

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BEŞ FARKLI AHŞAP MALZEMENİN YERLİ LİNYİT İLE OLAN
KARIŞIMLARININ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Kemal Berk ALTUNKAYA

**Danışman
Prof. Dr. Sema YURDAKUL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2025**



© 2025 [Kemal Berk ALTUNKAYA]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	4
2. MATERYAL VE METOD	7
2.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	7
2.2. Çalışmada kullanılan Malzemelerin Elementel ve Yaklaşık Analiz Sonuçları	11
2.3. Termogravimetrik Analizler	13
2.4. TGA Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi	13
2.5. Yanma Karakteristiğini Gösteren İndesklerin Hesaplanması.....	14
3. BULGULAR.....	17
3.1. Alev alma sıcaklığı	17
3.2. Son Yanma Sıcaklıkları.....	19
3.3. Maksimum Pik Sıcaklıkları	21
3.4. DTGmax Değerleri	23
3.5. Isıtma Hızının Etkisi.....	23
3.6. Yanma İndesklerinin Değerlendirmesi.....	26
3.7. Biyokütle-Linyit Karışımlarında Sinerji	28
3.8. Karbon Emisyonları ve Çevresel Etkiler	29
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	32
4.1. Çalışmanın Sınırlamaları.....	33
4.2. Uygulama Alanları	34
4.3. İleri Araştırma Önerileri.....	35
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ.....	44

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BEŞ FARKLI AHŞAP MALZEMENİN YERLİ LİNYİT İLE OLAN KARIŞIMLARININ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kemal Berk ALTUNKAYA

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Sema YURDAKUL

Türkiye'de fosil yakıtlar toplam birincil enerji tüketiminde %90'luk bir paya sahipken, fosil yakıt tüketiminin %80'i ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Oysaki, Türkiye'nin enerji açısından dışa bağımlılığının açık bir göstergesi olan bu miktar, yerel kaynaklarımızın değerlendirilmesiyle azaltılabilmektedir. Dolayısıyla, mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütlenin yerli linyit ile birlikte mevcut termokimyasal sistemlerde kullanılması, hem ülkemizin enerjide dışa olan bağımlılığını azaltacak hem en önemli sera gazlarından biri olan CO₂ emisyonlarının da azalmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, beş farklı ahşap işleme atığı (kızılçam ağacı ve kimyasal olarak işlenmiş dört ahşap ürün; ahşap pencere çerçevesi, (ahşap parke ve MDF'den yapılmış iki farklı mobilya atığı) iki farklı yerli linyit (Tunçbilek ve Soma Linyiti) ile ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılmış ve hazırlanan yakıt karışımlarının yanma davranışı termogravimetrik analizle belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada 90 adet biyokütle/liniyit karışımı, 21 adet ise karışım olmaksızın ham linyit ve ham biyokütle örneği hazırlanmış ve toplamda 111 adet TGA analizi gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda, atık ahşap biyokütlelerin linyit kömürlerine kıyasla daha düşük alev alma ve son yanma sıcaklıklarına sahip oldukları görülmektedir. Kimyasal işlem görmemiş ham ahşaplar, işlem görmüş ahşap atıklara kıyasla daha yüksek reaktivite sergilemiştir. Yakıt karışımlarındaki linyit oranı arttıkça genel olarak alev alma ve son yanma sıcaklıkları yükselmiş, buna karşılık toplam yanma reaktivitesi azalmıştır. Yani yüksek oranda linyit içeren karışımlar daha geç tutuşup daha yavaş yanmıştır. Yakıt karışımlarının kapsamlı yanma, yanıcılık, alev alma ve son yanma indeksleri linyite biyokütle eklendikçe artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, biyokütlenin linyite eklenmesinin linyitin yanma ve tutuşma performansını iyileştirdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: TGA, Türk linyiti, Biyokütle, Birlikte yanma, Atık ahşap malzeme.

2025, 44 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF MIXTURES OF FIVE DIFFERENT WOOD MATERIALS WITH LOCAL LIGNITE

Kemal Berk ALTUNKAYA

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Sema YURDAKUL

While fossil fuels account for 90% of total primary energy consumption in Turkey, 80% of fossil fuel consumption is met through imports. This amount, which is a clear indicator of Turkey's external dependence in terms of energy, can be reduced by utilizing local resources. Therefore, the utilization of waste wood material, which is one of the available renewable energy sources, in existing thermochemical systems will reduce the country's external dependence on energy and reduce CO₂ emissions, one of the most important greenhouse gases.

In this study aim to determine five different wood processing wastes (red pine wood and four chemically processed wood products: wooden window frames, wooden parquet, and two different furniture wastes made of MDF) were mixed with two different domestic lignites (Tunçbilek and Soma Lignite) in varying weight ratios, and the combustion behavior of the prepared fuel mixtures was investigated using thermogravimetric analysis (TGA). A total of 90 biomass/lignite mixtures were prepared, along with 21 raw lignite and raw biomass samples without mixing, resulting in 111 TGA analyses in total.

The results showed that waste wood biomass has lower ignition and final combustion temperatures compared to lignite coals. Untreated raw wood exhibited higher reactivity than processed wood waste. As the lignite ratio in the fuel mixtures increased, the ignition and final combustion temperatures generally rose, while the total combustion reactivity decreased. In other words, mixtures with a high lignite content ignited later and burned more slowly. The comprehensive combustion, flammability, ignition, and burnout indices of the fuel mixtures increased with the addition of biomass to lignite. Thus, it was observed that blending biomass with lignite improves the combustion and ignition performance of lignite.

Keywords: TGA, Turkish lignite, Biomass, Co-combustion, Waste wood residue.

2025, 44 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile bu aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Sema YURDAKUL'a ve aileme teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca Juri Üyelerim Prof. Dr. Kamil Ekinci ve Barış Gürel'e tezime olan değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kemal Berk ALTUNKAYA
ISPARTA, 2025



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Çalışmada kullanılan ham örnekler için kodlamalar ve analiz koşulları	8
Çizelge 2.2. Çalışmada kullanılan yakıt karışımları için kullanılan kodlamalar ve analiz koşulları.....	9
Çizelge 2.3. Çalışmada kullanılan ahşap malzemelerin yaklaşık ve elemetel analiz sonuçları	12
Çizelge 3.1. Bu çalışmada kullanılan tüm numunelere ait yanma karakteriklerinin belirlenmesi için kullanılan parametreler	25
Çizelge 3.2. Farklı yakıt karışımları için hesaplanan ortalama yanma indeksleri	28



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Seçili örneklerin TGA sonuçları (sırasıyla c40, f140, p40 ve f240).....	11
Şekil 2.2. DTG eğrileri üzerinde yakıtların yanma karakteristiklerinin değerlendirilmesinde dikkate alınan sıcaklıkların belirlenmesinde izlenen yöntem.....	13
Şekil 3.1. Sabit karbon içeriği ile son yanma sıcaklığı arasındaki korelasyon	20



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

C	Alevlenme İndeksi
CO₂	Karbondioksit
D_f	Son Yanma İndeksi
D_i	Alev Alma İndeksi
DTG	Derivative Termogravimetri
DTG_{max}	Maksimum Derivative Termogravimetri
Dve	Uçuculuk İndeksi
NO_x	Azot Oksitler
S	Kapsamlı Yanma İndeksi
SO₂	Kükürt Oksit
TG	Termogravimetri
TGA	Termogravimetrik Analiz

1. GİRİŞ

Günümüzde petrol rezervlerine 50 yıldan az, kömür rezervlerine ise 300 yıldan fazla süre ömür biçilmektedir. Giderek artan dünya nüfusu ve enerji ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda kömürün daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir. Kömür, dünya enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu karşılamaktadır. Rezervlerinin dünya üzerinde geniş bir alana yayılması nedeniyle de kömür cazip bir yakıt türü olmaktadır (Kural, 2015).

Ülkemiz açısından düşünüldüğünde, toplam birincil enerji tüketimi içinde fosil yakıtlar % 90 paya sahip iken fosil yakıt tüketiminin % 80'i ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Enerji açısından dışa bağımlılığın açık bir göstergesi olan bu miktarın aşağı seviyelere çekilebilmesi, yerel kaynakların değerlendirilmesiyle mümkün olabilecektir. Yerel enerji kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye'nin önemli bir linyit potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Linyit kömürü, 9,3 milyar tonluk toplam (görünür ve muhtemel) rezervi ile ülkemiz katı fosil yakıt rezervleri içerisinde en büyük paya sahip enerji kaynağıdır. Ayrıca, dünya kara yüzölçümünün % 0,5'ini oluşturan Türkiye'nin, dünya linyit rezervlerinin % 2,05'ine sahip olması, ülkemiz linyit zenginliğinin önemli bir göstergesidir (TC Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, 2007). Bu çerçevede, linyit potansiyelinin değerlendirilmesi için uygun teknolojilerin geliştirilmesi, ülkenin öncelikli enerji sorunları arasında yer almaktadır.

Biyokütle kömüre kıyasla düşük olan kirletici özellikleri ve yenilenebilir niteliği ile öne çıkmış organik esaslı bir yakıt türüdür. Biyokütleden enerji üretmek amacıyla yapılan çalışmalar, birlikte yakmanın pratik ve maliyeti düşük bir uygulama olduğunu göstermektedir. Tek başına yakıldığında, biyokütle, hammadde sıkıntısı yaşatabilen ve yüksek alkalite içeriği nedeniyle korozyon gibi sorunlara yol açabilen bir yakıt olmaktadır. Ayrıca, biyokütle yakma kazanı (boiler) tasarım ve inşasına gerek kalmaksızın, mevcut kömür yakan sistemlerde küçük değişiklikler yapılarak biyokütle-kömür karışımlarının yakılabileceği yeni sistemler elde edilmiş olmaktadır (Turan, 2009).

Gelişmekte olan ve her geçen gün enerji talebi artan Türkiye, birincil enerji talebinin %76'sını ithalat yoluyla karşılamaktadır. Bunun yanı sıra ülkemiz elektrik enerjisinin yüzde 70'i atmosferi ve yaşadığımız çevreyi ciddi anlamda kirleten fosil yakıtlardan elde edilmektedir (Türkiye enerji görünümü, 2017; Biyokütle Sektör Raporu, 2012). Tüm bu gerçekler göz önüne alındığında hem ülkemizin taraf olduğu uluslararası anlaşmalara uyulması açısından, hem de ekonomik büyümenin sürdürülebilir olması için enerji temininde çevre boyutunun da gözetilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, enerji ihtiyacımızın kendi öz kaynaklarımız (yenilenemeyen ve yenilenebilen) ile karşılanması durumunda hem ülke ekonomimizin dışa bağımlılığının azaltılması hem de maliyetlerin azaltılması sağlanabilecektir. Türkiye, bulunduğu coğrafya ve iklimden dolayı önemli miktarda yenilenebilir enerji kaynaklarına sahiptir. Türkiye'nin biyokütle atık potansiyelinin yaklaşık 8,6 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) ve üretilebilecek biyogaz miktarının ise 1,5-2 MTEP olduğu tahmin edilmektedir (enerji.gov.tr, 2019). 2018 yılı itibariyle toplam enerji tüketimimiz 154 MTEP olarak gerçekleşmiştir. Bunun %31,6'sını, petrol, %26,5'ni doğalgaz, %26,7'sini kömür, %8,8'ni hidroelektrik ve %5,6'sını ise biyokütle oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerjinin toplam pastadan aldığı pay 2000 yılında %0,1 iken 2018 yılında bu oran %5,6'ya yükselmiş durumdadır. Yenilenebilir enerji tarafındaki bu hızlı iyileşme, ülkemizdeki potansiyeli ve yönelimi ortaya koyması açısından önemlidir. Diğer yandan, yenilenebilir enerji yatırımlarının birim maliyetlerinin teknolojik gelişmeler doğrultusunda ucuzlamaya devam etmesi ve devletin bu alana sunduğu destekler sonucu bu büyüme trendinin önümüzdeki yıllarda da devam edeceği bildirilmiştir (Biyokütle Sektör Raporu, 2012).

Sonuç olarak; yerli enerji kaynaklarımızdan biri olan biyokütle ülkemiz açısından önemli bir potansiyele sahiptir ve bu anlamda biyokütle odaklı enerji politikalarının geliştirilmesinin ülkemizde sürdürülebilir, yerli, ucuz ve temiz enerji eldesinin yanı sıra, dış ticaret ve cari işlemler açığının kapatılması hususlarında kazançlar sağlayacağı aşîkârdır. Ülkemizin enerji arzını sürekli kılabilmek adına yerli linyit rezervlerimizin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ülkemizde 19,32 Milyar ton civarında linyit bulunmaktadır (MTA,2022). Ancak, ülkemizde bulunan linyit rezervlerinin yaklaşık sadece

%1'inin 4000 kcal/kg üzerinde bir ısı değere sahip olduğu göz önüne alındığında, düşük kaliteye sahip bu kömürlerin biyokütle ile birlikte yakılması hem biyokütlenin daha stabil bir şekilde bertaraf edilmesini hem de var olan kaynaklardan daha temiz bir şekilde enerji eldesine imkan sağlayacaktır (Atay vd., 2016).

Konunun önemini özetlemek gerekirse; ülkemizde 2023 yılı itibariyle dikili kabuklu kızılçam hacmi 7.540.290 m³ iken diğer çam türü hacmi 8.734.970 m³ olmuştur. 2023 yılındaki endüstriyel odun üretimi ise 6.846.829 m³ olmuştur (OGM, 2025). Ülkemizde 2023 yılında oluşan ahşap orman ürünü atığı miktarı ise yaklaşık 1.800.000 m³ olarak gerçekleşmiştir (FAO, 2025). Yani ülkemizde her yıl önemli miktarda orman ürünü işleme atığı ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, ülkemizde 2023 yılında gerçekleştirilen kömür satışlarının %51,2 oranındaki kısmı Soma'dan, %16,5'i Tunçbilek'den ve %23,6'sı Çan'dan sağlanmıştır. Dolayısıyla ülkemizde kullanılan yerli linyitlerimizin yaklaşık %70'i Soma ve Tunçbilek linyitlerinden karşılanmıştır (Kömür sektör raporu, 2023). Ancak, yerli linyitlerimizin ise yüksek nem, kül ve kükürt içeriğine ve düşük ısı değere sahip olması nedeniyle konvansiyonel yakma sistemlerinde verimli bir şekilde yakılamamasından dolayı; termokimyasal sistemlerde linyit ve biyokütle atıklarının birlikte yakılmasının bu tür atıkların bertarafındaki en çevreci yaklaşım olacağı anlaşılmaktadır.

Literatürde, biyokütlenin yakılmasının bir takım işletme problemlerini de beraberinde getirdiği görülmektedir. Kazanlarda en yaygın görülen işletme problemlerinin biyokütle külünde yüksek miktarda bulunan alkali-klorürlerden kaynaklanan bitişme, birikinti ve korozyon olduğu, ısı transferi yüzeyini kaplayan kül birikintilerinin ısı transferini azaltarak, ısı verimi düşürdüğü ve korozyona yol açtığı bildirilmiştir (Selçuk vd., 2007). Biyokütle yakan sistemlerdeki bu problemlerin biyokütlenin değişik güçteki kimyasallarla süzülmesi ya da kömür ile birlikte yakılmasıyla çözülebileceği rapor edilmiştir (Selçuk vd., 2007). İlk alternatifin çok pahalı ve riskli olduğu, biyokütlenin kömür ile birlikte yakılmasının ise problemleri çözeceği ve sürdürülebilir bir enerji seçeneği olacağı birçok literatür çalışmasında belirtilmiştir (Bapat vd.,

1997; Guanyi vd., 1997; Hughes ve Tillman, 1998; Baxter ve Koppejan, 2004; Selçuk vd., 2007).

