta meydana geldiği Şekil 4 ve 5’ te çok açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 6’da verilmiş olan DSC eğrilerinde ise bu bozunma basamaklarına ait enerji değişimleri görülmektedir. İlk bozunmanın enerjisi ikinci basamağın enerjisinden daha düşüktür. Şekil 7’de verilen DDSC eğrilerinde de bu enerji değişimlerinin değişim hızları görülmektedir. Bu bozunma olaylarına ait dönüşüm değerleri (α) 0,1-0,9 arasında TG eğrilerinden elde edilen datalardan hesaplanmıştır. Bozunma basamakları dikkate alınarak elde edilen dönüşüm değerleri (α) her iki bölge için sıcaklığa karşı grafik edilmiştir. Bu grafikler Şekil 8 ve 9’da verilmiştir. Bu şekillerden her iki basamağın bozunma davranışlarının birbirlerinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Birinci bölgede artan sıcaklıkla birlikte dönüşüm değerlerinin (α) artış hızı artmaktadır. Ancak ikinci bölgede bu artış hızı çok daha hızlı meydana gelip aniden bitmektedir.

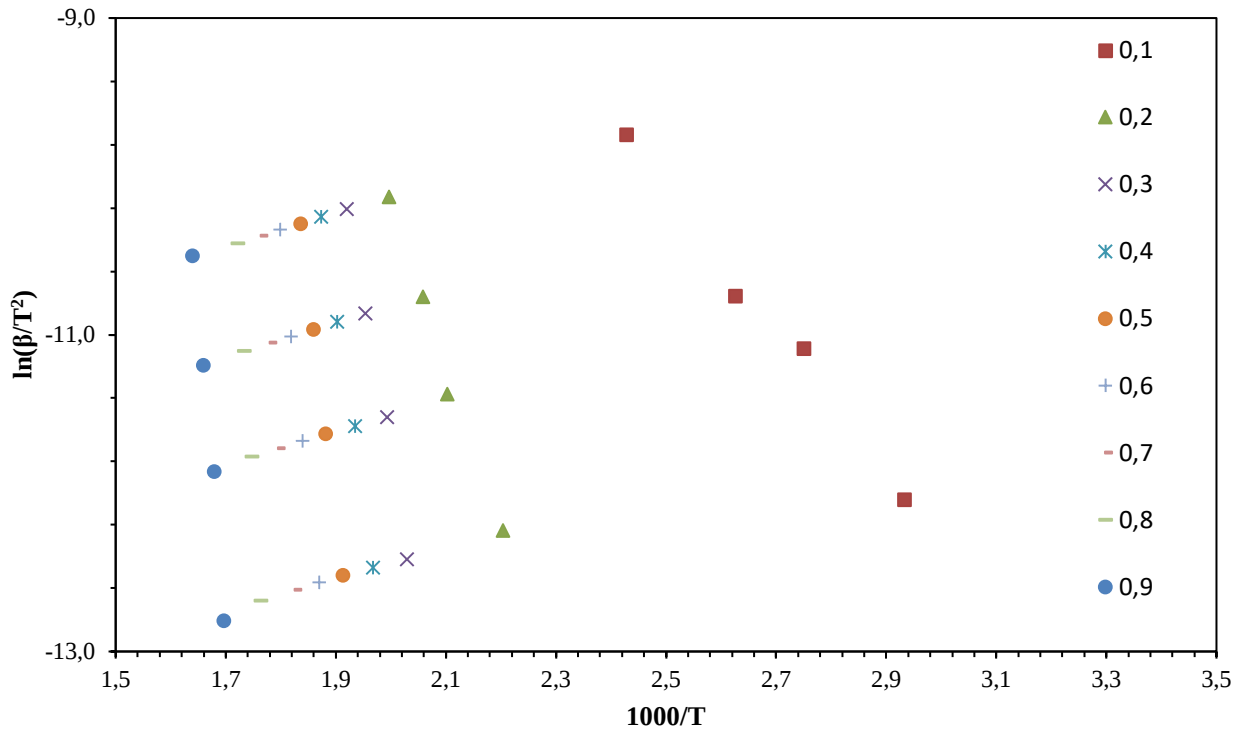


Şekil 8. I. Bölge sıcaklığa karşı dönüşüm değerleri

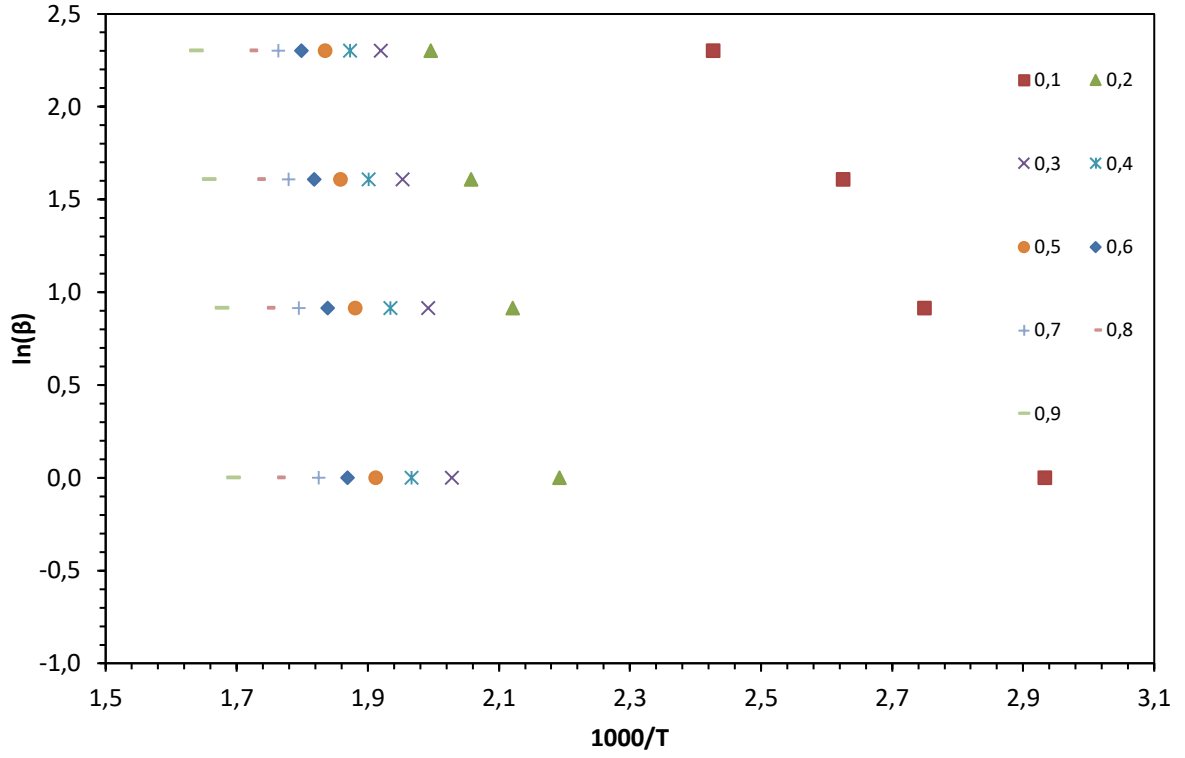


Şekil 9. II. Bölge sıcaklığa karşı dönüşüm değerleri

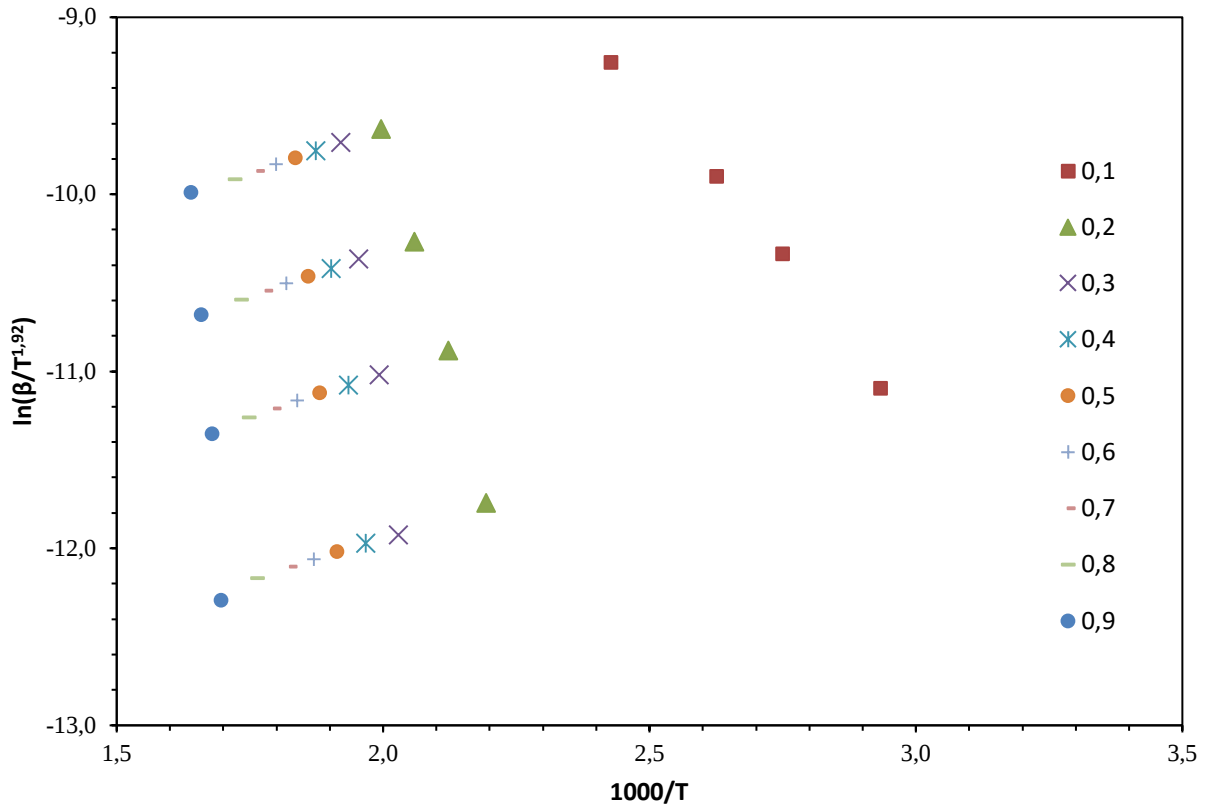
