

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE PİRİNANIN OPTİMUM OKSİ
YAKMA KOŞULLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR TORU

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE PİRİNANIN OPTİMUM OKSİ
YAKMA KOŞULLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ONUR TORU
506121039**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hanzade AÇMA

MAYIS 2015

Tüm sevenlerime,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen, geçirdiğim tüm zor anlarda manevi desteklerini her an hissettiğim saygı değer hocam Prof. Dr. Hanzade AÇMA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca; bilgi ve deneyimleriyle uygun çalışma ortamının oluşturulmasında desteklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Sadriye KÜÇÜKBAYRAK ve Prof. Dr. Serdar YAMAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmam sırasında kullandığım pirina numunelerinin sağlanması konusunda yardımcı olan Marzey A.Ş. Marmarabirlik İşletme Müdürü Çevre Yüksek Müh. Mehmet ŞEN'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımda yardımlarını ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım, Kimya Müh. Ayşen AKTÜRK'e, Kimya Yük. Müh. Seza Özge GÖNEN'e teşekkür ederim.

Özellikle son dönemde manevi desteğini yoğun olarak hissettiğim kız arkadaşım Gıda Müh. Gizem Muazzez YILMAZ'a teşekkür ederim

Beni bu günlere getiren ve hayatım boyunca bana destek olan, özellikle yüksek lisans dönemimde yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

MAYIS 2015

Onur TORU
(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KÖMÜR	3
2.1 Linyit ve Yapısı	3
2.2 Türkiye’de Linyit	4
2.3 Dünyada Linyit.....	5
2.4 Linyit Yakma Sistemleri	5
2.4.2 Sabit yatakta yakma sistemleri	6
2.4.3 Akışkan yatakta yakma sistemi	6
2.4.4 Pulverize yakıt yakma sistemi	7
3. KÖMÜRÜN YANMASI	9
3.1. Kömürün Yapısal Özellikleri	9
3.2. Kömürün Yanma Özellikleri	10
3.2.1 Tutuşma	11
3.2.2 Uçucu çıkışı	12
3.2.3 Uçucu yanması	13
3.2.4 Yarı kok yanması.....	14
4. BİYOKÜTLE ENERJİSİ	17
4.1. Biyokütle Kaynakları	18
4.2 Türkiye’nin Biyokütle Potansiyeli	19
4.3 Biyokütlenin Yapısal Özellikleri.....	21
5. BİYOKÜTLE YANMASI.....	23
6. OKSİJEN İLAVESİ İLE YAKMA.....	25
6.1. Oksijenle Yakmada NO _x Oluşumu	26
6.2 Biyokütle-Kömür Karışımlarının Kullanıldığı Oksijenli Yakma Çalışmaları	28
7. BİRLİKTE YAKMA.....	31
7.1. Kömür ve Biyokütle Yakan Sistemlerin Karşılaştırılması	31
7.2. Prina (Zeytin Küspesi) İle İlgili Literatür Çalışmaları	32
8. LİTERATÜR ÖZETİ.....	35
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
9.1. Numunelerin Hazırlanması Ve Yakılması	42
9.2. Numunelere Uygulanan Analizler.....	43
9.2.1. Isıl değer analizi	43
9.2.2 Kısa analiz	45
9.2.3 Termal analiz	47

9.2.4 Elementel analiz.....	53
10.DENEYSEL ÇALIŞMALARIN YORUMLANMASI	55
10.1.Afşin Elbistan Numunelerinin Sonuçlarının Yorumlanması.....	55
10.2.Pirina Numunesinin Sonuçlarının Yorumlanması.....	56
10.3.Termal Analiz Sonuçlarının Yorumlanması.....	58
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	85

KISALTMALAR

AE	: Afşin Elbistan
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
DTG	: Diferansiyel Termal Gravimetri
P	: Pirina
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Kurumlara Ait Linyit Rezervleri,2013 .	4
Çizelge 2. 2 TKİ Kömür Rezervleri.	5
Çizelge 4. 1 Biyokütle kaynaklarının fiziksel ve kimyasal içeriği.	19
Çizelge 4. 2 Türkiye’de yetişen bazı tarım ürünlerinin yıllık üretim miktarları.	21
Çizelge 9. 1 Numune kodları.	42
Çizelge 9. 2 Ana numunelerin ısııl değer sonuçları.	44
Çizelge 9. 3 Pirina ısııl değer analiz sonuçları.	44
Çizelge 9. 4 Afşin Elbistan ısııl değer analiz sonuçları.	45
Çizelge 9. 5 Afşin Elbistan Numunelerinin Kısa Analiz Sonuçları.	46
Çizelge 9. 6 Pirina numunelerinin kısa analiz sonuçları.	47
Çizelge 9. 7 Karışımların kısa analiz sonuçları.	47
Çizelge 9. 8 Pirina numunelerinin maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.	47
Çizelge 9. 9 Afşin Elbistan numunelerinin maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.	48
Çizelge 9. 10 Karışımların maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.	48
Çizelge 9. 11 Afşin Elbistan Numuneleri Elementel Analiz Sonuçları	54
Çizelge 9. 12 Pirina Numeleri Elementel Analiz Sonuçları	54
Çizelge 9. 13 Afşin Elbistan ve Pirina Karışımlarının Elementel Analiz Sonuçları	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Türkiye Linyit Rezervlerinin Dağılımı.....	4
Şekil 2. 2 Temel yakma sistemleri; (a) sabit yatakta yakma, (b) kabarcıklı akışkan yatakta yakma,(c)dolaşımli akışkan yatakta yakma, (d) pulverize yakıt yakma.	6
Şekil 3. 1 Kömürün varsayımsal organik yapı modeli.....	10
Şekil 3. 2 Pirolize uğrayan kömür taneciğinin (a) ilk (b) sonraki safhaları.....	11
Şekil 3. 3 Termal bozunma esnasında varsayımsal kömür yapısının kırılması	13
Şekil 3. 4 Heterojen yarı kok oksitlenme mekanizması.....	15
Şekil 3. 5 Yarı kok yanması için hız kontrol edici rejimlerde (a) reaksiyon hızı - sıcaklık ilişkisi (b) oksidant konsantrasyonu tanecik merkezinden uzaklık ilişkisi	16
Şekil 4. 1 Biyokütle oluşum, dönüşüm ve tüketim süreçler	17
Şekil 4. 2 Nişasta ve selülozun uzayda farklı dizilişleri	22
Şekil 6. 1 (a) Hava ortamında (b) Oksijen ortamında yakma sistemlerinin genel şematiği.....	25
Şekil 6. 2 NO oluşum ve indirgenme mekanizmaları	27
Şekil 9. 1 Deneysel çalışmaların akım şeması	41
Şekil 9. 2 Retsch AS 200 elek sistemi.	43
Şekil 9. 3 Yatay boru fırın.....	43
Şekil 9. 4 IKA C2000 model kalorimetre sistemi.....	44
Şekil 9. 5 Termal analiz cihazı	46
Şekil 9. 6 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DTA eğrileri.....	49
Şekil 9. 7 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DTG eğrileri.....	49
Şekil 9. 8 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DSC eğrileri.	50
Şekil 9. 9 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin TGA eğrileri.....	50
Şekil 9. 10 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.	51
Şekil 9. 11 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.	51
Şekil 9. 12 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.....	52
Şekil 9. 13 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri	52
Şekil 9. 14 Afşin Elbistan 450°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.	53
Şekil 9. 15 Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve S modülü	53

Şekil A. 1 Afşin Elbistan 450°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.....	69
Şekil A. 2 Afşin Elbistan 450°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.	69
Şekil A. 3 Afşin Elbistan 450°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.....	70
Şekil A. 4 Afşin Elbistan 500°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.....	70
Şekil A. 5 Afşin Elbistan 500°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.....	71
Şekil A. 6 Afşin Elbistan 500°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.	71
Şekil A. 7 Afşin Elbistan 500°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.....	72
Şekil A. 8 Afşin Elbistan 600°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.....	72
Şekil A. 9 Afşin Elbistan 600°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.....	73
Şekil A. 10 Afşin Elbistan 600°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.	73
Şekil A. 11 Afşin Elbistan 600°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.....	74
Şekil A. 12 Afşin Elbistan 650°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.....	74
Şekil A. 13 Afşin Elbistan 650°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.....	75
Şekil A. 14 Afşin Elbistan 650°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.	75
Şekil A. 15 Afşin Elbistan 650°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.....	76
Şekil A. 16 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi..	76
Şekil A. 17 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi..	77
Şekil A. 18 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi. .	77
Şekil A. 19 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi..	78
Şekil A. 20 Pirina 400°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi.	78
Şekil A. 21 Pirina 400°C'deki %25O ₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi.	79
Şekil A. 22 Pirina 400°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi.	79
Şekil A. 23 Pirina 400°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi.	80
Şekil A. 24 Pirina 450°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi.	80
Şekil A. 25 Pirina 450°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi.	81
Şekil A. 26 Pirina 450°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi.	81
Şekil A. 27 Pirina 450°C'deki %25 O ₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi.	82
Şekil A. 28 Karışımların DTA eğrileri.....	82
Şekil A. 29 Karışımların DTG eğrileri.....	83
Şekil A. 30 Karışımların DSC eğrileri.	83
Şekil A. 31 Karışımların TGA eğrileri.....	84

AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE PİRİNANIN OPTİMUM OKSİ YAKMA KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde ülkemiz, kullanmakta olduğu enerjinin çok büyük bir miktarını ithal etmektedir. Giderek artan enerji talebi nedeniyle, enerjide dışarı bağımlılığı her geçen gün giderek artmaktadır. Ülkemizde ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Kömür yataklarımız yaygın olmasına rağmen büyük bir kısmını ısı değeri düşük, mineral maddesi çok yüksek linyit yatakları oluşturmaktadır.

Hali hazırda bulunan linyit yataklarımızın verimli ve çevreye minimum zararlı olacak şekilde değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu süreçte kullanılan yakma yönteminin doğru seçilmesi büyük bir rol oynamaktadır. Elimizdeki kömür yataklarının en verimli değerlendirilmesi için hava fazlası ile yakma gibi geleneksel yakma yöntemleri yetersizdir. Geleneksel yakma yöntemleri yerine oksijen yakma yönteminin kullanımı giderek artmaktadır. Oksijen yakma yönteminde hava ile birlikte saf oksijen kullanıldığı için, azotun seyreltici etkisi engellenmekte ve böylece külde kalan yanmamış karbon miktarı minimum değerlere indirilebilmektedir. Ayrıca oxyfuel yöntemi sonucu, geleneksel yöntemlere göre baca gazında daha düşük bir karbondioksit oranı elde edilir. Elde edilen bu karbondioksit gazı sıkıştırma ve sıvılaştırma gibi yöntemler kullanılarak değerlendirilebilir. Oksijen yakma yöntemi, kömür yakma ile enerji üretiminden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının kontrolü için en son geliştirilen yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkemiz biyokütle enerji kaynakları bakımından da oldukça zengin bir ülkedir. Biyokütle, temel bileşenleri karbon, hidrojen ve oksijen olan, yenilenebilir nitelikteki her türlü organik madde olarak nitelendirilmektedir. Biyokütle tarımsal, endüstriyel, kentsel katı atıklar ile orman atıkları, hayvansal atıklar ve su biyokütlesinden oluşmaktadır. Biyokütle enerji kaynakları, karbondioksit açısından nötr yakıtlar olarak adlandırılır. Fosil yakıtlara göre çevreye daha az olumsuz etkileri vardır ve atmosferdeki karbondioksit emisyonlarının artışı üzerindeki etkileri yok sayılabilir.

Bu çalışmada biyokütle ve kömür karışımı birlikte yakılarak zararlı emisyon çıkışının azaltılması ve yanmayan karbonun tamamına yakın bir kısmının yakılabileceği optimum oksijen yakma koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada zeytinyağı üretiminden geriye kalan pirinanın kömüre ilave edilerek yakılması ile değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın sonucunda kömür ve biyokütle karışımının optimum oksijen yakma koşulları belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında Afşin Elbistan linyit kömürü ve Pirina numunesinin içerdiği karbonun tamamının yandığı, oksijen yakma koşullarını belirlemek amacıyla her iki numunede farklı sıcaklık ve farklı oksijen yakma koşullarında yakılmış ve optimum koşullar belirlenmiştir. Birlikte yakabilme amacıyla %5,10,25,50 oranlarında Afşin Elbistan kömürüne Pirina ilave edilerek, hazırlanan karışımların karbon içeriğinin tamamı ile yandığı oksijen yakma koşulları belirlenmiştir. Ana numunelere ve yakma sonrası geriye kalan numunelere ısı değeri, kısa analiz, termal analiz ve elementel analiz uygulanmıştır.

DETERMINING OPTIMUM OXYFUEL CONDITIONS OF AFSIN ELBISTAN LIGNITE COAL AND PIRINA

SUMMARY

Turkey is a country which imports the most part of its energy need, so the present foreign dependency on energy is gradually increasing. The fossil energy sources provide the significant portion of our energy need. On the other hand, a great deal of coal reserves in Turkey is comprised of lignites which have low calorific value and high mineral matter.

One of the most important indicators of the country's level of development is energy production. Energy production depends on availability of resources and utilization of these resources at an optimum level. With increasing population and as a result of this increasing energy needs and pollution, biomass energy is becoming popular day by day. This energy is the sustainable source for the growing energy problem. Biomass can be defined as the total mass of living organisms belonging to a community which consists of various types in a certain time. In general, biomass is herbal organism that stores solar energy by the help of photosynthesis. Solar energy is stored as chemically cellulosic and later used in different ways. As a result of being converted CO_2 into other organic compounds, solar energy is stored as fixed carbon in biomass. In photosynthesis, O_2 , necessary compound of human respiration, is released to atmosphere and CO_2 is used for generation of organic materials. This shows biomass energy can be an environmental friendly energy source. Biomass is the oldest renewable energy sources. Biomass sources are trees, tree wastes, agricultural products and wastes, domestic solid waste, animal waste, processed food waste, aquatic plants and algs. This energy is mostly produced from trees and tree wastes. Biomass is a inexhaustible energy source as long as the solar energy exists. Biomass contains stored energy. That's because plants absorb energy from the sun through the process of photosynthesis. When biomass is burned, this stored energy is released as heat. As a result of increasing population and life standards, development in industry, energy resources are running out of fastly. Fossil fuels such as coal, oil and gas are also derived from biological material, however material that absorbed CO_2 from the atmosphere many millions of years ago. Coal has different and big amount of sources and also cheaper than the other fuels so it is more preferable than the other choices. Coal is a kind of sedimentary rock which is one of the most important energy source. This fossil origin rock played an important role in the development of humanity. Although other fuels partially replace the coal, which has the most reserves, coal will be in the service of the humanity. Coal includes organic and inorganic compounds in different amounts. Basic component of coal is C. This sedimentary rock is formed through biochemical and physical changes of plant residuals in marshes. Minerals materials in coal are important because they are used for classification, testing and usage of coals.

Biomass is one of the most plentiful and well-utilised sources of renewable energy in the world. Our country has very rich biomass reserves. It is defined as any organic substance which is mainly consisted of carbon, hydrogen, and oxygen, and it is generally formed from agricultural, industrial, and municipal solid wastes, forestry remnants, animal wastes, and aquatic flora. This organic substance is carbon based and is composed of a mixture of organic molecules containing hydrogen, usually

including atoms of oxygen, often nitrogen and also small quantities of other atoms, including alkali and heavy metals. These metals are often found in functional molecules such as chlorophyll. Most of biomass species are regarded as carbon dioxide neutral. They show lower environmental impact compared to fossil fuels, and their contribution to the increase in atmospheric carbondioxide concentration is negligible. As an energy source, biomass can either be used directly by combustion to produce heat, or indirectly after converting it to various forms of biofuel.

In order to control carbondioxide emissions, co-combustion of 'carbon neutral' biomass with coal is being carried out nowadays. Carbon neutrel means, carbondioxide that is produced after burning of biomass is equilevent of carbondioxide that has been used in photosynthesis in biomass growth. Co-combustion method is a good way to convert low economic value agricultural, industrial and forest waste into energy.

Different than coal, many biomass species have different physical and chemical characteristics. Having high oxygen and volatile material content, low calorific value, low density and low fixed carbon is the most significant differences between biomass and coal. Wooden biomasses buling blocks cellulose, hemi cellulose and lignin have rather weak ether bonds than coal. With termal effects they would have high reactivity and their burning process can occur at low temperatures. Released heat and maximum temperatures are much more lower than coal.

The combustion method is very crucial in efficient utilization of the lignite reserves without causing any harmful effect to environment. In order to accomplish that it is very important to choose the right burning process for producing energy. It is inadequate to use general method of employing much more oxygen than the stoichiometric ratio for our lignites. Instead of using conventional burning methods, nowadays oxyfuel method is being used more commonly. In oxyfuel method, pure oxygen is used for oxidation makes it possible to reach very high combustion yields in association with the elimination of nitrogen which is present in air. Consequently, the unburned carbon content in ash reduces to very low levels. Carbon dioxide in the flue gas becomes concentrated since it is not diluted by nitrogen from air. Thus, carbon dioxide in the flue gas processed for underground storage and sequestration after some operations such as compression and liquefaction. So, the oxyfuel method has recently been the most striking method for controlling of carbondioxide emissions resulting from coal combustion.

Despite some of the disadvantages, coal and biomass cofiring have some good outcomes. Co-combustion of biomass with low grade coals such as lignite is a good way to reduce emissions. This process helps with disposing of waste biomass. Also co-combustion of biomass with coal, helps reduction of NO_x and SO_x levels of coal burning plants and also reduces soil and water pollution.

Co-combustion biomass with coal in different ratios will result in different outcomes that cannot be achieved by single burning of biomass or coal. This can be defined as 'synergy effect'. Synergy between different compounds will result with better result than expected results.

In this work, co-combustion of lignite / biomass blends will be carried out in order to reduce emissions and determining optimum oxyfuel burning conditions for burning

unburned carbon. For this purpose, remaining waste from olive oil production process will be added to coal and used as biomass energy source. Thus, not only the disposal of industrial wastes will be performed, but also waste material will be used for energy production.

Oxy-fuel combustion is the process of burning a fuel using pure oxygen instead of air as the primary oxidant. Since the nitrogen component of air is not heated, fuel consumption is reduced, and higher flame temperatures are possible. Historically, the primary use of oxy-fuel combustion has been in welding and cutting of metals, especially steel, since oxy-fuel allows for higher flame temperatures than can be achieved with an air-fuel flame.

There is currently research being done in firing fossil-fueled power plants with an oxygen-enriched gas mix instead of air. Almost all of the nitrogen is removed from input air, yielding a stream that is approximately 95% oxygen. Firing with pure oxygen would result in too high a flame temperature, so the mixture is diluted by mixing with recycled flue gas, or staged combustion. The recycled flue gas can also be used to carry fuel into the boiler and ensure adequate convective heat transfer to all boiler areas. Oxy-fuel combustion produces approximately 75% less flue gas than air fueled combustion and produces exhaust consisting primarily of CO₂ and H₂O.

The justification for using oxy-fuel is to produce a CO₂ rich flue gas ready for sequestration. Oxy-fuel combustion has significant advantages over traditional air-fired plants.

In the experimental process samples first dried at laboratory then grinded under 250 µm. According to main sample results by thermal analysis, starting burning temperatures were chosen. Main idea in experiments were reducing the conventional system operating temperature by using oxyfuel combustion. First oxygen content increased by %4 from normal air conditions. With %25 Oxygen content temperatures varied from 700 to 400 for Afşin Elbistan lignite samples.

In this work optimum oxyfuel conditions coal and biomass mixture is determined. This is accomplished by burning Afşin Elbistan lignite coal and Pirina biomass separately in different temperatures using different ratio of oxygen and nitrogen mixtures. After determining their optimum conditions separately, lignite and biomass were mixed with different ratios to observe their behaviour as mixture. For obtaining the maximum carbon burning yield for co-combustion, biomass was added to lignite as 5,10,25,50 percent. Calorific value, thermal analysis, short analysis and elemental analysis was done for main samples and post-burn samples.

As for the outcome of this work, optimum oxyfuel conditions for co-combustion of lignite / biomass blends is determined.

1. GİRİŞ

Ülkemiz kömür yatakları açısından zengin bir ülkedir. Kömür yataklarımızın büyük bir kısmını linyit kömürü oluşturmaktadır. Toplam linyit rezervimiz son bulunan rezervler ile birlikte 15 milyar tona ulaşmıştır. Ancak mevcut rezervin büyük bir kısmını düşük kaliteli linyit kömürleri oluşturmaktadır. Isıl değeri düşük, külü yüksek bu linyit rezervimizin uygun yakma koşullarında içerdiği karbonun tamamına yakın kısmının yakılabildiği ve çevreyi kirletmeyen yakma sistemlerinde değerlendirilmesi önemlidir. Kömürün yakılabilmesi için farklı yakma sistemleri olmasına rağmen, bu sistemlerde kömürün içerdiği karbonun tamamının yakılabilmesi ikincil veya üçüncül hava beslemelerine rağmen mümkün olmamaktadır. Karbonun bir kısmı yanar iken bir kısmı yatak külünde, bir kısmını da baca külünde kaybedilmektedir. Bu kayıpları önlemek amacıyla son yıllarda geliştirilen en önemli teknolojik uygulama oksijen yakmadır. Oksijen yakma sistemlerinde havanın içerdiği %21 oksijenin üzerinde yakıtın özelliğine bağlı olarak saf oksijen yakma sistemine hava ile birlikte ilave edilmektedir. Böylece azotun seyreltici etkisi engellenmiş olur ve karbonun tamamına yakın bir kısmı yakılarak verim artırılır. Baca gazı emisyonlarında azot oksitlerinin ve karbon monoksit miktarı azalırken karbon dioksit miktarı artmaktadır. Yakma sonunda oluşan karbondioksit farklı ayırma yöntemleri uygulanarak yer altında depolanabilir. Bu çalışmada biyokütle ve kömür karışımı birlikte yakılarak, karbonun tam yakılması için optimum koşullar belirlenmiştir.

2. KÖMÜR

Kömür madenciliği ve kömür kullanımı, her aşaması çevre üzerinde etkili ve belirli düzeylerde çevre kirliliğine neden olan faaliyetlerin bütünüdür. Özellikle son 20-25 yıl içerisinde, kömürün çevreye olan etkileri konusunda gerek teknoloji gerekse mevzuat bakımından olumlu gelişmeler elde edilmiştir. Kömürün yakılması sonucunda ortaya çıkan ve küresel ısınmaya neden olan CO₂ emisyonları ise, son yıllarda kömürden kaynaklanan çevresel sorunlar arasında ilk sırada yer almaktadır. Kömürün küresel ısınmaya yol açan etkilerinin ne şekilde giderilebileceği konusu ve bu kapsamda temiz kömür teknolojilerinin bugünü ve geleceği tüm dünyada ciddi şekilde tartışılmaktadır.

Temiz kömür teknolojileri; kömür yıkamadan sıvılaştırmaya, gazlaştırmadan karbon tutma ve depolamaya kadar çok geniş bir yelpazeyi tanımlamakla beraber, günümüz kömür endüstrisinin, kömüre dayalı elektrik santrallerinin veriminin artırılması ve söz konusu santrallerden CO₂ emisyonlarının azaltılmasıyla sınırlı bir alanda özellikle yoğunlaştığı görülmektedir [1].

2.1 Linyit ve Yapısı

Kömürün yapısında, kil, sülfat, sülfat, karbonat, klorid, silikat, oksitler, hidroksi gruplar ve fosfatlar gibi birçok mineral bulunmaktadır. Mineral yapı ise genellikle tüm inorganik mineraller ile elementlerin toplamı olarak tanımlanır. Organik olarak yapıya bağlı olan C, H, N, O ve S dışında kalan tüm elementler bu tanım kapsamına girmektedir [2].