Dolayısıyla yüksek uçucu madde, nem ve düşük kül içeren atık biyokütleyi, düşük uçucu madde, nem ve yüksek kül içeren yerli linyitlerimizle birlikte yakmanın hem yerli linyitlerimizin yukarıda mevzu bahis olan kullanımını kısıtlayan dezavantajları ortadan kaldıracığı hem de biyokütlenin ısıl değerini yükselterek, biyokütlenin yanmasından kaynaklı bitişme, birikme ve korozyon problemlerini önleme açısından önemli olacağı aşıkardır.

Bu çalışmada, iki adet yerli Tunçbilek ve Soma linyiti, beş farklı ahşap atık ile ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılarak, yakıt karışımları hazırlanmış ve hazırlanan yakıt karışımlarının Termogravimetrik (TG) analizleri gerçekleştirilerek yakıt karışımlarının yanma karakteristikleri ve indeksleri belirlenmiştir. Böylece, farklı odunsu atık biyokütlelerin yerli linyitlerimizle birlikte termokimyasal sistemlerde kullanımına yönelik tasarımsal parametreler ve işletme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Biyokütle olarak pirinç kabuğunun kullanıldığı çalışmalarda pirinç kabuğu-kömür karışımlarının birlikte yakılması hangi sistemde? sonucu oluşan SO₂ ve NO_x emisyonlarındaki değişiminin araştırıldığı çalışmada, % 30'a kadar farklı oranlarda biyokütle katkısı araştırılmıştır. Çalışmada, biyokütle içeriği arttıkça NO_x salınımının düştüğü, SO₂ salınımında ise doğrusal bir ilişkinin olmadığı görülmüştür (Jian-jun ve Xue 2007).

Biyokütle olarak ayçekirdeği kabuğunun kullanıldığı çalışmada, briketlenecek çalışma koşulları? MPa basınç? Vs... kömürün mekanik dayanıklılığını artırması için ayçekirdeği kabuğu katılmış ve kömür ile ayçekirdeği kabuğu karışımının termal analizi sonucunda ayçekirdeği katkısının reaktiviteyi ve ısıl değeri arttırdığı saptanmıştır (Haykırı ve Yaman, 2008).

Biyokütle olarak fındık kabuğunun kullanıldığı diğer bir çalışmada ise fındık kabuğu ve Elbistan linyitinin birlikte yakıldığı ve % 10'a kadar biyokütle katkısı ile elde edilen yakıt yanma oranlarının sinerjik bir etkiyle teorik değerden sapmalar gösterdiği, % 20 civarlarında ise karışım oranı nispetinde teorik değerlerle uyumlu oranlar elde edildiği görülmüştür (Haykırı ve Yaman, 2008).

Sarıçam odununun yanma ve kimyasal analizinin yapıldığı çalışmada odun bileşenlerinin (selüloz, holoselüloz ve lignin) termal bozunmalarının 300-500°C arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Odun bileşenlerinden elde edilen TGA-DTG termogramları üç ana bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Birinci bölge 100 °C altında olup, malzemede bulunan rutubetin uzaklaşmaya başlaması olarak ifade edilmiştir. İkinci bölgede ise odun bileşenlerinin bozunması söz konusu olup 150-500 °C arasında gerçekleşirken, 500-800 °C arasında ise karbonizasyonun gerçekleştiği belirtilmiştir (Tutuş, 2010).

Pirinç kabuğu ve kömür karışımlarının TGA-DSC analizlerini yapılmış olduğu bir çalışmada %20 biyokütle oranında NO_x emisyonlarında %22 azalma gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada, silika içeriği yüksek pirinç kabuğunun kül sinterlenmesini önlediği de tespit edilmiştir (Chen, 2021).

Başka bir çalışma ise farklı biyokütle türlerini (odun talaşı, ayçiçeği sapı, pamuk sapı) kömürle karşılaştırmalı olarak incelemiş ve odun talaşının en yüksek termal verimi (%88.7) sağladığını belirlemiştir (Wang vd., 2022).

Mısır koçanı-linyit karışımları ile yapılan bir çalışmada %20 biyokütle oranının aktivasyon enerjisini %15 azalttığını ortaya koymuştur (Liu vd., 2023).

Biyokütle kömür karışımlarının yanma kinetiğini inceleyen ve Flynn-Wall-Ozawa yöntemiyle aktivasyon enerjilerini hesaplayan bir çalışmada, biyokütle katkısının yanma hızını artırdığını ve kül aglomerasyonunu azalttığını göstermiştir (Zhang vd., 2020).

Fındık kabuğu-kömür karışımlarının termal davranışı inceleyen bir çalışmada %15 biyokütle oranının optimum yanma performansı sağladığı belirlenmiştir (Demirbaş vd., 2024).

Fındık kabuğu ve linyit kömürü karışımlarının termal davranışını inceleyen başka bir çalışmada. TGA-DTG analizleri, fındık kabuğunun yüksek lignin içeriği nedeniyle 300-500°C aralığında daha kararlı bir yanma profili sergilediğini ortaya koymuştur. Çalışmada, %15 fındık kabuğu içeren karışımların optimum yanma performansı sağladığı belirlenmiştir (Kaya vd, 2022).

Kül yönetimi alanındaki yapılan bir çalışmada araştırmacılar, biyokütle-kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan külün yapı malzemesi olarak değerlendirilme potansiyelini incelemişlerdir. Sonuçlar, %20 biyokütle içeren karışımlardan elde edilen külün, Portland çimentosuna kıyasla %28 daha yüksek basınç dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur (Gupta vd., 2023).

Yanma verimliliği konusunda yapılan bir çalışmada yapay zeka destekli yanma optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Makine öğrenme algoritmaları kullanılarak farklı biyokütle-kömür karışım oranları, yanma sıcaklıkları ve hava fazlalık katsayıları için optimum koşullar belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, %15-25 biyokütle katkısı ve 1.2-1.4 hava fazlalık katsayısı aralığında maksimum yanma veriminin (%91.3) elde edildiğini göstermiştir (Wang & Zhang, 2024).

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Termogravimetrik analiz, bir örneğin kütlesinde artan sıcaklık sonucu meydana gelen ağırlık değişimlerini nicel olarak veren bir tekniktir. Bir maddenin dehidrasyonu veya bozunması sırasındaki ağırlık değişimlerini zamana veya sıcaklığa bağlı olarak gözlemek mümkündür. Ağırlık değişimi, yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması sonucunda meydana gelmektedir. Kütlenin veya kütle yüzdesinin zamana karşı grafiği termogram veya termal bozunma eğrisi olarak adlandırılır. Termal özellikleri belirlenecek malzeme ısıtılırken meydana gelen kütle kayıpları tespit edilerek, sıcaklık-kütle kaybı grafiğinden kırılmanın meydana geldiği sıcaklık değeri bozunma sıcaklığı olarak bulunmaktadır. Bozunma sıcaklıklarının belirlenmesi için ağırlık kaybının 1. dereceden türevinden (DTG) yararlanılmaktadır.

Bu çalışmada ahşap işleme atıklarını temsil etmesi açısından beş adet atık ahşap örneği; kızıl çam ağacı ve kimyasal olarak işlenmiş dört ahşap ürün; ahşap pencere çerçevesi, ahşap parke ve MDF'den yapılmış iki farklı mobilya (f1 ve f2, iki farklı fabrikadan ofis mobilyası üretimi için üretilmiş) seçilmiştir. Hiçbir kimyasal madde ve katkı maddesi içermeyen kızıl çam ağacı örnekleri (Pinus brutia) ise kereste üretim merkezinden alınmıştır. Ayrıca ahşap atıklarının yerli linyitlerimizle olan birlikte yanma karakteristiklerinin incelenebilmesi adına da 2 adet de yerli linyit; Tunçbilek ve Soma Linyitleri biyokütle/liniyit karışımlarını temsil etmesi adına bu çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada 90 adet biyokütle/liniyit karışımı, 21 adet ise karışım olmaksızın ham linyit ve ham biyokütle örneği hazırlanmış ve toplamda 111 adet TGA analizi çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1.'de seçili örneklerin TGA sonuçları verilmiştir. Çalışma 30-900 °C sıcaklık aralığında ve üç farklı ısıtma hızında; 10 °C/dk, 40 °C/dk ve 80 °C/dk gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir biyokütle kömür karışımı için ise 3 farklı ısıtma hızında da (düşük ısıtma hızını yansıtması açısından 10 °C/dk, orta derece ısıtma hızını yansıtması açısından 40 °C/dk ve

hızlı ısıtma hızını yansıtması açısından da 80 °C/dk seçilmiştir) ağırlıkça üç farklı oranda; 25%, 50%, 75% linyit ilavesi gerçekleştirilmiştir.

TG analizi için, ham numuneler ilk önce oda sıcaklığında (25 °C±5 °C) kurutulmuş daha sonra parçalanarak öğütülmüşlerdir. Öğütülen numuneler 850 µm-300 µm aralığına elenmişler ve TG analizleri için yaklaşık 25±1,23 mg tartılarak ağızları hava almayacak şekilde saklanmışlardır. Çalışmada kullanılan ham ve karışım numuneler için oluşturulan etiketleme sistemi ve deney koşulları sırasıyla Çizelge 2.1. ve Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

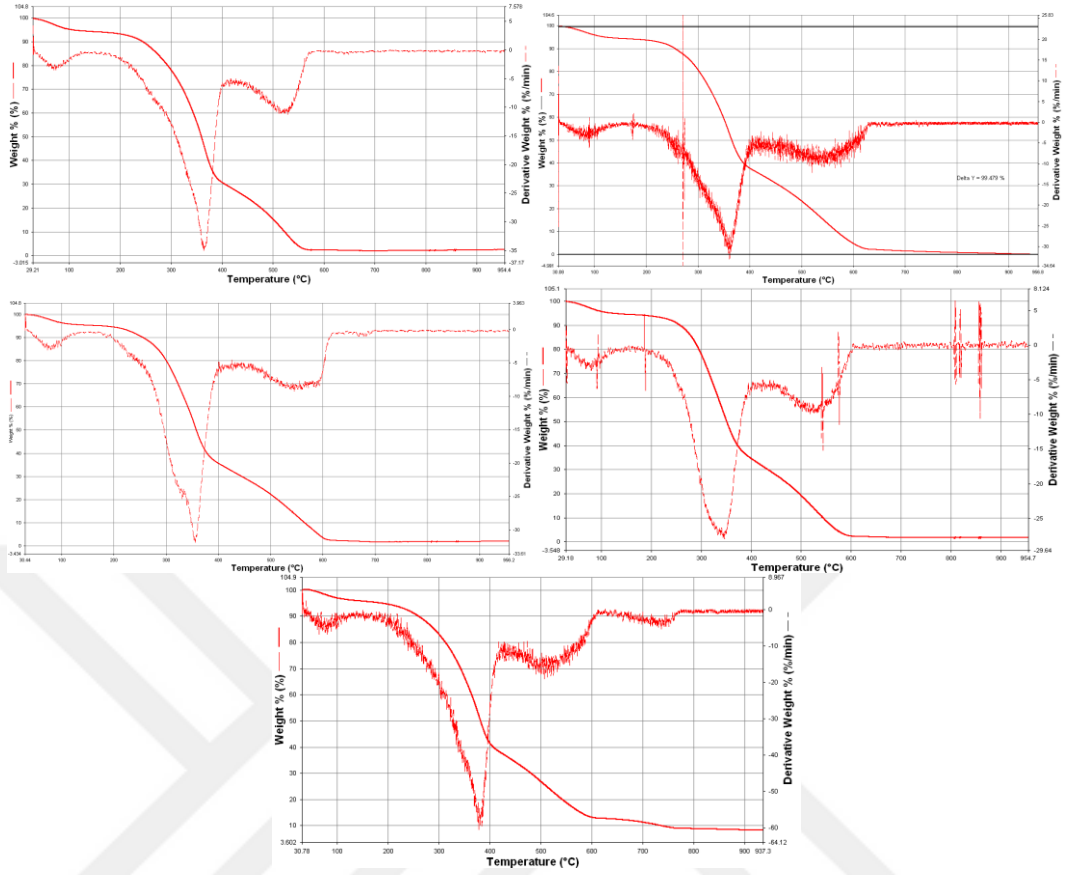
Çizelge 2.1. Çalışmada kullanılan ham örnekler için kodlamalar ve analiz koşulları

Etiket no	Numune adi	İçerik	Sıcaklık aralığı (°C)	Isıtma hızı (°C/dak)	Deney atmosferi
1	c10	%100 çam	30-900	10	Hava
2	c40	%100 çam	30-900	40	Hava
3	c80	%100 çam	30-900	80	Hava
4	f110	%100 mobilya (f1)	30-900	10	Hava
5	f140	%100 mobilya (f1)	30-900	40	Hava
6	f180	%100 mobilya (f1)	30-900	80	Hava
7	p10	%100 parke	30-900	10	Hava
8	p40	%100 parke	30-900	40	Hava
9	p80	%100 parke	30-900	80	Hava
10	s10	%100 soma linyiti	30-900	10	Hava
11	s40	%100 soma linyiti	30-900	40	Hava
12	s80	%100 soma linyiti	30-900	80	Hava
13	t80	%100 tunçbilek linyiti	30-900	80	Hava
14	t10	%100 tunçbilek linyiti	30-900	10	Hava
15	t40	%100 tunçbilek linyiti	30-900	40	Hava
16	F210	%100 mobilya (f2)	30-900	10	Hava
17	F240	%100 mobilya (f2)	30-900	40	Hava
18	F280	%100 mobilya (f2)	30-900	80	Hava
19	w10	%100 ahşap pencere çerçevesi	30-900	10	Hava
20	w40	%100 ahşap pencere çerçevesi	30-900	40	Hava
21	w80	%100 ahşap pencere çerçevesi	30-900	80	Hava

Çizelge 2.2. Çalışmada kullanılan yakıt karışımları için kullanılan kodlamalar ve analiz koşulları