Bu çalışmada üç tane farklı kinetik model kullanılarak dönüştürülen değerlerinin (α) 0,1 ve 0,9 arasında aktivasyon enerjileri hesaplandı. Bu modeller KAS, FWO ve STK modelleridir. Sırasıyla KAS modelinde $1000/T$ ye $\ln(\beta/T^2)$ 'ye karşı grafiğinin eğiminden $(-E/R)$ aktivasyon enerjileri hesaplandı. Bu her iki bölge için tekrarlanarak her iki bozunma basamağı için ayrı ayrı aktivasyon enerjileri hesaplandı. FWO modeli için bu grafikler $1000/T$ 'ye karşı $\ln(\beta)$ ' ye karşı grafik edilirken STK yönteminde ise $1000/T$ 'ye karşı $\ln(\beta/T^{1,92})$ 'e grafik edilir. Bu modellere ait eşitliklere yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen grafikler Şekil 10-15'de verilmiştir. Her üç modele ait hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Özellikle ilk bozunma basamağına ait değerler birbirine oldukça yakın. Bu grafiklerden elde edilen verilerle hesaplanan aktivasyon enerjileri (E_a), frekans faktörü (A) ve korelasyon katsayısı (R^2) Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Şekil 16 ve 17'de ise dönüşüm değerlerine karşı aktivasyon enerjilerinin değişimi her iki bölge için grafik edilmiştir.



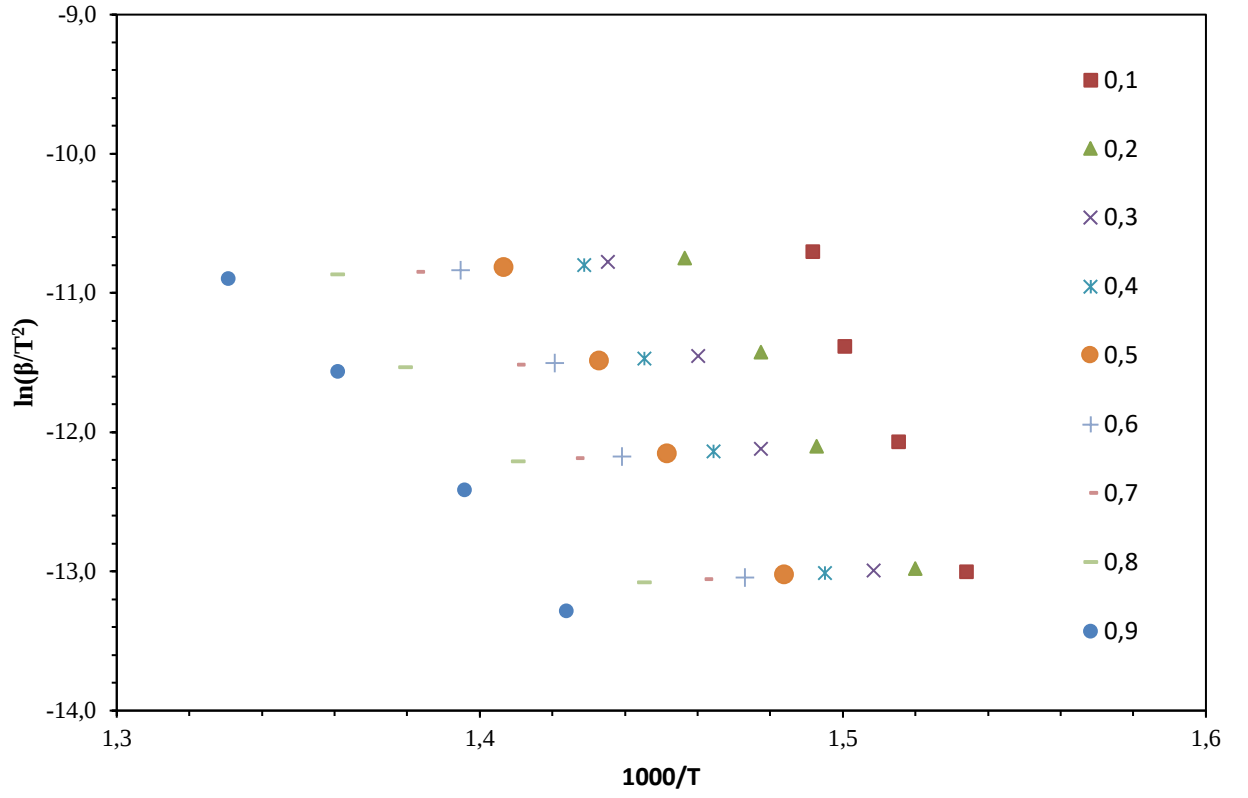
Şekil 10. I. Bölge KAS yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri



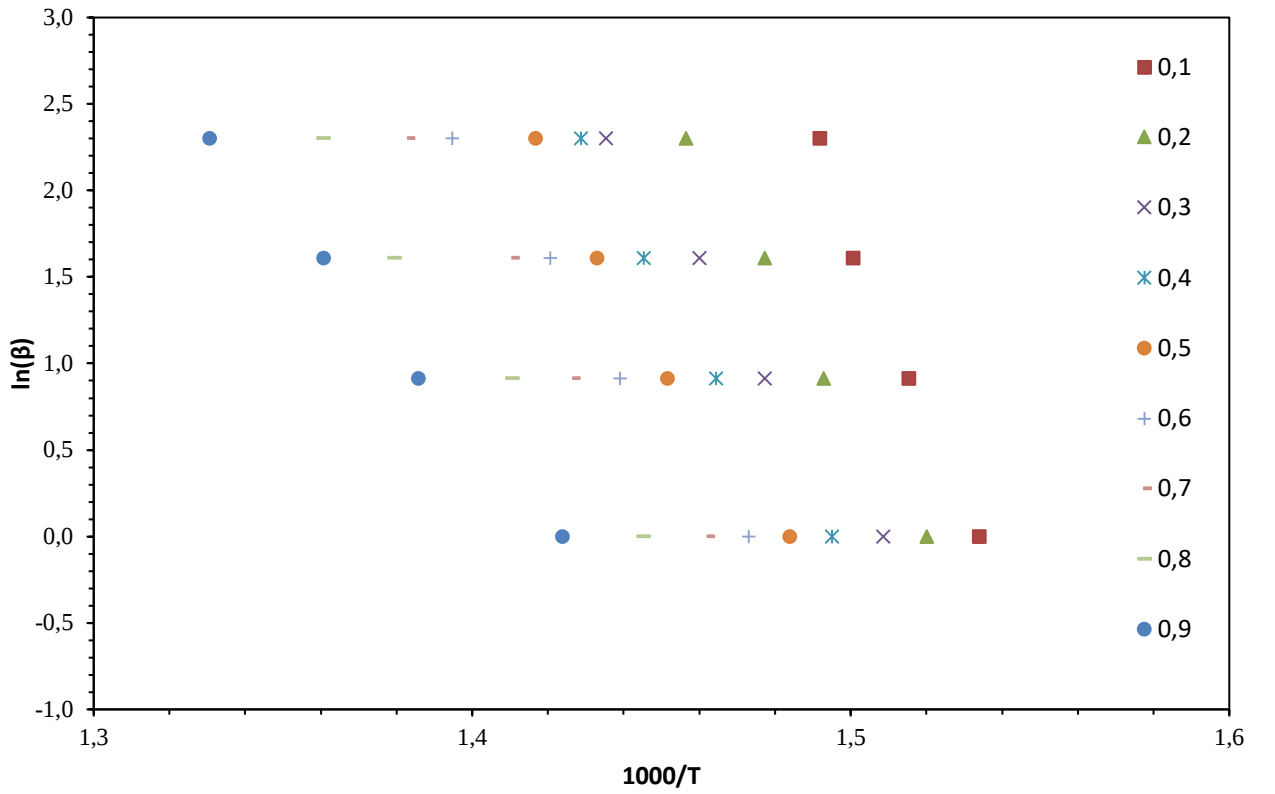
Şekil 11. I. Bölge FWO yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri



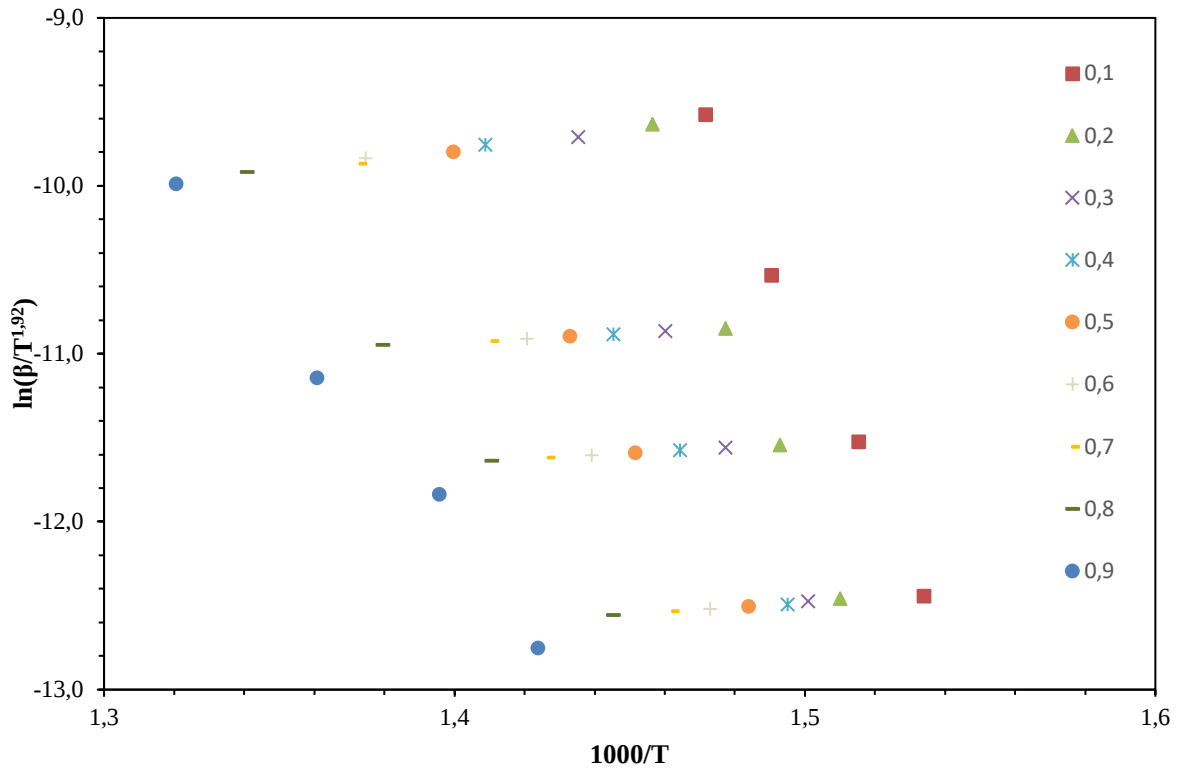
Şekil 12. I. Bölge STARINK yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri



Şekil 13. II. Bölge KAS yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri



Şekil 14. II. Bölge FWO yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri



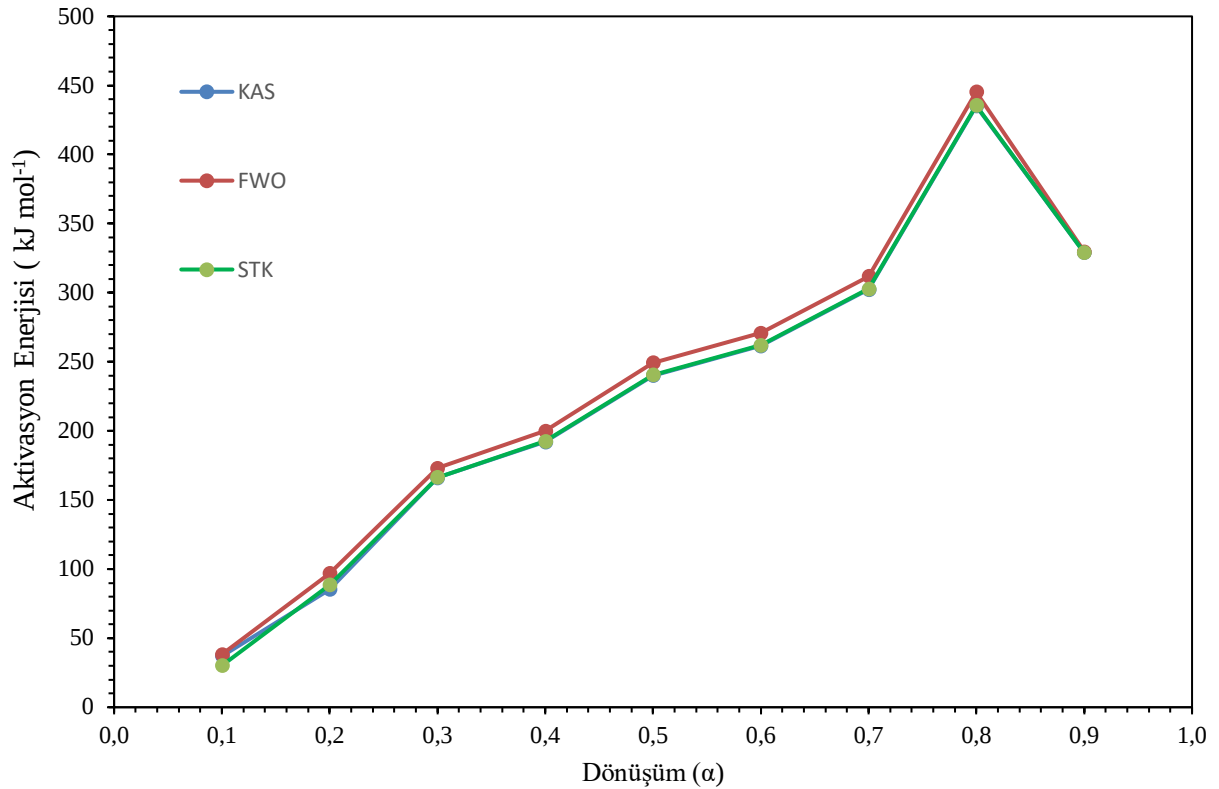
Şekil 15. II. Bölge STK yöntemi ile dönüşüm fraksiyonu (α) değerlerinde bozunma sıcaklığı değişimleri

Tablo 2. I. Bölgede Patates Kabuğunun Termal Bozunmasında KAS, FWO ve STK Yöntemleriyle Hesaplanan Aktivasyon Enerjileri (E_a), Frekans Faktörü (A) ve Korelasyon Katsayısı (R^2)

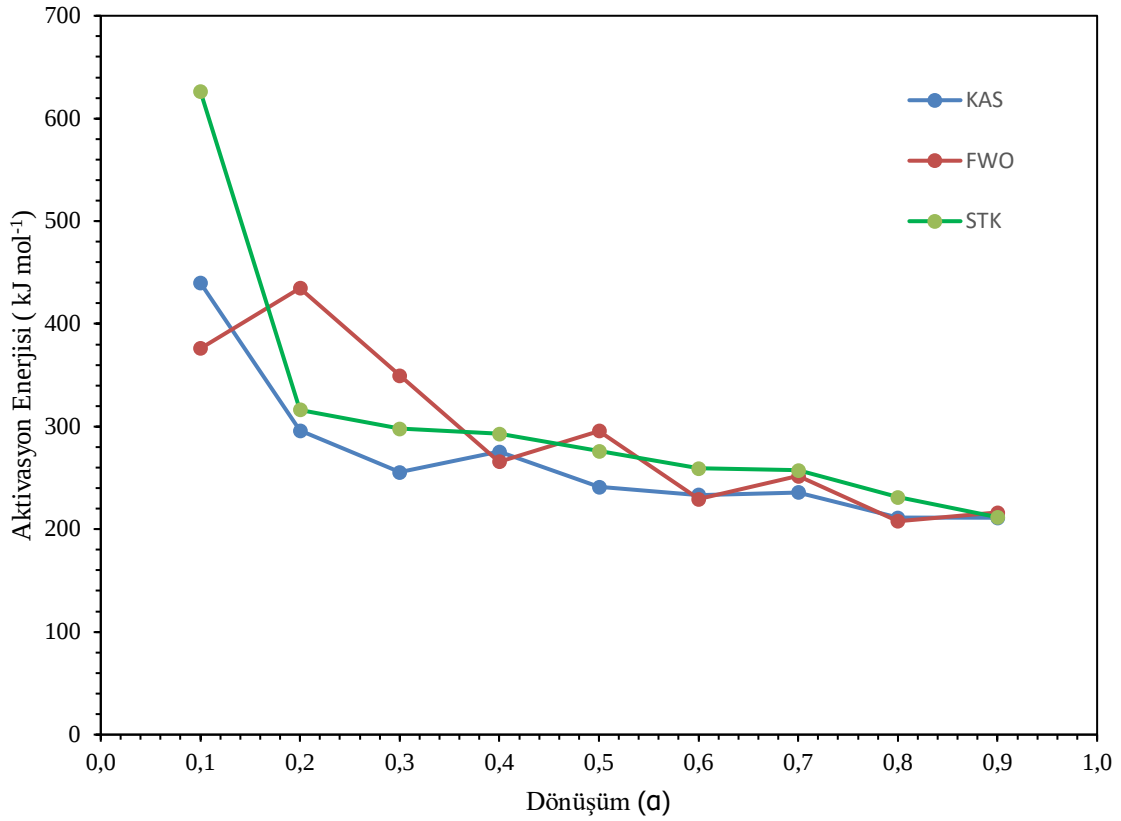
α	KAS			FWO			STK		
	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)
0.1	36,97	0,9905	1,03	38,29	0,9903	13,57	30,15	0,9960	0,42
0.2	85,38	0,9901	10,34	96,77	0,9900	25,56	88,59	0,9976	11,66
0.3	166,02	0,9932	28,153	173,09	0,9947	42,29	166,30	0,9933	28,72
0.4	192,18	0,9960	33,05	200,02	0,9967	47,38	192,49	0,9961	33,62
0.5	240,12	0,9998	42,71	249,24	0,9996	57,32	240,49	0,9998	43,29
0.6	261,61	0,9984	46,23	270,91	0,9996	60,88	261,98	0,9984	46,82
0.7	302,39	0,9905	53,70	311,84	0,9901	68,38	302,76	0,9905	54,29
0.8	435,07	0,9985	79,65	445,21	0,9989	94,47	435,50	0,9985	80,24
0.9	328,90	0,9881	54,39	329,58	0,9904	67,32	328,93	0,9882	54,90
Ortalama	227,63			234,99			227,47		