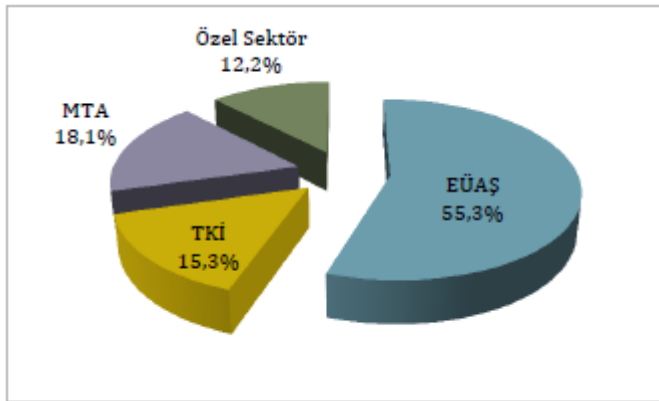
Linyitler yüksek kül ve kükürt içeriğine sahip olmaları nedeniyle, karbonizasyon, gazlaştırma ve sıvılaştırma gibi işlemlerde doğrudan kullanılması çevre ve donanım güvenliği açısından pek uygun değildir. Dünyada yüksek kaliteli yakıtlar her geçen gün azalmakta ve düşük kalitede yakıtların değerlendirilmesine yönelik çalışmalar artmaktadır [3].

2.2 Türkiye’de Linyit

Ülkemiz önemli ölçüde linyit rezervine sahiptir. 2013 yılında kurumlara ait olan linyit rezervleri Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Türkiye’de 2015 yılı itibariyle yaklaşık 13,8 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin %15,3’ü (yaklaşık 2,1 milyar ton) TKİ Kurumu’na aittir. TKİ kömür rezervlerinin hemen tamamı yapılan çalışmalarla görünür rezerv kategorisine alınmış, 2013 sonu itibariyle Çizelge 2.2’de verilmektedir. Sahip olduğumuz bu kaynak özellikle elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye’de üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %80’i fosil yakıtlar kullanılarak elde edilmektedir. Bu fosil yakıtlar arasında en yaygın olarak kullanılan linyitlerdir. Dünya linyit rezervlerinin yaklaşık % 4’ü ülkemizde bulunmaktadır. Genellikle yüksek kükürt oranına sahip olmasıyla birlikte, linyit 1100 – 4500 kcal/kg aralığında değişen enerji içeriğine sahiptir. [4,5,6].

Çizelge 2. 1 Kurumlara Ait Linyit Rezervleri,2013 .[7]

Kurumlar	Görünür	Muhtemel	Mümkün	Toplam
EÜAŞ	7.467.788.000	133.706.000	2.964.000	7.604.458.000
TKİ	1.891.434.000	184.005.000	25.030.000	2.100.469.000
MTA	2.371.000.000			2.371.000.000
Özel Sektör (2012)	1.680.000.000	v.y.	v.y.	1.680.000.000
TOPLAM	13.410.222.000	317.711.000	27.994.000	13.755.927.000



Şekil 2. 1 Türkiye Linyit Rezervlerinin Dağılımı.

Çizelge 2. 2 TKİ Kömür Rezervleri.

		Mumkün	Muhtemel	Görünür	Hazır	Toplam
ELİ	Soma		15.000	677.450	11.729	704.179
	Çan			72.853	200	73.053
	Toplam		15.000	750.303	11.929	777.232
GLİ	Tavşanlı	16.891		232.469	7.167	256.527
	Orhaneli	1.560	19.945	83.421	146	105.072
	Toplam	18.451	19.945	315.890	7.313	361.599
Kontrol Md.		6.579	122.061	710.303	83	839.026
Diğer			26.999	114.938		141.937
TOPLAM		25.030	184.005	1.891.434	19.325	2.119.794

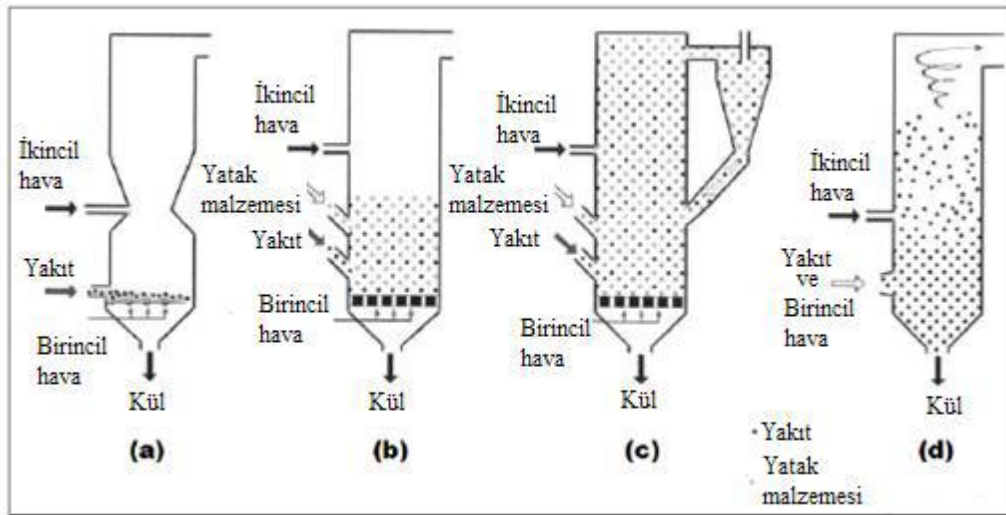
Katı yakıtlar, dünyada enerji ve kimyasal hammadde kaynağı olarak önemli bir yere sahiptirler. Türkiye gibi büyük linyit rezervlerine sahip olan ülkelerde, linyit kömürünün etkin olarak değerlendirilmesi yönünde yapılan çalışmalar giderek hız kazanmaktadır. Son zamanlarda ülkemizde yapılan çalışmalar arasında bu konular üzerine yoğunlaşmış ve piroliz, yakma teknolojileri ve gazlaştırma gibi yöntemler üzerine odaklanılmıştır [8].

2.3 Dünyada Linyit

Toplam 201 milyar ton büyüklüğündeki dünya linyit rezervlerinin en büyük bölümü 40,5 milyar ton ile Almanya’da bulunmaktadır. Bu ülkeyi 37,2 milyar ton ile Avustralya ve 30,2 milyar ton ile ABD izlemektedir. Çin (18,6 milyar ton), Sırbistan (13,4 milyar ton), Kazakistan (12,1 milyar ton) ve Rusya (10,5 milyar ton) geniş linyit rezervlerine sahip diğer ülkeler arasındadır.

2.4 Linyit Yakma Sistemleri

Linyit yakma sistemleri; Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi, sabit yatak, akışkan yatak ve pulverize yakıt yakma sistemleri şeklinde sınıflandırılmaktadır [9].



Şekil 2. 2 Temel yakma sistemleri; (a) sabit yatakta yakma, (b) kabarcıklı akışkan yatakta yakma, (c) dolaşımli akışkan yatakta yakma, (d) pulverize yakıt yakma.

2.4.2 Sabit yatakta yakma sistemleri

Izgaralı yakma sistemleri olarak da bilinen sabit veya kesikli yatakta yakma sistemleri klasik sistemler olarak adlandırılır [10]. Sabit yatak sistemlerini elle yüklemeli ve mekanik yüklemeli olarak iki ana grupta toplamak mümkün olduğu gibi büyük ve küçük kapasiteli sistemler olarak da ayırmak mümkündür. Sabit yatağın en yaygın iki türü ızgaralı yakıcı ve alttan beslemeli yakma sistemleridir.

Sabit yataklarda yanma süresi tanecik büyüklüğüne bağlı olarak dakikalardan saatlere kadar değişebilir. Sabit yatak yakma sistemlerinin üst bölümüne yerleştirilen hava jetleri giren katı yakıtın üniform ateşlenmesini sağlar. Beslenen birincil hava yatak boyunca ilerlerken kuruma, gazlaşma ve yarı kok yanması gerçekleşir. Oluşan yanabilir gazlar ise ikincil hava beslemesi ile yanar[10,11].

2.4.3 Akışkan yatakta yakma sistemi

Akışkan yatakta yanma, kömür taneciklerinin sıcak akışkanlaştırılmış kum, kül ve tutucu yatağında yanmasıdır. Dağıtıcı plakadan geçen primer hava yatak malzemesini akışkanlaştırır ve yatağa alttan veya üstten beslenen kömürün yanmasını sağlar. Yakıt ve tutucunun hava ile mükemmel bir şekilde karışması yüksek yanma ve kükürt tutma koşullarını hazırlar. Yatak sıcaklığı yatak içerisine yerleştirilen soğutma borularıyla kontrol edilir.

Akışkan yatakta yakma sisteminin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Yüksek yanma verimi (%90 - %99)

- Yüksek ısı transfer katsayısı (kompakt kazan)
- Mükemmel gaz – katı karışımı
- Yakıt hazırlama maliyetinin düşük olması
- Temiz yanma
 - Düşük yanma sıcaklığı ve basamaklı hava besleme (düşük NO_x emisyonu)
 - Yüksek yanma verimi (düşük CO emisyonu)
 - Yanma kamarasına kireçtaşı beslenmesiyle SO₂'nin yanma kamarasında tutunumu (düşük SO₂ emisyonu)

Akışkan yataklı yakıcılar atmosferik (AAYY) ve basınçlı (BAYY) olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Ayrıca akışkanlaştırma koşullarına bağlı olarak kabarcıklı (KAYY) ve dolaşimli (DAYY) olmak üzere ikiye ayrılırlar [12].

2.4.4 Pulverize yakıt yakma sistemi

Güç üretim tesislerinde kullanılan, katı yakıtın yakma havasının bir kısmı ile taşındığı, sürüklemeli sistemlere pulverize yakma sistemleri denir. Katı yakıt çok küçük boyutlara öğütülür (taneciklerin %80'i 200 µm'dan küçüktür), sonra primer hava ile yakma başlığına sürüklenir ve yanma odasına püskürtülür. Tanecik boyutu çok küçük olduğundan 1400°C'ye kadar alev sıcaklığının olduğu yakma kamarasına girdiğinde uçucu maddeler yakıttan çok çabuk ayrıldığı için taneciğin içine doğru ısınma hızı artar. Taneciklerin boyutu çok küçük olduğundan, kazan içinde kalma süreleri yanma gazlarınıninkine çok yakındır [13].

Bu yakma metodunun dezavantajı, sıcaklığın 1400°C'ye yükselmesi sonucu külde bulunan bazı minerallerin ergiyerek bir tabaka oluşturmasıdır. Kül tanecikleri kazanın konvektif ısı transfer bölümüne girdiğinde hala ergimiş halde ise, soğutma tüpleri üzerinde yapışkan tortular oluşturur ve yüksek sıcaklıkta korozyon etkisi gösterir [13].

Bu yakma sistemlerinin dışında, dolaşimli akışkan yatak sistemleri, kömür/su karışımlarının yakıldığı yakma sistemleri ve oksijen yakma sistemleri de mevcuttur.

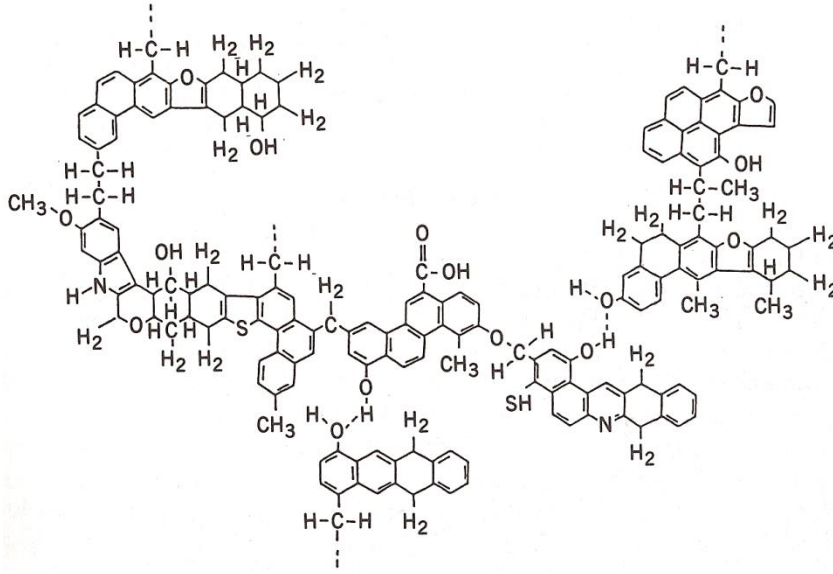
3. KÖMÜRÜN YANMASI

3.1. Kömürün Yapısal Özellikleri

Kömür, ayrışmaya ve metamorfoza uğramış bitkisel kalıntılardan oluşmuş, yanabilir bir tortul kayaç olarak tanımlanmaktadır [14,15]. Kömür, kömürleşme süreci olarak adlandırılan, milyonlarca yıl süren uzun bir zaman diliminde, yüksek basınç ve sıcaklık altında oluşmaktadır [15,16].

Kömürleşme sürecinin ilk aşaması olan *turba* oluşumunda, sulak alan (bataklık) içerisindeki bitkisel kalıntılar mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılır. Ortamda suyun bulunması, oksijen geçişini engellemekte ve organik kalıntıların tamamen okside olarak CO₂ ve H₂O'ya dönüşmesini engellemesi sebebiyle önemlidir [16]. İkinci aşamada ise, üst üste biriken katmanların yaptığı basıncın ve sıcaklığın etkisiyle *linyit* oluşur. Kömürleşme derecesinin (rank) artmasıyla altbitümlü kömür, bitümlü kömür ve daha sonra antrasit meydana gelir. Bu artış yönünde, kömürün O, H, N, nem ve genellikle uçucu madde içerikleri azalırken, karbon içeriği, aromatik yapıları ve ısı değeri artış gösterir [14, 16].

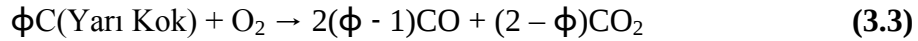
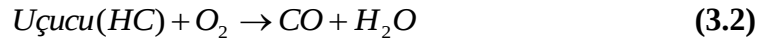
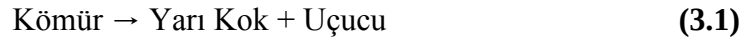
Yapı üzerine yapılan çalışmalar, kömürün kovalent çapraz bağlar ve hidrojen bağları vasıtasıyla üç boyutlu yapı kazanmış aromatik halkalardan oluştuğunu göstermektedir. Kömürdeki fonksiyonel gruplar ve heteroatomlar, esas olarak oksijen, kükürt ve azottan oluşmaktadır [16]. Çeşitli kızılötesi ölçüm sonuçları ve termal analiz verileri ışığında oluşturulmuş kömürün varsayımsal organik yapı modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Hidroksil, alifatik veya hidroaromatik hidrojen, aromatik hidrojen, alifatik karbon ve aromatik karbon ham kömür içeriğinde mevcut bulunan yapılardır [15]. Organik olarak bağ yapan C, H, O, N ve S dışındaki tüm elementler ise kömürün inorganik yapısını, karbonatlar (kalsiyum, magnezyum, demir), oksitler, sülfatlar ve silikatlar şeklinde oluşturur [17].



Şekil 3. 1 Kömürün varsayımsal organik yapı modeli.

3.2. Kömürün Yanma Özellikleri

Kömürün yanması temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır [16]:

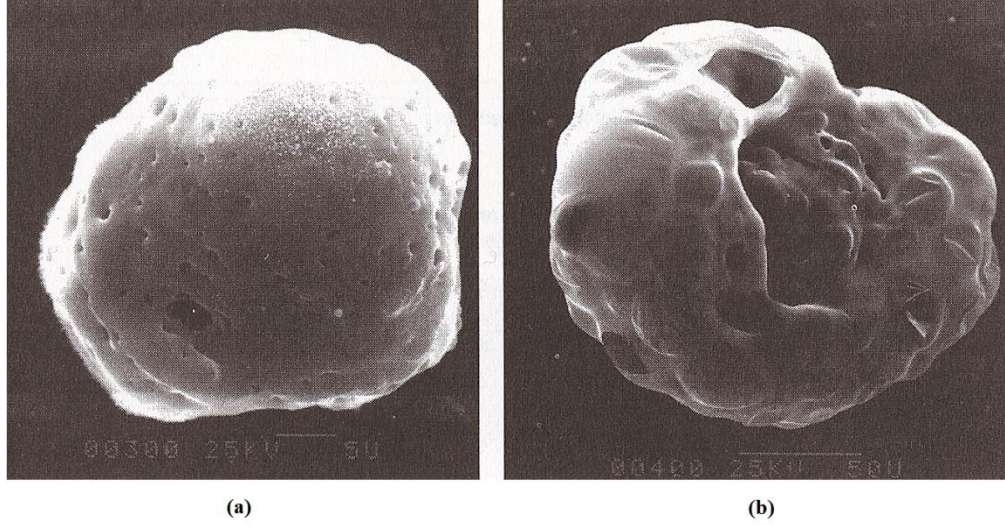


Birinci basamak kömürün uçucu ve yarı koka ayrışmasını, ikinci basamak uçucu yanmasını, üçüncü basamak ise yarı kokun tam ve kısmi yanması sonucu CO ve CO₂ oluşumunu göstermektedir. Ayrıca oluşan karbon monoksitlerin:



reaksiyonu ile yükseltgenmesi de önemli yanma reaksiyonları arasındadır [16]. Sıcaklık yükselmesinin ilk aşamalarında nem çıkışı gözlenirken, sıcaklığın daha da yükselmesiyle gazlar ve ağır katranımsı maddeler kömürden uzaklaşır. *Uçucu çıkışı* veya *piroliz* olarak ifade edilen bu ikinci kısım, kömürün tanecik boyutu, türü ve sıcaklığa bağlı olarak çok düşük düzeylerden seyredebileceği gibi kömür ağırlığının %80'inin çıkışına kadar da sürebilir [15]. Karbonca zenginleşmiş, oksijen ve hidrojenle fakirleşmiş ve hala bir miktar azot ve sülfür içeriği yanında mineral maddenin çoğunu ihtiva eden kalan bu kütle *yarı kok* olarak isimlendirilir. Uçucu

madde çıkışının fazla olması, oluşan yarı kokun yoğunluğunu düşürmekte, gözenekliliğini artırmakta ve gözenek yapısının orijinal kömürünkünden önemli ölçüde farklı olmasına neden olmaktadır. Çıkan gazlar sonucu yarı kokun porozlu bir yapıya dönüşümü Şekil 3.2’de görülmektedir [15].



Şekil 3. 2 Pirolize uğrayan kömür taneciğinin (a) ilk (b) sonraki safhaları.

Kalan yarı kok taneciklerinin oksijenle reaksiyonu heterojen olarak gerçekleşir ve bu heterojen reaksiyon uçucu çıkışı ve yanmasına göre çok daha yavaş ilerler [15,17]. Bu nedenle, kömürün yanma kinetiği büyük ölçüde yarı kokun yanma aşamasına bağlıdır [17]. Su buharı, CO_2 ve H_2 gibi reaktanlar da yarı kokla tepkimeye girer ancak bu reaksiyonlar oksijenle tepkimeye göre çok daha yavaş gerçekleşir [15].

Kömürün yanma aşamaları ardışık olarak gerçekleşse de biraz da eşzamanlıdır [17]. Uçucu çıkışı ve yarı kok oksitlenmesi, özellikle yüksek ısıtma hızlarında, aynı anda gerçekleşebilir. Yanma prosesinde olduğu gibi, uçucu çıkışı oksitleyici bir ortamda gerçekleşiyorsa, yanıcı gazlar ve katranlımsı ürünler gaz fazında oksitlenir ve sıcaklığı yükseltirler [15].

3.2.1 Tutuşma

Tutuşma, yanma reaksiyonlarının aniden hızlanması ve reaktanların çok hızlı bir şekilde ürünlere dönüşmesi olayıdır. Tutuşma, *kendiliğinden tutuşma* ve *zorlanmış tutuşma* gibi iki farklı biçimde gerçekleşebilir [18].

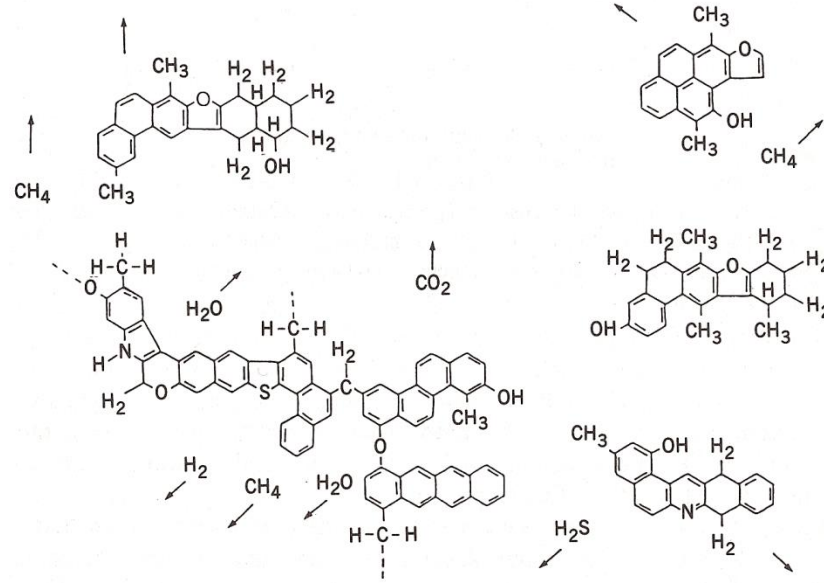
Kendiliğinden tutuşma, yakıt hava karışımının sıcak cidarlarla ısıtılması veya gaz kütlesinin adyabatik sıkıştırılmasıyla gerçekleşir. Sıcaklık arttıkça reaksiyonlar hızlanır ve tutuşma bütün hacimde aynı anda başlar.

Zorlanmış tutuşmada ise, dış kaynaktan bir enerji ilavesiyle (ör. kıvılcım) alev bir noktada başlar ve geri kalan karışım içerisinde ilerler [18].

Tutuşmanın başlangıç noktasını belirlemek zordur. Üretilen ısıнын çevreye kaybolan ısıyı aştığı nokta olarak tanımlanabileceği gibi, belirli bir sıcaklık artış hızının elde edildiği nokta olarak da ifade edilebilir [15,18]. Kömürün tutuşma sıcaklığı, kömür türü, uçucu miktarı ve tanecik boyutu gibi çeşitli parametrelere göre değişiklik gösterir [15].

3.2.2 Uçucu çıkışı

Kömürün uçucu maddesi; çoğunluğu hidrojen, karbon monoksit, metan ve diğer hidrokarbonlar gibi yanıcı gazlardan oluşan, katran buharlarını ve karbon dioksit ve su buharı gibi yanmayan gazları da içeren bir karışımdır [17]. Uçuculaşma sırasında oluşan katran, çoğunluğunu aromatik hidrokarbonların teşkil ettiği yüzlerce farklı bileşenden oluşmaktadır [15]. Karbonizasyon dereceleri farklı olan kömürlerin uçucu maddelerinin bileşimleri ve miktarları da önemli farklılıklar gösterir. Kömürün karbonizasyon derecesi, yani yaşı arttıkça, ısındığında çıkan uçucu maddenin miktarı ve içerisindeki yanmayan gaz oranı azalır [17]. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte termal bozunmaya uğrayan kömür yapısı Şekil 3.3'te görülmektedir. Şekil 3.2 ile kıyaslandığında bazı uçucu maddelerin oluşum mekanizmaları (karboksil grubundan CO₂ çıkışı gibi) görülebilir [16].



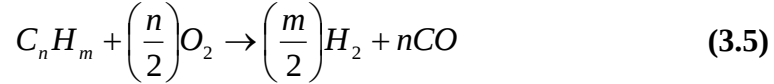
Şekil 3. 3 Termal bozunma esnasında varsayımsal kömür yapısının kırılması.

Uçuculaşma sırasında yarı kokun iç yüzeyi, ikincil reaksiyonların meydana geldiği bir site görevi görür. Oluşan piroliz ürünleri yarı kok merkezinden dışarı doğru ilerlerken meydana gelen polimerleşme gibi ikincil reaksiyonlar sonucunda karbon birikmesi gözlenenebilir. Bu yüzden, daha büyük taneciklerde daha fazla birikme meydana gelirken, daha az uçucu çıkışı gözlenir [15].