Etiket no	Numune adi	İçerik	Sıcaklık aralığı (°C)	Isıtma hızı (°C/dak)	Deney atmosferi
22	12tf1	%25tunçbilek+%75f1	30-900	10	hava
23	15tf1	%50tunçbilek+%50f1	30-900	10	hava
24	17tf1	%75tunçbilek+%25f1	30-900	10	hava
25	42tf1	%25tunçbilek+%75f1	30-900	40	hava
26	45tf1	%50tunçbilek+%50f1	30-900	40	hava
27	47tf1	%75tunçbilek+%25f1	30-900	40	hava
28	82tf1	%25tunçbilek+%75f1	30-900	80	hava
29	85tf1	%50tunçbilek+%50f1	30-900	80	hava
30	87tf1	%75tunçbilek+%25f1	30-900	80	hava
31	12sc	%25soma+%75çam	30-900	10	hava
32	15sc	%50soma+%50çam	30-900	10	hava
33	17sc	%75soma+%25çam	30-900	10	hava
34	42sc	%25soma+%75çam	30-900	40	hava
35	45sc	%50soma+%50çam	30-900	40	hava
36	47sc	%75soma+%25çam	30-900	40	hava
37	82sc	%25soma+%75çam	30-900	80	hava
38	85sc	%50soma+%50çam	30-900	80	hava
39	87sc	%75soma+%25çam	30-900	80	hava
40	12tc	%25tunçbilek+%75çam	30-900	10	hava
41	15tc	%50tunçbilek+%50çam	30-900	10	hava
42	17tc	%75tunçbilek+%25çam	30-900	10	hava
43	42tc	%25tunçbilek+%75çam	30-900	40	hava
44	45tc	%50tunçbilek+%50çam	30-900	40	hava
45	47tc	%75tunçbilek+%25çam	30-900	40	hava
46	82tc	%25tunçbilek+%75çam	30-900	80	hava
47	85tc	%50tunçbilek+%50çam	30-900	80	hava
48	87tc	%75tunçbilek+%25çam	30-900	80	hava
49	12sp	%25soma+%75parke	30-900	10	hava
50	15sp	%50soma+%50parke	30-900	10	hava
51	17sp	%75soma+%25parke	30-900	10	hava
52	42sp	%25soma+%75parke	30-900	40	hava
53	45sp	%50soma+%50parke	30-900	40	hava
54	47sp	%75soma+%25parke	30-900	40	hava
0	82sp	%25soma+%75parke	30-900	80	hava
56	85sp	%50soma+%50parke	30-900	80	hava
57	87sp	%75soma+%25parke	30-900	80	hava
58	12sf1	%25soma+%75f1	30-900	10	hava
59	15sf1	%50soma+%50f1	30-900	10	hava
60	17sf1	%75soma+%25f1	30-900	10	hava
61	42sf1	%25soma+%75f1	30-900	40	hava
62	45sf1	%50soma+%50f1	30-900	40	hava
63	47sf1	%75soma+%25f1	30-900	40	hava
64	82sf1	%25soma+%75f1	30-900	80	hava
65	85sf1	%50soma+%50f1	30-900	80	hava
66	87sf1	%75soma+%25f1	30-900	80	hava
67	12sw	%25soma+%75pencere çerçevesi	30-900	10	hava
68	15sw	%50soma+%50pencere çerçevesi	30-900	10	hava
69	17sw	%75soma+%25pencere çerçevesi	30-900	10	hava

Etiket no	Numune adi	İçerik	Sıcaklık aralığı (oC)	Isıtma hızı (oC/dak)	Deney atmosferi
70	42sw	%25soma+%75pencere çerçevesi	30-900	40	hava
71	45sw	%50soma+%50pencere çerçevesi	30-900	40	hava
72	47sw	%75soma+%25pencere çerçevesi	30-900	40	hava
73	82sw	%25soma+%75pencere çerçevesi	30-900	80	hava
74	85sw	%50soma+%50pencere çerçevesi	30-900	80	hava
75	87sw	%75soma+%25pencere çerçevesi	30-900	80	hava
76	12sm	%25soma+%75pencere çerçevesi	30-900	10	hava
77	15sm	%50soma+%50pencere çerçevesi	30-900	10	hava
78	17sm	%75soma+%25pencere çerçevesi	30-900	10	hava
79	42sf2	%25soma+%75f2	30-900	40	hava
80	45sf2	%50soma+%50f2	30-900	40	hava
81	47sf2	%75soma+%25f2	30-900	40	hava
82	82sf2	%25soma+%75f2	30-900	80	hava
83	85sf2	%50soma+%50f2	30-900	80	hava
84	87sf2	%75soma+%25f2	30-900	80	hava
85	12tp	%25tunçbilek+%75parke	30-900	10	hava
86	15tp	%50tunçbilek+%50parke	30-900	10	hava
87	17tp	%75tunçbilek+%25parke	30-900	10	hava
88	42tp	%25tunçbilek+%75parke	30-900	40	hava
89	45tp	%50tunçbilek+%50parke	30-900	40	hava
90	47tp	%75tunçbilek+%25parke	30-900	40	hava
91	82tp	%25tunçbilek+%75parke	30-900	80	hava
92	85tp	%50tunçbilek+%50parke	30-900	80	hava
93	87tp	%75tunçbilek+%25parke	30-900	80	hava
94	12tf2	%25tunçbilek+%75f2	30-900	10	hava
95	15tf2	%50tunçbilek+%50f2	30-900	10	hava
96	17tf2	%75tunçbilek+%25f2	30-900	10	hava
97	42tf2	%25tunçbilek+%75f2	30-900	40	hava
98	45tf2	%50tunçbilek+%50f2	30-900	40	hava
99	47tf2	%75tunçbilek+%25f2	30-900	40	hava
100	82tf2	%25tunçbilek+%75f2	30-900	80	hava
101	85tf2	%50tunçbilek+%50f2	30-900	80	hava
102	87tf2	%75tunçbilek+%25f2	30-900	80	hava
103	12tw	%25tunçbilek+%75pencere çerçevesi	30-900	10	hava
104	15tw	%50tunçbilek+%50pencere çerçevesi	30-900	10	hava
105	17tw	%75tunçbilek+%25pencere çerçevesi	30-900	10	hava
106	42tw	%25tunçbilek+%75pencere çerçevesi	30-900	40	hava
107	45tw	%50tunçbilek+%50pencere çerçevesi	30-900	40	hava
108	47tw	%75tunçbilek+%25pencere çerçevesi	30-900	40	hava
109	82tw	%25tunçbilek+%75pencere çerçevesi	30-900	80	hava
110	85tw	%50tunçbilek+%50pencere çerçevesi	30-900	80	hava
111	87tw	%75tunçbilek+%25pencere çerçevesi	30-900	80	hava



Şekil 2.1. Seçili örneklerin TGA sonuçları (sırasıyla c40, f140, p40 ve f240)

2.2. Çalışmada kullanılan Malzemelerin Elementel ve Yaklaşık Analiz Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin uçucu madde, kül ve sabit karbon değerleri Çizelge 2.3.'de verilmiştir. Kullanılan yakıtların elementel ve yaklaşık analizleri, o yakıtın termokimyasal prosesler için kalitesini ve prosesin verimi üzerindeki etkisini göstermesi açısından oldukça önemli özelliklerdir (Alvarez vd., 2018; Bhavsar vd., 2018). Örneklerdeki uçucu maddeyi (VM) belirlemek için ASTM E-872 standardı uygulanmıştır. Örneklerin kül içeriği, biyokütle için ASTM E-1755-01 ile hesaplanmıştır. Nem içeriği, biyokütle ve linyit numuneleri için sırasıyla ASTM D-871-82 ve ASTM D317213 standartlarına göre belirlenmiştir. Sabit karbon (FC) ise farktan hesaplanmıştır.

Çalışmada kullanılan numunelerin uçucu madde içerikleri %33,32 (Tunçbilek linyiti) ile %89,90 (çam) arasında değişmektedir. Ancak biyokütle

numunelerinin uçucu madde içerikleri linyit numunelerinkinden oldukça yüksek olarak bulunmuştur. Buna karşın linyit numunelerinin kül içerikleri ahşap biyokütlelere kıyasla oldukça yüksek bulunmuş ve çalışmadaki numunelerin kül içerikleri %0,63 (çam) ile %42,6 (Soma linyiti) arasında bulunmuştur. Numunelerin sabit karbon içerikleri ise %9,40 (çam) ile %24,70 (Tunçbilek linyiti) arasında değişmiştir.

Çizelge 2.3. Çalışmada kullanılan ahşap malzemelerin yaklaşık ve elementel analiz sonuçları

	Çam	Ahşap pencere çerçevesi	f1	Ahşap döşeme	f2	Soma linyiti	Tunçbilek linyiti
Parametreler	Yaklaşık Analiz (kuru ortam, ağırlıkça %)						
Uçucu madde	89,90	81,1	85,75	86,82	83,82	41,20	33,32
Kül	0,63	1,21	0,75	2,29	1,25	42,6	36,97
Sabit karbon	9,40	17,69	13,3	10,85	14,89	16,2	24,70
Parametreler	Elementel Analiz (kuru ve külsüz ortam, ağırlıkça %)						
C	49,30	49,30	48,20	46,90	46,90	74,89	74,33
H	6,53	6,31	6,66	6,04	6,13	5,039	5,603
N	0,32	0,31	1,47	4,77	2,68	1,535	3,051
S(toplam)	-	-	-	-	-	0,831	0,777
O*	43,85	44,08	43,67	42,59	44,29	17,705	16,239
*fark olarak alınmıştır							

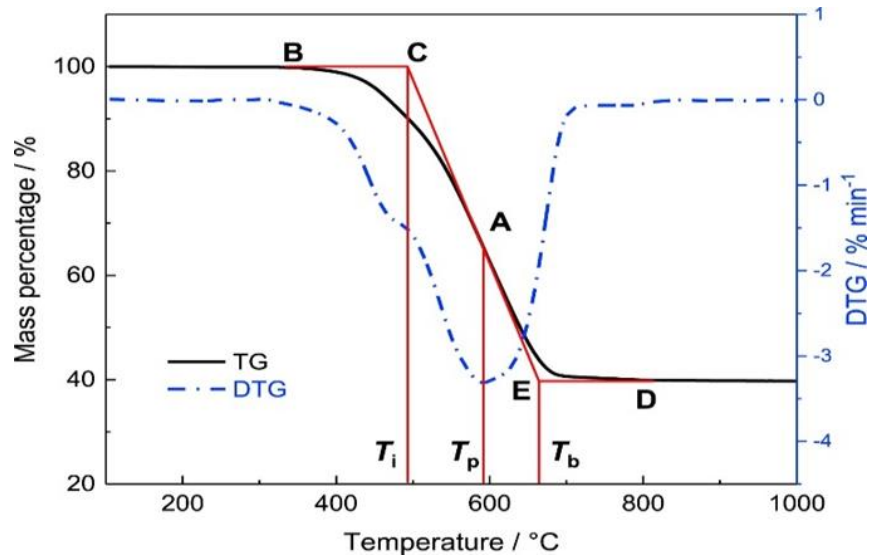
Karbon içeriği malzemenin ısı değerini belirlemesi açısından önemli bir parametre olduğu için, yüksek karbon içeriğine sahip malzemeler termokimyasal sistemlerde tercih edilmektedir (Jose Claudio vd., 2019; Mierzwa-Hersztek vd., 2019). Bu çalışmadaaki numunelerin karbon içerikleri %46,90 (ahşap döşeme ve F1) ile %74,89 (Soma linyiti) arasında bulunmuştur. Linyit numunelerinin karbon içeriği biyokütlelere kıyasla daha yüksek olmakla birlikte, linyit numunelerinin kükürt içerikleri yaklaşık olarak %0,8 olarak bulunurken ahşap numunelerinde kükürte rastlanmamıştır. Yakıtlarda düşük azot ve kükürt içeriği, yakıtı termokimyasal proseslerde kullanımı sırasında daha düşük azot oksit ve kükürt oksit emisyonlarına sebep olması açısından istenilen özelliklerdir (Ibeto vd., 2016; Mierzwa-Hersztek vd., 2019).

2.3. Termogravimetrik Analizler

Çalışmada kullanılan numunelerin TG analizi için ODTÜ Merkezi Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer-Pyris-1 Termal Gravimetrik Analiz Cihazı (TGA) kullanılmıştır. Termal analizler sırasında, hava akış hızı 20 mL/dk olarak seçilmiş ve 30 °C - 950 °C sıcaklık aralığında üç ısıtma hızı; 10 °C/dk (yavaş), 40 °C/dk (orta) ve 80 °C/dk (hızlı) kullanılmıştır. Ayrıca, TG analizinin tekrarlanabilirliği (± 2 °C) iki kez yapılan deneyler ile kontrol edilmiştir.

2.4. TGA Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi

Çalışmada TG analizlerine göre elde edilen termogramlar üzerinde yanma karakteristiklerini belirleyen parametreler belirlenmiştir. Alev alma sıcaklığı, yakıtın alev almaya başladığı sıcaklık iken pik sıcaklığı ise ağırlık kaybının en fazla olduğu andaki sıcaklığı göstermektedir (Wang vd., 2010). Son yanma sıcaklığı ise numunenin termal oksidasyonunun tamamlandığı sıcaklıktır. Bu çalışmada numunelerin alev alma sıcaklığının, pik sıcaklıklarının ve son yanma sıcaklıklarının belirlenmesinde Şekil 2.2.'de gösterilen ve literatürde sıklıkla verilen yöntem izlenmiştir.



Şekil 2.2. DTG eğrileri üzerinde yakıtların yanma karakteristiklerinin değerlendirilmesinde dikkate alınan sıcaklıkların belirlenmesinde izlenen yöntem (Cong vd., 2019)

Şekil üzerinde yer alan karakteristik sıcaklıklar; alev alma sıcaklığı (T_i) (ignition temperature), pik sıcaklığı (T_p) (peak temperature), son yanma sıcaklığı (T_b) (burnout temperature) ve maksimum kütle kaybı oranı (DTG_{max}) parametreleridir. T_i ve T_b , TG/DTG eğrilerinde yaygın olarak kullanılan yöntemle göre belirlenmektedirler (Yu vd., 2016; Wang vd., 2016; Cong vd., 2019). A noktası, DTG tepe noktasından (DTG eğrisindeki maksimum değer) dikey bir çizginin TG eğrisiyle buluştuğu noktayı gösterir. B ve D noktaları sırasıyla kütle kaybının başladığı ve bittiği konumu gösterir. A, B ve D'deki TG eğrisine teğet olan üç çizgi, sırasıyla tutuşma sıcaklığına ve yanma sıcaklığına karşılık gelen C ve E noktasında buluşur. A noktasına, T_p 'ye karşılık gelen sıcaklık, maksimum kütle kaybı oranının meydana geldiği sıcaklıktır. Çalışmanın geri kalan kısmında ise Şekil 2.2'ye göre bu çalışma sonucunda elde edilen termogramlar üzerinden okunan ve Çizelge 3.4.'te verilen karakteristik parametrelerin yorumlanmaları gerçekleştirilmiştir.

2.5. Yanma Karakteristiğini Gösteren İndesklerin Hesaplanması

Karakteristik parametreler kullanılarak ayrıca çalışmada hazırlanan yakıt karışımlarının kapsamlı yanma indeksleri de (S) Denklem [2.1.]'e göre hesaplanmıştır (Qing vd., 2011). Yüksek S değerleri, numunelerin daha reaktif olduğunu ve yanmanın daha yoğun olduğunu göstermektedir (Cong, 2019). Böylece, numunelerin yanma karakteristiklerinin birbirleriyle karşılaştırılması mümkün olmuştur.

$$S = \frac{(\frac{dw}{dt})_{max} (\frac{dw}{dt})_{ortalama}}{T_i^2 T_b} \quad [2.1]$$

burada: $(\frac{dw}{dt})_{max}$: maksimum DTG değerini; $(\frac{dw}{dt})_{ortalama}$: ortalama DTG değerini, (%dk); T_i : alev alma sıcaklığı, (°C) ve T_b : son yanma sıcaklığını (°C) ifade etmektedir.

Çalışmada ayrıca, tutuşma (alev alma) indeksi (Di)'de hesaplanmıştır. Di yakıttan çıkan uçucu bileşiklerin miktarıyla belirlenmekte ve yakıtın yanmasının termal olasılığını tanımlamaktadır. Daha büyük bir alev alma

indeksi, düşük sıcaklıklarda kolayca meydana gelen yanmayı temsil etmektedir. Dolayısıyla D_i değeri ne kadar yüksekse, yanma süreci o kadar verimli ve kararlıdır (Mragwand vd., 2021). D_i değeri Denklem [2.2.]'den hesaplanmıştır.

$$D_i = \frac{DTG_{max}}{t_i t_p} \quad [2.2]$$

burada: DTGmax-maksimum yanma oranını, (ağırlıkça % dk); t_p -DTGmax'a karşılık gelen zaman, (dak); t_i -alev alma süresini, (dk) ifade etmektedir (Wonovroska vd., 2021).