Tablo 3. II. Bölgede Patates Kabuğunun Termal Bozunmasında K A S , FWO ve STK Yöntemleriyle Hesaplanan Aktivasyon Enerjileri (E_a), Frekans faktörü (A) ve Korelasyon Katsayısı (R^2)

	KAS			FWO			STK		
α	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)	E_a (kJ mol ⁻¹)	R^2	A (min ⁻¹)
0.1	439,93	0,9912	68,13	439,94	0,9902	81,13	376,00	0,9978	56,95
0.2	295,86	0,9970	41,09	305,44	0,9971	55,13	434,70	0,9976	66,48
0.3	255,46	0,9962	33,34	265,34	0,9963	48,13	349,67	0,9977	50,61
0.4	275,51	0,9932	36,47	286,88	0,99	51,53	265,67	0,9990	35,26
0.5	241,13	0,9969	30,00	281,86	0,99	50,24	295,69	0,9974	35,57
0.6	233,30	0,9960	29,08	246,14	0,9916	43,27	229,31	0,9935	28,14
0.7	235,83	0,9911	28,39	248,09	0,9962	43,93	251,61	0,9939	31,68
0.8	211,22	0,9931	23,62	219,86	0,9930	38,20	207,78	0,9989	23,57
0.9	211,18	0,9947	22,96	207,13	0,9990	35,47	216,21	0,9932	24,33
Ortalama	266,60			277,85			291,85		



Şekil 16. Patates kabuğunun bozunmasında I. Bölgeye ait aktivasyon enerjisi eğrisi



Şekil 17. Patates kabuğunun bozunmasında II. Bölgeye ait aktivasyon enerjisi eğrisi

Sıklıkla kullanılan katı hal reaksiyonları için bazı mekanizmaların $g(\alpha)$ yaygın formları Tablo 1'de verilmiştir. $G(\alpha)$ değerleri, Eşitlik $\ln(g(\alpha))$ $1000/T$ 'ye karşı, farklı β değerleri için çizilerek, on altı farklı $g(\alpha)$ için aktivasyon enerjileri eğimden hesaplanmıştır. Böylece, farklı olası $g(\alpha)$ mekanizmalar için aktivasyon enerjileri elde edilmiştir. Aktivasyon enerjisinin bu değerleri, bakır hidroksi sülfatın termal bozunması için FWO yöntemiyle elde edilen aktivasyon enerjileri ile karşılaştırılarak, I. Bölge için reaksiyon mekanizması belirlenmiştir.

$G(\alpha)$ mekanizması bilindiğinden, her α için değeri aktivasyon enerjileri Eşitlik $\ln(g(\alpha))$ $1000/T$ 'de yerine yazılarak frekans faktörü $\ln(A)$ değeri elde edilmektedir. Buna göre II. Bölgede iki boyutlu nükleasyon ve büyümenin $(-\ln(1-\alpha)^{1/2})$ (A_2) kontrol edici mekanizma olduğu, aktivasyon enerjisinin $E_a = 198,33$ kJ/mol ve $\ln(A)$ değerinin 21,58 olduğu bulunmuştur.

Tablo 4. Patates Kabuğunun 1, 2.5, 5 ve 10 K/dak Isıtma Hızlarında I. Bölge İçin Farklı Katı Hal Mekanizmalarından Elde Edilen Aktivasyon Enerjileri

Mekanizma	Sembol	F(α)	G(α)	E _a (kJ mol ⁻¹)			
				$\beta=1$	$\beta=2,5$	$\beta=5$	$\beta=10$
Reaksiyon merteye modelleri							
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₁	(1- α)	-ln (1- α)	29,95	35,77	42,09	50,34
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₂	(1- α) ²	(1- α) ⁻¹ -1	49,24	50,27	51,07	51,96
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₃	(1- α) ³	[(1- α) ⁻² -1]/2	73,51	74,54	75,34	76,22
Difüzyon modelleri							
Bir boyutlu difüzyon	D ₁	0.5 α	α^2	42,01	43,04	43,84	44,73
İki boyutlu difüzyon	D ₂	[-ln(1- α)] ⁻¹	$\alpha+(1-\alpha)\ln(1-\alpha)$	49,09	50,12	50,92	51,81
Üç boyutlu difüzyon (Ginstling-Brounshtein eşitliği)	D ₄	(3/2)/[1- α] ^{1/3} -1	(1-2 α /3)-(1- α) ^{2/3}	52,14	53,17	53,97	54,86
Üç boyutlu difüzyon (Zhuravlev eşitliği)	D₅	(3/2)(1+α)^{3/4}[1+α]^{-1/3}-1]⁻¹	[(1-α)^{-1/3}-1]²	104,51	103,46	102,68	101,79
Sigmoidal oran modelleri							
Büzülmüş geometri şekli (disk simetri)	R ₁	1	α	16,68	17,71	18,50	19,39
Büzülmüş geometri şekli (silindirik simetri)	R ₂	2(1- α) ^{-1/2}	1-(1- α) ^{1/2}	22,58	23,61	24,41	25,30
Büzülmüş geometri şekli (küre simetri)	R ₃	3(1- α) ^{-1/3}	1-(1- α) ^{1/3}	24,87	25,90	26,70	27,59
Çekirdeklenme modelleri							
İki boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=2)	A ₂	2(1- α)[-ln(1- α)] ^{1/2}	[-ln(1- α)] ^{1/2}	11,16	11,68	12,47	13,36
Üç boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=3)	A ₃	3(1- α)[-ln(1- α)] ^{2/3}	[-ln(1- α)] ^{1/3}	4,21	5,24	5,84	6,93
Dört boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=4)	A ₄	4(1- α)[-ln(1- α)] ^{3/4}	[-ln(1- α)] ^{1/4}	26,07	27,11	27,90	28,79
Mamplé güç kanunu (n = 1/2)	P ₂	2 $\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$	4,01	5,04	5,84	6,73
Mamplé güç kanunu (n = 1/3)	P ₃	3 $\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$	0,21	0,82	1,61	3,58
Mamplé güç kanunu (n = 1/4)	P ₄	4 $\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$	0,50	1,25	1,39	3,13

Tablo 5. Patates Kabuğunun 1, 2.5, 5 ve 10 K/dak Isıtma Hızlarında II. Bölge İçin Farklı Katı Hal Mekanizmalarından Elde Edilen Aktivasyon Enerjileri