3.2.3 Uçucu yanması

Kömürün ayrışması sonucu çıkan uçucu madde, ortam tutuşma sıcaklıkları üzerindeyse yanmaya başlar. Uçucu maddenin yanması sırasında; oksijenle birleşen hidrokarbon moleküllerinin kararlı olmayan hidroksil bileşiklerine dönüştüğü, bunların da parçalanarak aldehitleri oluşturduğu, aldehitlerin ise oksitlenerek karbon monoksit ve hidrojene ayrıştığı saptanmıştır [17]. Uçucu yanma mekanizmasının kontrolü; NO_x oluşumunun kontrolü, is oluşumunun engellenmesi, alev kararlılığının sağlanması ve yarı kokun tutuşması konularıyla ilişkili olması açısından gereklidir. Uçucu yanması sonucu sıcaklığın yükselmesi yarı kokun tutuşması bakımından önem arz etmektedir [15]. Hızlı ısınma, yakıt-oksijen temasının yeterince sağlanamaması veya ortamdaki oksijenin yetersiz oluşu gibi durumlarda hidrokarbonlar hidroksil bileşenlerine dönüşme yerine, karbon ve hidrojene ayrışır. Bu olay, yanmayan karbon taneciklerinin birleşerek is oluşturmaya neden olmaktadır [17].

Birçok farklı hidrokarbondan oluşan uçucu maddenin yanma kinetiğini incelemek zor olsa da çeşitli pratik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu amaçla hidrokarbonların tükenmesini gösterme amacıyla bir C_nH_m temsili-molekülü seçilir ve bu molekülün oksijenle tepkimesi üzerinden bir global reaksiyon hızı hesaplanır. Bu noktada önemli olan uçucuları temsil edecek uygun karbon/hidrojen (n/m) oranının belirlenebilmesidir [15]. Siminski ve arkadaşları tarafından, uçucu yanması için:



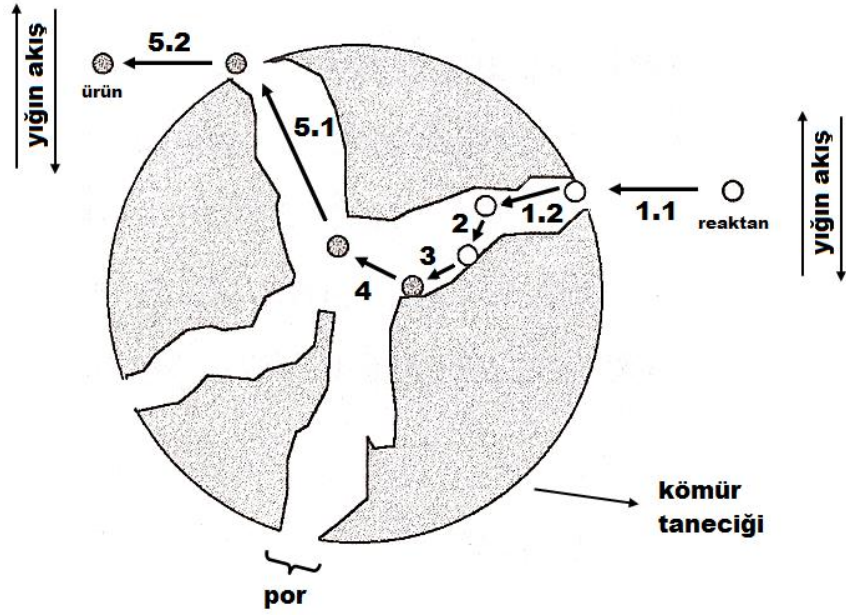
reaksiyonu önerilmiş ve reaksiyon hızı:

$$\frac{dC_H}{dt} = -ATP^{0.3}(C_H)^{0.5}(C_O)\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3.6)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada, C_H ve C_O hidrokarbon ve oksijen molar konsantrasyonları, T sıcaklık, P basınç, A ise uzun zincirli hidrokarbonlar için 59.8, siklik hidrokarbonlar için 2.07×10^4 olan bir katsayıdır [15,19].

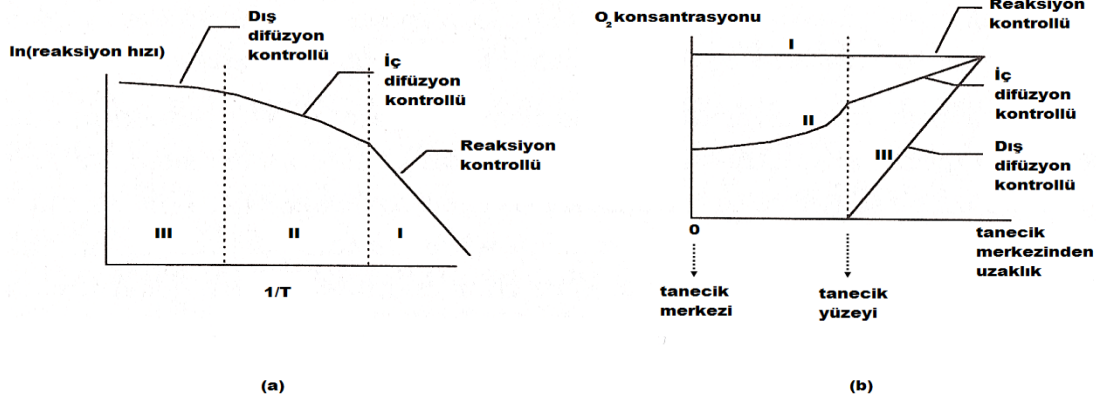
3.2.4 Yarı kok yanması

Heterojen yarı kok yanması; difüzyon, adsorbsiyon, reaksiyon, desorbsiyon ve tekrar difüzyon aşamaları ile gerçekleşir. Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi, öncelikle reaktan (O_2 , H_2O , CO_2 ve H_2) yığın akış içerisinde kömür taneciği dış yüzeyine difüze olmakta (1.1, dış difüzyon) ve daha sonra difüzyon por içerisinde (1.2, iç difüzyon) devam etmektedir. Reaktanın yüzeye adsorblanmasının (2) ardından reaktan, reaksiyona girerek (3) ürünü oluşturur. Yüzeyden desorbe olan (4) ürün gaz faza geçer ve önce por boyunca (5.1), tanecik dış yüzeyine ulaştıktan sonra ise yığın akışa doğru (5.2) difüze olur [15].



Şekil 3. 4 Heterojen yarı kok oksitlenme mekanizması.

Yarı kok oksitlenmesinde hız sınırlayıcı adım kimyasal (adsorbsiyon, reaksiyon veya desorbsiyon adımları) olabileceği gibi, gaz difüzyonu (iç veya dış difüzyon) olabilmektedir. Aktivasyon enerjisinin ve tepkime mertebesinin kontrol edici adıma bağlı olarak değiştiği saptanmıştır [17,21]. Birçok araştırmacının incelemeleri, hız kontrolünün nasıl gerçekleşeceğini belirleyen üç farklı sıcaklık bölgesinin varlığını tespit etmişlerdir [15,22,23]. Şekil 3.5'te görülen bu bölgelerden düşük sıcaklık bölgesinde (bölge I), oksidant yarı kok porlarına kolayca difüze olabilmekte ve toplam yarı kok reaksiyonu kimyasal kinetik kontrollü gerçekleşmektedir. Orta sıcaklık bölgesinde (bölge II), kimyasal reaksiyon hızı, tanecik merkezinde oksidant konsantrasyonunu sıfıra düşürecek yüksekliktedir, hız ise kinetik ve difüzyonun birlikte kontrolü altındadır. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise (bölge III), kimyasal reaksiyon, tanecik yüzeyinde oksidant konsantrasyonunun sıfır kabul edilebileceği bir yükseklikteki bir hızda yürür, dolayısıyla toplam yarı kok reaksiyonu, yığın akıştan tanecik yüzeyine difüzyon (dış difüzyon) kontrolü altındadır [15].



Şekil 3. 5 Yarı kok yanması için hız kontrol edici rejimlerde (a) reaksiyon hızı - sıcaklık ilişkisi (b) oksidant konsantrasyonu tanecik merkezinden uzaklık ilişkisi.

Yarı kokun oksidasyonu; oluştuğu kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerine, tanecik çapına, minerallerin etkisine, tepkimeler sırasında yüzey alanında meydana gelen değişikliklere, yarı kokun parçalanmasına ve yakıcının sıcaklık ile basıncına bağlı olarak değişmektedir. Çıkan uçucu madde miktarı da, yarı kokun gözenekliliğini artırması nedeniyle oksidasyonda önemlidir [17]. Kömürün yanması ile ilgili olarak yapılan çalışmalar sonucunda birçok mekanizma ileri sürülmüş olmasına rağmen hiçbiri bütün kömür türleri için genelleştirilememiş, hesaplanan kinetik parametreler incelenen kömürlerin özelliklerine göre farklılık göstermiştir [17,21]. Tepkime rejiminin çalışma koşullarına bağlı olması, tepkime ilerledikçe kömürün gözenek yapısında değişiklik olması ve kömür ile çevresindeki gaz arasında oluşan sıcaklık gradiyeni, kömürün yanmasının kinetik analizini güçleştiren olaylardır [17,20].

Kömür yanmasını tanımlayan kinetik parametreler, yanma sırasında kömürdeki ağırlık değişiminin zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedildiği TG verileriyle hesaplanabilmektedir [17].

4. BİYOKÜTLE ENERJİSİ

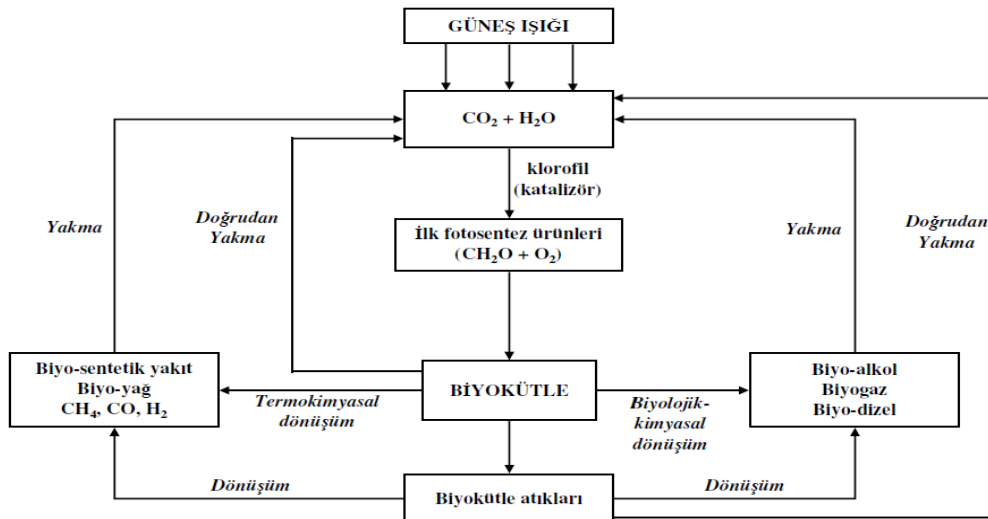
Biyokütle terimi, biyolojik her türlü maddeyi tanımlamak amacıyla kullanılır [24]. Diğer bir deyişle, canlı organizma kaynaklı ürün ve artıklar biyokütle olarak adlandırılır.

Biyokütle oluşumunun ana basamağı fotosentez sürecidir.



eşitliğiyle ifade edilir. CH_2O temel organik yapıdır ve güneş enerjisi bu organik yapı içerisinde kimyasal enerji olarak depolanır [25].

Biyokütle enerjisi, doğrudan yakılarak (ısıtma ve pişirme amaçlı odun yakılması v.b.) kullanılabileceği gibi, sıvı veya gaz yakıtlara (şekerden alkol veya hayvansal atıklardan biyogaz eldesi gibi) dönüştürülerek de faydalanılabilir. Biyokütle den termokimyasal proseslerle sıvı, katı ve gaz ürünler üretmek mümkündür [24]. Biyokütlenin oluşum, dönüşüm ve tüketim süreçleri Şekil 4.1’de özetlenmiştir.



Şekil 4. 1 Biyokütle oluşum, dönüşüm ve tüketim süreçleri. [24]

Biyokütlenin yakıt olarak kullanımı, birçok açıdan önem taşımaktadır. Bunlardan başlıcaları ise şunlardır:

- Biyokütlenin, yenilenebilir ve nispeten çevre dostu bir yakıt olması [24,26].
- Biyokütlenin karbon-nötr bir yakıt türü olarak kabul edilmesi nedeniyle, karbon dioksit salınımını artırıcı etki yapmaması [24,26].
- Biyokütlenin ihmal edilebilir düzeyde kükürt içermesi [24].
- Biyokütle yanması sonucu, kömüre kıyasla çok daha düşük düzeyde kül çıkması ve çıkan külün tarlalarda toprağa katkı olarak kullanılabilmesi [26].
- Atık yakılmasının, özellikle kentlerde, enerji eldesi yanında kentsel atıkların bertarafı açısından da önem arz etmesi [26].

4.1. Biyokütle Kaynakları

Enerji amaçlı kullanılan biyokütle, kullanım yeri ve amacına göre, geleneksel ve modern olmak üzere iki ana kategoride toplanabilir. Geleneksel biyokütleyi, evsel amaçlı kullanılan ve gelişmekte olan ülkelerde daha yaygın olan ve soba ile ocaklarda yakılan odun, tezek, tarımsal atık v.b. oluşturmaktadır. Modern biyokütle ise, daha büyük ölçekte kullanılan ve konvansiyonel enerji kaynaklarının yerini alması hedeflenen kaynaklardır. Modern biyokütlenin kullanıldığı uygulamalarda, odun ve atıkların yanı sıra “enerji bitkileri” adı verilen ve enerji üretim amacıyla hasat edilen ürünlerden de faydalanılmaktadır [24].

Biyokütle, dünya enerji tüketiminde % 14'lük payla kömür, petrol ve doğalgazdan sonra dördüncü sırayı alırken, bu oranın büyük bir kısmını, gelişmekte olan ülkelerdeki kırsal nüfusun geleneksel biyokütle kullanımı oluşturmaktadır [24,26]. Türkiye özelinde ise, evsel enerji tüketimi toplam enerji tüketiminde %52'lik paya sahipken, bu oranın %37'sini biyokütle esaslı yakıtlar oluşturmaktadır [27]. Türkiye'nin modern biyokütle uygulamaları ise proje aşamasındadır [28].

Biyokütle kaynakları türlerine göre ise üç grupta değerlendirilebilir [29]:

- Atıklar: Tarımsal ürünlerin atıkları, tarımsal ürünlerin işlenmesinin sonucu çıkan atıklar, hasat artıkları, şehirsal odun atıkları ve organik atıklar.
- Orman ürünleri: Odun, tomruklama artıkları, talaş, çalı v.b.
- Enerji mahsulleri: Kısa dönemli odunsu ürünler, otsu ürünler, çim, mısır, buğday, arpa, şeker kamışı, şeker pancarı, soya, ayçiçeği v.b.

Çizelge 4. 1 Biyokütle kaynaklarının fiziksel ve kimyasal içeriği.[30]

	Odun	Tahıl	Kentsel Atık	Hayvansal Atıklar (Gübre)
Karbon(%)	50,0-53,0	45,0	47,6	35,1
Hidrojen (%)	5,8-7,0	5,8	6,0	5,3
Azot(%)	0-0,3	2,4	1,2	2,5
Kükürt(%)	0-0,1	0	0,3	0,4
Oksijen(%)	38,0-44,0	42,5	32,9	38,7
Uçucu Madde(%)	77,1-87,0	80,0	77,0	76,5
Sabit Karbon(%)	13,0-21,0	0	11,0	0
Kül(%)	0,1-2,0	4,0	12,0	23,5
Nem(%)	25,6-60,0	16,0	20,0	7,0-35,0
H/C Oranı	1,4-1,6	1,5	1,5	1,8
Isıl Değer (MJ/Kg) (Kuru)	19,8-21,0	16,7	19,0	13,4

4.2 Türkiye'nin Biyokütle Potansiyeli

Biyokütle enerjisi Türkiye'de klasik yöntemle dayanılarak, daha çok ticari olmayan yakıt biçiminde kullanılmakta ve yerli enerji üretiminin dörtte birini karşılamaktadır [31]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, odun ile hayvan ve bitki atıklarını kullanan klasik biyokütle enerji üretiminin 2020 yılında 7530 Btep olmasını planlamıştır. 2000 yılında 17 Btep ile başlayan modern biyokütle üretimi ise hiç öngörülmemiştir. Oysa ticari olmayan klasik biyokütle enerji üretiminin giderek azaltılması ve modern biyokütle enerji üretimine başlanarak bu üretimin artırılması gerekir [32,33].

Modern biyokütle enerjisi kullanımına geçilmesi ülke ekonomisi ve çevre kirliliği açısından önem taşımaktadır. Birçok ülke bugün kendi ekolojik koşullarına göre en uygun ve en ekonomik tarımsal ürünlerden alternatif enerji kaynağı sağlamaktadır.

Türkiye de bu potansiyele, ekolojik yapıya sahip ülkeler arasındadır [34]. Türkiye biyokütle materyal üretimi açısından, güneşlenme ve alan kullanılabilirliği, su kaynakları, iklim koşulları gibi özellikleri uygun olan ülkedir. Modern biyokütle teknikleri kapsamında, enerji ormancılığı ve enerji bitkileri tarımından yararlanılması gerekmektedir. Biyokütle enerji kapsamında, çöp termik santralleri de yaygınlaştırılmalıdır [31].

Türkiye’ de enerji ormancılığı yönünden ekonomik değeri yüksek ve hızlı büyüyen yerli ağaç türleri arasında, akkavak, titrek kavak, kızılğaç, kızıl çam, meşe, dişbudak, fıstık çamı, karaçam, sedir ve servi ağaçlarını saymak olanaklıdır. Türkiye ortamında yetişecek yabancı kökenli ağaçlar arasında ise okaliptüs, papulus euramericana, pinus pinaster, acacia cynophilla gibi türleri saymak olanaklıdır. Burada kavak, söğüt gibi oldukça fazla su isteyen ağaçların yanı sıra, oldukça kurak alanlarda yetişebilecek ağaçlara da önem verilmesi gerekmektedir [34]. Türkiye' de enerji ormancılığı için uygun alanın %15'i değerlendirilmiş olup, geri kalan %85 alan uygulama beklemektedir [31].

Modern biyokütle için enerji bitkileri tarımı, enerji planlaması ve tarımsal üretim planlaması kapsamında birlikte ele alınmalıdır. Türkiye' de kültürel yetiştiriciliğe ve gıda üretimi dışında fotosentezle kazanılabilecek enerjiye bağlı olarak biyokütle enerji brüt potansiyeli teorik olarak 135-150 Mtep/yıl kadar hesaplanmakla birlikte, kayıplar düşüldükten sonra net değer 90 Mtep/yıl olacağı varsayılmaktadır. Ancak, ülkenin tüm yetiştiricilik alanlarının yıl boyu yalnızca biyokütle yakıt üretim amacıyla kullanılması olanaklı değildir.

Olabilecek en üst düzeydeki yetiştiriciliğe göre teknik potansiyel 40 Mtep/yıl düzeyinde bulunmaktadır. Ekonomik sınırlamalarla 25 Mtep/yıl değeri, Türkiye'nin ekonomik biyokütle enerji potansiyeli alınabilir [31,35].

Senelik ürünler biyokütle potansiyelinde önemli bir kısmı teşkil etmektedir. Türkiye’de yetişen belli başlı tarım ürünlerinin 2014 yılı üretim miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Türkiye’de yetişen bazı tarım ürünlerinin yıllık üretim miktarları.[36]

Ürün adı	Ekilen alan(dekar)	Hasat edilen alan(dekar)	Üretim(ton)	Verim(kg/da)
Arpa	26.075.982	25.485.773	5.819.000	228
Ayçiçeği	5.524.651	5.496.827	1.480.000	269
Buğday	66.367.448	65.493.287	15.700.000	240
Çavdar	1.150.800	1.131.764	300.000	265
Çeltik	1.108.844	1.086.487	830.000	764
Darı	26.672	26.372	6.744	256
Fasulye	911.103	904.496	215.000	238
Kenevir	10	10	1	100
Mısır	6.586.450	6.556.627	5.950.000	907
Nohut	3.885.175	3.881.693	450.000	116

4.3 Biyokütlenin Yapısal Özellikleri

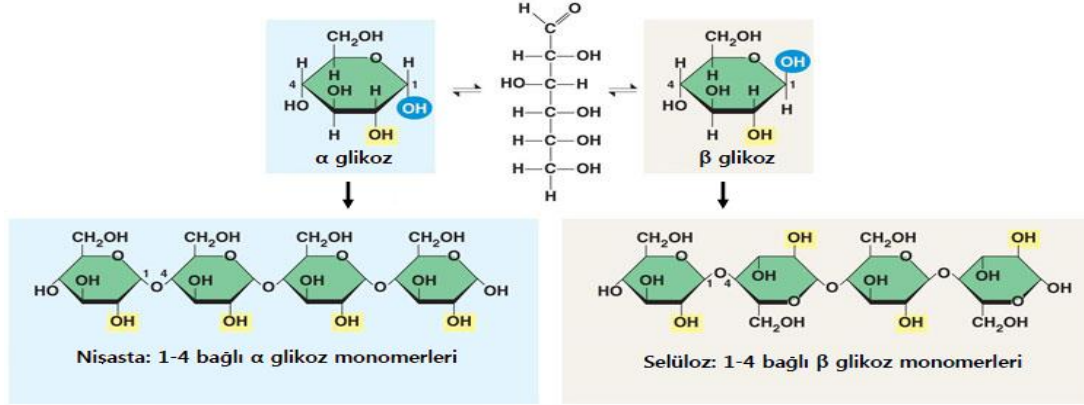
Biyokütle, genel olarak, %75-90 oranında şeker türleri (karbonhidratlar), %10-20 oranında ise lignin içerir [37].

Karbonhidrat içeriği, basit yapılı şekerler olan sakkaritler (glikoz, fruktoz) ve polimerik yapılı olan polisakkaritlerden (nişasta, selüloz, hemiselüloz) oluşmaktadır [37].

Nişasta, bitkilerin tohum ve kök gibi depolayıcı dokularında biriken, glikoz monomerlerinden oluşmuş düz ve dallı zincirler içeren bir polisakkarittir. Selüloz kadar kimyasal direnç göstermez, bu yüzden seyreltik asit ve enzimlerle daha kolay hidrolize edilebilir [37].

Selüloz da düz zincirler içeren bir glikoz polimeridir ve bir zinciri 10000 taneye kadar monomer içerebilmekle beraber ortalama bir selüloz zincirinin ağırlığı 100000 civarındadır [38,39]. Aynı monomerlerden oluşmuş olan nişasta ve selülozu ayıran fark ise, Şekil 4.2.’de görüldüğü gibi, nişastada aynı yöne bakan H gruplarının (α glikoz), selülozda farklı yönere bakmasıdır (β glikoz) [40]. Selüloz zincirlerinin konformasyonu, molekül-içi ve moleküller-arası kuvvetli hidrojen bağları yapacak

şekildedir. Bu yüzden, selüloz molekülleri bir yığın oluşturacak şekilde bir arada dururlar. Yüksek kristallliğe sahip bu yapı, bitkisel hücre duvarlarında yüksek mekanik dayanıklılığın nedeni olan selüloz liflerini oluştururken, asidik ve enzimatik hidrolize karşı direncin ve birçok çözücünde çözünmemenin de sebebini açıklamaktadır [38].



Şekil 4. 2 Nişasta ve selülozun uzayda farklı dizilişleri.

Hemiselüloz ise farklı şeker türlerinden oluşan, ortalama zincir ağırlığı 30000 civarında olan bir polisakkarittir ve selülozla beraber hücre duvarında bulunur [39]. Hemiselülozun çözünübilirliği selüloza göre daha fazla (seyreltik alkalın çözeltilerinde çözünebilirler) ve kimyasal direnci de daha azdır [37].