Çalışmada ayrıca yakıt karışımlarının son yanma indeskleri (D_f) de hesaplanmıştır (Wonovroska vd., 2021), Denklem [2.3.]. Son yanma indeksi, bir yakıt örneğinin tamamen yanma kabiliyetini vurgulamak için kullanılmıştır (Maragwanda vd., 2021).

$$D_f = \frac{DTG_{max}}{\Delta_{t1/2} t_f t_p} \quad [2.3]$$

$\Delta_{t1/2}$: DTGmax zaman aralığı=0,5, dak ve t_f : son yanma zamanını, dk ifade etmektedir.

Yanıcılık indeksi (C), ilk yanma sırasındaki kimyasal reaksiyon aktivitesini temsil eder. Ne kadar büyük bir değer elde edilirse yakıtın yanma ve tutuşma kararlılığı o kadar iyi olur (Qin vd., 2022), Denklem [2.4.].

$$C = \frac{(\frac{dw}{dt})_{max}}{T_i^2} \quad [2.4]$$

Son olarak yakıt karışımlarının uçuculuk (devolatilizasyon) indeksi hesaplanmıştır. Devolatilizasyon indeksi, malzeme eğer yüksek uçucu içeriğe sahipse daha yüksek olarak hesaplanmaktadır (Bermejo vd., 2020).

$$Dev = \frac{DTG_{max}}{(T_p - T_i) \cdot T_p} \quad [2.5]$$

Burada, T_p -Pik sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) vermektedir. Fiziksel olarak, bir tek bir malzemeden oluşan yakıt numunesi Şekil 2.1'de görüldüğü üzere bir kez tutuşabilir, ancak bu çalışmada kullanılan karışım numuneleri söz konusu olduğunda, DTG eğrisi birden fazla pik noktası oluşturabilmektedir. Bu nedenle, Jiang vd., 2019, Mragwanda vd., 2021 ve Urban vd., 2017'nin bulgularını destekler şekilde bu çalışmada da termogramlarda okunan birden fazla piklerin ortalama değerleri alınarak yanma indeksleri hesaplanmıştır. Örneğin, iki pik noktasından elde edilen iki DTG_{max} değerinin veya iki pik sıcaklığının ortalaması alınarak çalışmadaki indeksler hesaplanmıştır.



3. BULGULAR

Kızılçam odununun yanma ve kimyasal analizinin yapıldığı çalışmada odun bileşenlerinin (selüloz, holoselüloz ve lignin) termal bozunmalarının 300-500°C arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Odun bileşenlerinden elde edilen termogramlar üç ana bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Birinci bölge 100 °C altında olup, malzemede bulunan nemin uzaklaşmaya başlaması olarak ifade edilebilir. İkinci bölgede ise ahşap bileşenlerinin ısıl bozunması söz konusu olup 150-500 °C arasında gerçekleşmiştir. 500-800 °C arasında ise karbonizasyon gerçekleşmiştir (Tutuş, 2010). Linyit numunelerinde ise iki bölge elde edilmiştir. Birinci bölge yine numunelerin içerisindeki nemden, ikinci bölge (275-950 °C) ise termal bozunmanın olduğu ve linyitin oksidasyonun gerçekleştiği bölgedir.

Çalışmada seçili ahşap numunelerin ve yerli linyitlerin yanma karakteristiklerini inceleyebilmek adına alev alma, son yanma, maksimum pik sıcaklıkları, DTG_{max} değerleri, bölgelerdeki ağırlık kayıpları ve termal bozunma sonucunda kalan kütle olmak üzere farklı parametreler incelenmiş ve Çizelge 3.4'te verilmiştir. Alev alma, son yanma ve maksimum pik sıcaklıkları literatürde TG/DTG eğrilerinde yaygın olarak kullanılan yöntemle göre belirlenmiştir (Yu vd., 2016; Wang vd., 2016; Cong vd., 2019).

3.1. Alev alma sıcaklığı

Ateşleme sıcaklığı, bir yakıtın harici ateşleme kaynağı olmayan bir ortamda kendiliğinden tutuştuğu minimum sıcaklık olarak tanımlanır (Jiang vd., 1995). Yakıtların yanma sırasında yanma kinetikleri kadar tutuşma davranışı bilgisi de yakıtların teknolojik kullanım alanlarıyla ilgili önemli özelliklerdir (Mortari vd., 2010). Ayrıca literatürde alev alma sıcaklığının ve yanma kararlılığının, kazan tasarımı, kirletici oluşumu ve yanma prosesinin kararlılığı için oldukça önemli olduğu belirtilmektedir (Crelling vd., 1992; Huang vd., 2008). Alev alma davranışı yakıtın alev alma sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir ve alev alma sıcaklığı ne kadar düşükse yakıtı tutuşturmak da o derece kolaydır (Jia, 2021). Bu çalışmada incelenen ham beş adet ahşap malzeme ile iki adet yerli linyit

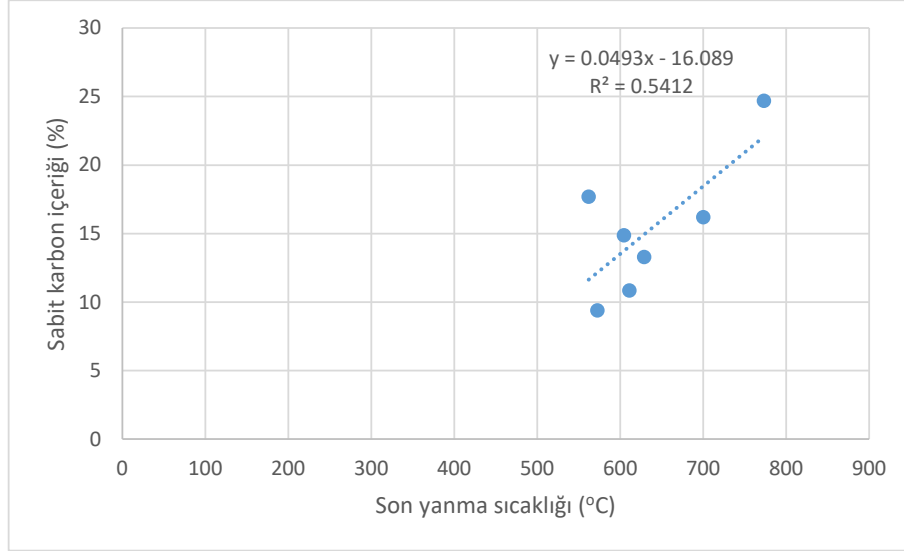
örneğinde en düşük alev alma sıcaklıklarının ahşap numunelerinde; w10 (131 °C), p10 (145 °C) ve w40 (165 °C) olduğu görülmüştür. En yüksek alev alma sıcaklıklarının ise linyit numunelerinde; s80 (285 °C) ve t80 (281 °C) olduğu görülmektedir. Bu durum ahşap atıklarını yakmanın linyit numunelerine kıyasla daha kolay olduğunu ve biyokütle numunelerinin daha reaktif olduğunu göstermektedir (Wnorowska vd., 2021). Dolayısıyla, atık ahşap biyokütlelerin **alev alma sıcaklıklarının** linyit kömürlerine kıyasla belirgin biçimde daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, biyokütlenin yüksek uçucu madde içeriği ve düşük kül oranından kaynaklanmaktadır. Nitekim, Wnorowska ve arkadaşları (2021) da biyokütlelerin düşük kül içeriği ve yüksek uçucu madde oranı sayesinde daha kolay tutuştuğunu raporlamıştır. Bu çalışmada çam odunu örnekleri ~131–165 °C gibi düşük sıcaklıklarda tutuşurken linyit örneklerinde tutuşma genellikle çok daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. Literatürde **biyokütlelerin termal bozunma aralığı** da benzer şekilde belirtilmektedir: Örneğin Tutuş (2010), saf sarıçam odununun yaklaşık 300–500 °C arasında piroliz olup ayrıştığını bulmuştur; bu çalışma da çam odununun benzer aralıklarda bozunduğunu doğrulamıştır. Biyokütlenin tutuşma davranışının **homojen fazda** (uçucu yanması ile) başladığı, linyitin ise daha geç ve kısmen heterojen fazda tutuştuğu bilinmektedir. Magalhaes vd. (2017) düşük ısıtma hızlarında (TGA koşulları) biyokütlelerin daha yüksek kendiliğinden tutuşma riskine sahip olduğunu, linyitlerin ise daha zor tutuştuğunu göstermiştir. Bu bulgular, atık ahşapların daha düşük sıcaklıklarda yanmayı başlatabildiğini ve karışımlarda ilk ateşlemeyi iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, linyitle karşılaştırıldığında, biyokütle yakıtları daha düşük karbon içeriğine ve daha yüksek oksijen içeriğine sahiptir (Çizelge 2.3.). Bu da farklı bağlanma enerjileriyle sonuçlanarak biyokütlelerin daha erken bir sıcaklıkta tutuşmasına neden olmuştur (Wnorowska vd., 2021).

Diğer dikkat çekici bir husus da işlem görmüş ahşap numunelerinin alev alma sıcaklığının işlem görmemiş olan çam numunesine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmiş olmasıdır. Çünkü, işlem görmüş numunelerin üretimi sırasında kullanılan kimyasallar, numunelerin yanıcılığında azalmaya yol açmaktadır (Yorulmaz ve Atımtay, 2010). Yakıt karışımlarının alev alma

sıcaklıkları incelendiğinde; ister Tunçbilek ister Soma linyiti olsun, karışımlardaki linyit oranının artışına bağlı olarak daha yüksek alev alma sıcaklıklarının gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Linyitlerin alev alma sıcaklıkları biyokütleyle kıyasla daha yüksek olduğundan, karışımdaki linyit oranına bağlı olarak alev alma sıcaklıkları artış göstermiştir. Karışımların en düşük alev alma sıcaklıkları Soma linyiti ilavesi ile 25s75w, 50s50w ve 75s25w örnekleri için sırasıyla 174, 178 ve 180 °C olarak ve en yüksek 25s75c, 50s50c ve 75s25c örnekleri için sırasıyla 190, 195 ve 198 °C olarak bulunmuştur. Tunçbilek linyiti ilavesi ile karışımların en düşük alev alma sıcaklıkları 25t75w, 50t50w ve 75t25w örnekleri için sırasıyla 167, 169 ve 206 °C olarak bulunurken, en yüksek 25t75d, 50t50d ve 75t25d örnekleri için sırasıyla 203, 206 ve 213 °C olarak bulunmuştur. Literatürde biyokütlenin alev alma sıcaklığındaki bu artışa biyokütle ile linyit arasındaki sinerjinin neden olduğu belirtilmektedir (Mortari vd., 2010).

3.2. Son Yanma Sıcaklıkları

Son yanma sıcaklığı yanma hızı ile ilgilidir ve yanma özelliğini yansıtmaktadır (Jia, 2021). Alev alma ve son yanma sıcaklıkları yakıtların önemli iki özelliğidir. Sönümleme süreci tutuşma süreci tarafından başlatıldığından dolayı, son yanma sıcaklıkları da alev alma sıcaklıklarıyla doğrudan bağlantılıdır (Wnorowska vd., 2021). Son yanma sıcaklığı, yakıtın neredeyse tamamen tüketildiği sıcaklığı ifade eder. Buna göre, biyokütlenin yanma sıcaklığının Ayrıca hem alev alma hem de yanma sıcaklıkları, yakıt seçimi, tüketimi ve yanma odasının tasarımını değerlendirmek için anahtar parametrelerdir (Du vd., 2007; Du vd., 2014). Çalışmada son yanma sıcaklıkları tüm biyokütle numuneleri için (562 °C (100w) ile 629 °C (100f1)) linyit numunelerin kıyasla daha düşük (700 °C (100s) ile 772 °C (100t)) bulunmuştur. Dolayısıyla sabit karbon içeriğinin artmasıyla birlikte daha yüksek son yanma sıcaklıklarının elde edildiği görülmektedir (Şekil 3.3). Linyitin biyokütlelere eklenmesiyle birlikte, biyokütlelerin de son yanma sıcaklıkları artış göstermiştir. Çünkü termostabilitesi en düşük olan bileşenin yani hemiselülozun içeriği, artan linyit içeriği ile birlikte azalmış ve DTG eğrileri daha yüksek sıcaklıklara doğru kaymıştır (Borthakur ve Gogoi, 2014).



Şekil 3.1. Sabit karbon içeriği ile son yanma sıcaklığı arasındaki korelasyon

Çalışmada değişken son yanma sıcaklıklarının nedeni, termal dönüşüm sürecini tamamlamak için daha uzun bir yanma süresine ve daha yüksek bir yanma sıcaklığına neden olan numunelerin yakılmasının zorluğu olarak ön görülmektedir (Wnorowska vd., 2021). Çalışmada incelenen karışımların son yanma sıcaklıkları ise 567 °C (25s75w) ile 757 °C (75t25f1) arasında değişmektedir. Karışımda artan linyit oranıyla birlikte, alev alma sıcaklıklarında olduğu gibi daha yüksek son yanma sıcaklıkları elde edilmiştir.

Ayrıca yakıtın içerdiği **kül oranı**, tutuşma ve yanma karakteristikleri üzerinde önemli bir role sahiptir. Yüksek kül içeriği, yanma sırasında inert bir yük oluşturarak hem ısı transferini olumsuz etkiler hem de yanmayı geciktirir. Zhou ve arkadaşları (2006), kömür-biyokütle karışımlarında mineral madde (kül) miktarı arttıkça yakıt reaktivitesinin azaldığını ve tutuşturma davranışının zorlaştığını raporlamıştır. Bu tezde incelenen Soma ve Tunçbilek linyitlerinin yaklaşık %37–43 düzeylerinde yüksek kül oranları da benzer şekilde tutuşma sıcaklıklarını yükseltmiştir. Nitekim literatürde de yüksek kül içeriğine sahip linyitlerin geç alev aldığı bildirilmektedir (Zhou vd., 2006). Buna karşılık ahşap atıkların kül oranı %1–3 gibi çok düşüktür (Çizelge 3). Dolayısıyla, linyit ile karşılaştırıldığında biyokütle yakıtlar daha **reaktif** davranış sergilemekte; içerdiği yanmayan kısımların azlığı sayesinde daha düşük sıcaklıklarda ve daha hızlı bir şekilde yanmayı başlatabilmektedir. Bu durum literatürde de

desteklenmektedir: Örneğin Wnorowska vd. (2021), inorganik madde (kül) miktarı yüksek olan kömürlerin daha geç tutuştuğunu, düşük kül içerikli biyokütle katkısının ise tutuşturmayı kolaylaştırdığını göstermiştir.

Daha yüksek bir ısıtma hızı, daha yüksek alev alma ve yanma sıcaklıklarına yol açmaktadır. Biyokütle tutuşturulduğunda, kimyasal reaksiyonlar uçucu maddenin yanması tarafından yönetilir. Biyokütle yanmasının bu birincil adımı homojen reaksiyonla ilgilidir. Kimyasal reaksiyonlar tükenmeye doğru kaydığında, kömür yanması devreye girer ve bu ikincil adım reaksiyonu, heterojen reaksiyona karşılık gelir. Heterojen reaksiyonların daha yavaş reaksiyon dinamikleri göz önüne alındığında, ısıtma hızının yanma sıcaklığı üzerindeki etkisi, alev alma sıcaklığından daha büyüktür (Lu ve Chen, 2015). Bu çalışmada da ısıtma hızı son yanma sıcaklıkları üzerinde daha etkili bulunmuştur.