Mekanizma	Sembol	F(α)	G(α)	E _a (kJ mol ⁻¹)			
				$\beta=1$	$\beta=2,5$	$\beta=5$	$\beta=10$
Reaksiyon merteye modelleri							
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₁	(1- α)	-ln (1- α)	244,29	206,48	206,11	205,28
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₂	(1- α) ²	(1- α) ⁻¹ -1	295,55	294,55	294,18	293,35
Kimyasal reaksiyon (birinci merteye)	F ₃	(1- α) ³	[(1- α) ⁻² -1]/2	408,28	402,44	402,07	401,24
Difüzyon modelleri							
Bir boyutlu difüzyon	D₁	0.5α	α^2	294,11	293,10	292,74	291,90
İki boyutlu difüzyon	D ₂	[-ln(1- α)] ⁻¹	$\alpha+(1-\alpha)\ln(1-\alpha)$	331,38	330,37	330,01	329,18
Üç boyutlu difüzyon (Ginstling-Brounshtein eşitliği)	D ₄	(3/2)/[1- α] ^{1/3} -1]	(1-2 α /3)-(1- α) ^{2/3}	346,54	345,54	345,17	344,34
Üç boyutlu difüzyon (Zhuravlev eşitliği)	D ₅	(3/2)(1+ α) ^{3/4} [1+ α] ^{-1/3} -1] ⁻¹	[(1- α) ^{-1/3} -1] ²	503,84	504,84	505,21	506,04
Sigmoidal oran modelleri							
Büzülmüş geometri şekli (disk simetri)	R ₁	1	α	141,45	140,07	139,24	137,49
Büzülmüş geometri şekli (silindirik simetri)	R ₂	2(1- α) ^{-1/2}	1-(1- α) ^{1/2}	171,75	170,74	170,38	169,55
Büzülmüş geometri şekli (küre simetri)	R ₃	3(1- α) ^{-1/3}	1-(1- α) ^{1/3}	183,05	182,04	181,84	180,67
Çekirdeklenme modelleri							
İki boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=2)	A ₂	2(1- α)[-ln(1- α)] ^{1/2}	[-ln(1- α)] ^{1/2}	98,14	97,12	96,76	95,93
Üç boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=3)	A ₃	3(1- α)[-ln(1- α)] ^{2/3}	[-ln(1- α)] ^{1/3}	61,69	60,68	60,31	59,48
Dört boyutlu nükleasyon ve büyüme (n=4)	A ₄	4(1- α)[-ln(1- α)] ^{3/4}	[-ln(1- α)] ^{1/4}	188,92	187,91	187,55	186,72
Mamle güç kanunu (n = 1/2)	P ₂	2 α ^{1/2}	α ^{1/2}	65,12	64,11	63,74	62,91
Mamle güç kanunu (n = 1/3)	P ₃	3 α ^{2/3}	α ^{1/3}	39,67	38,67	38,30	37,47
Mamle güç kanunu (n = 1/4)	P ₄	4 α ^{3/4}	α ^{1/4}	26,95	25,94	25,58	24,74

SONUÇLAR

Bu çalışmamızda patates kabuğunun termal bozunması incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan selülozun FTIR spektrumundan, iki ana absorbands bölgesini gösterdiğini belirlenmiştir. Bu iki bölge sırasıyla, yüksek dalga sayılarında (2800-3500 cm⁻¹) ve düşük dalga sayılarında (500-1700 cm⁻¹) bulunmaktadır. 800-1500 cm⁻¹ bölgesi, selüloz için eşsiz bir parmak izi bölgesidir. Deneysel çalışmalar yapılırken oda sıcaklığından başlanarak 1300 K sıcaklığa kadar 1, 2,5, 5 ve 10 K dk⁻¹ ısıtma hızları kullanılmıştır. Bu deneyde hesaplamalar KAS, FWO ve STK metotları olmak üzere üç tane kinetik model kullanılarak yapılmıştır. Dönüşüm oranının 0,1 – 0,9 aralığında olduğu zamanlarda en yüksek enerjisi hesaplanmıştır. Isıtma hızın biyokütlenin termal bozunması üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Isıtma hızının artmasıyla selülozun bozunma sıcaklığını daha yüksek sıcaklıklara kaymaktadır. Buda normalde beklenen bir durumdur. Bozunmanın meydana geldiği her iki basamağın bozunma davranışları birbirinden oldukça farklı eğilimler göstermektedir. Patates kabuklarının I. Bozunma bölgesinde artan dönüşüm (α) değerleriyle birlikte aktivasyon enerjide (E_a) artmaktadır. Bu artış 0.8 dönüşüm değerine kadar oldukça hızlı bir şekilde meydana gelmektedir. II.bozunama basamağında ise bu davranış tam tersi bir şekilde meydana gelmektedir. Artan dönüşüm değeriyle birlikte aktivasyon enerjisi de (E_a) azalmaktadır. İlk basamakta İlk basamak için sırasıyla 244.00, 234.99 ve 245.29 kJ mol⁻¹ olarak hesaplandı. II. Basamak için ortalama aktivasyon enerjileri KAS, FWO ve STK yöntemlerinden sırasıyla 288.57, 277,85 ve 307.66 kJ/mol olarak hesaplandı. Katı hal mekanizmalarından elde edilen aktivasyon enerjileri incelendiğinde her iki basamağın bozunma mekanizmasının birbirinden farklı olduğu görülmüştür. I. Basamak için kontrol mekanizmasının üç boyutlu difüzyon (Zhuravlev eşitliği) $D_5 [(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$ olduğu bulunmuştur. II. Basamak için kontrol mekanizmasının bir boyutlu difüzyon $D_1 \alpha^2$ olduğu hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abbasi, T., Premalatha, M., & Abbasi, S. A. (2011). The return to renewables: Will it help in global warming control? In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 15, Issue 1, pp. 891–894). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.048>
- Abdelraof, M., Hasanin, M. S., & El -Saied, H. (2019). Ecofriendly green conversion of potato peel wastes to high productivity bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 211, 75–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.095>
- Açıklan, K. (2010). *Çeşitli biyokütle atık maddelerin pirolizi ve elde edilen ürünlerin analizi*.
- Akhtar, J., & Amin, N. S. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5101–5109.
- Alhumade, H., da Silva, J. C. G., Ahmad, M. S., Çakman, G., Yıldız, A., Ceylan, S., & Elkamel, A. (2019). Investigation of pyrolysis kinetics and thermal behavior of Invasive Reed Canary (*Phalaris arundinacea*) for bioenergy potential. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.018>
- Artok, L., & Schobert, H. H. (2000a). Reaction of carboxylic acids under coal liquefaction conditions: 1. Under nitrogen atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 54(1–2), 215–233.
- Artok, L., & Schobert, H. H. (2000b). Reaction of carboxylic acids under coal liquefaction conditions. 2. Under hydrogen atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 54(1–2), 235–246.
- Aysu, T., & Küçük, M. M. (2014). Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. *Energy*, 64, 1002–1025.
- Azizi Samir, M. A. S., Alloin, F., & Dufresne, A. (2005). Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules*, 6(2), 612–626.
- Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. CRC press.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- Bayrakçeken, H., Naktiyok, J., Özer, A. K., & Yurtcan, A. B. (2017). Investigation of the thermal behavior of polypyrrole/carbon nanotube composites and utilization as capacitive material or support for catalysts. *Chemical Engineering Communications*, 204(8), 916–925.
- Bhattacharya, S. C., Salam, P. A., & Sharma, M. (2000). Emissions from biomass energy use in some selected Asian countries. *Energy*, 25(2), 169–188.
- Blackadder, W., & Rensfelt, E. (1985). A pressurized thermo balance for pyrolysis and gasification studies of biomass, wood and peat. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion* (pp. 747–759). Springer.
- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., Joseph, S., Jung, S., Kim, K.-H., & Kirkham, M. B. (2022). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*, 67(2), 150–200.
- Brebu, M., & Vasile, C. (2010a). Thermal degradation of lignin—a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353.