Lignin, çok dallanmış aromatik polimerlerdir ve belirli biyokütlelerin (özellik odunsu türlerin) hücre duvarlarında ve genellikle selüloz liflerinin yanında, onlarla lignoselülozik kompleksler oluşturacak şekilde bulunurlar [39]. Lignin, selülozdan daha kolay çözünebilirken, hidrolize ve mikrobiyal bozunmaya karşı direnç gösterir [37].

5. BİYOKÜTLE YANMASI

Biyokütlenin enerji dönüşümü yapılmaksızın doğrudan yakılması, enerjisinin mevcut teknolojiler kullanılarak pratik bir biçimde eldesini sağlaması bakımından avantajlıdır [37].

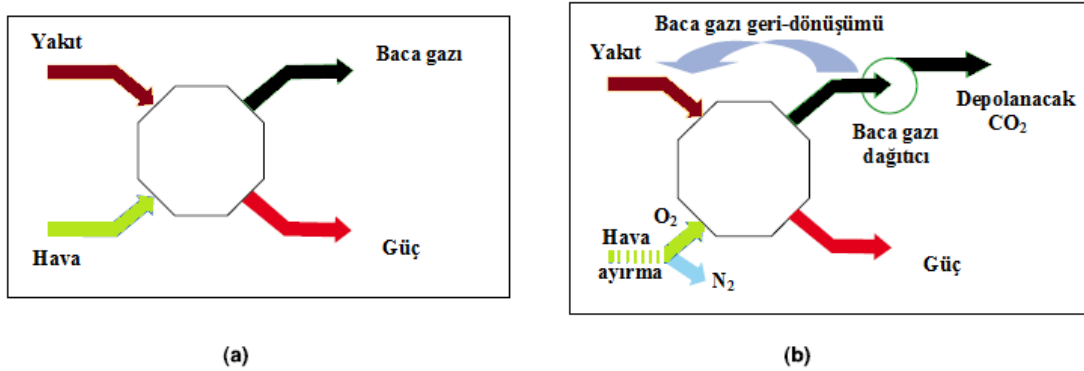
Kömürün yanması esnasında olduğu gibi nem çıkışının ardından uçucu madde çıkışı gerçekleşir. Uçucu madde gaz fazında yanar ve ardında yarı ok olarak isimlendirilen karbonca zengin gözenekli kısım kalır. Ardından yarı kok yanması gerçekleşir. Biyokütle yanması esnasında, terpenler gibi yüksek enerjili uçucular gaz faza geçer ve burada yanarlar [25]. Biyokütlenin genel olarak uçucu maddesi yüksektir ve en fazla ağırlık kaybı uçucu madde çıkışı esnasında görülür [41]. Biyokütlenin lignoselüloz içeriği, yüksek sıcaklık altında ayrışır ve meydana gelen piroliz ürünleri de gaz fazda yanar. Kalan yarı kok ise, kömürün yanmasında olduğu gibi, daha yavaş bir hızda oksidasyonunu sürdürür. Yanma sırasında selüloz, yanabilir ve yanamaz (su ve CO₂ gibi) uçuculara dönüşürken, lignin daha çok çar içerisinde kalır [25]. Yapılan bir çalışmada, lignin içeriği ile sabit karbon içeriğinin doğru orantılı olduğu görülmüştür [42].

Biyokütle yakma sistemlerinin, ısı ve/veya güç eldesi amaçlı, evsel, bölgesel ve endüstriyel çeşitli boyutlarda uygulamaları vardır. Evsel biyokütle kullanımının yaygın bir örneği olan odun yakıtlı soba verimliliği, şöminelerde %13 civarında seyrederken, katalitik odun sobalarında %75'lere ulaşmakta, odunun nem içeriğinin artışı ile bu değerler düşmektedir. Biyokütle yakışlı güç üretim tesislerin verimliliği ise %20'den %40'a kadar değişebilirken, kojenerasyon sistemlerinde bu değerler yükselir. Tesis kapasitesini ise yerel biyokütle kaynakları belirler ve genellikle 25 MW'ın altındadır, ancak güç tesisine ayrılmış bir biyokütle kaynağının olduğu durumlarda daha yüksek kapasiteli tesisler kurulabilir [25].

6. OKSİJEN İLAVESİ İLE YAKMA

Konvansiyonel yakma sistemlerinde hava yaygın olarak kullanılmaktadır. Sera gazlarıyla mücadele amacı ile yanma sonucu oluşan karbondioksitin uzaklaştırılmasının amaçlandığı teknolojilerde, baca gazındaki havadan kaynaklanan yüksek azot derişimi, karbondioksitin ayrıştırılmasını daha zor ve maliyetli kılmaktadır. Ayrıca, yanma sırasında NO_x oluşumu, havayla yakma sistemlerinde önemli bir çevresel sorunu oluşturmaktadır.

Oksitleyici olarak hava yerine oksijenin kullanıldığı oksijenli yakma sistemlerinde ise temel hedef, sera etkisi yapan gazların baca gazındaki derişimlerini azaltarak, çoğunlukla CO_2 ve H_2O içeren baca gazı eldesidir. Bu içeriğe sahip bir baca gazı, CO_2 'nin ayrıştırılması ve depolanmaya hazır konsantre karbondioksit akım eldesini kolaylaştırmaktadır [43,44]. Ayrıca oksijenle yakma sistemlerinde, NO_x oluşumu da düşük seviyelerde tutulabilmektedir [34]. Hava ve oksijen ortamında yakma sistemlerinin şematiği Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6. 1 (a) Hava ortamında (b) Oksijen ortamında yakma sistemlerinin genel şematiği.

Yüksek saflıktaki oksijenin yakıcı olarak kullanılması, yanma odasında hava ile yakma sistemlerine göre daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesi anlamına gelmektedir. Birçok uygulamada yüksek sıcaklık, termal verimliliği artırması bakımından avantajlıdır ancak yüksek sıcaklığa dayanıklılığı olan maddelerin bulunması ve maliyetli olması açısından sorun getirmektedir. Bu nedenle, sıcaklık değerlerini daha aşağı çekmek için, Şekil 6.1'de görüldüğü gibi, baca gazının bir

miktarı yanma ortamına geri yollanarak saf oksijenli ortam seyreltilmektedir [44]. Geri dönüşüm miktarının ne kadar olacağı konusunda ise çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Oksijenle yakma sonrası CO₂ ayırma üzerine yapılan çalışmalarda bu miktarın baca gazı debisinin 2/3'ü kadarı olduğu belirtilmektedir [45,46].

Oksijenle gerçekleştirilen kömür yakma sistemlerindeki, yanma prosesi içerisinde de birçok değişimler gerçekleşmektedir. Oksijenle kömürün yakılması prosesindeki, hava ile yakma sistemlerindeki göre farklılık gösteren özellikler ana olarak oksidize akımlarının kimyasal kompozisyonunun değişiminden kaynaklanmaktadır. Oksi yakma prosesinde, genel yakıcı oksijen giriş konsantrasyonu geri beslenen baca gazı ve hava ayırma ünitesinden gelen oksijen ile kolayca ayarlanabilir. Ayrıca oksi-yakma sistemlerinde CO₂ konsantrasyonları yüksek değerlerdedir. Bu durumda CO₂'nin kimyasal etkisi O₂'ye göre daha azdır. Ancak CO₂'nin ısı kapasitesi ve gaz taşınım özellikleri üzerinde etkisi yüksektir ve bu nedenle yakma prosesine büyük etki etmektedir [47].

6.1. Oksijenle Yakmada NO_x Oluşumu

Boylerde gerçekleşen yanma sonucu oluşan NO_x'in büyük çoğunluğunu NO oluşturmaktadır [48]. NO oluşumu ise:

- Havadaki oksijen atomlarıyla moleküler azotun yüksek sıcaklıklarda tepkimesi (termal-NO)
- Yanma prosesinde yakıt içerisindeki azotun oksidasyonu (yakıt-NO)
- Hidrokarbon serbest radikali ve moleküler azotun tepkimesi (prompt-NO)

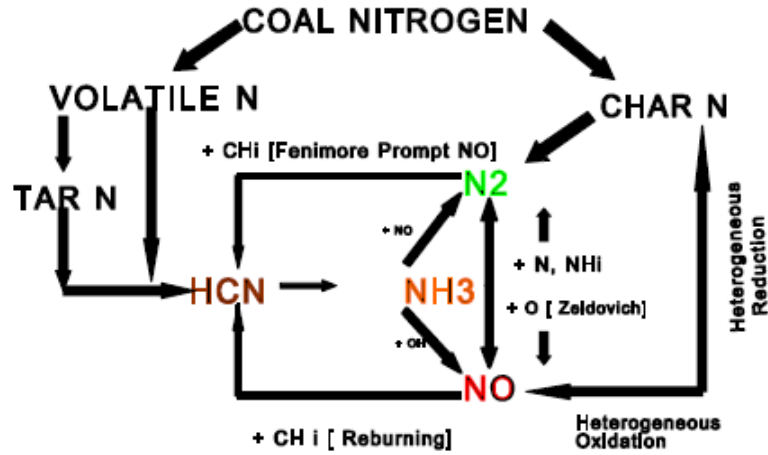
şeklinde, üç farklı yolla gerçekleşmektedir [14]. Moleküler N₂ ve O₂'nin reaksiyonu sonucu oluşan termal-NO için Zeldovich tarafından:



şeklinde önerilen reaksiyon mekanizması sıcaklığa oldukça bağımlıdır ve 1500°C derece üzerinde önem kazanmaktadır [48]. Dolayısıyla, bu sıcaklıklara çıkmadığı sürece termal-NO oluşumu NO emisyonunda baskın bir unsur olmamaktadır.

Prompt-NO da, termal-NO gibi serbest azot miktarıyla ilişkilidir ve oluşan azot oksitler içindeki miktarı oldukça düşüktür. Bu nedenlerden ötürü, kömürün hava ortamında yanması sırasında oluşan NO miktarının yaklaşık %50-90'ı ise yakıt-NO'dur [14]. Oksijenle yakmada ise, beslenen oksijen akımı içerisindeki moleküler azotun çok düşük seviyelerde olması da eklenince, termal NO mekanizması daha da önemsiz kalmakta ve yakıt-NO oluşumu NO emisyonunu belirleyen baskın unsur olmaktadır [48].

Yakıt bünyesinde bulunan azot, moleküler azota oranla çok daha kararsızdır ve bağ parçalanma enerjisi, moleküler azotun %25 ila %67'si civarındadır [14]. Dönüşümü incelendiğinde, öncelikle, yakıtın pirolize uğraması sonucu, uçucu-N (HCN, NH₃ gibi) ve yarı kok-N olarak ikiye ayrıldığı görülür. Uçucu-N ve yarı kok-N, bir dizi reaksiyon sonunda NO ve N₂'ye dönüşür [48].



Şekil 6. 2 NO oluşum ve indirgenme mekanizmaları.

Oluşan NO ise:



reaksiyonu ile indirgenir. Burada XO, NO indirgeyici her çeşit reaktanı (CO gibi) ve hidrokarbonları temsil etmektedir. Bu noktada önemli olan, hava ve oksijen ortamlarında yakma sonucu bu reaksiyonun ne oranda gerçekleştiğidir. Oksijenle yakmada, NO_x'in baca gazı geridönüşüm akımı içerisinde yanma odasına dönüşü, hidrokarbonlarla NO indirgenme reaksiyonlarının artışına neden olmakta ve geridönüşümlü oksijenle yakma sistemlerinde NO_x salınımını azaltan temel faktörü oluşturmaktadır [49]. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda devreye giren Zeldovich

mekanizması, hava ortamında NO oluşum hızını ciddi oranda artırırken, oksijenle yakma sistemlerinde tam tersi bir durum gözlenmektedir. Bu sistemlerde, N_2 'nin ortamda az bulunması, reaksiyon mekanizmasını ters yöne çevirerek N_2 oluşumu yönünde ilerlemekte ve NO indirgenme hızını artırmaktadır [50]. Birçok araştırmacının NO_x salınımı üzerine yaptığı incelemeler sonucunda, geleneksel yakma sistemlerine kıyasla geridönüşüm yapılan oksijenli sistemlerde, salınımda %70'lere varan bir düşmenin olduğu bildirilmiştir [34,51,52]. Geridönüşüm yapan gaz içerisindeki NO'nun, alevden bir daha geçerken (1.4) reaksiyonlarıyla indirgenmesinin, NO_x salınımda azaltıcı etki yaptığı düşünülmektedir [53]. Ayrıca, geridönüşüm oranının artışı ile NO indirgenmesinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir [52]. Okazaki ve Ando, kömürün havayla yanması sonucu oluşan CO_2 'nin yanma odasına geri dönüşümü üzerine yaptıkları çalışmada, geri dönen baca gazı içerisindeki NO'nun büyük bir kısmının, kömür uçucu maddesinin yanma bölgesinde indirgendiğini tespit etmişlerdir [54].

6.2 Biyokütle-Kömür Karışımlarının Kullanıldığı Oksijenli Yakma Çalışmaları

Literatürde çeşitli oksijenle yakma ve birlikte yakma çalışmaları bulunsa da, biyokütle-kömür karışımlarının oksijen atmosferinde yakılması üzerine çalışma sayısı oldukça azdır.

Arias ve arkadaşları, oksijenle yakmanın ve biyokütle katkısının kömürün tutuşma sıcaklığı ve yakıt yanma oranları üzerine etkilerini belirleme amacıyla yaptıkları bir çalışmada, sürükleme reaktörde, bekleme süresini sabit tutarak, dört farklı kalitede kömür ve bir biyokütle türü (okaliptüs) ile deneyler yürütmüşlerdir. Oksijenle yakma sistemlerindeki geridönüşümden kaynaklanan CO_2 düşünülerek, havanın (%21 O_2 - %79 N_2) yanı sıra, farklı konsantrasyonlarda O_2/CO_2 (21/79, 30/70 ve 35/65 oranlarında) karışımları yakıcı gaz olarak kullanılmıştır. Tutuşma sıcaklıkları, havayla aynı O_2 derişimine sahip O_2/CO_2 karışımında – CO_2 'nin N_2 'den yüksek olan ısı kapasitesinden dolayı – yükselme gösterirken, O_2 konsantrasyonu arttıkça tutuşma sıcaklıkları ciddi düşüş göstermiştir. Okaliptüs katılarak (%10 ve %20) yapılan deneyler sonucu ise, biyokütle katkısının artışıyla tutuşma sıcaklığının düştüğü görülmüş ve en düşük tutuşma sıcaklığının, biyokütle ve oksijen oranlarının en yüksek olduğu durumda elde edildiği görülmüştür [34].

Yine aynı çalışmada, yakıt yanma oranlarının, benzer bir şekilde 21/79 O₂/CO₂ ortamında düşüş gösterirken, oksijen oranının artışıyla yükselme gösterdiği görülmüştür. Biyokütle katkısının ise, biyokütle oranı nispetinde bir “yakıt yanma oranı” artışı sergilemediği görülmüş ve bu durum, hızlı yanan biyokütlenin oksijeni çabuk tüketerek kömürün yanmasını (dolayısıyla yakıt yanma oranını) etkilemesi şeklinde yorumlanmıştır [34].

7. BİRLİKTE YAKMA

Biyokütlenin kömürle birlikte yakılması, kömür esaslı güç tesislerinin CO₂ salınımlarının düşürülmesi açısından en etkili yöntemlerden biri olarak gözükmekte, atık biyokütle berterafının da en etkin yöntemlerden biridir. Biyokütlenin sera gazı etkisini azaltma potansiyeli, sürdürülebilir üretilmesiyle doğrudan ilgilidir. Fosil yakıtlar, yüksek oranda CO₂ salınımı yaparken, enerji amaçlı tüketilme oranı üretilme oranına eşit olduğu zaman, biyokütlenin net CO₂ salınımı “sıfır” olmaktadır. Bu nedenle “CO₂ Nötr” olarak adlandırılmaktadır. [55].

7.1. Kömür ve Biyokütle Yakan Sistemlerin Karşılaştırılması

Kömür yakmak için kullanılan konvansiyonel boylerlere biyokütle eklenmesi verimi düşürebilir. Bu durum, daha yüksek enerji girdili yakıt hazırlama işlemlerinden ve yakıtın daha fazla nem içeriğinden kaynaklanmaktadır. Proses inşa maliyeti ise, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında oldukça düşüktür, çünkü mevcut kömür yakan proses altyapısında ufak değişikliklerle bir “birlikte yakma” sistemi elde edilebilmektedir. İşletme maliyetleri biyokütle için konvansiyonel sistemlere göre genelde daha fazladır. Biyokütle kaynağı olarak tahsis edilmiş enerji ürünlerinin kullanıldığı durumda maliyet açısından dezavantaj oluşsa da, atıkların kullanıldığı durumda da (yakıt hazırlama maliyetlerinden dolayı) biyokütle kömürle ancak rekabet edebilir, hatta bazı durumlarda geri kalabilir [55].

Genel olarak, “birlikte yakma” sistemleri kömür sistemlerine göre her anlamda daha yüksek maliyetli gözükse de, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında maliyet oldukça düşüktür. Ayrıca, düşük risk taşıması ve çeşitli boyler tiplerinde, birçok yakıtın birçok biyokütle türüyle başarılı uygulamaları yürütülmüş bir teknoloji olması da “birlikte yakmayı” cazip kılmaktadır [55].

Biyokütlenin yakıldığı sistemlerde dikkat edilmesi gereken özel parametreler vardır. Öncelikle, biyokütle ısı değeri genelde kömürden daha düşük, tanecik yoğunluğunun kömürün yaklaşık yarısı, yığın yoğunluğunun kömürün yaklaşık beşte biri olması, aynı hacimdeki biyokütle ve kömürden biyokütlenin yaklaşık %90 daha

az enerji girdisine sahip olması anlamına gelmektedir. Bu yüzden, biyokütlenin enerji katkısı başına düşen nakliye, depolama ve sahada taşıma maliyetleri yükselmektedir [55]. Bunun yanı sıra, düşük yoğunluklu ve yüksek nem içerikli biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırma amacı ile küçük parçalara ayırma, yoğunlaştırma ve kurutma gibi ön işlemlerin uygulanması gerekmektedir. Bu ön işlemler sayesinde daha küçük boyutlarda yakma üniteleri ile enerji üretimi gerçekleştirilebilir [56].

Biyokütle külünün alkalın karakterli olmasının yol açtığı tortu korozyona neden olmakta, ayrıca ısı transferini olumsuz etkilerken, ekipmanların ömrünü de kısaltmaktadır. Ayrıca, biyokütle içeriğinde bulunan sodyum ve potasyum külün ergime noktasını düşürerek, ısı aktarım yüzeylerinde kül birikmesi ve tortulaşmayı artırmaktadır [28]. Biyokütle birikmeleri, kömür yanması sonucu oluşan birikmelere kıyasla, daha yoğun ve giderilmesi daha zordur [57]. Bu problemi engellemek için yapılabilecek en pratik uygulama, yakma sisteminin sıcaklığını küldeki tuzların ergime noktasının altında tutmaktır. Bunun için kullanılacak biyokütle için sistemin parametreleri iyi belirlenmelidir [25].

Biyokütlenin düşük tanecik yoğunluğu, kömürden çok daha hızlı okside olmasını sağlar. SO_x salınımı, yakıtın kükürt içeriğine bağlı olarak değişmekle birlikte, biyokütlerde genellikle kükürt içeriği düşük olduğu için, birlikte yakma sistemlerinin SO_x salınımı da azalmaktadır. NO_x değerleri ise, yakıtın azot içeriği yanı sıra yakma şartlarıyla da doğrudan ilgili olduğu için değişkenlik gösterir. Kolayca sürdürülebilir olduğundan, ticari uygulama için en olgun seviyede bulunan odunun kullanıldığı birlikte yakma sistemlerinde, yakıtın azot içeriği nispeten azdır ve toplam NO_x salınımı da azalma eğilimi gösterir [55,57].

7.2. Prina (Zeytin Küspesi) İle İlgili Literatür Çalışmaları

Cliffe ve Patumsawad'ın zeytin küspesi ve kömürün akışkan yatakta birlikte yanması üzerine yaptıkları çalışmada, %20 biyokütle katkısı sonucu verimliliğin en fazla %5 düşüş gösterdiği saptanmıştır [58].

Armesto ve arkadaşlarının benzer bir çalışmasında ise SO_2 ve NO_x derişimlerinin zeytin küspesi katkısıyla birlikte düşüş gösterdiği görülmüştür [59]. Yine akışkan

yatakta, Atımtay ve Topal tarafından yürütülen çalışmada kullanılan kömürün azot içeriği, kullanılan zeytin küspesinin 3 katı, kükürt içeriği ise 15 katı olarak ölçülmüştür. SO₂ salınımları ise biyokütle katkısı ile belirgin bir düşüş sergilerken, NO_x salınımı fazla değişiklik göstermemektedir [60].

Zeytin küspesi ve kömürün reaktivitelerinin termogravimetrik analiz yoluyla karşılaştırıldığı bir çalışmada, maksimum reaktivitenin biyokütle katkısıyla arttığı, maksimum reaktivite anındaki sıcaklığın ise düştüğü, Kastanaki ve Vamvuka tarafından tespit edilmiştir [61].

Linyit ve zeytin küspesinin birlikte yakılmasının kül özelliklerine etkisini araştıran Grammelis ve arkadaşları, bileşenlerin karışım oranlarının yanı sıra yanma koşullarının da birlikte yakma külü üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, çeşitli uygulamalarda (çimento katkısı gibi) kullanılabilmesi için %20'ye kadar biyokütle içeren yakıtların küllerinin uygun olduğu, ancak bu orandan sonra artan biyokütle miktarıyla beraber artış gösteren yanmamış karbon miktarının sorunlara yol açacağı vurgulanmıştır [62].

8. LİTERATÜR ÖZETİ

Dünya Enerji Tahmini projelerine göre Dünya'nın enerji ihtiyacı 2007-2030 yılları arasında %40 artış gösterecektir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların bu enerji ihtiyacının %80'ini karşılaması durumunda, oluşacak karbon dioksit emisyonlarının yıllık 20.2 milyar ton civarında olacağı öngörülmektedir [63].

Bu günlerde bile elektrik ihtiyacı nüfus artışı, teknolojik ve ekonomik gelişme ile birlikte artmaktadır. 826 milyar ton hazır kömür rezervi ve kömür yanma işlemi dünya çapında enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [64].

Dünyada üretilen elektriğin %39'u kömür ile üretilmektedir. Kömür kaynaklı üretilen elektrik miktarı ABD ve bazı ülkelerdeki üretilen toplam elektriğin yarısından daha fazlasını oluşturmaktadır [65].

Küresel ısınma ve Sera Gaz Emisyonlarının bağlantılı olduğu hakkında genel bir farkındalık ve çözüm arayışı dünyada oluşmaya başlamıştır. Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve bunların neden olduğu iklimsel olumsuzlukların azaltılması konuları acil önem teşkil etmektedir. Sera gazlarının azaltılması için yeni düzenlemeler dünya çapında yapılmaktadır [66].

Yeni düzenlemeler ve çalışmalar Sera etkisini en çok neden olan CO₂ gazı emisyonunu azaltacak yeni teknolojilerin geliştirilmesi yönünde yapılmaktadır. Sera gazlarının emisyonlarını azaltmak için bazı çözümler uygulanabilir. Bunlar; enerji verimini arttırmak, yenilenebilir enerji kullanımını yaygınlaştırmak ve yeni taşınım ölçümleri kullanmak olabilir. Enerji üretimi sera gazı emisyonlarına en büyük katkıyı yapan nedenlerdendir. Çünkü fosil yakıtların yakılması sırasında yüksek oranlarda CO₂ açığa çıkmaktadır. Kömür enerji üretiminde büyük bir paya sahiptir. Kolay bulunabilir ve yaygın rezervleri nedeniyle de gelecekte önemi artacaktır. Ancak bu yakıtın birim enerji başına ürettiği CO₂ miktarı diğer fosil yakıtlara göre daha fazladır [65].

Toplumsal farkındalık ve kanunlar gelişmiş ülkelerde Sera gazlarının emisyonlarında azalmaya yol açmıştır. Gerekli düzenlemeler Kyoto protokolü ve Hükümetler arası iklim değişimi paneli gibi uluslararası kuruluşlar tarafından yapılmaktadır [67].