3.3. Maksimum Pik Sıcaklıkları

Ağırlık kaybının her bir ana aşaması için (DTG eğrisinin üzerindeki her bir pik için), maksimum ağırlık kaybı oranına ulaşıldığındaki en yüksek sıcaklık maksimum pik sıcaklığı olarak gözlenmiştir (Yousefzad ve Kazanç, 2018). Termal olarak kararlı bir biyokütle numunesi daha az uçucu maddeye sahiptir. Ayrıca maksimum pik sıcaklığı, bir biyokütle materyalinin ayrışmaya başladığı noktanın bir göstergesidir (Liu ve Yu, 2006, Zhang vd., 2009).

Şekil 2.1 ve 2.2'den DTG eğrisinde belirgin bir tepe noktası olduğu görülebilir. Eğilim, önce minimum ağırlık kaybı olduğu yönündedir. Tutuşma sıcaklığına ulaştıktan sonra, şiddetli reaksiyon maksimum ağırlık kaybı zirvesine ulaşır ve ardından reaksiyon sona erene kadar düşer. Bunun nedeni hemiselüloz içeriğinin az olmasıdır. Bu nedenle, düşük sıcaklıktaki yanma aşamasında, hemiselüloz ve selülozun termal analizi, yanma sürecindeki uçucu maddenin üst üste bindiğini ve DTG eğrisinde bir tepe noktası olduğunu gösterir. Bunun nedeni, birkaç hemiselülozun erken termal ayrışmasının uçucu oluşturmalarıdır. Uçucu bileşenlerin tutuşma nedenini ortaya koyar ve ısının bir kısmını tüketir. Bu çalışmada termogramlarda yani DTG eğrilerinde belirgin üç bölge

gözlenmektedir. İlk bölge numunelerdeki su içeriğinden kaynaklanmaktadır ve yaklaşık 200 °C'ye kadar devam etmektedir. Çalışmalarda bu bölge değerlendirme dışında bırakılmış ve ana bozunmanın olduğu bölgelere odaklanılmıştır. Dolayısıyla, Termogramlarda gözlenen ikinci bölge bu çalışmada birinci bölge olarak tanımlanmış ve yaklaşık 200 ile 425 °C arasında gözlenmiştir. Hemisellülozun degradasyonu yaklaşık 173 °C'de başlayıp ile 355 °C'de son bulmaktadır. Sellüloz ise yaklaşık olarak ana kaybını 291 ile 520 °C aralığında gerçekleştirmektedir. Lignin ise 170 ile 935 °C gibi çok geniş bir aralıkta degradasyona uğramaktadır (Apaydın Varol ve Mutlu, 2023). Bu çalışmadaki 1. pik ortalama sıcaklıklarının biyokütle numuneleri için 339 °C (100f2) ile 358 °C(100w) arasında değiştiği göz önüne alındığında, numunelerin ikinci bölgesinde gerçekleşen termal bozunmanın ve bu bölgede gözlenen piklerin numunelerin içerisindeki temelde hemiselüloz ve selüloz ile kısmen ligninden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Linyit numunelerindeki degradasyon sıcaklığı termogramlarda 950 °C'ye kadar çıkmaktadır. Dolayısıyla, tek bir pik olarak gözlenen 100s ve 100t numuneleri için ortalama pik sıcaklıkları 494 ve 535 °C olarak anlamlı bir şekilde biyokütle numunelerinden daha yüksek ($p < 0,5$) istatistik yaptık mı? olduğu ve termal olarak daha az ve daha kararlı uçucuların devolatilizasyonundan ve kömürleşmeden kaynaklandığı ön görülmüştür (Heydari vd., 2015). Yakıt karışımlarının üçüncü bölgesinde yer alan 2. piklerin ise yaklaşık olarak 425 ile 625 °C arasında olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, ikinci piklerin lignin ile kömür (char) oluşumundan kaynaklandığı anlaşılmaktadır (Heydari vd., 2015). Benzer şekilde ortalama ikinci pik sıcaklıkları 479 °C (100w) ile 546 °C (100p) arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada kimyasal işlem görmüş örneklerin daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmektedir. Literatürde de vurgulandığı üzere, reçine ile işlenmiş ahşap, işlenmemiş olana göre termal olarak daha stabil olmasının bu duruma neden olduğu ön görülmektedir (Deka vd., 2002).

1.piklerin sıcaklıkları (342 °C (25t+75f2)- 366 °C (75t+25w)) ile benzer şekilde ikinci piklerin sıcaklıkları (457°C (25s+75c) ile 557 °C (75t+25w) biyokütleye linyit eklenmesi ile artış göstermiştir. Linyitin degradasyonu, daha düşük uçucu madde içeriği ve daha kuvvetli bağlar içermesi nedeniyle daha yüksek

sıcaklıklarda gerçekleşmektedir (Yuzbası ve Selçuk, 2011). Dolayısıyla, bu çalışmada da hem Tunçbilek hem de Soma linyitlerinin kimyasal madde içeren ve içermeyen atık odunsu biyokütlelere eklenmesi ile bu karışımların termal degradesyonu daha yüksek sıcaklıklara kaymıştır.

3.4. DTGmax Değerleri

DTGmax, numunenin maksimum kütle kaybı oranını belirtir (Yang, vd., 2024). Numunelerin ortalama yanma hızı ve maksimum yanma hızı esas olarak uçucu madde yanma bölgesinde meydana gelir (Wnorowska vd., 2021). Bu çalışmada yanma bölgelerinde, linyitler için, ortalama DTGmax parametresi ağırlıkça %100s ve %100t numuneleri için sırasıyla %10,82/dk ve %10,6/dk olarak bulunmuştur. Biyokütleler içinse ortalama DTGmax değerleri, %100c (%38,61/dk) > %100p (%35,77/dk) > %100f1 (%34,27/dk) > %100w (%33,67/dk) > %100f2 (%31,97/dk) olarak linyit numunelerinden daha yüksek bulunmuştur. Literatürde de benzer şekilde kömür numuneleri için bu değer %2,8-4,5/dk, biyokütle (otsu biyokütle, miscanthus ve saman) içinse ağırlıkça %2,8-12,7/dk aralığında bulunmuştur (Wnorowska vd., 2021). Başka bir çalışmada ise kavağın maksimum yanma hızı 301 °C'de %117,45/dk'dır. Slash çamının maksimum yanma hızı 287 °C'de %158,25/dk'dır. Masson çamının maksimum yanma oranı 291 °C'de %103,36/dk'dır. Çin köknarının maksimum yanma oranı 297 °C'de %134,1/dk'dır. Söğüdün maksimum yanma oranı 309 °C'de %68,12/dk'dır (Jia, 2021). Çalışmada biyokütleyle artan linyit ilavesi ile ortalama DTGmax değerleri düşüş göstermiş ve ağırlıkça Soma Linyiti içeren karışımlar için %31,87/dk (%25s+%75c) ile %13,57/dk (75s+25f2) ve Tunçbilek içeren linyit karışımları içinse (%34,01/dk (%25t+%75c) ile %10,68/dk (75t+25d) aralığında değişmiştir.

3.5. Isıtma Hızının Etkisi

Termogravimetrik analizlerde kullanılan **ısıtma hızı**, yanma karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada düşük (10 °C/dk), orta (40 °C/dk) ve yüksek (80 °C/dk) ısıtma hızlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve

ısıtma hızının artmasıyla yakıtların yanma sıcaklıklarında yükselme olduğu saptanmıştır. Çalışmada DTG eğrilerinin maksimum değeri, numune ısıtma hızının artmasıyla artmış ve bu da pik sıcaklıklarının daha yüksek değerlere ulaşmasına neden olmuştur. Ayrıca, kütle kaybı yüzdesi artmış ve numuneye ısı transferi daha düşük ısıtma hızına sahip deneylerde tekdüze olmuştur (Wnorowska vd., 2021). Yüksek ısıtma hızında numunelerin daha yüksek sıcaklıklarda alev aldığı ancak toplam reaksiyon süresinin kısaldığı gözlenmiştir. Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi, 10 °C/dk'lık daha yavaş ısıtma hızı arttıkça, genel olarak maksimum kütle kaybı oranında bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Riaza vd. (2011) bu olgunun yakıt partikülünün etrafında uçucu bir bulutun varlığıyla açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Bu bulutun, tam yanma için yakıtın yüzeyinden içerisine doğru olması gereken oksijen difüzyonunu engellediğini öne sürmüşlerdir. Dolayısıyla, bu çalışmada genel olarak ısıtma hızı arttıkça yanmadan kalan kütle miktarının da bir artış gösterdiği görülmektedir.

Lu ve Chen (2015) de bambu ve küspe üzerinde yaptıkları TGA çalışmalarında, hem tutuşturma hem de yanma sonu sıcaklıklarının ısıtma hızı arttıkça yükseldiğini rapor etmişlerdir. Bunun nedeni, yüksek ısıtma hızlarında numune içinde **ısı gecikme (thermal lag)** oluşması ve sıcaklık gradyanlarının artmasıdır. Yakıt parçacıklarının iç kısımlarının ısınması geciktiği için ölçülen görünür tutuşturma sıcaklığı daha yüksek çıkmaktadır. Bu çalışmada benzer şekilde, 10 °C/dk'lık yavaş ısıtmada ahşap numunelerin ~130–150 °C civarında alev aldığı görülürken, 80 °C/dk'ya çıkıldığında alev alma sıcaklıklarının daha yüksek değerlere kaydığı tespit edilmiştir. Isıtma hızının yanma reaktivitesine etkisi literatürde de geniş biçimde tartışılmıştır. Örneğin, Jau-Jang Lu ve Wei-Hsin Chen'in (2015) çalışmasında 5 farklı ısıtma hızı denenmiş ve 20–30 °C/dk aralığındaki orta hızların hem doğru ölçüm hem de pratik süre açısından tavsiye edildiği belirtilmiştir. Yüksek ısıtma hızlarında ise reaksiyon kinetiği farklılaşmakta, uçucu bileşenlerin ani çıkışı nedeniyle yanma daha şiddetli ancak daha kısa süreli olmaktadır. Nitekim bu tez kapsamında da ısıtma hızı arttıkça maksimum kütle kaybı oranlarının yükseldiği (daha hızlı reaksiyon) ancak toplam yanma süresinin kısaldığı görülmüştür.

Çizelge 3.1. Bu çalışmada kullanılan tüm numunelere ait yanma karakteriklerinin belirlenmesi için kullanılan parametreler

Etiket no	Numune adı	Isıtma hızı	Alev alma		DTG max	Ağırlık kaybı (%)	Pik 2 (°C)	DTG max	Ağırlık kaybı (%)	Son yanma sıcaklığı (°C)	Kalan kütle (%)
			sıcaklığı (°C)	Pik 1 (°C)							
1	c10	10	180	332	-10.7	55.2	490	-3.39	92.75	520	3.117
2	c40	40	185	366	-34.27	54.77	511	-10.89	97.6	567	2.44
3	c80	80	206	376	-70.86	55.96	550	-15.45	99.5	630	0.1
4	f110	10	195	331	-10.104	45	495	-3.37	88.61	580	0.3
5	f140	40	193	360	-32.77	47.83	549	-10.1	83.01	627	0.52
6	f180	80	200	380	-59.95	52.34	580	-13.1	85.39	680	1.67
7	p10	10	145	331	-8.7	49.47	495	-2.62	88.61	560	0.05
8	p40	40	192	354	-31.9	48.73	551	-8.9	87.35	613	2.1
9	p80	80	198	366	-66.72	51.8	591	-15.13	90.54	660	0.9
10	s10	10	240	441	-5.31	66.23	-	-	-	500	2.5
11	s40	40	250	492	-10.05	52	-	-	-	700	6.7
12	s80	80	285	549	-17.1	49.01	-	-	-	900	7.9
13	t80	80	280	569	-14.24	28.08	-	-	-	950	25
14	t10	10	270	480	-5.59	47.97	-	-	-	600	13
15	t40	40	280	549	-11.964	36.93	-	-	-	770	15.3
16	f210	10	167	320	-7.03	47.7	469	-2.907	86.01	546	0.16
17	f240	40	173	346	-27.92	47.1	477	-7.93	76.45	600	2.01
18	f280	80	200	352	-60.95	46.49	560	-14.05	86.09	667	1.77
19	w10	10	131	333	-7.15	38.05	473	-3.03	72.15	520	12.1
20	w40	40	165	365	-33.17	50.75	466	-8.85	72.61	560	6.97
21	w80	80	177	377	-60.69	47.59	498	-16.3	72.86	606	8.48
22	12tf1	10	200	335	-7.36	59.51	494	-3.5	81.41	599	0.5
23	15tf1	10	200	337	-4.5	24.81	494	-4.1	67.34	600	1.92
24	17tf1	10	200	337	-2.81	16.01	494	-4.6	59.57	603	9.275
25	42tf1	40	203	360	-21.65	33.54	542	-9.89	68.97	687	6.08
26	45tf1	40	206	367	-16.289	27.54	567	-9.51	62.8	727	7.92
27	47tf1	40	206	368	-9.41	17.09	567	-9.95	50.86	767	12.96
28	82tf1	80	206	375	-48.12	36.94	599	-16.07	72.96	752	5.892
29	85tf1	80	213	379	-14.08	34.91	603	-16.65	67.33	833	4.56
30	87tf1	80	233	378	-15.59	18.38	600	-17.49	48.95	900	10.62
31	12sc	10	187	332	-8.974	45.42	436	-3.29	78.63	537	0.14
32	15sc	10	190	337	-7.48	38.78	434	-4.47	71.99	537	0.979
33	17sc	10	193	337	-4.717	30.69	434	-5.144	66.88	537	4.34
34	42sc	40	190	353	-34.4	43.5	436	-20	67.74	553	3.89
35	45sc	40	195	373	-27.5	45.84	500	-12.35	76.92	587	0.214
36	47sc	40	197	371	-16.481	33.23	468	-12.82	57.17	610	5.806
37	82sc	80	193	380	-52.25	49.64	499	-18.5	70.88	687	1.34
38	85sc	80	200	381	-45.78	41.58	500	-12.207	62.72	833	4.72
39	87sc	80	205	387	-28.7	31.9	500	-13.01	52.48	800	7.159
40	12tc	10	180	333	-8.64	40.87	493	-3.564	83.515	573	0.15
41	15tc	10	185	333	-6.25	27.65	487	-3.75	68.51	595	5.862
42	17tc	10	200	333	-3.15	13.49	487	-4.5	55.36	600	10.95
43	42tc	40	200	367	-30.72	47.1	550	-10.32	81.755	647	3.417
44	45tc	40	187	370	-21.03	29.37	551	-13.81	63.14	695	8.166
45	47tc	40	200	367	-11.21	16.39	550	-13.956	56.458	695	11.411
46	82tc	80	200	378	-62.68	47.26	553	-18.984	79.38	700	2.894
47	85tc	80	200	387	-41.1	32.71	602	-16.87	67.83	780	7.05
48	87tc	80	220	387	-17.14	16.57	600	-15.705	46.54	900	10.36
49	12sp	10	173	333	-7.131	36.45	467	-3.186	72.35	533	9.826
50	15sp	10	173	335	-5.49	38.51	440	-6.4	72.8	560	0.94
51	17sp	10	175	333	-3.85	32.67	437	-5.5	70.49	560	1.63
52	42sp	40	187	353	-26.96	39.63	494	-12.04	72.15	613	2.432
53	45sp	40	177	354	-20.1	36.16	500	-12.34	69.16	627	1.06
54	47sp	40	190	364	-13.21	30.22	500	-12	60.62	647	6.02
55	82sp	80	200	367	-49.04	40.69	527	-17.1	69.26	700	3.01
56	85sp	80	180	360	-43.02	35.12	470	-24.34	60.98	647	3.51
57	87sp	80	220	380	-29.36	29.61	531	-18.1	55.62	793	6.12
58	12sf1	10	173	333	-7.14	39.31	432	-3.74	70.12	573	0.52
59	15sf1	10	173	333	-6.57	34.91	433	-4.5	68.62	574	2.29