- Brebu, M., & Vasile, C. (2010b). Thermal degradation of lignin—a review. *Cellulose Chemistry & Technology*, 44(9), 353.
- Bridgwater, A. V. (1996). Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass. *Catalysis Today*, 29(1–4), 285–295.
- Bridgwater, A. V. (2008). *Progress in thermochemical biomass conversion*. John Wiley & Sons.
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000a). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1–73.
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000b). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1–73.
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000c). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(1), 1–73.
- Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E., & Kenny, J. M. (2013). Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 154–169.
- Brown, M. E., & Brown, M. E. (1988). Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC). *Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications*, 23–49.
- Caballero, J. A., Conesa, J. A., Font, R., & Marcilla, A. (1997). Pyrolysis kinetics of almond shells and olive stones considering their organic fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 42(2), 159–175.
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., Yu, Y., Liu, R., & Bridgwater, A. V. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 309–322.
- Campos, H., & Ortiz, O. (2020). *The potato crop: its agricultural, nutritional and social contribution to humankind*. Springer Nature.
- Chen, D., Lawton, D., Thompson, M. R., & Liu, Q. (2012). Biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from potato peel waste. *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 709–716. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.06.002>
- Collard, F.-X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 594–608.
- Coseri, S. (2017). Cellulose: To depolymerize... or not to? *Biotechnology Advances*, 35(2), 251–266.
- Crewe, R. J., Staggs, J. E. J., & Williams, P. T. (2007). Drag-induced apparent mass gain in thermogravimetry. *Polymer Degradation and Stability*, 92(11), 2070–2075.
- Dai, L., Wang, Y., Liu, Y., He, C., Ruan, R., Yu, Z., Jiang, L., Zeng, Z., & Wu, Q. (2020). A review on selective production of value-added chemicals via catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Science of the Total Environment*, 749, 142386.
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378.
- Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24(5), 471–482.

- Doh, H., Lee, M. H., & Whiteside, W. S. (2020). Physicochemical characteristics of cellulose nanocrystals isolated from seaweed biomass. *Food Hydrocolloids*, 102, 105542.
- dta. (n.d.).
- Durak, H. (2019). Biyokütlenin Katalitik Hidrotermal Sıvılaştırma Yöntemi İle Sıvılaştırılması. *Journal of Turkish Studies*, 14(Volume 14 Issue 1), 263–278. <https://doi.org/10.7827/turkishstudies.14716>
- Ehrenstein, G. W., Riedel, G., & Trawiel, P. (2012). *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- El Bassam, N. (2010). *Handbook of bioenergy crops: a complete reference to species, development and applications*. Routledge.
- Gabbott, P. (2008). A practical introduction to differential scanning calorimetry. *Principles and Applications of Thermal Analysis*, 1–50.
- Ganesh, A., & Banerjee, R. (2001). Biomass pyrolysis for power generation—a potential technology. *Renewable Energy*, 22(1–3), 9–14.
- Garcia-Perez, M., Wang, X. S., Shen, J., Rhodes, M. J., Tian, F., Lee, W.-J., Wu, H., & Li, C.-Z. (2008). Fast pyrolysis of oil mallee woody biomass: effect of temperature on the yield and quality of pyrolysis products. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(6), 1846–1854.
- Goyal, H. B., Seal, D., & Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517.
- Grassi, G., & Bridgewater, A. V. (1991). *Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilisation*. Elsevier Science Publishers Ltd.
- Gustavsen, G. W. (2021). Sustainability and potato consumption. *Potato Research*, 64(4), 571–586.
- Haggerty, A. P. (2011). *Biomass crops: Production, energy and the environment*. Nova Science Publishers.
- Hatice Bayrakçeken Hüseyin Okur A. Kadir Özer M. Şahin Gülaboğlu, J. N. (2014). Fosfat Kayasının İzotermal Olmayan Bozunma Kinetiği. *Journal*, 20(7), 266–271.
- Horne, P. A., & Williams, P. T. (1996). Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*, 75(9), 1051–1059.
- Jacob, M., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364.
- Jiménez, L., & González, F. (1991). Study of the physical and chemical properties of lignocellulosic residues with a view to the production of fuels. *Fuel*, 70(8), 947–950.
- Joe, M. S., Sudherson, D. P. S., Suyambulingam, I., & Siengchin, S. (2023). Extraction and characterization of novel biomass-based cellulosic plant fiber from *Ficus benjamina* L. stem for a potential polymeric composite reinforcement. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–15.
- Karathanasis, A. D., & Harris, W. G. (1994a). Quantitative thermal analysis of soil materials. *Quantitative Methods in Soil Mineralogy*, 360–411.
- Karathanasis, A. D., & Harris, W. G. (1994b). Quantitative thermal analysis of soil materials. *Quantitative Methods in Soil Mineralogy*, 360–411.
- Klass, D. L. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Elsevier.