Başta karbondioksit olmak üzere, sera gazlarının kontrolünü amaçlayan en önemli global eylem planı Kyoto Protokolüdür ve ülkemiz 5 Şubat 2009 tarihinde bu protokolü imzalamıştır. Söz konusu protokol, ülkelerin sera gazı emisyon salınımlarının 1990 yılındaki seviyelerinin altına indirmesini gerektirmektedir. Ülkemizde 1990 yılında enerji tüketimi 52.6 MTEP civarında iken bu değer 2010 yılında yaklaşık olarak iki katına çıkarak 100 MTEP civarında gerçekleşmiştir. Ülkemizin enerji üretiminde fosil yakıtların payı %90'ın üzerindedir. Bunun sonucu olarak, 1990-2004 yılları arasında sera gazı üretimini dünyada en çok artıran ülke Türkiye olmuştur. Bu nedenle, fosil yakıt yakılmasından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının kontrolü ülkemiz açısından büyük önem arz etmektedir.

Kullanmakta olduğumuz enerjinin büyük bölümünü fosil enerji kaynaklarının oluşturmasına rağmen, petrol ve doğal gaz kaynaklarımız ihtiyacın ancak çok küçük bir bölümünü karşılayabilmektedir. Kömür yataklarımızın büyük kısmı ise, ısı değeri düşük, mineral maddesi yüksek kalitesiz linyit kömüründen oluşmaktadır. Ayrıca, ülkemizde kullanılan kömür yakma sistemlerinin verimleri, karbon dönüştürme oranı açısından incelendiğinde, bu sistemlerin istenen verimde olmadığı ve bu nedenle külde yanmadan kalmış karbon nedeniyle ciddi verim düşüklüğü olduğu görülmektedir. Ülkemizin en önemli linyit yataklarının bulunduğu Afşin-Elbistan yöresindeki linyitlerin yakıldığı termik santralden alınan yatak külünün incelenmesi sonucunda, yatak külündeki karbon oranının %13.8 gibi oldukça yüksek bir değerde olduğu belirlenmiştir [68,69,70]. Ayrıca, uçucu kül içerisinde de karbona rastlanmıştır. Yakma işleminin saf oksijen ile gerçekleştirilmesi halinde, yanmadan külde kalan karbon miktarında önemli ölçüde azalma sağlanarak, yakma veriminin yükseltilme potansiyeli bulunmaktadır [71,72,73].

Termik santrallerde CO₂ azaltıcı ve yakalayıcı teknolojilerin kullanımı ile küresel Sera Gazı Emisyonları azaltılabilir. Bu teknolojiler 3 ana grup altında toplanabilir. Bunlar;

- 1) Karbon monoksit ve hidrojen gibi yanıcı gazlar üretmek amacıyla gazlaştırma veya reformlama gibi yöntemler uygulamak.
- 2) Yakma işlemi sonucunda açığa çıkan karbon dioksiti amin vb kimyasal maddeler içeren çözeltiler kullanarak tutmak.
- 3) Yakma işlemini hava ile gerçekleştirmek yerine, saf oksijen kullanarak, azotun seyreltici etkisini ortadan kaldırarak yüksek derişimde karbondioksit içeren yanma gazı üretmek ve bu gazı sıvılaştırarak yeraltında depolamak [72,74,75].

Oxyfuel yakma yönteminde kömür yüksek saflıkta oksijen içeren(>95%) karışımla ve geri beslenen baca gazı yakıtın yakımında kullanılır. [70]

Yakma ortamında hava yerine saf oksijen kullanılması halinde, külde kalan yanmamış karbon taneciklerinde önemli oranda azalma meydana geldiğinden, yanma veriminde belirgin bir artış sağlanabilmekte, bacadan atılarak çevre kirliliğine ve sağlık sorunlarına yol açan partiküler madde emisyonlarında ise azalma sağlanmaktadır. Hava kullanılan konvansiyonel yakma sistemlerinde karbondioksit derişimi hacimce %4-14 arasında değışirken, saf oksijen kullanılan oksiyakma yönteminde ise bu oran %55-65 gibi daha yüksek değıerlere ulaşmaktadır. Ele geçen baca gazının soğutulurak su buharının yoğunlaştırılması halinde ise, karbondioksit derişimi yaklaşık olarak %96'ya kadar yükselmektedir [76]. Yüksek derişimdeki karbondioksit, sıvı hale getirilerek hacmi azaltıldıktan sonra, eski maden ocaklarında veya uygun jeolojideki yer altı yataklarında depolanarak atmosferik karbondioksit emisyonu olmaktan kurtarılmaktadır.

Baca gazının geri beslenmesi ile ağırlıklı olarak CO₂ içeren gaz ve su üretilir. CO₂'yi gaz akımdan ayırmadan sekastrasyon yapılmaya uygun bir gaz karışımı elde edilir. Geri beslenen baca gazı alev sıcaklığını kontrol etmeye ve eksik olan N₂ hacmini karşılayarak ısıyı taşıyacak yeterli hacimde gaz olmasını sağlar.[71]

Karbondioksit emisyonlarını kontrol etmek için diğeri bir yaklaşım, karbondioksit açısından nötr olduğı kabul edilen biyokütlenin kömür ile belli oranlarda karıştırılarak birlikte yakılmasıdır. Biyokütlenin yakılması sonucunda açığa çıkan

karbondioksit miktarı, bitkisel biyokütlenin gelişim sürecinde fotosentez işlemi için atmosferden tutulan karbondioksit miktarına eşdeğer olmasından ötürü, biyokütle yakılmasının atmosferdeki karbondioksit artışına net bir katkısı bulunmamaktadır. Bu yöntem, aynı zamanda ekonomik değeri düşük olan tarımsal ve ormansal atık ve yan ürünlerin, kentsel katı atıkların ve endüstriyel atıkların da enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi bakımından önem arz etmektedir [78].

Özellikle Avrupa Birliği ülkeleri başta olmak üzere gelişmiş birçok ülkede, biyokütle enerjisinden daha fazla oranda yararlanma yönünde kısa ve uzun dönemli hedefler bulunmaktadır. Örneğin Polonya, 2020 yılına kadar enerji ihtiyacının %14'ünün yenilenebilir kaynaklardan teminini stratejik plan olarak belirlemiştir. Bu programın önemli bir bölümünü biyokütle yakma teknolojilerinin geliştirilmesi oluşturmaktadır [77].

Çoğu biyokütle kömüre göre çok farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Yüksek oranda uçucu madde ve oksijen içeriklerine sahip olmaları, ısı değerlerinin, sabit karbon içeriklerinin ve yoğunluklarının düşük olması, kömürle biyokütle arasındaki en belirgin farklılıklardandır [79]. Odunsu biyokütlenin temel yapı taşlarını teşkil eden selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi makromoleküler bileşenleri, kömür yapısı ile karşılaştırıldığında daha zayıf eter bağları ile bir arada tutulduklarından, termal etkiye maruz kalmaları halinde, oldukça reaktif şekilde davranmakta ve düşük sıcaklıklarda yanma işlemi gerçekleşmektedir. Açığa çıkan ısı miktarı ve ulaşılabilen sıcaklıklar da kömüre göre daha sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, biyokütlenin yakılması sonucunda ulaşılacak en yüksek sıcaklıklar kömür yakıldığında ulaşılan sıcaklıklara göre oldukça düşük değerlerdedir [78,80].

Karşılaşılan bazı dezavantajlara rağmen, kömürün biyokütle ile karıştırılarak yakılması birçok yönden tercih edilmektedir.

Bunlar:

- Sadece kömür yakılması durumu ile karşılaştırıldığında, biyokütlenin ve kömürün birlikte yakılması daha düşük net CO₂ emisyonu ile sonuçlanır.

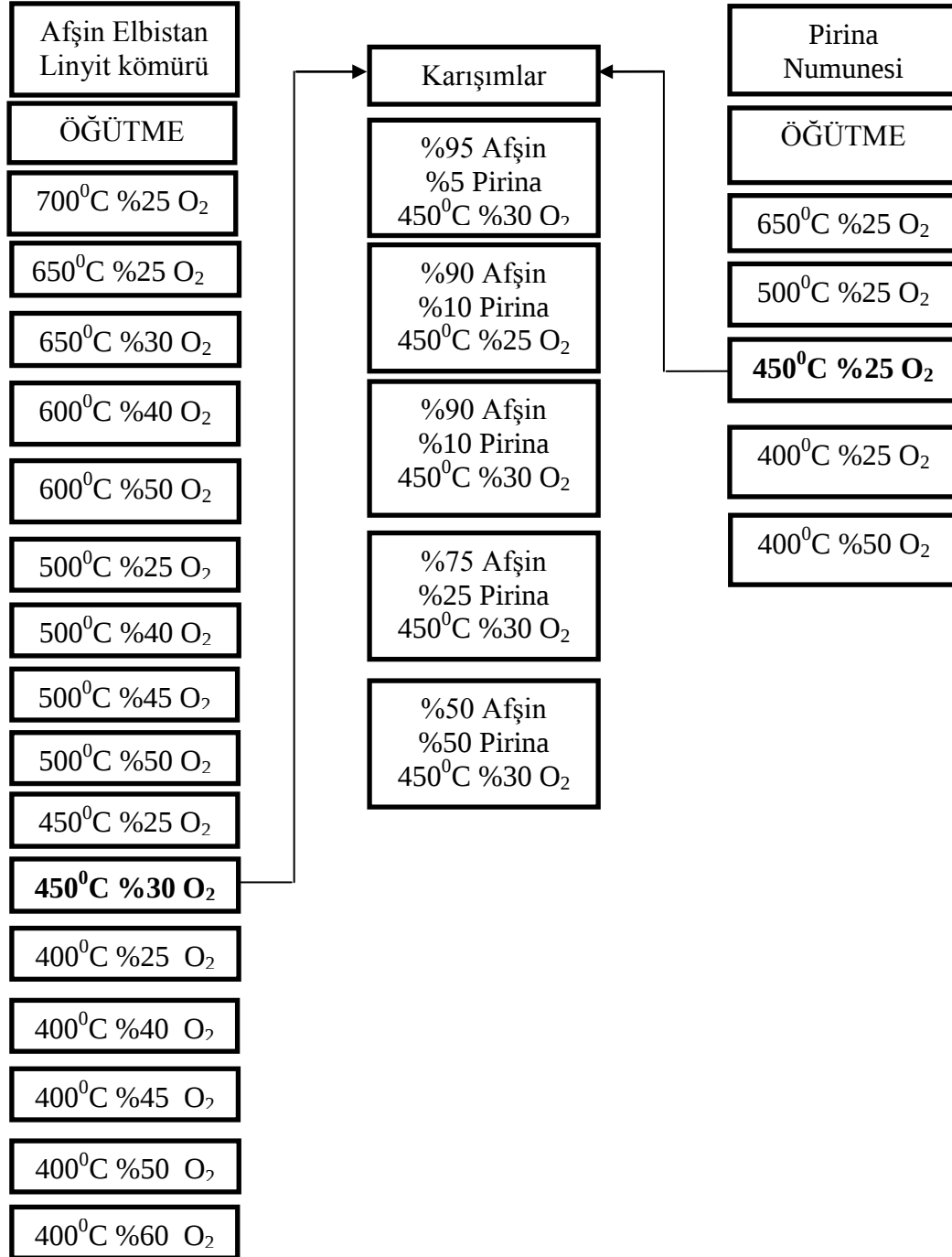
- Belirli bir bölgeye özgü yerel yakıt kullanımı, yakıt taşımacılığı ve ithalatı ihtiyacını azaltır ve böylece enerji üretim sistemi daha az kırılgan ve daha ekonomik hale gelir.
- Kentsel ve tarımsal atıkların yakılması, bu atıkların bırakılacağı çöplük alan ihtiyacını azaltır. Çöplüklerden açığa çıkan metan gazının sera etkisi karbon dioksitin sera etkisinin çok üstündedir [81,82].
- Biyokütlenin kül fraksiyonu alkali ve toprak alkali metal türlerince zengin olduğundan, kömür yakılmasından kaynaklanan kükürt dioksitin tutulması için ilave bir fırsat sunabilir.
- Biyokütle yakma ünitelerindeki ısı transfer yüzeyleri üzerinde cüruf ve kurum birikimi gibi kül kaynaklı problemler, biyokütlenin kömür ile karıştırılarak yakılması sayesinde azaltılabilir veya tamamen ortadan kaldırılabilir.
- Biyokütle yakarak güç elde etmek istendiğinde, yeniden yakıcı ve kazan inşa etmek gerekli değildir; mevcut kömür yakma sistemleri doğrudan ya da bazı değişiklikler yapılarak kullanılabilir [83,84].

Linyit gibi düşük kömürleşme dereceli kömürlerin termik santrallerde biyokütle ile birlikte yakılması, sera gazlarının azaltılmasına katkıda bulunan iyi bir tekniktir. Aynı zamanda atık bertaraf problemine de bir çözümdür. Biyokütlenin kömür ile birlikte yakılması, kömür yakan tesislerin NO_x ve SO_x seviyelerinde azalma kapasitesine sahiptir; toprak ve su kirliliğine de azaltıcı etkisi vardır [85].

Biyokütle ile farklı oranlarda karıştırılan kömürün yakılması sırasında, sadece kömürün ya da sadece biyokütlenin yakılması sırasında gözlenmeyen bazı etkileşimler ortaya çıkmaktadır. Farklı bileşenler arasında sinerji oluşumu olarak nitelendirilen bu etkileşim sonucunda, kömüre ilave edilen biyokütlenin oranı dikkate alındığında, beklenenden daha büyük bir etkinin ortaya çıkması olasıdır.

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar Şekil 9.1'deki adımlara göre yürütülmüştür.



Şekil 9. 1 Deneysel çalışmaların akım şeması

Bu çalışmada Afşin-Elbistan linyit kömürü ve pirina kullanılmıştır. Numuneler laboratuvar ortamında bir hafta süreyle kurutularak öğütülmüş ve tanecik boyutu 250 mikrometre altına düşürülmüştür. Ana numunelerin kısa analizleri, ısıl değerleri, termal analizleri ve elementel analizleri gerçekleştirilmiştir. Afşin Elbistan linyit kömürü ve pirinanın ve bunlardan farklı oranlarda hazırlanan karışımların, kuru hava ile yakmaya nazaran daha düşük sıcaklıkta ve oksijen yakma koşullarında yüksek verimle yakılması amacıyla numuneler yatay boru fırında yakılmıştır. 5 gram numune yatay boru fırında kuvars kayıkçık içerisine yerleştirilerek, 40°C/dk yakma hızıyla 100 cc/dk debideki farklı oksijen/azot oranlarında ortam sıcaklığından seçilen sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve her bir numune bu sıcaklıkta iki saat süreyle bekletilmiştir. Bu çalışmada amaç yakma sistemlerinde yanma neticesinde yatak külünde kalan karbon miktarının en az olduğu optimum koşulların belirlenmesidir. Yüksek verimle yanma koşullarının belirlenebilmesi amacıyla yanma sonucu oluşan küllere sırasıyla kısa analiz, ısıl değer, elementel analiz ve termal analiz uygulanmıştır. Bu analizler ASTM standartları uygulanmıştır. Yanma neticesinde geriye kalan külde toplam karbon miktarının sıfır olduğu linyit ve pirina numunelerinin yakma şartları seçilerek dört farklı oranlarda karışımlar hazırlanmış ve yanma özellikleri belirlenmiştir. Kısa analiz sonuçları 9.5-9.7 Çizelgelerinde, ısıl değer sonuçları 9.2-9.4 Çizelgelerinde, termal analiz sonuçları Şekil 9.5-Şekil 9.45 ve elementel analiz sonuçları 9.11-9.13 Çizelgelerinde görülmektedir. Pirina ve afşin Elbistan Linyit kömürü Numunelere ve hazırlanan karışımlara farklı kodlar verilmiştir. Numunelerin ve karışımların kodları Çizelge 9.1’de görülmektedir.

Çizelge 9. 1 Numune kodları.

Afşin Elbistan	AE
Pirina	P
Afşin Elbistan, 450°C, %25 O₂	AE_450_25
%90 Afşin Elbistan, %10 Pirina	90AE_10P

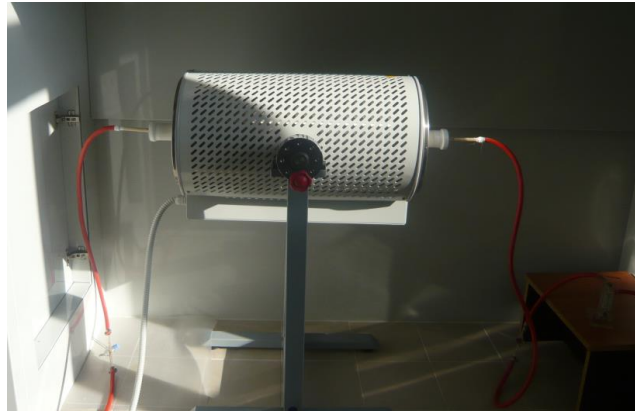
9.1. Numunelerin Hazırlanması Ve Yakılması

Afşin Elbistan linyit kömürü halkalı öğütücüde öğütüldükten sonra Şekil 9.2’de gösterilen Retsch AS 200 model eleme sisteminde elenerek tanecik boyutu 250 µm altına indirilmiştir.



Şekil 9. 2 Retsch AS 200 elek sistemi.

Deneysel çalışmalarda kullanılan yatay boru fırın Şekil 9.3'te gösterilmiştir.



Şekil 9. 3 Yatay boru fırın.

9.2. Numunelere Uygulanan Analizler

9.2.1. Isıl değer analizi

Isıl değer analizleri Şekil 9.4'te görülen kalorimetre cihazında yapılmıştır. Öncelikle, 0.7-1 g aralığında tartılan numuneler krozeyle alınmıştır. Kesilen tel devreye bağlanan pamuk ipliğinin, bir ucu numunenin içinde batacak, diğer ucu ise uygun metal aksamla bağlandıktan sonra kalorimetre bombasının içerisine yerleştirilmiştir. İçerisine saf oksijen basıldıktan sonra bomba, cihaz içerisine yerleştirilir ve program çalıştırılır. 5 gram Afşin Elbistan linyit numunesinin yatay boru fırında farklı sıcaklık ve oksijen/azot atmosferinde yakılması neticesinde geriye kalan numunelerin ısı değer analiz sonuçları Çizelge 9.4'te görülmektedir. 5 gram Pirina numunesinin yatay boru fırında farklı sıcaklık ve oksijen/azot atmosferinde yakılması neticesinde geriye kalan numunelerin ısı değer analiz sonuçları Çizelge 9.3'te görülmektedir. Farklı oranlarda hazırlanan karışımların 450°C kadar %30O₂ + %70N₂ atmosferinde yakılan linyit kömürü ve 450°C %25O₂ + %75N₂ atmosferinde

yakılan pirina numuneleri seçilerek %5,10,25,50 pirina içerecek şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Bu hazırlanan karışımlardan 5 gram numune %30O₂ + %70N₂ atmosferinde ortam sıcaklığından 450°C'ye 40°C/dk ısıtma hızı ile yakılmış ve bu sıcaklıkta iki saat süreyle bekletilmiştir. Isıl değer sonuçları bütün karışımlar için sıfır olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. 4 IKA C2000 model kalorimetre sistemi.

Çizelge 9. 2 Ana numunelerin ısıl değer sonuçları.

Numune	Isıl Değeri (cal/g)
Afşin Elbistan Ana Numune	2536
Pirina Ana Numune	4748

Çizelge 9. 3 Pirina ısıl değer analiz sonuçları.

Yakma Sıcaklığı (°C)	Oksijen (%)	Yakma sonunda kalan numunenin Isıl Değeri (cal/g)
400	25	3699
400	50	70
450	25	0
500	25	0
650	25	0

Çizelge 9. 4 Afşin Elbistan ısıt değer analiz sonuçları.

Yakma Sıcaklığı (°C)	Oksijen (%)	Yakma sonunda kalan numunenin Isıl Değeri (cal/g)
400	25	1099
400	40	348
400	45	69
400	50	54
400	60	0
450	25	146
450	30	0
500	25	0
500	40	0
500	45	0
500	50	0
600	40	0
600	50	0
650	25	0
650	30	0
700	25	0

9.2.2 Kısa analiz

Etüvde kurutulmuş, öğütülmüş ve elenmiş numunelere uygulanan kısa analiz işleminde, numuneler 100 ml/dak azot akımında öncelikle 10°C/dak ısıtma hızıyla 105°C'e ısıtılarak bu sıcaklıkta nem çıkışının sağlanması için 10 dakika süreyle bekletilmiş, sonrasında 40°C/dak ısıtma hızıyla 900°C'e ısıtılmış ve uçucu madde çıkışının gerçekleşmesi için bu sıcaklıkta 7 dakika süre ile bekletilmiştir. Kısa analizin son aşamasında ise, 20°C/dak soğutma hızıyla sıcaklık, kömür numunelerinin kısa analizinde 755°C'e, biyokütle numunelerinin kısa analizinde ise 600°C'e düşürülmüş, azot yerine aynı debide kuru hava beslenmiş ve yanmanın bitmesi sonucu ağırlığın sabitlendiği noktaya kadar bekletilmiştir. Analiz için

kullanılan SDT Q600 model termal analiz cihazı Şekil 9.5'te gösterilmiştir. Numunelerin kısa analiz sonuçları Çizelge 9.5 'te görülmektedir.



Şekil 9. 5 Termal analiz cihazı.

Çizelge 9. 5 Afşin Elbistan Numunelerinin Kısa Analiz Sonuçları

Numune(°C,%O ₂)	Nem	Uçucu Madde	Sabit Karbon	Kül
AE	11.67	44.49	13.24	30.59
AE_400_25	2.6	46.37	0.62	50.41
AE_400_40	2.09	42.87	0	55,03
AE_400_45	2.04	42.42	0	55,54
AE_400_50	3.62	43.51	0	52,88
AE_450_25	1.36	42.8	0.52	55.81
AE_450_30	0.9	39.09	0	59.99
AE_500_25	0.88	33.28	0	65.64
AE_500_40	0.64	32.83	0	66,53
AE_500_45	0.86	30.05	0	69,08
AE_500_50	0.96	29.69	0	69,34
AE_600_40	0.57	28.12	0	71,30
AE_600_50	0.77	28.03	0	71,20
AE_650_25	0.63	24.75	0	74,62
AE_650_30	0.79	25.30	0	73,91
AE_700_25	0.31	24.85	0	74,84

Çizelge 9. 6 Pirina numunelerinin kısa analiz sonuçları.

Numune (°C,%O ₂)	Nem	Uçucu Madde	Sabit Karbon	Kül
P	3.45	78.56	11,40	6,58
P_400_25	2.78	49.11	2.28	47.83
P_400_50	2.26	46.86	1.12	49.62
P_450_25	1.85	42.79	0	55.36
P_500_25	0.2	39.5	9.49	50.81

Çizelge 9. 7 Karışımların kısa analiz sonuçları.

Numune (°C,%O ₂)	Nem	Uçucu Madde	Sabit Karbon	Kül
95AE_5P_450_30	1.54	41.22	0	56.83
90AE_10P_450_25	1.2	37.74	0	61
90AE_10P_450_30	1.3	42.27	0	56.41
75AE_25P_450_30	1.4	36.29	0	62.31
50AE_50P_450_30	0.62	35.68	0	62.79

9.2.3 Termal analiz

Şekil 9.4'te görülen TA marka, SDT Q600 model termal analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Yakma deneylerinde her numuneden yaklaşık 10 mg kullanılmıştır. Tüm analizler 40°C/min ısıtma hızıyla ortam sıcaklığından 900°C'ye kadar gerçekleştirilmiş ve ağırlık kaybı sabitleninceye kadar bu sıcaklıkta beklenilmiş, numunelerin eş zamanlı olarak TGA, DTG, DTA, DSC analizleri gerçekleştirilmiştir. DTA analizi ile numunelerin tutuşma sıcaklıkları belirlenirken, DTG ile maksimum yanma hızı sıcaklığı ve maksimum yanma hızı belirlenmiştir. Çizelge 9.9'da görülmektedir. Numunelerin termal analiz eğrileri Şekil 9.5- 9.45 arasında görülmektedir.