Etiket no	Numune adı	Isıtma hızı	Alev alma sıcaklığı (oC)	Pik 1 (oC)	DTG max	Ağırlık kaybı (%)	Pik 2 (oC)	DTG max	Ağırlık kaybı (%)	Son yanma sıcaklığı (oC)	Kalan kütle (%)
60	17sf1	10	173	333	-6.34	32.81	433	-5	68.73	575	3.12
61	42sf1	40	198	363	-28.68	44.71	500	-13.45	75.22	527	1.53
62	45sf1	40	195	366	-19.94	36.92	500	-11.78	67.21	553	3.84
63	47sf1	40	199	367	-14.52	31.25	500	-11.403	62.18	653	5.84
64	82sf1	80	202	375	-53.71	44	499	-20.35	71.19	647	2.17
65	85sf1	80	213	369	-46.4	36.46	453	-23.1	57.465	660	4.36
66	87sf1	80	215	371	-30.72	30.15	462	-24.43	51.07	667	6.82
67	12sw	10	153	333	-7.09	41.22	427	-3.108	77.85	513	6.46
68	15sw	10	155	333	-4.16	29.69	427	-5.46	62.708	513	3.768
69	17sw	10	161	333	-2.17	32.68	427	-2.5	64.9	513	1.27
70	42sw	40	183	369	-25.12	43.07	527	-11.27	76.7	588	9.987
71	45sw	40	180	368	-21.21	38.15	519	-11.49	72.13	600	7.62
72	47sw	40	180	369	-15.6	32	493	-12.96	61.7	606	7.74
73	82sw	80	187	374	-52.56	40.89	476	-25.758	63.923	600	12.16
74	85sw	80	200	377	-43.78	36.29	493	-21.518	61.4	620	11.13
75	87sw	80	200	377	-31.64	29.916	493	-20.95	50.45	667	11.39
76	12sf2	10	167	327	-6.29	44.984	427	-3.5	74.4	545	0.74
77	15sf2	10	167	327	-5.14	40.408	428	-4.61	72.74	546	0.911
78	17sf2	10	173	328	-3.59	30.59	433	-5.11	66.92	545	3.685
79	42sf2	40	190	343	-25.26	41.59	470	-10.14	71.989	598	0.764
80	45sf2	40	191	348	-20.28	36.62	472	-12.07	65.44	620	3.211
81	47sf2	40	193	354	-13.32	30.17	473	-12.52	56.09	653	6.04
82	82sf2	80	200	360	-53.71	42.99	548	-17.29	77.99	706	1.49
83	85sf2	80	210	367	-35.45	37.5	548	-14.499	67.61	780	3.468
84	87sf2	80	217	370	-23.8	30.09	553	-15.72	60.72	806	5.55
85	12tp	10	160	330	-6.744	38.64	487	-3.504	77.96	580	1.056
86	15tp	10	187	333	-5.42	26.483	486	-4.895	65.01	585	7.63
87	17tp	10	213	333	-3.89	15.576	486	-4.426	58.04	595	9.142
88	42tp	40	187	357	-25.01	37.89	551	-10.82	74.9	673	3.184
89	45tp	40	187	360	-18.22	28.38	550	-11.66	64.486	693	4.858
90	47tp	40	200	362	-11.22	18.87	556	-11.33	53.94	713	10.64
91	82tp	80	200	370	-50.42	38.25	567	-16.53	69.35	767	3.454
92	85tp	80	197	374	-34.07	28.6	580	-15.39	58.46	820	7.7778
93	87tp	80	206	377	-18.41	17.27	585	-15.36	44.549	900	12.154
94	12tf2	10	173	320	-6.6	42.8	440	-3.66	75.56	550	0.276
95	15tf2	10	200	320	-4.28	22.63	460	-4.83	62.56	567	4.699
96	17tf2	10	206	330	-2.6	15.73	480	-5.104	58.66	600	0.048
97	42tf2	40	193	347	-20.4	37.89	502	-8.79	67.77	667	3.15
98	45tf2	40	205	355	-16.12	30.02	533	-9.62	60.6	700	6.46
99	47tf2	40	211	354	-10.117	19.19	528	-11.64	49.99	720	11.64
100	82tf2	80	213	359	-49.72	38.65	598	-14.925	77.83	787	3.229
101	85tf2	80	210	357	-35.43	28.73	600	-13	64.88	847	6.94
102	87tf2	80	216	370	-17.94	19.16	602	-17.5	53.43	845	10.81
103	12tw	10	153	334	-7.24	39.5	480	-2.953	74.04	580	6.428
104	15tw	10	157	337	-5.21	27.09	474	-3.98	59.3	587	10.64
105	17tw	10	209	340	-3.591	18.938	487	-4.495	57.769	588	7.504
106	42tw	40	167	365	-25.71	39.53	525	-10.68	70.33	640	9.579
107	45tw	40	167	370	-19.91	31.15	580	-10.83	68.43	680	7.714
108	47tw	40	200	369	-10.47	18.89	587	-12.375	61.39	700	11.18
109	82tw	80	180	387	-53.73	43.5	539	-17.19	68.62	700	9.215
110	85tw	80	183	389	-43.49	36.84	563	-16.69	64.63	767	9.315
111	87tw	80	210	390	-19.07	17.27	599	-15.73	47.45	863	13.68

3.6. Yanma İndesklerinin Değerlendirmesi

Biyokütle yakıtının yanma özelliklerinden biri de kapsamlı yanma özellikleri endeksidir. Kapsamlı yanma karakteristiği indeksinin yüksek olması, yakıtının yanma performansının da yüksek olduğunu göstermektedir. Ham biyokütlelerin

kapsamlı yanma indisi linyit örneklerine kıyasla dah yüksek olmakla birlikte, ortalama kapsamlı yanma indeksleri $100w > 100c > 100p > 100f2 > 100f1$ olarak sıralanmaktadır (Çizelge 3.5.). Kimyasal madde içeriklerinden (yanma geciktirici kimyasal madde içeriği) dolayı mobilya numunelerinin ve parke numunesinin kapsamlı yanma indeksinin daha düşük olduğu ön görülmektedir. Benzer şekilde biyokütlelere linyit eklendikçe genel olarak yakıt karışımlarının da bir düşüş gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla, linyite biyokütle ekledikçe, 100t ve 100s yakıt karışımına kıyasla, yanma performanslarının da iyileştiği görülmektedir.

Kapsamlı yanma indeksine benzer şekilde, yakıt karışımlarının yanıcılık, alev alma ve son yanma indeksleri de $100w > 100c > 100p > 100f2 > 100f1 > 100s > 100t$ olarak sıralanmakta ve linyite biyokütle eklendikçe, bu indekslerin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, biyokütlenin linyite eklenmesinin linyitin yanma ve tutuşma performansını iyileştirdiği görülmektedir. Diğer yazarlar tarafından vurgulandığı gibi, alev alma indeksi ne kadar yüksekse, daha düşük sıcaklıklarda yanma eğilimi veya daha düşük sıcaklıklarda yanma oluşumu da o kadar yüksektir (Kongkaew vd., 2015, Xu vd., 2018). Bu etki, yanma aktivitesiyle ilgili olan yanıcılık indeksi tarafından da yansıtılmaktadır. Karışımdaki biyokütle oranı arttıkça, gerçek yanma aktivitesi de biyokütleden salınan uçucular tarafından desteklenerek artmıştır.

Yakıt karışımlarının son yanma indeksleri incelendiğinde TGA sonuçlarına göre özellikle kül miktarı yüksek olan (Çizelge 3.4.) linyit numunelerinin son yanma indekslerinin de düşük olduğu görülmektedir. Benzer şekilde linyit oranı en fazla olan ve 75s/75t içeren yakıt karışımları için de düşük son yanma indeksleri hesaplanmaktadır (Çizelge 3.5.).

Çizelge 3.2. Farklı yakıt karışımları için hesaplanan ortalama yanma indeksleri

	Kapsamlı yanma indeksi	Yanıcılık indeksi	Alev alma indeksi	Son yanma indeksi	Uçuculuk indeksi
100c	6.49488E-06	0.000631378	1.402366	0.495946	0.000213
100f1	5.30298E-06	0.00055525	1.187333	0.37016	0.000176
100p	6.13273E-06	0.000622162	1.321956	0.431698	0.000176
100s	5.34913E-07	7.72523E-05	0.351163	0.086308	0.00002897
100t	2.12917E-07	5.73206E-05	0.081065	0.01295	0.00002175
100f2	5.61923E-06	0.000571523	1.283221	0.411479	0.000186
100w	7.42732E-06	0.000765685	1.590754	0.555145	0.000195
25t+75f1	3.59002E-06	0.000424916	0.969518	0.268683	0.000146
50t+50f1	1.70033E-06	0.000250048	0.48018	0.114114	8.88E-05
75t+25f1	1.30287E-06	0.000208466	0.447624	0.100495	8.42E-05
25s+75f1	5.55471E-06	0.000542197	1.298624	0.446422	0.000213
50s+50f1	4.38391E-06	0.000455991	1.194118	0.409192	0.000217
75s+25f1	3.21582E-06	0.000371096	0.927839	0.309278	0.000176
25s+75c	5.99007E-06	0.000626169	1.383032	0.42122	0.000248
50s+50c	3.81037E-06	0.000471449	1.048271	0.256569	0.000181
75s+25c	2.59989E-06	0.000335374	0.73779	0.188766	0.00014
25t+75c	5.34129E-06	0.000574044	1.33036	0.403575	0.000189
50t+50c	3.41166E-06	0.000433965	0.912099	0.236594	0.000133
75t+25c	1.61279E-06	0.000249836	0.491927	0.108594	9.08E-05
25t+75p	4.25369E-06	0.000516447	1.104993	0.294124	0.000155
50t+50p	3.01439E-06	0.000403982	0.82904	0.200531	0.000121
75t+25p	1.68931E-06	0.000257139	0.538256	0.117587	9.14E-05
25s+75p	5.74048E-06	0.000612843	1.326171	0.383554	0.000173
50s+50p	5.80471E-06	0.000585291	1.396276	0.45282	0.00019
75s+25p	2.51593E-06	0.000330704	0.733732	0.193305	0.000133
25t+75f2	3.47663E-06	0.000425221	0.964605	0.254796	0.000156
50t+50f2	2.41332E-06	0.000323071	0.737116	0.176174	0.000124
75t+25f2	1.65372E-06	0.000238306	0.525639	0.125731	9.67E-05
25s+75f2	4.88365E-06	0.000517774	1.210823	0.363141	0.00019
50s+50f2	3.15204E-06	0.000394832	0.836802	0.220828	0.000154
75s+25f2	2.2426E-06	0.000303943	0.635549	0.161241	0.000124
25t+75w	5.5808E-06	0.000654856	1.339055	0.387412	0.000156
50t+50w	4.26876E-06	0.000545345	1.078379	0.278846	0.000122
75t+25w	1.72246E-06	0.000257559	0.525919	0.121684	8.58E-05
25s+75w	6.10953E-06	0.000626985	1.502763	0.552063	0.0002
50s+50w	4.68083E-06	0.000507021	1.15589	0.412369	0.000172
75s+25w	3.59153E-06	0.000396066	0.943071	0.30302	0.000139

3.7. Biyokütle-Linyit Karışımlarında Sinerji

Biyokütle ilavesinin linyit kömürlerinin yanma performansını geliştirdiği ve sinerjik etkiler yarattığı çok sayıda çalışma ile ortaya konmuştur. Bu tez kapsamında da atık ahşapların belirli oranlarda linyit ile birlikte yakılması, toplam karışımın beklenenden daha reaktif bir yanma sergilemesine yol açmıştır. Biyokütle katkısı, yüksek uçucu madde içeriği sayesinde linyitin

tutuşmasını hızlandırmış ve yanma verimini artırmıştır. Nitekim Jiaxin Tan ve arkadaşlarının (2021) termogravimetrik analiz çalışmasında, biyokütle oranı artırıldığında karışımların tutuşma ve yanma bitiş sıcaklıklarının belirgin ölçüde düştüğü, maksimum kütle kayıp hızının arttığı ve buna bağlı olarak yanma performansının iyileştiği gösterilmiştir. Yani biyokütle ilavesi, yakıt karışımının daha düşük sıcaklıklarda daha hızlı yanmasını sağlayarak linyitin nispeten yavaş yanma karakterini olumlu yönde etkilemektedir. Bhavsar vd. (2008) de biyokütle ile birlikte yakılan kömür numunelerinde beklenenden daha yüksek yanma verimi gözlemlemiş ve bunun gerçek bir sinerjik etkileşimden kaynaklandığını vurgulamıştır. Benzer şekilde, Mierzwa-Hersztek vd. (2019) biyokütle-lyinyit birlikte yakılmasının toplam yanma reaktivitesini artırdığını ve emisyon özelliklerini iyileştirdiğini bildirmektedir. Kazagić ve Smajević (2009) tarafından Bosna linyitiyle yürütülen deneyler de belirli oranlarda odun biyokütlesi katıldığında yanmanın hızlandığını ve daha temiz bir yanma gerçekleştiğini göstermiştir. Bütün bu bulgular, biyokütle ve linyit karışımlarının birbirlerini tamamlayıcı özelliklere sahip olduğunu ve uygun oranlarda bir araya geldiklerinde olumlu sinerjik etkiler ortaya çıkardığını ortaya koymaktadır. Özellikle uçucu madde bakımından zengin bir biyokütlenin kömürle birlikte yakılması, kararlı alev oluşumunu kolaylaştırmakta ve düşük reaktivite sorununu gidermektedir. Literatürde, uçucu madde içeriğinin %35'in üzerine çıkmasının alev stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiği belirtilmiştir (Sahu vd., 2014). Ayrıca biyokütle külü içerisinde bulunan alkali metallerin kömür yanmasını katalizleyerek de sinerjik etki yaratabileceği bazı araştırmacılarca öne sürülmüştür. Ancak, biyokütle türüne göre bu etkileşimlerin farklılık gösterebileceği de not edilmelidir (Tan vd., 2021). Bu tezde incelenen karışımlar özelinde, örneğin %25 oranında biyokütle karışımı, literatürle uyumlu şekilde hem alev alma davranışını hızlandırmış hem de kapsamlı yanma verimliliğini yükseltmiştir.