- Langier-Kuzniarowa, A. (2002). Thermal analysis of organo-clay complexes. *Organo-Clay Complexes and Interactions*. New York: Marcel Dekker, 273–344.
- Lee, H. V, Hamid, S. B. A., & Zain, S. K. (2014). Sci. World J. 2014, 2014. DOI, 10, 631013.
- Leung, D. Y. C., & Wang, C. L. (1999a). Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis. *Energy & Fuels*, 13(2), 421–427.
- Leung, D. Y. C., & Wang, C. L. (1999b). Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis. *Energy & Fuels*, 13(2), 421–427.
- Lewandowski, I. (2017). Bioeconomy: Shaping the transition to a sustainable, biobased economy. In *Bioeconomy: Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8>
- Margenot, A., O'Neill, T., Sommer, R., & Akella, V. (2020). Predicting soil permanganate oxidizable carbon (POXC) by coupling DRIFT spectroscopy and artificial neural networks (ANN). *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105098.
- Mohamad Haafiz, M. K., Eichhorn, S. J., Hassan, A., & Jawaaid, M. (2013). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. *Carbohydrate Polymers*, 93(2), 628–634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.035>
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Mok, W. S.-L., & Antal Jr, M. J. (1983). Effects of pressure on biomass pyrolysis. I. Cellulose pyrolysis products. *Thermochimica Acta*, 68(2–3), 155–164.
- Olad, A., Doustdar, F., & Gharekhani, H. (2020). Fabrication and characterization of a starch-based superabsorbent hydrogel composite reinforced with cellulose nanocrystals from potato peel waste. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 601, 124962.
- Özay, Y., Ateş, H., Taner, F., Üniversitesi, M., Fakültesi, M., Bölümü, Ç. M., & Türkiye, Y.-M. /. (n.d.). *Biyokütle Dönüşüm Süreçleri*.
- Pandey, A. (2008). *Handbook of plant-based biofuels*. CRC press.
- Pecha, M. B., Arbelaez, J. I. M., Garcia-Perez, M., Chejne, F., & Ciesielski, P. N. (2019). Progress in understanding the four dominant intra-particle phenomena of lignocellulose pyrolysis: chemical reactions, heat transfer, mass transfer, and phase change. *Green Chemistry*, 21(11), 2868–2898.
- Plante, A. F., Fernández, J. M., & Leifeld, J. (2009). Application of thermal analysis techniques in soil science. *Geoderma*, 153(1–2), 1–10.
- Porpatham, E., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2012). Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. *Fuel*, 95, 247–256.
- Pütün, A. E. (2002). Biomass to bio-oil via fast pyrolysis of cotton straw and stalk. *Energy Sources*, 24(3), 275–285.
- Ramesh, S., & Radhakrishnan, P. (2019). Cellulose nanoparticles from agro-industrial waste for the development of active packaging. *Applied Surface Science*, 484, 1274–1281.
- Reddy, B. S. (1994). Biomass energy for India: an overview. *Energy Conversion and Management*, 35(4), 341–361.

- RukiyeÇalışkan DidemSutay Kocabaş, S. (2019). Lignoselülozik Biyokütlenin Ekstrüzyon ile Ön işlemleri ve Enzimatik Yolla Ksilooligosakkarit Üretimi. *Journal*, 1(1), 156–171.
- Schieber, A., & Saldaña, M. D. A. (2009). *Potato peels: a source of nutritionally and pharmacologically interesting compounds-a review*.
- Schieber, A., Stintzing, F. C., & Carle, R. (2001). By-products of plant food processing as a source of functional compounds—recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 12(11), 401–413.
- Schobert, H. H. (2002). *Energy and society: An introduction*. Crc Press.
- Seo, D. K., Park, S. S., Hwang, J., & Yu, T.-U. (2010). Study of the pyrolysis of biomass using thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration measurements of the evolved species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), 66–73.
- Shafizadeh, F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 3(4), 283–305.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*. Cengage learning.
- Smith, B. C. (2003). *Quantitative spectroscopy: theory and practice*. Elsevier.
- Smith, B. C. (2018). *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*. CRC press.
- Sobhy, A., & Chaouki, J. (2010). Microwave-assisted biorefinery. *Chemical Engineering Transactions*, 19, 25–30.
- Soria-Verdugo, A., Rubio-Rubio, M., Goos, E., & Riedel, U. (2020a). On the characteristic heating and pyrolysis time of thermally small biomass particles in a bubbling fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, 160, 312–322.
- Soria-Verdugo, A., Rubio-Rubio, M., Goos, E., & Riedel, U. (2020b). On the characteristic heating and pyrolysis time of thermally small biomass particles in a bubbling fluidized bed reactor. *Renewable Energy*, 160, 312–322.
- Sriram, N., & Shahidehpour, M. (2005). Renewable biomass energy. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 612–617.
- Subedi, S., Ghimire, Y. N., Gautam, S., Poudel, H. K., & Shrestha, J. (2019). Economics of potato (*Solanum tuberosum* L.) production in terai region of Nepal. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 4(1), 57–62.
- Sun, Y., Liu, L., Wang, Q., Yang, X., & Tu, X. (2016). Pyrolysis products from industrial waste biomass based on a neural network model. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 94–102.
- Thomas, I. (2007a). *The Pros and Cons of Biomass Power*. The Rosen Publishing Group, Inc.
- Thomas, I. (2007b). *The Pros and Cons of Biomass Power*. The Rosen Publishing Group, Inc.
- Thring, R. W., & Breau, J. (1996). Hydrocracking of solvolysis lignin in a batch reactor. *Fuel*, 75(7), 795–800.
- Tiwari, A., & Raj, B. (2015). *Reactions and mechanisms in thermal analysis of advanced materials*. John Wiley & Sons.
- Trilokesh, C., Bavadarani, P., Mahapriyadarshini, M., Janani, R., & Uppuluri, K. B. (2021). Recycling baby diaper waste into cellulose and nanocellulose. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 4299–4306.
- Twidell, J. (1998). Biomass energy. *Renewable Energy World*, 1.

- Uçar, S., & Karagöz, S. (2009). The slow pyrolysis of pomegranate seeds: The effect of temperature on the product yields and bio-oil properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(2), 151–156.
- Van de Velden, M., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B., & Dewil, R. (2010). Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable Energy*, 35(1), 232–242.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. In *Fuel* (Vol. 89, Issue 5, pp. 913–933). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Wang, N., Tahmasebi, A., Yu, J., Xu, J., Huang, F., & Mamaeva, A. (2015). A comparative study of microwave-induced pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass. *Bioresource Technology*, 190, 89–96.
- Werner, K., Pommer, L., & Broström, M. (2014). Thermal decomposition of hemicelluloses. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 110, 130–137.
- White, L. P., & Plaskett, L. G. (1981). *Biomass as fuel*. Academic Press Ltd.
- Xu, W., Wang, X., Sandler, N., Willfor, S., & Xu, C. (2018). Three-dimensional printing of wood-derived biopolymers: a review focused on biomedical applications. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(5), 5663–5680.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788.
- Yang, J., An, X., Liu, L., Tang, S., Cao, H., Xu, Q., & Liu, H. (2020). Cellulose, hemicellulose, lignin, and their derivatives as multi-components of bio-based feedstocks for 3D printing. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116881.
- Yin, W., Alekseeva, M. V., Venderbosch, R. H., Yakovlev, V. A., & Heeres, H. J. (2020). Catalytic hydrotreatment of the pyrolytic sugar and pyrolytic lignin fractions of fast pyrolysis liquids using nickel based catalysts. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010285>
- Yu, F., Deng, S., Chen, P., Liu, Y., Wan, Y., Olson, A., Kittelson, D., & Ruan, R. (2007). Physical and chemical properties of bio-oils from microwave pyrolysis of corn stover. *Applied Biochemistry and Biotechnology: The Twenty-Eighth Symposium Proceedings of the Twenty-Eight Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held April 30–May 3, 2006, in Nashville, Tennessee*, 957–970.
- Zanoni, M. A. B., Massard, H., & Martins, M. F. (2012). Formulating and optimizing a combustion pathways for oil shale and its semi-coke. *Combustion and Flame*, 159(10), 3224–3234.
- Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. W., & Hou, D. (2018). Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of Cleaner Production*, 174, 977–987.
- Zhen, F. (1993). A biomass pyrolysis gasifier applicable to rural China. *Fuel Science & Technology International*, 11(8), 1025–1035.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Tuna SONKAYA
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	