Çizelge 9. 8 Pirina numunelerinin maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.

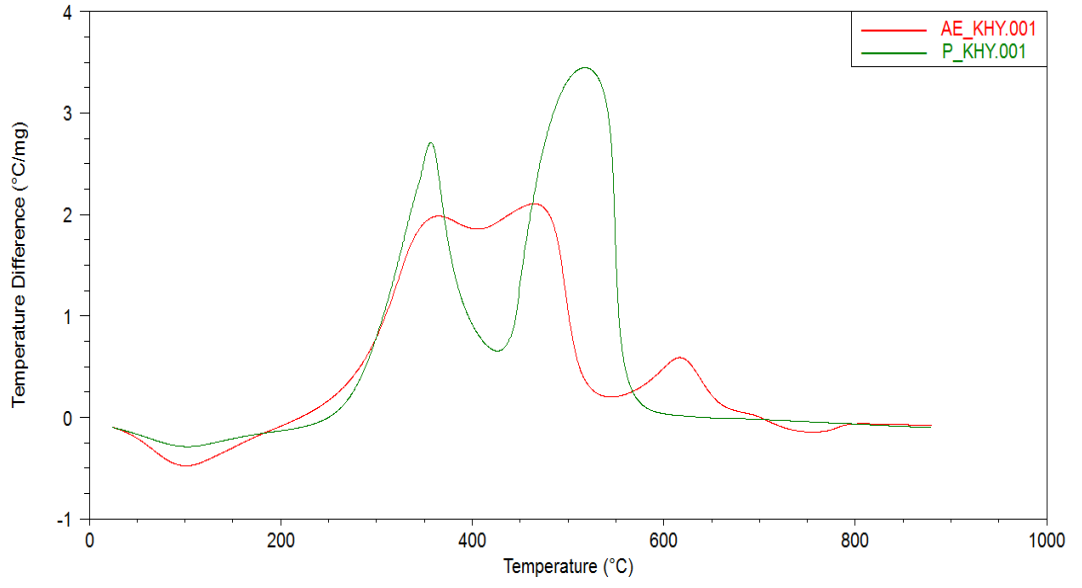
Numune (°C,%O ₂)	(dm/dt) _{max} (%/min)	T _{max} (°C)
P	43.69	320.52
P_400_25	26.30	421.46

Çizelge 9. 9 Afşin Elbistan numunelerinin maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.

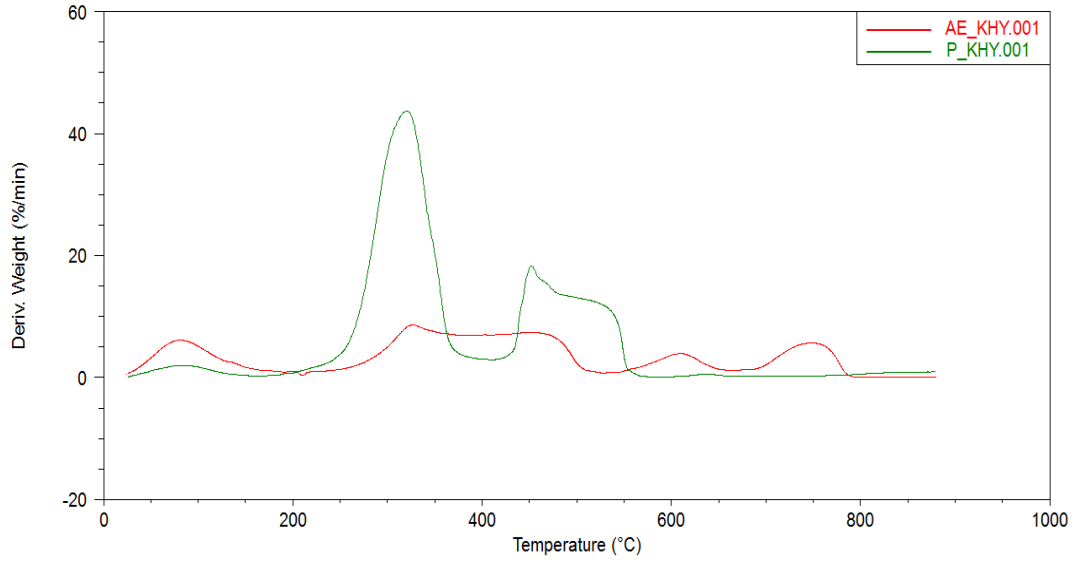
Numune (°C,%O₂)	(dm/dt)_{max} (%/min)	T_{max} (°C)
AE	8.60	327.01
AE_400_25	13.75	794.16
AE_400_40	12.46	790.52
AE_400_45	15.24	789.93
AE_400_50	14.65	787.81
AE_450_25	14.15	780.40
AE_450_30	15.30	795.19
AE_500_25	15.83	796.35
AE_500_45	15.59	793.39
AE_500_50	14.95	790.27
AE_600_40	14.02	786.30
AE_600_50	14.48	787.78
AE_650_25	13.31	788.86
AE_650_30	13.73	786.34
AE_700_25	10.91	781.70

Çizelge 9. 10 Karışımların maksimum yanma hızları ve sıcaklıkları.

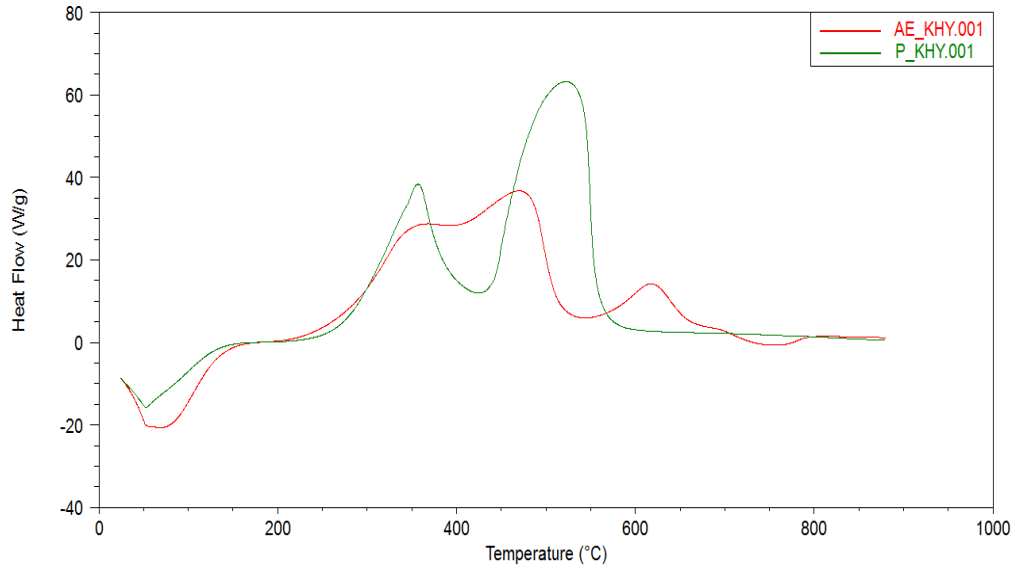
Numune (%AE,%P, °C,%O₂)	(dm/dt)_{max} (%/min)	T_{max} (°C)
95AE_5P_450_30	14.28	781.33
90AE_10P_450_25	13.32	773.70
90AE_10P_450_30	14.67	793.63
75AE_25P_450_30	13.24	769.53
50AE_50P_450_30	13.05	763.19



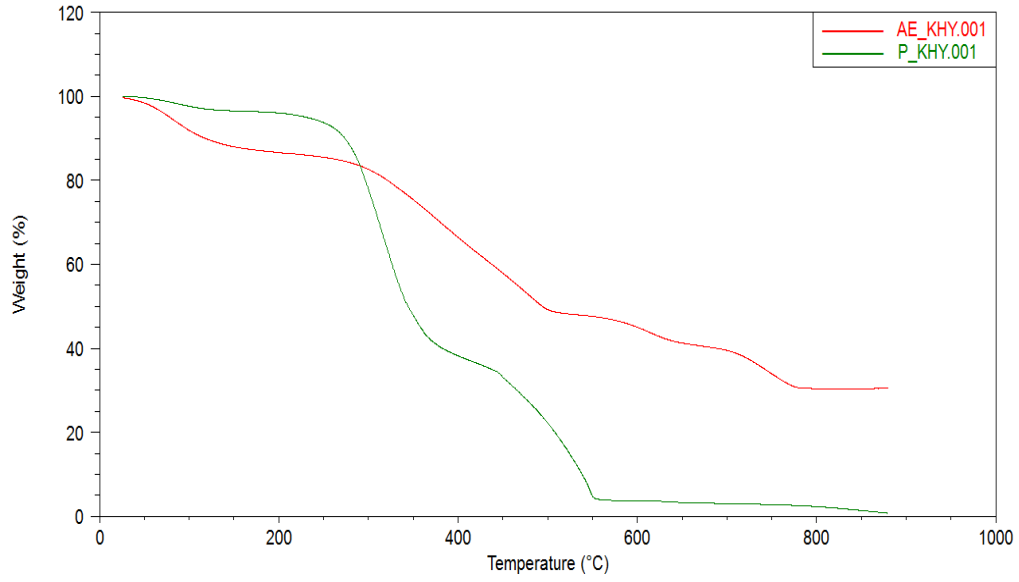
Şekil 9. 6 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DTA eğrileri.



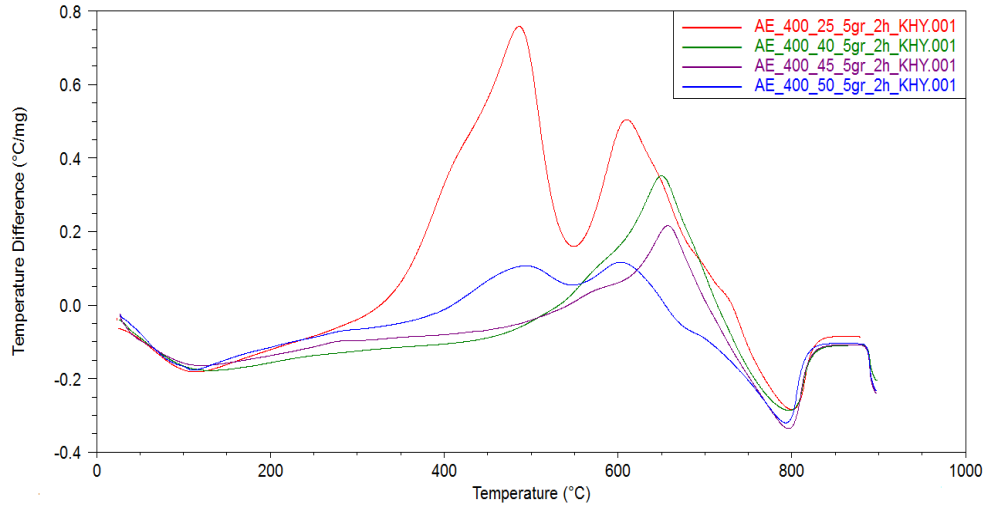
Şekil 9. 7 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DTG eğrileri.



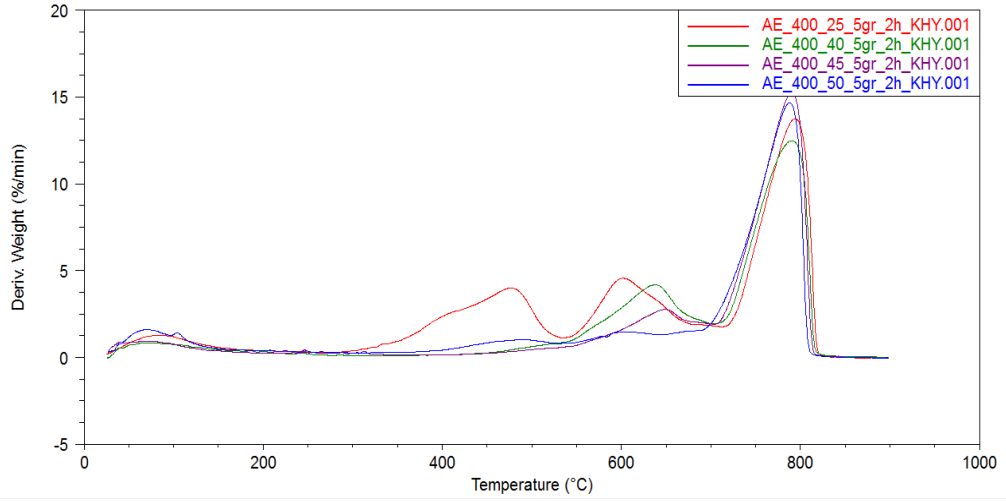
Şekil 9. 8 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin DSC eğrileri.



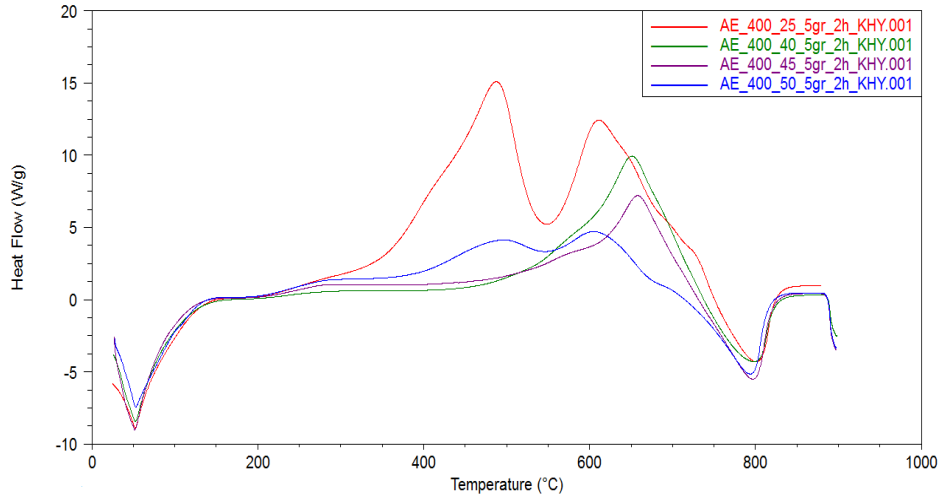
Şekil 9. 9 Afşin Elbistan ve pirina ana numunelerinin TGA eğrileri.



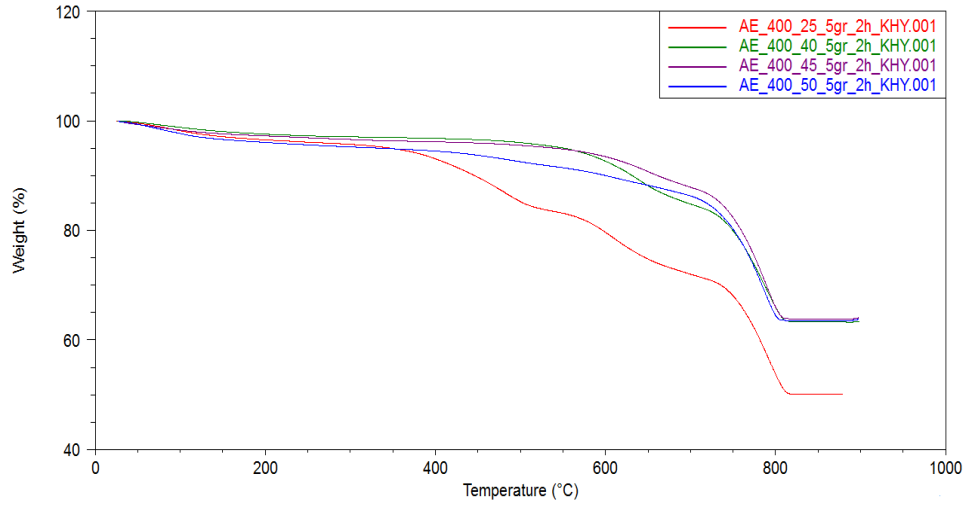
Şekil 9. 10 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.



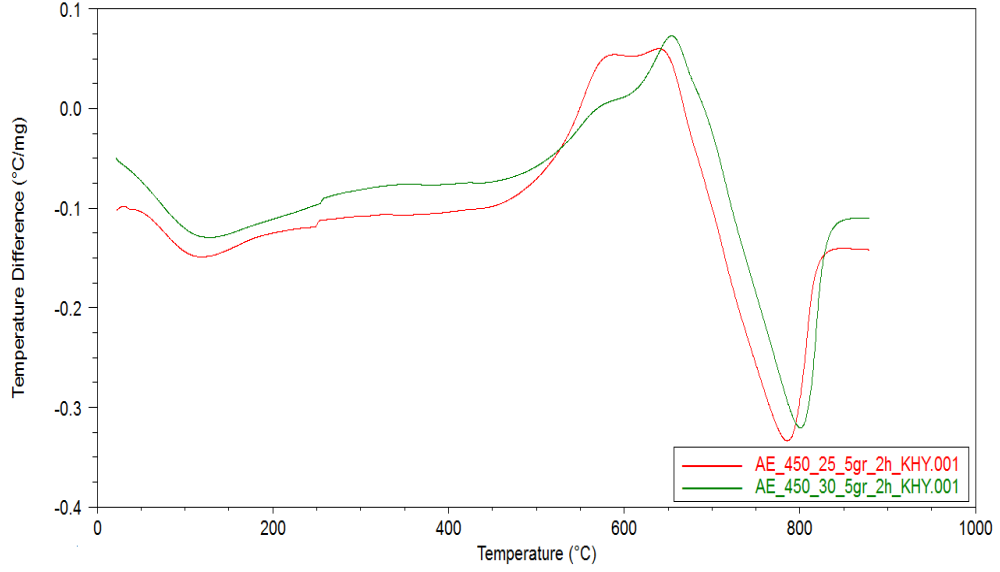
Şekil 9. 11 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.



Şekil 9. 12 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri



Şekil 9. 13 Afşin Elbistan 400°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri



Şekil 9. 14 Afşin Elbistan 450°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.

9.2.4 Elementel analiz

Numunelerin elementel analizleri Şekil 9.15’te gösterilen Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve Leco TruSpec® S modülü kullanılarak yapılmıştır. Elementel analiz ile numunelerin yapısındaki C, H, N, S ve O miktarları belirlenmiştir.



Şekil 9. 15 Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve S modülü

Çizelge 9. 11 Afşin Elbistan Numuneleri Elementel Analiz Sonuçları

NUMUNE (°C,%O ₂)	KÜKÜRT (%)	AZOT (%)	KARBON (%)	HİDROJEN (%)	OKSİJEN (%)
AE	0.84	1.27	37.2	1.78	24.28
AE_400_25	1.61	1.68	25.5	0.37	19.08
AE_400_40	1.36	1.90	16.2	0.17	24.17
AE_400_45	1.77	1.25	13.5	0.09	26.69
AE_400_50	1.24	1.17	13.2	0.01	29.51
AE_400_60	1.65	0.81	0	0	41.5
AE_450_25	1.40	0.85	13	0.08	28.17
AE_450_30	1.93	1.01	0	0	36.53
AE_500_25	1.75	0.53	0	0	31.5
AE_500_40	1.85	0.36	0	0	30.83
AE_500_45	1.98	0.37	0	0	27.97
AE_500_50	1.82	0.36	0	0	27.81
AE_600_40	1.63	0.40	0	0	26.26
AE_600_50	1.62	0.29	0	0	26.34
AE_650_25	1.62	0.38	0	0	22.91
AE_650_30	1.59	0.47	0	0	23.44
AE_700_25	1.72	0.42	0	0	22.79

Çizelge 9. 12 Pirina Numeleri Elementel Analiz Sonuçları

NUMUNE (°C,%O ₂)	KÜKÜRT (%)	AZOT (%)	KARBON (%)	HİDROJEN (%)	OKSİJEN (%)
P	0.08	0.75	51.6	5.6	15.15
P_400_25	0.10	0.94	45.8	1.86	2.10
P_400_50	0.24	0.26	5.15	0.76	42.86
P_450_25	0.34	0.71	0	0	42.55
P_500_25	0.19	0.3	0	0	48.6
P_650_25	0.45	0.21	0	0	50.77

Çizelge 9. 13 Afşin Elbistan ve Pirina Karışımlarının Elementel Analiz Sonuçları

NUMUNE (%AE,%P, °C,%O ₂)	SÜLFÜR (%)	NİTROJEN (%)	KARBON (%)	HİDROJEN (%)	OKSİJEN (%)
AE95_P5_450_30	1.71	0.83	0	0	27.09
AE90_P10_450_25	1.71	0.57	0	0	25.55
AE90_P10_450_30	1.73	0.8	0	0	27.88
AE75_P25_450_30	1.76	0.54	0	0	23.77
AE50_P50_450_30	1.79	0.36	0	0	25.96

10. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN YORUMLANMASI

Bu çalışmada seçilen Afşin Elbistan linyit kömürü ve Pirina numunelerinin oksijen yakma koşullarında ve düşük sıcaklıkta, yüksek verimde yakılabilmesi için optimum yakma şartlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bütün numunelerin yakma deneyleri yatay boru fırında kuvars kayıkçık içerisinde 5 gram numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki numunenin de kuru hava atmosferinde termal analizleri gerçekleştirilmiş ve Afşin Elbistan linyit kömürünün yanmasının 800°C 'de tamamlandığı DTG eğrisi ile belirlenmiştir (Şekil 9.6). Pirina numunesinin ise, 550°C 'de yanmasının sona erdiği gözlenmiştir. Yanmanın tamamlandığı bu sıcaklıklar göz önünde bulunarak linyit numunesi için 800°C 'den daha düşük sıcaklıklarda (700,650,600,500,450,400) oksijen yakma koşulları sağlanarak yanma sonrası geride kalan kısmın analizleri gerçekleştirilerek yüksek verimli yakma şartları belirlenmiştir.

10.1. Afşin Elbistan Numunelerinin Sonuçlarının Yorumlanması

Linyit numunesi için, 700°C ve %25O₂ + %75N₂ ortamında yakma deneyi ile başlanılmış, yanma neticesinde geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. Yakma sistemlerine beslenen yakma havasındaki %21 olan oksijen oranının %4 artırılması ile 100°C daha düşük sıcaklıkta yüksek verimle karbonun tamamının yakılması sağlanmıştır.

Yakma sıcaklığı 650°C 'ye düşürüldüğünde oksijen oranı %25O₂ + %75N₂ olarak seçildiğinde yakma işlemi neticesinde kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın 150°C düşürülmesi ile aynı yüksek verim elde edilmiştir.

Linyit numunesi için, 500°C ve %25O₂ + %75N₂ ortamında yakma deneyi ile başlanılmış, yanma neticesinde geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. Yakma sistemlerine beslenen

yakma havasındaki %21 olan oksijen oranının %4 arttırılması ile 300°C daha düşük sıcaklıkta yüksek verimle karbonun tamamının yakılması sağlanmıştır.

Yakma sıcaklığı 450°C 'ye düşürüldüğünde oksijen oranı %25O₂ + %75N₂ olarak seçildiğinde yakma işlemi neticesinde kalan kısmın ısı değeri 146 cal/g olduğu, sabit karbonunun 0.52 ve toplam karbonunun da %13 olduğu belirlenmiştir. Yakma neticesinde kalan kısımda karbonun az da olsa yanmadığı görülmüştür. 450°C'de %25O₂ atmosferinde karbonun tamamının yakılması sağlanamamıştır.

Oksijen derişiminin etkisini görmek amacıyla 400,500,600 ve 650°C'de farklı oksijen yüzdeleri ile deneyler yapılmıştır. 650°C'de %30O₂ atmosferinde yapılan çalışmalarda geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir.

600°C'de %40 ve 50O₂ atmosferinde yapılan çalışmalarda da geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir.

500°C 'de %40,45 ve 50 O₂ atmosferlerinde de yapılan çalışmalarda aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

400°C'de %40,45,50 ve 60 oksijen atmosferinde yakma işlemleri gerçekleştirilmiştir. %40,45 ve 50 oksijen atmosferlerinde yakma ile karbonun tamamının yanmadığı ancak, oksijen yüzdesinin 400°C'de %60 değerine çıkarılması ile karbonun tamamının yakılabildiği, ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. 450°C'de oksijen miktarını %5 arttırarak yapılan deneyler neticesinde geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma şartları karışımlar için optimum çalışma şartları olarak kabul edilmiştir.