3.8. Karbon Emisyonları ve Çevresel Etkiler

Biyokütle ve linyitin birlikte yakılması çevresel açıdan önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Öncelikle, biyokütle yenilenebilir bir karbon kaynağı

olduğundan CO₂ emisyonlarını azaltıcı bir etki yapar. Kömürün bir kısmının biyokütle ile ikame edilmesi, fosil karbonun atmosfere salımını doğrudan düşürmektedir. Yapılan araştırmalar, biyokütle yakma oranı ile orantılı biçimde net CO₂ emisyonunda azalma sağlandığını göstermektedir (Brem ve Koppejan, 2005). Örneğin Brem ve Koppejan'ın (2005) çalışmasında, %10 biyokütle katkısının teorik olarak CO₂ salımını %10 azalttığı belirtilmiştir. Bu tezde de deneysel olarak biyokütle ilavesinin yanma verimini artırırken karbondioksit emisyonlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Biyokütleler karbon nötr yakıtlar olarak kabul edildiğinden, birlikte yakma uygulaması sera gazı envanterinde iyileşme sağlamaktadır (Tan vd., 2021). NO_x ve SO₂ gibi kirletici emisyonlar açısından da biyokütle katkısının faydalı etkileri literatürde rapor edilmiştir. Jian-jun ve Xue (2007), biyokütle-kömür karışımlarının saf kömüre kıyasla daha düşük NO_x emisyonu ürettiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Bunun bir nedeni, biyokütlelerin genellikle kömürlere göre çok daha düşük toplam azot ve kükürt içeriğine sahip olmasıdır. Nitekim bu çalışmada kullanılan ahşap atıkların kükürt içeriği ihmal edilecek düzeyde düşük iken linyitlerin ~%0,8 kükürt içerdiği ölçülmüştür. Yakıtta azot ve kükürt miktarının düşük olması, yanma sırasında azot oksit ve kükürt dioksit emisyonlarının da düşük olması demektir ve istenilen bir özelliktir (Ibeto vd., 2016; Mierzwa-Hersztek vd., 2019). Dolayısıyla biyokütle ilavesi, yalnızca CO₂ açısından değil konvansiyonel kirleticiler bakımından da daha temiz bir yanma sağlamaktadır. Büyük ölçekli bir araştırmada Smajević vd. (2012), %7 oranında odun talaşı ile linyitin birlikte yakılmasını bir termik santralde denemiş ve %100 kömür yakmaya kıyasla NO_x ve SO₂ emisyonlarında belirgin düşüş gözlemlemiştir. Ayrıca biyokütle içinde bulunan alkali metallerin, yanma sırasında kükürtle reaksiyona girerek bir kısmını tutulabilir kül formunda yakaladığı ve böylece baca gazındaki SO_x miktarını azalttığı da literatürde ifade edilmektedir (Variny vd., 2021). Bunun yanı sıra, tek başına biyokütle yakıldığında ortaya çıkabilen **birikme** problemlerinin, kömür ile birlikte yakma durumunda seyredildiği ve kazan yüzeylerinde daha az tortu oluştuğu rapor edilmiştir. Örneğin Haykırı ve Yaman (2008), düşük erime noktalı biyokütle külünün seyreltilmesiyle kazan yüzeylerinde cüruflaşma ve birikme sorunlarının azaldığını belirtmiştir. Bu bulgu, biyokütle ve kömürün birlikte yakılmasının sadece emisyon kontrolü

değil, aynı zamanda sistem işletimi açısından da yarar sağlayabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, biyokütle-ilaveli linyit yakma uygulaması, sera gazı salımlarını azaltan, hava kirleticilerini sınırlayan ve atık biyokütlelerin değerlendirildiği çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tez bulguları da literatürde belirtilen çevresel faydaları doğrular niteliktedir.

Bu tez çalışmasında, atık ahşap malzemeleri ile yerli linyit karışımlarının yanma karakteristikleri detaylı şekilde incelenmiştir. TGA analizleri sonucunda atık ahşap örneklerinin, linyitlere göre daha düşük alev alma ve son yanma sıcaklıklarına sahip olduğu ve daha reaktif davranışlar sergilediği gözlenmiştir.

Literatürde de benzer sonuçlar bildirilmiştir. Tutuş (2010) çalışmasında, saf çam odununun 300-500°C arasında termal bozunmaya uğradığı bulunmuş, bu çalışmada da çam örneklerinin benzer sıcaklık aralıklarında bozunduğu gözlenmiştir. Wnorowska vd. (2021) biyokütlelerin düşük kül ve yüksek uçucu madde içeriği nedeniyle daha düşük alev alma sıcaklıklarına sahip olduğunu bildirmiştir. Jian-jun ve Xue (2007) biyokütle-kömür karışımlarında NO_x emisyonlarında azalma olduğunu ortaya koymuş, bu çalışmanın bulguları da biyokütle katkısının çevresel fayda sağladığını desteklemiştir.

Isıtma hızının artması ile birlikte, yanma sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir (Lu ve Chen, 2015). Ayrıca Zhou vd. (2006), yüksek kül içeriğinin tutuşturma davranışını zorlaştırdığını belirtmiş, bu çalışmada da linyit numunelerinin kül içeriği yüksek olduğundan daha geç alev aldıkları görülmüştür. Bhavsar vd. (2008) ve Mierzwa-Hersztek vd. (2019) ise biyokütle katkısının linyit ile sinerjik etkiler yaratarak yanma performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma literatürle yüksek derecede uyumlu sonuçlar ortaya koymuştur ve yerli linyitlerin biyokütle katkısı ile yanma verimliliğinin artırılabilirliği doğrulanmıştır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında atık ahşap malzemelerin yerli linyit kömürleriyle farklı oranlarda karıştırılarak birlikte yakılması durumunda ortaya çıkan yanma karakteristikleri detaylı olarak incelenmiştir. Termogravimetrik analiz sonuçları ve ilgili hesaplamalar ışığında aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Atık ahşap biyokütleler, linyit kömürlere göre belirgin biçimde daha düşük tutuşma (alev alma) ve yanma bitiş sıcaklıklarına sahiptir. Biyokütlelerin yüksek uçucu içeriği ve düşük kül oranı, daha erken ve hızlı yanmalarını sağlamaktadır.
- Kimyasal işlem görmemiş ham ahşaplar (ör. çam odunu), işlem görmüş ahşap atıklara kıyasla daha yüksek reaktivite sergilemiştir. Bu durum, üretim sırasında kullanılan boyar madde, reçine gibi kimyasalların yakıt yapısını değiştirerek yanıcılığı azaltmasından kaynaklanmaktadır.
- Karışımdaki linyit oranı arttıkça genel olarak alev alma ve son yanma sıcaklıkları yükselmiş, buna karşılık toplam yanma reaktivitesi azalmıştır. Yani yüksek oranda linyit içeren karışımlar daha geç tutuşup daha yavaş yanmıştır.
- Uygulanan ısıtma hızı arttıkça yakıtların ölçülen alev alma ve yanma bitiş sıcaklıkları belirli ölçüde yükselmiştir. Ancak daha yüksek ısıtma hızı, reaksiyonların daha kısa sürede tamamlanmasına yol açmıştır. Bu da pratikte hızlı ısıtılan partiküllerin daha çabuk yanacağını, fakat gerekli tutuşturma sıcaklığının daha yüksek olacağını göstermektedir.
- Ham biyokütlelerin kapsamlı yanma indisi linyit örneklerine kıyasla daha yüksek olmakla birlikte, ortalama kapsamlı yanma indeksleri $100w > 100c > 100p > 100f2 > 100f1$ olarak sıralanmıştır.
- Yakıt karışımlarının yanıcılık, alev alma ve son yanma indeksleri de $100w > 100c > 100p > 100f2 > 100f1 > 100s > 100t$ olarak sıralanmakta ve linyite biyokütle eklendikçe, bu indekslerin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, biyokütlenin linyite eklenmesinin linyitin yanma ve tutuşma performansını iyileştirdiği görülmektedir.

- Biyokütle katkısının linyit kömürlerinin yanma verimini artırdığı ve çevresel performansı iyileştirdiği doğrulanmıştır. Atık ahşap ilavesiyle linyitin yanma verimi yükselmiş, karbondioksit (CO₂) emisyonlarında azalma sağlanmıştır. Aynı zamanda, biyokütlenin düşük kükürt ve azot içeriği sayesinde NO_x ve SO_x emisyonlarında da azalma potansiyeli olduğu görülmüştür.

Yukarıdaki sonuçlar genel hatlarıyla değerlendirildiğinde, atık biyokütlelerin yerli linyit kömürlerine belirli oranlarda katılması, enerji üretiminde daha verimli ve çevreci bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular literatürdeki çalışmalarla büyük ölçüde uyumludur ve biyokütle-lyinyit birlikte yakma uygulamasının pratikte uygulanabilirliğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır.

4.1. Çalışmanın Sınırlamaları

Bu tez çalışmasının bulguları laboratuvar ölçeğindeki termogravimetrik analizlere dayanmaktadır. Termogravimetrik analiz (TGA) yöntemi kontrollü şartlarda değerli veriler sunmakla birlikte, gerçek endüstriyel koşulların tümünü temsil edemez. Dolayısıyla bu çalışmanın bir sınırlaması, elde edilen tutuşturma sıcaklığı ve yanma hızı verilerinin büyük ölçekli yanma sistemlerinde birebir aynı şekilde görülmeyebileceğidir. TGA'da kullanılan küçük numune boyutları ve nispeten düşük ısıtma hızları, bir termik santraldeki kazan ortamından farklılık gösterir. Örneğin, bu çalışmada en yüksek ısıtma hızı 80 °C/dk (~1,33 °C/sn) iken, bir pulverize kömür kazanında yakıt parçacıkları çok daha yüksek anlık ısıtma oranlarına maruz kalabilir. Literatürde de vurgulandığı gibi, laboratuvar ölçekli bulguların ölçek etkisi dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekir. (Magalhaes vd. (2017) düşük ve yüksek ısıtma hızlarını karşılaştırdıkları çalışmada, biyokütle ve kömürlerin tutuşturma davranışının yüksek ısı akışlarında farklı reaksiyon mekanizmalarına kayabildiğini göstermiştir. Bu nedenle, bu tezde elde edilen sayısal değerler (örneğin tutuşma sıcaklığı) büyük sistemlerde değişiklik gösterebilir; ancak karşılaştırmalı eğilimler ve çıkarımlar genel olarak geçerli olacaktır. Bir diğer sınırlama, çalışmada sadece belirli iki linyit türü (Soma ve Tunçbilek) ile sınırlı

sayıda atık ahşap tipi kullanılmış olmasıdır. Farklı özellikte kömürler veya diğer biyokütle türleri (örneğin tarımsal atıklar, enerji bitkileri) ile yapılacak deneyler farklı sonuçlar verebilir. Ayrıca, birlikte yakma sırasında oluşan kül ve tortu özellikleri bu çalışma kapsamında derinlemesine incelenmemiştir. Külün ergime davranışı, kazan yüzeylerinde birikme eğilimi veya külün atık olarak değerlendirilmesi gibi konular bu tezde sınırlandırılmıştır. Son olarak, deneyler sabit bir atmosfer koşulunda (havada oksidasyon) yürütülmüştür. Farklı oksijen konsantrasyonları veya örneğin oksijenle zenginleştirilmiş yanma gibi özel yakma teknikleri değerlendirilmemiştir. Tüm bu sınırlamalar, çalışmanın odak alanını daraltmak için bilinçli olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla sonuçlar, belirtilen koşullar için geçerli olup bu koşulların dışında yapılacak uygulamalarda dikkatli yorumlanmalıdır.

4.2. Uygulama Alanları

Elde edilen bulgular, pratikte biyokütle ve linyit birlikte yakma uygulamalarının teşvik edilebileceğini göstermektedir. Özellikle termik santrallerde ve endüstriyel kazan sistemlerinde, yerli linyit kömürüne uygun oranda atık biyokütle karıştırmak hem fosil yakıt tüketimini azaltacak hem de atık yönetimine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma özelinde incelenen atık ahşaplar, mobilya sanayi atıkları veya orman endüstrisi artıklarının enerji üretiminde değerlendirilebileceğine işaret etmektedir. Uygun hazırlık (boyut küçültme, kurutma vb.) adımlarından sonra biyokütleleri linyite ko-yakıt olarak kullanarak birlikte yakılmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Literatürde mevcut büyük ölçekli denemeler, mevcut kömür yakıtlı kazanlarda %5-20 oranında biyokütle karışımının genellikle herhangi bir modifikasyon yapmadan yakılabildiğini göstermektedir. Örneğin Smajević vd. (2012) tarafından Bosna-Hersek'te 110 MWe gücündeki bir kömür ünitesinde gerçekleştirilen denemede, yakıta hacimce %7 oranında odun talaşı eklenerek sorunsuz bir işletme gerçekleştirilmiştir. Bu birlikte yakma denemesi, kazan veriminde bir düşüşe yol açmaksızın emisyonlarda azalma sağlamış ve mevcut kömür besleme sisteminde herhangi bir tıkanma veya aşırı birikme sorunu yaratmamıştır. Benzer şekilde Avrupa'daki bazı ticari santrallerde %10-15 biyokütle karışımı

rutin olarak uygulanmaktadır (Variny vd., 2021). Ülkemiz özelinde, yerli linyitler yüksek nem ve kül içerikleri nedeniyle tek başına yakıldığında verimi düşüren unsurlar barındırmaktadır. Bu tez bulguları, uygun nem ve kül özelliklerine sahip atık biyokütlelerin linyitlere eklenmesiyle bu olumsuzlukların giderilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, özellikle enerji ormancılığı atıkları, tarımsal biyokütle atıkları, şehirselle yeşil atıklar ve orman endüstrisi artıklarının linyitlerle birlikte termik santrallerde yakılması potansiyel bir uygulama alanıdır. Bu uygulama, hem yenilenebilir enerji hedeflerine katkı sağlayacak (biyokütleden enerji üretimi) hem de fosil yakıt bağımlılığını azaltacaktır. Ayrıca, atık ahşap gibi malzemelerin yakıt olarak kullanımı, düzenli depolama sahalarına gidecek atık miktarını da azaltarak çevresel fayda sunmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, biyokütle oranının %20'ler düzeyine kadar kademeli artırılması, yanma verimliliğini iyileştirirken ciddi bir teknik problem oluşturmayabilir. Ancak daha yüksek oranlar için sistem tasarımının güncellenmesi gerekebileceği unutulmamalıdır. Sonuç olarak bu çalışma, küçük ve orta ölçekli kazanlardan büyük termik santrallere kadar geniş bir yelpazede birlikte yakma konseptinin uygulanabilir olduğunu ve özellikle atık biyokütlelerin enerjiye dönüştürülmesi için etkin bir yol sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.3. İleri Araştırma Önerileri

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut bilgilerle uyumlu olarak biyokütle-lyinyit birlikte yakma konusunda pek çok faydayı ortaya koymuştur. Bununla birlikte, konunun derinlemesine anlaşılması ve endüstriyel uygulamalara tam anlamıyla entegrasyonu için gelecekte yapılacak araştırmalarda ele alınması gereken çeşitli noktalar bulunmaktadır:

- **Daha Yüksek Biyokütle Oranları:** Bu çalışmada incelenen biyokütle katkı oranları nispeten düşük-orta aralıktadır (%5-25 arası). İleriki çalışmalarda, linyit kömürlerine daha yüksek oranlarda (örneğin %30, %40 veya daha fazla) biyokütle katılmasının etkileri araştırılmalıdır. Avrupa Birliği'nde 2030 hedefleri doğrultusunda bazı santrallerde yakıt karışımının %50'ye

kadar biyokütle olacak şekilde denenmesi planlanmaktadır. Ancak biyokütle oranı yükseldikçe kazan tasarımında yapılması gereken değişiklikler, besleme sisteminin uyumu, yanma odası sıcaklık profili ve kül oluşumu gibi konular detaylı çalışmayı gerektirir. Gelecekteki araştırmalar, yüksek biyokütle oranlarında ortaya çıkabilecek teknik kısıtları (örneğin cüruflaşma, korozyon, vb.) ve bunları önleme yöntemlerini irdelenebilir.