Bu deneyler neticesinde Afşin Elbistan linyit kömürünün yüksek verimle yakılabildiği, bünyesinde bulunan karbonun tamamının yakılabildiği en düşük sıcaklığın 450°C, en düşük O₂ miktarının ise %30 olduğu belirlenmiştir.

10.2. Pirina Numunesinin Sonuçlarının Yorumlanması

Pirina numunesinin kuru hava atmosferinde yapılan DTG analizi neticesinde yanmasının 550°C'de sona ermesinden dolayı bu sıcaklığın altında 500,450 ve 400°C'lerde farklı oksijen atmosferlerinde pirina numunesi yakılmıştır.

500 ve 450°C'de %25O₂ + %75N₂ ortamında yakma deneyi ile başlanılmış, yanma neticesinde geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir. Yakma sistemlerine beslenen yakma havasındaki %21 olan oksijen oranının %4 artırılması ile 50°C daha düşük sıcaklıkta yüksek verimle karbonun tamamının yakılması sağlanmıştır.

400°C'de ise %25O₂ atmosferinde yapılan yakma deneyleri neticesinde karbonun tamamının yanmadığı, ana numunede %51.6 olan toplam karbon miktarının, 400°C %25O₂'de %5.8'i yanarak %45.8 değerine indiği belirlenmiştir. Isıl değeri ise %22 azalma olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 400°C'de %25O₂ atmosferinin yakma için yeterli olmadığı belirlenmiştir.

400°C'de %50O₂ atmosferinde yakıldığında ise karbonun büyük bir kısmının yandığı (%90) ancak tamamının yanmasının gerçekleşmediği belirlenmiştir.

Sıcaklık 450°C'ye artırılması ile %25O₂ + %75N₂ atmosferinde yakma deneyi ile başlanılmış, yanma neticesinde geride kalan kısmın ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde Pirina numunesinin yüksek verimle yakılabildiği, bünyesinde bulunan karbonun tamamının yanabildiği en düşük sıcaklığın 450°C, en düşük O₂ miktarının ise %25 olduğu belirlenmiştir.

Afşin Elbistan linyit kömürü için seçilen 450°C ve %30O₂ çalışma şartları ile Pirina numunesi için seçilen 450°C ve %25O₂ çalışma şartları incelendiğinde her iki numunenin de karbon içeriğinin tamamının yandığı sıcaklığın aynı olduğu ancak, pirina numunesinin %5 daha az oksijen ortamında karbon içeriğinin tamamının yandığı belirlenmiştir. Kömür-biyokütle yakma sistemlerinde kömüre daha az olan biyokütlenin ilavesi söz konusu olduğu için kömürün karbonunun tamamının yandığı çalışma şartları kabul edilerek deneysel çalışmalar yürütülmüştür. %5,10,25 ve 50 pirinanın kömüre ilavesi ile hazırlanan karışımların tamamının 450°C ve %30O₂ atmosferinde yakılması ile ısı değeri, sabit karbonunun ve toplam karbonunun da sıfır olduğu belirlenmiştir.

Afşin Elbistan linyit kömürü numunesine %10 Pirina ilave edilerek %25O₂ atmosferinde 450°C'de yakılması ile tek başına 450°C'de içermiş olduğu karbonun tamamı yanmayan Afşin Elbistan linyit kömürünün karbonunun tamamının yandığı belirlenmiştir. %10 Pirina ilavesi oksijen miktarında %5 azalmaya neden olmuştur.

10.3. Termal Analiz Sonuçlarının Yorumlanması

Afşin Elbistan linyit numunesinin ve Pirina numunesinin kuru hava atmosferinde 900°C'ye kadar gerçekleştirilen DTA analiz sonuçları Şekil 9.5'te görülmektedir. 105°C'de nem çıkışından kaynaklanan endoterm pik nemi yüksek olan Afşin Elbistan linyit kömüründen daha kuru olan pirina numunesinde daha belirgin bir endoterm pik mevcuttur. Afşin Elbistan linyit kömürünün tutuşma sıcaklığının Pirina numunesinden daha yüksek değerde olduğu ekzoterm yanma reaksiyonlarının Afşin Elbistan linyit kömüründe 700°C'ye kadar devam ettiği görülmektedir. Birinci ekzoterm pik 350°C'de, ikinci ekzoterm pik 500°C'de, 3. Ekzoterm pik ise 625°C'de gerçekleştiği görülmüştür. Yanmanın ise 800°C'de tamamlandığı görülmüştür.

Pirina numunesinin ise 300-400°C arasında gaz fazında uçucu madde yanması, 450-580°C arasında ise yarıkok yanmasının gerçekleştiği görülmüştür. İki adet ekzoterm pik mevcuttur. Birinci ekzoterm pik 350°C'de ikincisi ise 530°C'de gerçekleşmektedir.

Afşin Elbistan ve Pirina numunelerinin DTG eğrileri incelendiğinde, Pirina numunesinin maksimum ağırlık kayıp hızının, Afşin Elbistan numunesinden çok daha yüksek olduğu (43.69), 350°C'de maksimum ağırlık kayıp hızına ulaştıkları belirlenmiştir. Pirina numunesi 550°C'de, Afşin Elbistan numunesinin de 800°C'de tamamlandığı görülmektedir.

Numunelerin DSC eğrileri incelendiğinde, daha yüksek ısı değere sahip olan pirina numunesinin ısı değeri ile orantılı olarak daha büyük, geniş ve keskin pikler verdiği gözlenmiştir.

400°C'deki Afşin Elbistan linyit kömürünün farklı Oksijen yüzdelerinde yakılmasına ait DTA eğrileri incelendiğinde, oksijen miktarının artışına bağlı olarak ekzoterm piklerde azalma olduğu ve ekzoterm piklerin daha yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı gözlenmiştir.

DTG eğrileri incelendiğinde ise T_{max} hızının oksijen miktarına bağlı olarak düştüğü ve T_{max} değerlerinde ise bariz bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

DSC eğrilerinde ise ısı değeri ile bağlı olarak oksijen miktarının düşmesi ile birlikte daha keskin ekzoterm pikler elde edilmiştir.

450°C'deki %25 ve %30O₂ atmosferlerinde yakılan Afşin Elbistan linyit numunesine ait DTA eğrisi incelendiğinde ekzoterm pikler O₂ miktarının yükselmesi ile birlikte daha yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Düşük oksijen miktarında uçucu maddenin gaz fazında yanması ile meydana gelen ekzoterm pik yarı kokun yanmasına ait ekzoterm pikten daha belirgindir. Oksijen miktarının artması ile uçucu maddenin gaz fazında yanması ve yarıkok yanması daha kısa sürede eş zamanlı olarak gerçekleşmekte ve kısmen daha tek bir pik olarak görülmektedir.

DTG eğrileri incelendiğinde yanma tepkimesinin 800°C'de tamamlanmayıp 830°C civarında tamamlandığıdır. Oksijen miktarının artmasına bağlı olarak maksimum ağırlık hızının gerçekleştiği sıcaklıklarda artış, ayrıca ağırlık kayıp hızında artış olduğu gözlemlenmiştir.

DSC eğrisi incelendiğinde numunelere ait belirgin bir ekzoterm piklerin görülmediği belirlenmiştir.

500°C'deki %25,45,50O₂ için olan DTA eğrileri incelendiğinde ekzoterm piklerin olmadığı, 800°C'de endoterm pik verdiği görülmektedir. (minerallerin parçalanması)

DTG eğrilerinde ise 700-825°C aralığında ağırlık kayıp hızlarının sıcaklığa bağlı olarak arttığı, T_{max} değerlerinde ise O₂ miktarının artışına bağlı olarak yükselme olduğu gözlenmiştir.

DSC eğrilerinde ise 500°C'de ekzoterm piklerin olmadığı, 800°C'de endoterm pik varlığı gözlenmiştir.

600°C'deki %40,50 DTA eğrisinde karbon içeriğinin tamamının yanmasından dolayı ekzoterm pik görülmemiştir. 800°C'de endoterm pik görülmüştür.

600°C'deki DTG eğrisi incelendiğinde, oksijen oranlarındaki artış belirli bir değişime neden olmamıştır.

Aynı numune için DSC ve TGA eğrisi incelendiğinde ise belirli bir değişim görülmemektedir.

650°C'de DTA eğrisinde %25 ve %30O₂ de ekzoterm pik görülmemiştir 800°C'de her iki numune için endoterm pik mevcuttur.

DTG eğrilerinde ve DSC eğrilerinde belirli bir değişim görülmemiştir.

700°C’de olan numunenin DTA eğrisi incelendiğinde ekzoterm pik görülmemekle birlikte, 425 ve 800°C’de endoterm pikler mevcuttur.

DTG eğrisinde 425°C ve 780°C’de 2 adet ekzoterm pik mevcuttur.

DSC eğrisinde 400°C ve 800°C’de bozunmalar ait pikler görülmektedir.

Pirina numunesi %25O₂ ile 400°C’de yakılan numunesine yapılan termal analiz sonucu elde edilen DTA eğrisinde 400 ile 600°C arasında ekzoterm pik mevcuttur.

DTG eğrisinde 250 ile 600°C arasında ağırlığın kaybedildiği, maksimum ağırlık kayıp hızının 27 mg/dk, sıcaklığın ise 450°C olduğu belirlenmiştir.

DSC eğrisi incelendiğinde 400-600°C arasında ısı çıkışının gerçekleştiği görülmüştür.

Farklı oksijen yüzdeleri ile yakılmış %10 pirina karışımlarına ait DTA eğrileri incelendiğinde oksijen miktarında azalma ile birlikte ekzoterm piklerde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklıklarda da artma olduğu gözlemlenmiştir.

450°C ve % 30O₂ ile yakılan karışımların DTA eğrileri tamamen incelendiğinde pirina oranının artmasına bağlı olarak ekzoterm piklerin gerçekleştiği maksimum sıcaklıklarda artış olduğu gözlemlenmiştir.

DTG eğrilerinde ağırlık kayıp hızlarında ilave edilen pirina miktarına bağlı olarak bir azalma olduğu, maksimum ağırlık kayıp hızının gerçekleştiği sıcaklıklarda artış olduğu gözlemlenmiştir.

DSC eğrilerinde belirgin bir artış olmadığı gözlemlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- 1- Afşin Elbistan linyit kömürünün içerdiği karbonun tamamının yandığı oksijen yakma şartları 450°C ve %30 O_2 olarak belirlenmiştir.
- 2- Pirina numunesinin ise 450°C ve %25 O_2 olarak belirlenmiştir.
- 3- Pirina numunesinin kömür numunesine ilavesi ile hazırlanan karışımlar 450°C ve %30 O_2 atmosferinde yakılması ile ilave edilen pirina yüzdesine bağımlı olmaksızın karbon içeriklerinin tamamının yandığı belirlenmiştir.
- 4- 450°C ve %30 O_2 'de karbonunun tamamı yanan Afşin Elbistan linyit kömürüne %10 Pirina ilavesi ile oksijen miktarında %5 azalma sağlanarak karbonunun tamamının yanması sağlanmıştır.
- 5- Sabit yataklı yakma sistemlerinde Afşin Elbistan ve Pirina karışımlarının karbon içeriklerinin tamamının yakılarak, yüksek verim elde edilebilmesi için oksijen miktarında %4 artış yapılarak 800°C 'de yanabilen Afşin Elbistan kömürünün 350°C sıcaklığını düşürerek 450°C 'de daha yüksek verimle yakılması sağlanmıştır.
- 6- Daha düşük sıcaklıkta yüksek verimle yakma neticesinde seçilecek malzemelerin 800°C 'ye değil 450°C 'ye dayanabilen malzemeler olması gerekmektedir. Bu nedenle yakma sistemlerinde kullanılacak malzemelerin maliyetinde de bir düşüş sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Tamzok, N.**, 2011. Kömürün Geleceği. TMMOB 8. Enerji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2. Cilt, İstanbul, 17- 19 Kasım 2011, s.247-292.
- [2] **Yağmur, E., Şimşek, H. E., Aktaş, Z., Toğrul, T.**, 2005. Effect of demineralization process on the liquefaction of Turkish coals in tetralin with microwave energy: Determination of particle size distribution and surface area. *Fuel* 84, 2316-2323.
- [3] **Haykiri-Açma, H., Ersoy-Meriçboyu A., Küçükbayrak, S.**, 2000. Effect of demineralization on the reactivity of lignites. *Thermochimica Acta*, 362(1-2), 131-135.
- [4] **Say, N P.**, 2006. Lignite-fired thermal power plants and SO₂ pollution in Turkey. *Energy Policy* 34, 2690-2701.
- [5] **Ballice, L.**, 2002. Classification of volatile products evolved from temperature-programmed pyrolysis of Soma-Lignite and Şırnak Asphaltite from Turkey. *JAAP* 63, 267-281.
- [6] <http://www.mta.gov.tr>, alındığı tarih: 12.03.2015.
- [7] **Tekes, T., Sınağ, A., Mısırlıoğlu, Z., Canel, M.**, 2002. Determination of Swelling Properties of Soma-Işıklar Lignite (Turkey). *Energy Fuels*, 16 (5), 1309 –1313.
- [8] **Loo, S., Koppejan, J.**, 2008. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan, London.
- [9] **Berkowitz, N.**, 1979. An Introduction to Coal Technology, Academic Pres, 201-209, New York.
- [10] **Essenhig, R.H.**, 1981. Chemistry of Coal Utilization, Seconda Supplemtary Volume (Ed.M.A.Elliot),1313-1389,Canada.
- [11] **Selçuk, N.**, 1993. Fluidized Bed Combustion Technologies for Existing Thermal Power Plants. *Invhed Paper, Workshop on Possibilities of Refurbishing Fossil-Fired Power Stations Taking Into Account Environmental Requirements, Turkish Electricity Authority*, p.241.
- [12] **Pitt, G.J., Millward, G.R.**, 1981. Coal and Modern Coal Processing an Introduction, Academic Press, London.
- [13] **Kural, O.**, 1998. Kömür, Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri
- [14] **Kök, M, V., Pamir, R., M.**, 1995. Pyrolysis and Combustion Studies of Fossil fuels by Thermal Analysis Method, 35, 145-156.
- [15] **Hu, Y., Naito, S., Hasatani, M.**, 2000. CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases, 79, 1925-1932.
- [16] **Açma, H.**, 1998. *Kömürün mineral içeriğinin yanma özelliklerine etkisi.* Türkiye (Doktora tezi), ITU.
- [17] **Kanury, A., M.**, 1975. Introduction to Combustion Phenomena (Cilt 2, Sf.124-132).
- [18] **White, L.P., Plaskett, L.G. ,** 1981. Biomass as Fuel, 199-200.
- [19] **Ocean Sequestration**, 1999. A 1999 Report by DOE's Office of Fossil Energy and Office of Science.

- [20] **Klara, S.M., Srivastava, R.D.**, 2002. U.S. DOE Integrated Collaborative Technology Development Program for CO₂ Separation and Capture, Environmental Progress, 21, 247-253.
- [21] 1996. IPCC. 1996 Climate Change 1995: The Science of Climate Change Cambridge: Cambridge University Press. 572 pp.
- [22] **H. Haykiri-Acma, S. Yaman**, 2008. Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomass blends: A Turkish case study,
- [23] **Demirbas, A.**, 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, , .
- [24] **Klass D., L.**, 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals, 513-517.
- [25] **R.C. Saxena , D.K. Adhikari, H.B. Goyal**, 2009. Biomass-based energy fuel through biochemical routes A review.
- [26] **Demirbas, A.**, 2006. Turkey's Renewable Energy Facilities in the Near Future (Cilt 28, Sf.527-536).
- [27] **Demirbas, A.**, 2008. Importance of biomass energy sources for Turkey (Cilt 36, Sf.834-842).
- [28] **Goyal, H.B., Seal, D. and Saxena, R.C.**, 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 504-517.
- [29] 2007, Hidrolik ve yenilenebilir enerji çalışma grubu biyokütle enerjisi alt çalışma grubu raporu, Ankara, Türkiye.
- [30] **Simmonds, M., Walker, G.**, 2005. Zero Recycle Oxyfuel Boiler Plant with CO₂ Capture, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formation, 1, 477-487.
- [31] **Paula A. Bejarano and Yiannis A. Levendis**, 2007. Combustion of Coal Chars in Oxygen-Enriched Atmospheres, Combust. Sci. and Tech., 179, 1569-1587.
- [32] **Kakaras, E., Koumanakos, A., Doukelis, A., Giannakopoulos, D., Vorrias, I.**, 2007. Oxyfuel boiler design in a lignite-fired power plant, Fuel, 86, 2144-2150.
- [33] **Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F. and Pis, J.J.**, 2008. Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion, Fuel, 87, 2753-2759.
- [34] **Acaroğlu, M.**, 2008. Türkiye’de biyokütle, biyoetanol ve biyomotorin kaynakları ve biyoyakıt enerjisinin geleceği
- [35] <http://tuikapp.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul>, alındığı tarih: 02.04.2015.
- [36] **J., G. Speight**, 2008. Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance.
- [37] **Overend, R.P., Milne, T.A. and Mudge, L.K. ,** 1985. Fundamentals of thermochemical biomass conversion.
- [38] **R.C. Saxena , D.K. Adhikari, H.B. Goyal**, 2009. Biomass-based energy fuel through biochemical routes A review.
- [39] **Chen, L., Young, S., Z., Ghoniem, F., A.**, 2012. Progress in energy and combustion science, oxy fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modelling, 38, 156-214.
- [40] **Baxter, L.**, 2005. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy, Fuel, 84, 1295-1302.

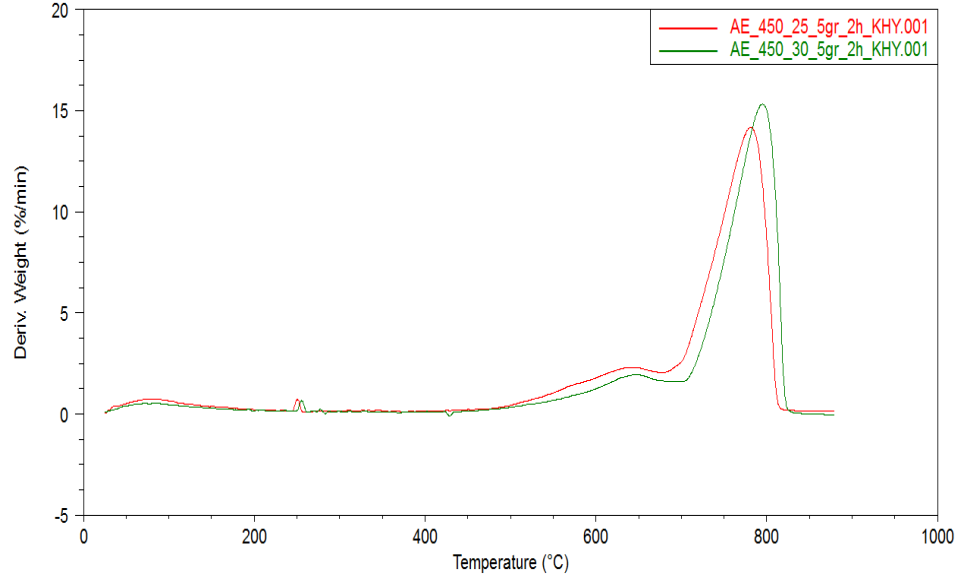
- [41] **Demirbas, A.**, 2003. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples.
- [42] **Klara, S.M., Srivastava, R.D.**, 2002. U.S. DOE Integrated Collaborative Technology Development Program for CO₂ Separation and Capture, *Environmental Progress*, 21, 247-253.
- [43] **Miracca, I., Aasen, K.I., Brownscombe, T., Gerdes, K., Simmonds M.**, 2005. Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture Technology Summary, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formation, 1, 441-449.
- [44] **Kakaras, E., Koumanakos, A., Doukelis, A., Giannakopoulos, D. and Vorrias, I.**, 2007. Oxyfuel boiler design in a lignite-fired power plant, *Fuel*, 86, 2144-2150.
- [45] **Singh, D., Croiset, E., Douglas, P., L., Douglas, M., A.**, 2003. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing vs. O₂/CO₂ recycle combustion., *Energy Conversion Management*, 44; 3073-3091.
- [46] **Ligang, Z.**, 2011. Oxy-fuel combustion for power generation and carbon dioxide, 101-102,196.
- [47] **Norman, F., Andersson, K., Leckner, B., Johnsson, F.**, 2008. High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion, 87, 3579-3585.
- [48] **Demirbas, A.**, 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219-230.
- [49] **Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., Anthony, E., J.**, 2008. NO Emission during Oxy-Fuel Combustion of Lignite, 150, 8-13.
- [50] **Tan, Y., Croiset, E., Douglas, M.A., Thambimuthu, K.V.**, 2006. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas, *Fuel*, 85, 507-512.
- [51] **Hu, Y., Q., Kobayashi, N., Hasatani, M.**, 2001. The reduction of recycled-NO_x in coal combustion with O₂/recycled flue gas under low recycling ratio, 80, 1851-1855.
- [52] **Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P., Wall, T.F.**, 2005. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation, *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 283-307.
- [53] **K. Okazaki, T. Ando**, 1997. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO₂, 22, 207-215.
- [54] **Baxter, L.**, 2005. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy, *Fuel*, 84, 1295-1302.
- [55] **Xuan, J., Leung, M., K., H., Leung, D., Y., C., Ni, M.**, 1981. A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems, 13, 1301-1313.
- [56] **Demirbas, A.**, 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal.
- [57] **Cliffe, K., R., S., Patumsawad**, 2001. Co-combustion of waste from olive oil production with coal in a fluidised bed, 21, 49-53.
- [58] **L., Armestoa, A., Bahilloa, A., Cabanillasa, K., Veijonenb, J., Oteroa, A., Plumedc, L., Salvadorc**, 2003. Co-combustion of coal and olive oil industry residues in fluidised bed, 82, 993-1000.
- [59] **Atimaya, A.,T., Topal, H.**, 2004. Co-combustion of olive cake with lignite coal in a circulating fluidized bed, 83, 859-861.
- [60] **Kastanaki, E., Vamvuka, D.**, 2006. A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal–biomass char blends, 85, 1186-1193.

- [61] **Grammelis, P., Skodras, G., Kakaras, E.**, 2006. Effects of biomass co-firing with coal on ash properties. Part I: Characterisation and PSD, 85, 2310–2315.
- [62] **Haykiri-Acma, H., Turan, A., Z., Yaman, S., Kucukbayrak, S.**, 2010. Controlling the excess heat from oxy-combustion of coal by blending with biomass, *Fuel Processing Technology* 91, 1569–1575
- [63] **Yuzbasi, N., S., Selçuk, N.**, 2011. Air and oxy-fuel combustion characteristics of biomass/lignite blends in TGA-FTIR, *Fuel Processing Technology*, 92, 1101–1108
- [64] **Paula A. Bejarano, Yiannis A. Levendis**, 2008. Single-coal-particle combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 environments, *Combustion and Flame*, 153, 270–287
- [65] **B. Arias, C. Pevida, F. Rubiera, J.J. Pis**, 2008. Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion, *Fuel*, 87, 2753–2759
- [66] **Wall, T., Liua, Y., Sperob, C., Elliott, L.**, 2009. An overview on oxyfuel coal combustion—State of the art research and technology development, *Chemical engineering research and design* 87 (2009) 1003–1016
- [67] **Ozbek, N., Hancar, N.**, Afşin-Elbistan ve Yatağan Termik Santrallerinin Yatak ve Uçucu Küllerinin Yer altı Sularına Etkisi, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Bitirme Ödevi, 2010.
- [68] Combustion processes for carbon capture. In: *Proceedings of the Combustion Institute* 2007, Wall TF.
- [69] **Singh, D., Croiset, E., Douglas, P., L., Douglas, M., A.**, 2003. Techno-economic study of CO_2 capture from an existing coal-fired power plant: MEA scrubbing Vs. O_2/CO_2 recycle combustion. *Energy Convers Manage*.
- [70] **Wall, T., Gupta, R., Buhre, B., Khare, S.**, Oxy-fuel (O_2/CO_2 , O_2/RFG) technology for sequestration-ready CO_2 and emission compliance. The Clearwater coal conference, April 17–21 2005.
- [71] **Davison, J., Thambimuthu, K.**, Technologies for Capture of Carbon Dioxide, in: E.S. Rubin, D.W. Keith, C.F. Gilboy (Eds.), *Greenhouse Gas Control Technologies*, Vol.I, Elsevier, 2005, 3-13.
- [72] **Bejarano, P., A., Levendis, Y., A.**, 2008. Single-Coal-Particle Combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 Environments, *Combustion and Flame*, 153, 270–87.
- [73] **Allam, R., White, V., Ivens, N., Simmonds, M.**, Heaters and Boilers to Oxyfiring by Cryogenic Air Separation and Flue Gas Recycle, in : D.C. Thomas, S.M. Benson (Eds.), *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*, Vol. 1, Elsevier, 2005, 451-475.
- [74] **Pipitone, G., Bolland, O.**, 2009. Power Generation with CO_2 Capture: Technology for CO_2 Purification, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 528–34.
- [75] **Hadjipaschalis, I., Kourtis, G., Poullikkas, A.**, 2009. Assessment of Oxyfuel Power Generation Technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2637–44.
- [76] **Pronobis, M.**, 2006. The Influence of Biomass Co-combustion on Boiler Fouling and Efficiency, *Fuel*, 85, 474-80.
- [77] **Miller, B., G., Tillman, D., A.**, 2008. *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*, Elsevier.
- [78] **Klass, D., L.**, 1998. *Biomass for Renewable Energy, Fuels, Chemicals*, Academic Press, Santiago.