- **Kül ve Yanma Artığı Davranışları:** Birlikte yakma sonucu oluşan külün fiziksel ve kimyasal özellikleri, depo edilebilirlik ve yan ürün değerlendirilebilirliği açısından önem taşır. İleri araştırmalarda biyokütle- linyit külünün ergime sıcaklıkları, viskozitesi ve bileşimi analiz edilerek kül birikmesi ve cüruflaşma riskleri ortaya konulabilir. Özellikle yüksek kül içerikli herbasyöz (otsu) biyokütle türleri kullanıldığında kazan boru ve yüzeylerinde birikme potansiyeli artabilmektedir (Variny vd., 2021). Bu nedenle, farklı biyokütle türleri için optimum karışım oranları ve gerekli önlemler (kül üfleme sistemleri, katkı maddeleri kullanımı gibi) araştırılabilir. Ayrıca birlikte yakma külünün yol yapımı, çimento üretimi gibi alanlarda kullanım potansiyeli de ayrı bir araştırma konusu olabilir.
- **Emisyon ve Yanma Kinetiği Modelleri:** Biyokütle ve kömür karışımlarının yanma süreci, kompleks bir kinetik etkileşim içerir. Gelecekte, farklı karışımlar için ayrıntılı yanma kinetiği modelleri geliştirilmeli ve deneysel verilerle doğrulanmalıdır. Özellikle reaksiyon mekaniği ve radikal etkileşimleri (örneğin biyokütlenin hidrojen açısından zengin radikallerinin kömür katranlarının yanmasını kolaylaştırma mekanizması) üzerinde durulabilir. Bunun yanı sıra, NO_x oluşumu ve indirgenmesi, uçucu organik bileşikler ve partikül madde emisyonları gibi konular için birlikte yakma şartlarında kapsamlı bir modelleme çalışması yapılabilir. Bu tezde gözlemlenen NO_x azalışının mekanistik sebepleri (termal NO_x oluşumunun azalması, yakıt NO_x 'nin biyokütle sayesinde seyrelmesi vb.) derinlemesine incelenmelidir. İleri çalışmalar, deneysel emisyon ölçümleri ile HAD tabanlı sayısal modelleri bir arada kullanarak birlikte yakma sürecinin optimizasyonuna katkı sağlayabilir.

- **Yeni Teknolojiler ve Yöntemler:** Biyokütle-linyit birlikte yakma alanında, gelecekte uygulanabilecek yenilikçi teknolojiler de araştırılmalıdır. Örneğin, oksijen zenginleştirmeli yakma (oxy-fuel) teknolojisinin biyokütle ile kömür karışımlarına uygulanması, CO₂ yakalama (CCS) entegrasyonu ile birlikte negatif emisyonlu enerji üretimi imkanını doğurabilir. Variny vd. (2021), birlikte yakmada oksijen destekli yakma ve uygun hava dağıtımı ile yanma veriminin artabileceğini ve NO_x emisyonlarının ek önlemlerle daha da azaltılabileceğini belirtmiştir. Gelecekteki deneyler, oksijen seviyesinin artırılması, basınçlı yakma, dolaşımli akışkan yataklı sistemler veya mikrodalga destekli yanma gibi alternatif yöntemlerin biyokütle-linyit karışımlarına etkisini inceleyebilir. Ayrıca, biyokütle ön işleme teknikleri (torrefaksiyon, peletleme, karbonizasyon vb.) uygulanarak yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ve bu işlenmiş yakıtların linyit ile birlikte performansı da araştırılmaya değerdir.
- **Yaşam Döngüsü ve Ekonomik Analiz:** Teknik araştırmaların yanı sıra, biyokütle ile kömür birlikte yakma uygulamalarının bütüncül bir değerlendirmesi için yaşam döngüsü analizi ve ekonomik fizibilite çalışmalarına ihtiyaç vardır. Gelecekteki çalışmalar, biyokütlenin temini, taşınması, hazırlanması süreçlerinde harcanan enerjiyi ve salınan emisyonları da hesaba katarak net sera gazı etkisini hesaplamalıdır. Yerel atık biyokütle kaynaklarının kullanılması, taşımayı en aza indirerek gerçekten karbon negatif veya nötr bir elektrik üretimine imkan sağlayabilir (Variny vd., 2021). Bunun rakamsal olarak ortaya konması, karar vericiler için kritik öneme sahiptir. Ekonomik açıdan ise kömür-biyokütle ortak yakıt kullanımının birim enerji maliyetine etkisi, karbon vergileri veya teşvik mekanizmaları dikkate alınarak incelenmelidir. İleri araştırmalar, birlikte yakma teknolojisinin uzun vadede sürdürülebilir bir seçenek olması için gerekli politik ve ekonomik koşulların neler olduğunu da değerlendirmelidir.

Sonuç olarak, bu tezde atık ahşap biyokütlelerin linyit kömürü ile birlikte yakılmasının yanma davranışları üzerindeki etkileri başarıyla ortaya konmuştur. Bulgular, literatürdeki genel kanıyı destekleyerek uygun koşullarda biyokütle ve kömürün birlikte yakılmasının teknik, çevresel ve ekonomik açıdan

uygulanabilir bir temiz enerji çözümü olduğunu göstermektedir. İleride yapılacak çalışmalar, yukarıda belirtilen öneriler doğrultusunda bu alandaki bilgi birikimini derinleştirecek ve biyokütle-kömür ortak yakma teknolojisinin geliştirilmesine katkı sunacaktır.

Özetle;

- Atık ahşaplar, linyite göre daha düşük alev alma ve yanma sıcaklıklarına sahiptir.
- Kimyasal işlem görmemiş ahşaplar (örneğin çam ağacı), işlem görmüş ürünlere göre daha yüksek reaktivite göstermiştir.
- Linyit oranı arttıkça, alev alma ve son yanma sıcaklıkları artmış, yanma reaktivitesi azalmıştır.
- Isıtma hızı arttıkça, yanma sıcaklıkları ve yanmanın tamamlanma süresi azalmıştır.
- Biyokütle katkısının linyitin yanma performansını iyileştirdiği ve CO₂ emisyonlarının azaltılabileceği gözlemlenmiştir.
- Daha az yanıcı ürünler, ana oksidasyon bölgesinde daha düşük ağırlık kayıpları, maks. işlenmemiş çam numunesine kıyasla işlem görmüş numuneler için ağırlık kaybı sıcaklıkları ve daha fazla kömür oluşumu. Başka bir deyişle, bu numunelerin üretimi sırasında kullanılan kimyasallar, işlem görmüş numunelerin yanıcılığında azalmaya yol açmaktadır.
- Atık ahşap örneklerinin hesaplanan yanma indeksleri, atıkların içeriklerine göre benzer eğilimler göstermiştir. Kimyasal işlem görmemiş atık ahşap örnekleri (pencere çerçevesi ve çam) için hesaplanan D_i , D_f ve S değerleri kimyasal işlem görmüş örneklerden (parke ve mobilya örnekleri) daha yüksektir. Bu nedenle, kimyasal işlem görmüş numuneler ham biyokütle numunelerinden daha düşük reaktiviteye sahiptir. Bu durum, numunelerin yanma zorluğundan kaynaklanmış ve dönüşüm sürecini tamamlamak için daha uzun bir yanma süresi ve daha yüksek bir yanma sıcaklığı ile sonuçlanmıştır.

- Atık odun örneklerinin hem DTG_{max} değerlerinin hem de tutuşma noktalarının linyit örneklerine göre daha düşük sıcaklıklarda elde edildiği sonucuna varılabilir.
- Biyokütle örneklerinin yerel linyit örneklerine göre daha reaktif olduğu görülmüştür. Buna göre, endüstriyel uygulamalarda linyitin atık odun ile karıştırılması, termokimyasal sistemlerde linyitin yanma performansını artırabilir.

Bu bulgular, biyokütle ve kömür karışımlarının çevreci enerji üretiminde potansiyel bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir.

- Çalışmanın sınırlamaları arasında sadece iki farklı yerli linyit kullanılması ve farklı atmosfer (örneğin inert ortam) şartlarında deney yapılmaması sayılabilir. Gelecek çalışmalarda farklı biyokütle türleri ve daha geniş karışım oranları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Apaydın Varol, E., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies*, 16(9), 3674.
- Bhavsar, S., Saha, U., & Basu, P. (2008). A study of biomass co-firing and ash deposition. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 639-645.
- Chen, X., Wang, Y., & Li, Z. (2023). Comprehensive characterization of agricultural waste biomass for co-combustion with coal: A TG-DSC-FTIR approach. *Fuel Processing Technology*, 241, 107643.
- Crelling, J. C., Hippo, E. J., Woerner, B. A., & West, D. P. Jr. (1992). Combustion characteristics of selected whole coals and macerals. *Fuel*, 71, 151-158.
- Deka, M., Saikia, C. N., & Baruah, K. K. (2002). Studies on thermal degradation and termite resistant properties of chemically modified wood. *Bioresource Technology*, 84(2), 151-157.
- Demirbaş, A., Kaya, S., & Öztürk, E. (2024). Combustion optimization of hazelnut shell-coal blends using thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*, 112, 101947.
- Du, S. W., Chen, W. H., & Lucas, J. (2007). Performances of pulverized coal injection in blowpipe and tuyere at various operational conditions. *Energy Conversion and Management*, 48, 2069-2076.
- Du, S. W., Chen, W. H., & Lucas, J. A. (2014). Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. *Bioresource Technology*, 161, 333-339.
- Food and Agriculture Organization. (2025). FAOSTAT database. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
- Gupta, A., Kumar, S., & Zhang, L. (2023). Utilization of biomass-coal co-combustion ash as sustainable construction material: Mechanical and microstructural analysis. *Construction and Building Materials*, 367, 130312.
- Haykırı, M., & Yaman, S. (2008). Biyokütle katkılı kömür briketlerinin termal analizleri. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 92(2), 431-435.
- Heydari, M., Rahman, M., & Gupta, R. (2015). Kinetic study and thermal decomposition behavior of lignite coal. *International Journal of Chemical Engineering*, 2015(1), 481739.
- Huang, X., Jiang, X., Han, X., & Wang, H. (2008). Combustion characteristics of fine and micro-pulverized coal in the mixture of O₂/CO₂. *Energy and Fuels*, 22, 3756-3762.

- Jia, G. (2021). Combustion characteristics and kinetic analysis of biomass pellet fuel using thermogravimetric analysis. *Processes*, 9(5), 868.
- Jiang, T. L., Chen, W. S., Tsai, M. J., & Chiu, H. H. (1995). A numerical investigation of multiple flame configurations in convective droplet gasification. *Combustion and Flame*, 103, 221-238.
- Jiang, X., Wang, C., Wang, X., Liu, Y., Song, Z., & Lin, Q. (2019). Co-combustion of coal and carbonaceous wastes: Thermogravimetric analysis. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 1-15.
- Jian-jun, L., & Xue, G. (2007). Co-firing biomass with coal: Experimental study on formation and reduction of pollutants. *Fuel*, 86(17-18), 2441-2449.
- Kaya, S., Demir, G., & Öztürk, E. (2022). Combustion characteristics of hazelnut shell-coal blends: Kinetic and thermodynamic analysis. *Fuel Processing Technology*, 235, 107387.
- Li, H., Yang, K., & Liu, Y. (2022). Catalytic NO_x reduction by biomass ash during co-combustion: Experimental and DFT study. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131156.
- Liu, X., & Yu, W. (2006). Evaluating the thermal stability of high performance fibers by TGA. *Journal of Applied Polymer Science*, 99(3), 937-944.
- Liu, Y., Chen, X., & Wang, J. (2023). Synergistic effects in corn cob-coal co-combustion: A comprehensive study using TGA, SEM and FTIR. *Energy*, 278, 127865.
- Lu, J. J., & Chen, W. H. (2015). Investigation on the ignition and burnout temperatures of bamboo and sugarcane bagasse by thermogravimetric analysis. *Applied Energy*, 160, 49-57.
- Marangwanda, G. T., Madyira, D. M., Ndungu, P. G., & Chihobo, C. H. (2021). Combustion characterisation of bituminous coal and pinus sawdust blends by use of thermo-gravimetric analysis. *Energies*, 14(22), 7547.
- Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., & Bajda, T. (2019). The impact of biomass and lignite co-combustion on emissions and ash properties. *Waste Management*, 84, 194-200.
- Mortari, D. A., Ávila, I., Dos Santos, A. M., & Crnkovic, P. M. (2010). Study of thermal decomposition and ignition temperature of bagasse, coal and their blends. *Revista de Engenharia Térmica*, 9(1-2), 81-88.
- Qin, Z., Lei, M., & Zhang, L. (2022). Thermogravimetric analysis of the co-combustion of bituminous coal, rice straw and sewage sludge. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1011(1), 012028.

- Riaza, J., Álvarez, L., Gil, M. V., Pevida, C., Pis, J. J., & Rubiera, F. (2011). Effect of oxy-fuel combustion with steam addition on coal ignition and burnout in an entrained flow reactor. *Energy*, 36, 5314-5319.
- Tutuş, A. (2010). Sarıçam odununun yanma ve kimyasal analizleri. *Biyoyakıt Teknolojileri Dergisi*, 3(1), 23-31.
- Türkiye Taş Kömürü Raporu. (2025). <https://turkiyedekomur.org/wp-content/uploads/2024/12/Ko%CC%88mu%CC%88r-Sekto%CC%88r-Raporu-2023.pdf>
- Urban, B., Shirazi, Y., Maddi, B., Viamajala, S., & Varanasi, S. (2017). Flash pyrolysis of oleaginous biomass in a fluidized-bed reactor. *Energy & Fuels*, 31, 8326-8334.
- Wang, H., Sun, L., & Yang, X. (2024). Comparative evaluation of different biomass types in coal co-combustion: Performance, emissions and ash characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113987.
- Wang, J., & Zhang, R. (2024). Artificial intelligence-assisted optimization of biomass-coal co-combustion parameters for maximum efficiency. *Applied Energy*, 353, 122065.
- Wnorowska, J., Ciukaj, S., & Kalisz, S. (2021). Thermogravimetric analysis of solid biofuels with additive under air atmosphere. *Energies*, 14(8), 2257.
- Yang, K., Zhang, R., & Li, W. (2020). Kinetic analysis and thermal behavior of lignocellulosic biomass-coal blends during combustion. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115643.
- Yang, X., Zhu, W., Li, Z., Xu, L., Zhu, S., Tian, J., Wang, Z., & Shen, B. (2024). Investigation of combustion and NO/SO₂ emission characteristics during the co-combustion process of torrefied biomass and lignite. *Molecules*, 29(12), 2728.
- Yorulmaz, S. Y., & Atımtay, A. (2010). Investigation of combustion kinetics of five waste wood samples with thermogravimetric analysis. In *Survival and sustainability* (pp. 511-520). Springer.
- Yousefzad Farrokhi, F., & Kazanç, F. (2018). Combustion behavior and kinetics of Turkish lignite blended with biomass/magnesite dust. *Journal of Energy Engineering*, 144(6), 04018064.
- Zhang, T., Jin, J., Yang, S., Hu, D., Li, G., & Jiang, J. (2009). Synthesis and characterization of fluorinated PBO with high thermal stability and low dielectric constant. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 48(6), 1114-1124.

- Zhang, Y., Liu, J., & Wang, H. (2021). Emission reduction and ash behavior during rice husk-coal co-combustion: A TG-FTIR study. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128732.
- Zhou, C., Wu, H., & Wang, G. (2006). Influence of mineral matter on reactivity and ash characteristics of coal-biomass blends during combustion. *Fuel Processing Technology*, 87(9), 793-801.