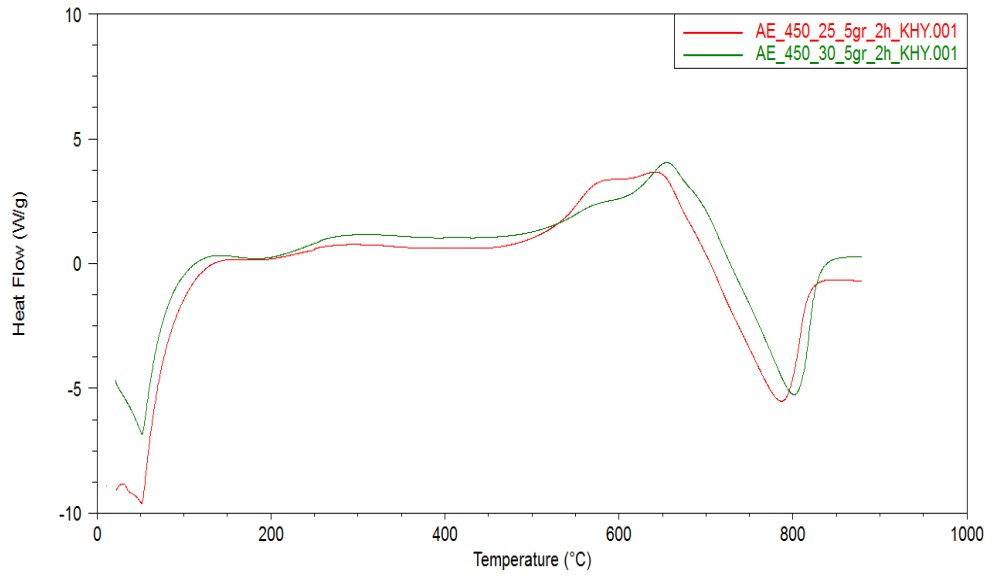
- [79] **Van Loo, S., Kooppejan, J.**, 2008. The Handbook of Biomass Combustion & Co-firing, Earthscan, London.
- [80] **Campbell, P.E., McCahey, S., Williams, B.C., Beekes, M.L.**, 2000. Coal and Plastic Waste in a PF Boiler, Energy Policy, 28, 223-9.
- [81] **Kouvo, P., Beckman, R.**, 2003. Estimation of Trace Element Release and Accumulation in the Sand Bed during Bubbling Fluidised bed Co-combustion of Biomass, Peat, and Refuse-derived Fuels, Fuel, 82, 741-53.
- [82] **Steenari, B., M., Lindqvist, O.**, 1999. Fly Ash Characteristics in Co-combustion of Wood with Coal, Oil or Peat, Fuel, 78, 479-88.
- [83] **Armesto, L., Bahillo, A., Cabanillas, A., Veijonen, K., Otero, J., Plumed, A., Salvador, L.**, 2003. Co-combustion of Coal and Olive Oil Industry Residues in Fluidized Bed, Fuel, 82, 993-1000.
- [84] **Martin, C., Villamanan, M., A., Chamorro, C., S., Otero, J., Cabanillas, A., Segovia, J., J.**, 2006. Low-grade Coal and Biomass Co-combustion on Fluidized Bed: Exergy Analysis, Energy, 31, 330-44.

EKLER

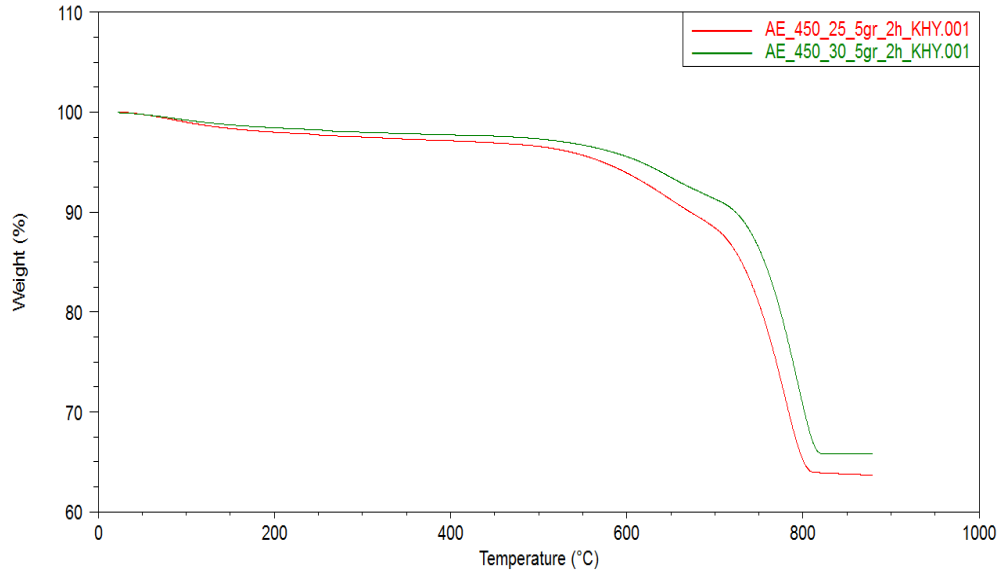
Ek A : Termal analiz grafikleri



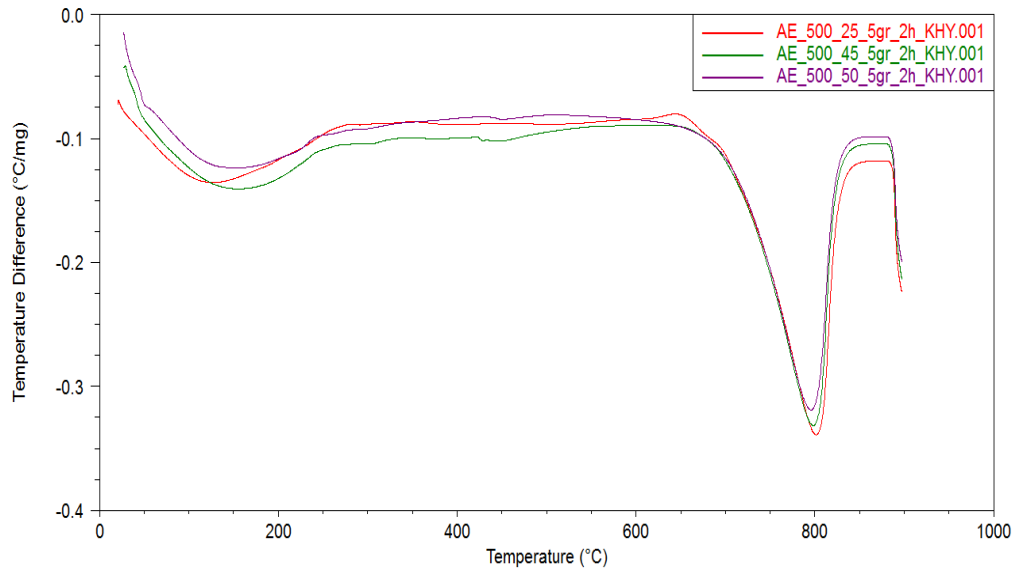
Şekil A. 1 Afşin Elbistan 450°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.



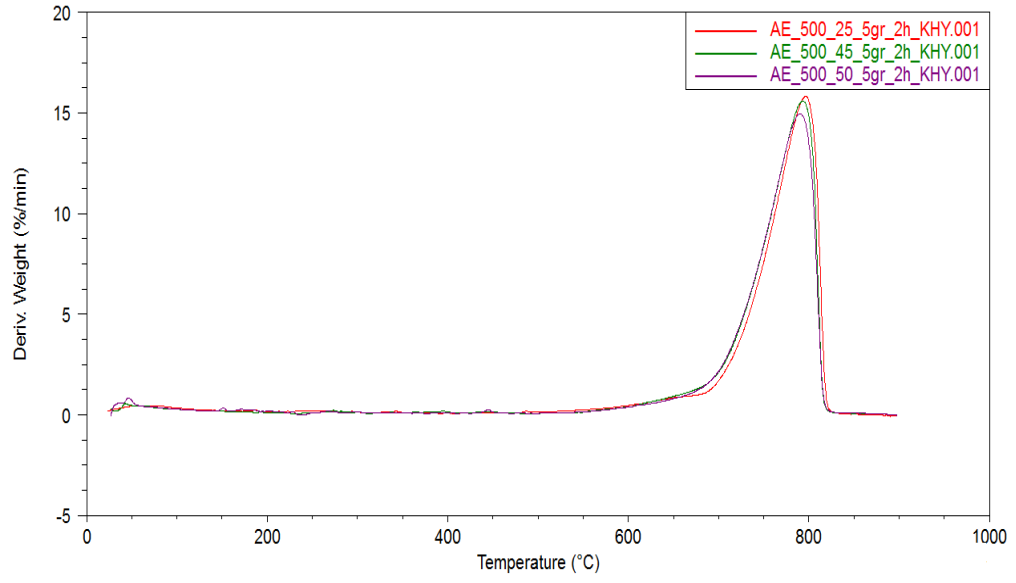
Şekil A. 2 Afşin Elbistan 450°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.



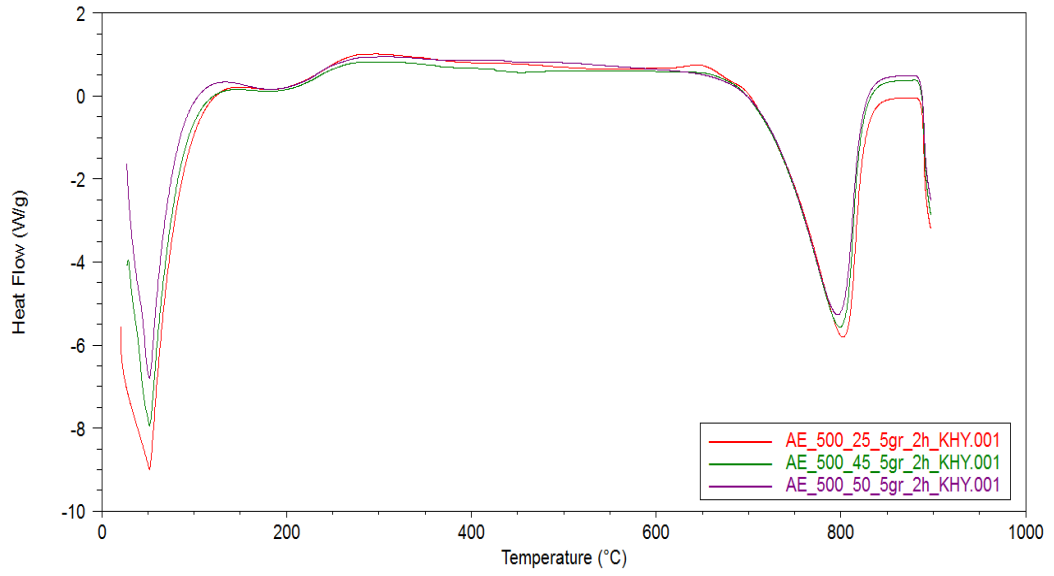
Şekil A. 3 Afşin Elbistan 450°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.



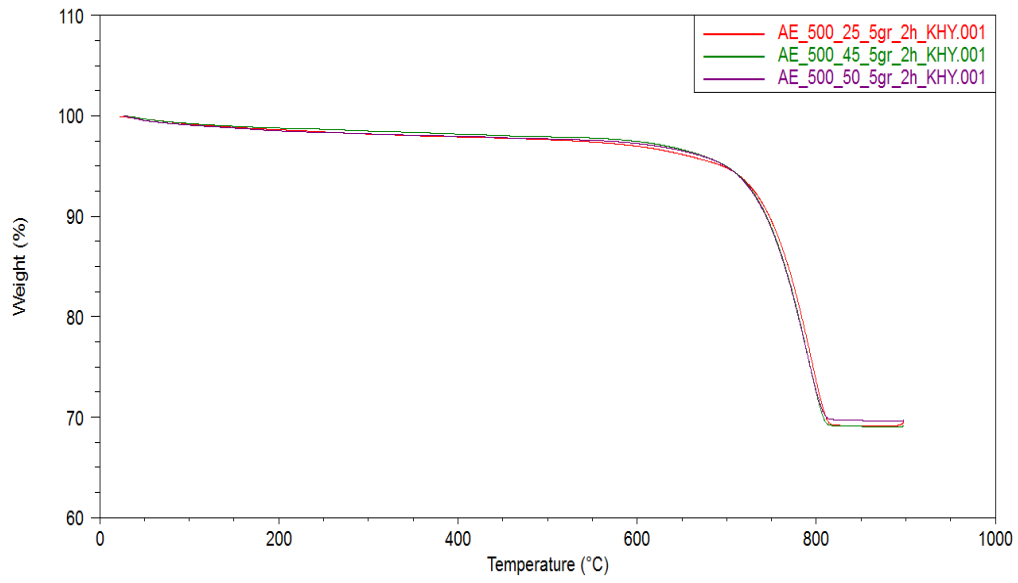
Şekil A. 4 Afşin Elbistan 500°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.



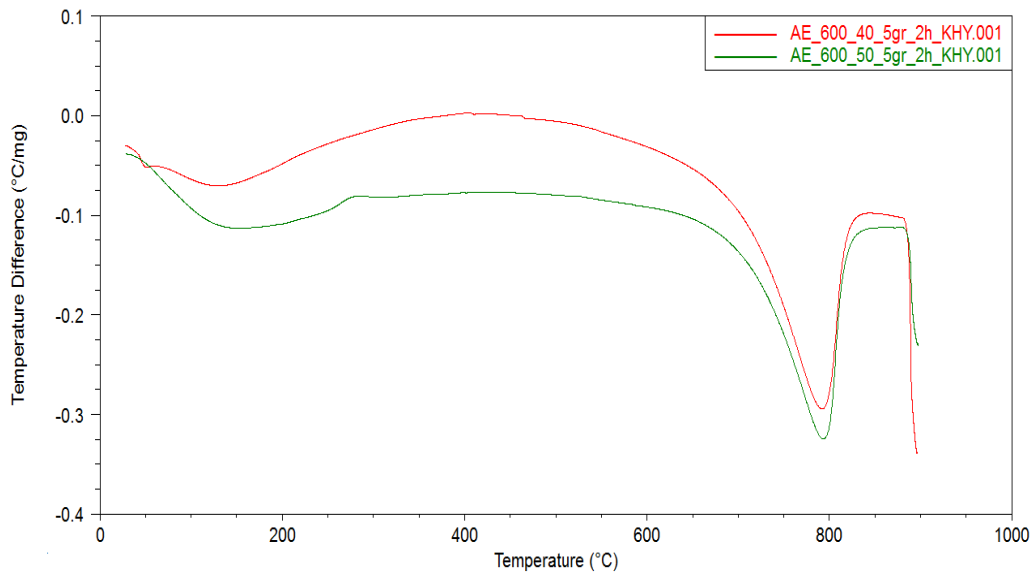
Şekil A. 5 Afşin Elbistan 500°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.



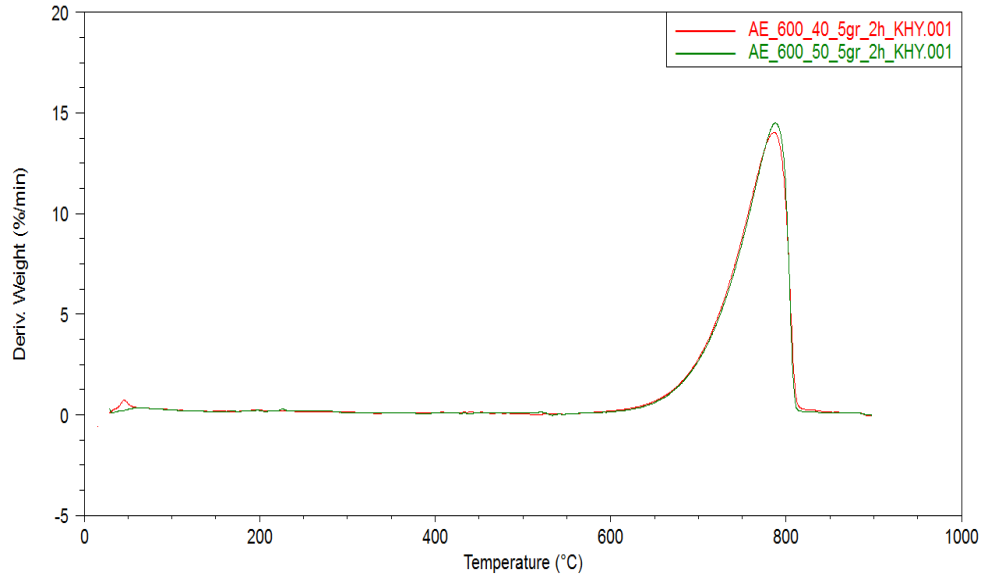
Şekil A. 6 Afşin Elbistan 500°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.



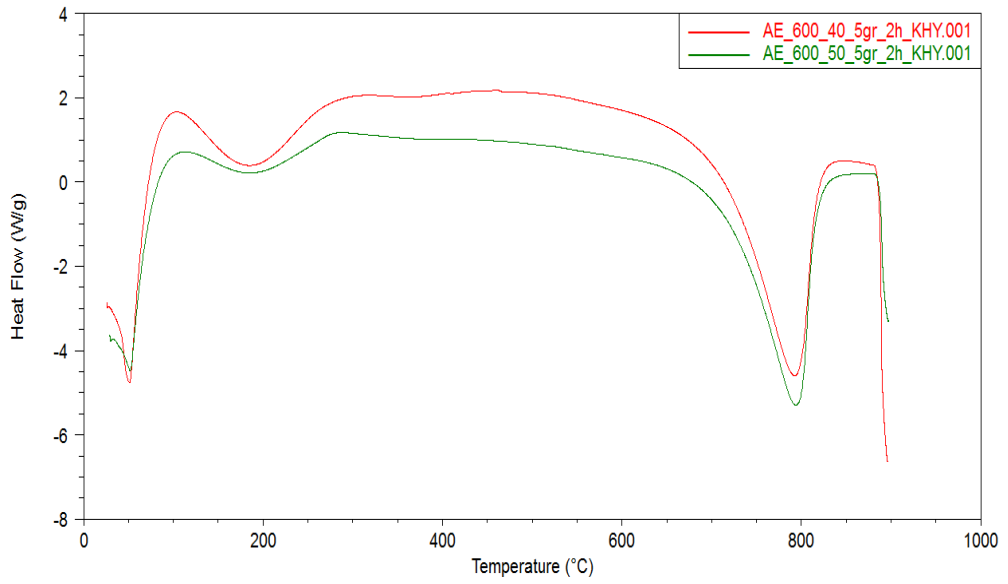
Şekil A. 7 Afşin Elbistan 500°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.



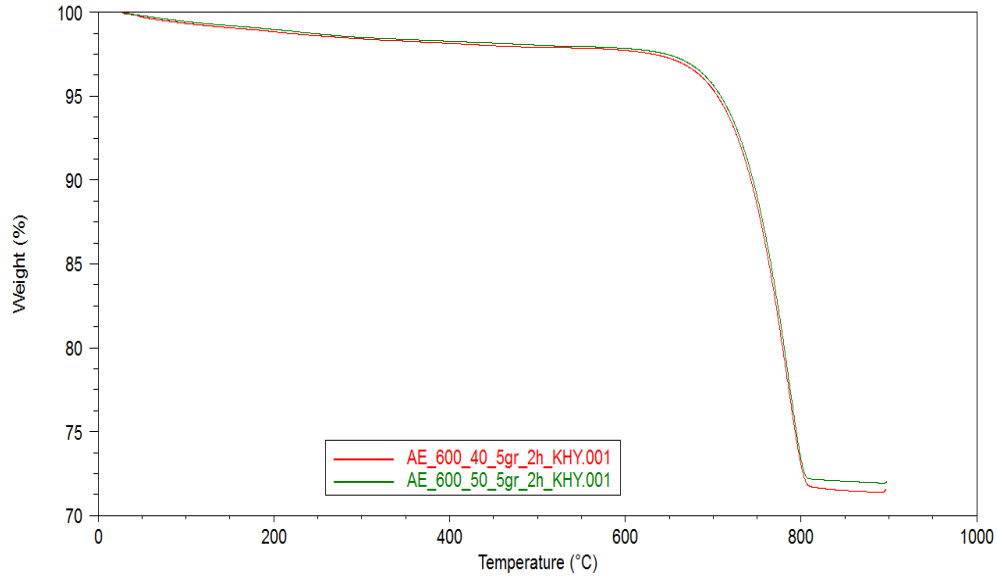
Şekil A. 8 Afşin Elbistan 600°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.



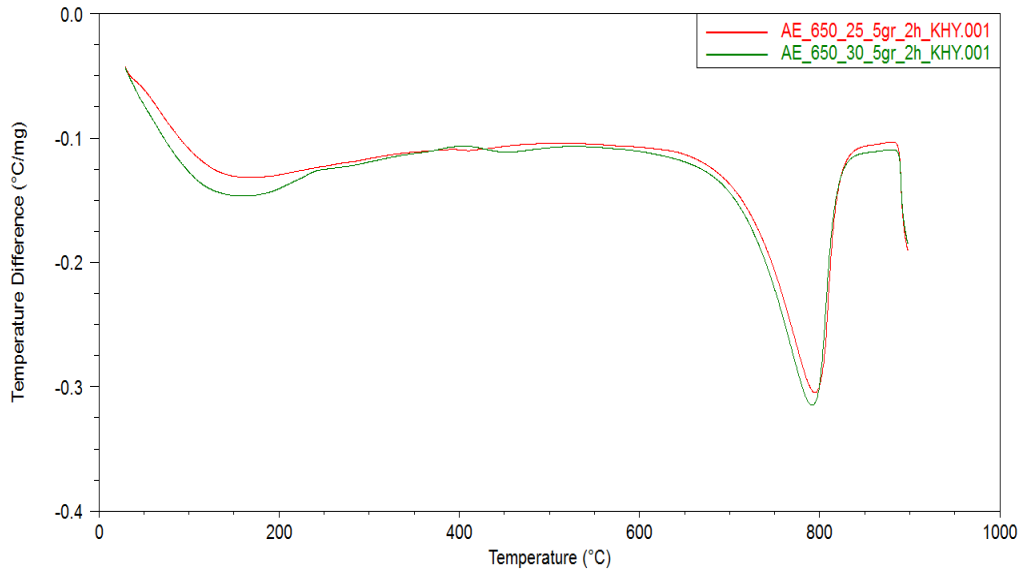
Şekil A. 9 Afşin Elbistan 600°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.



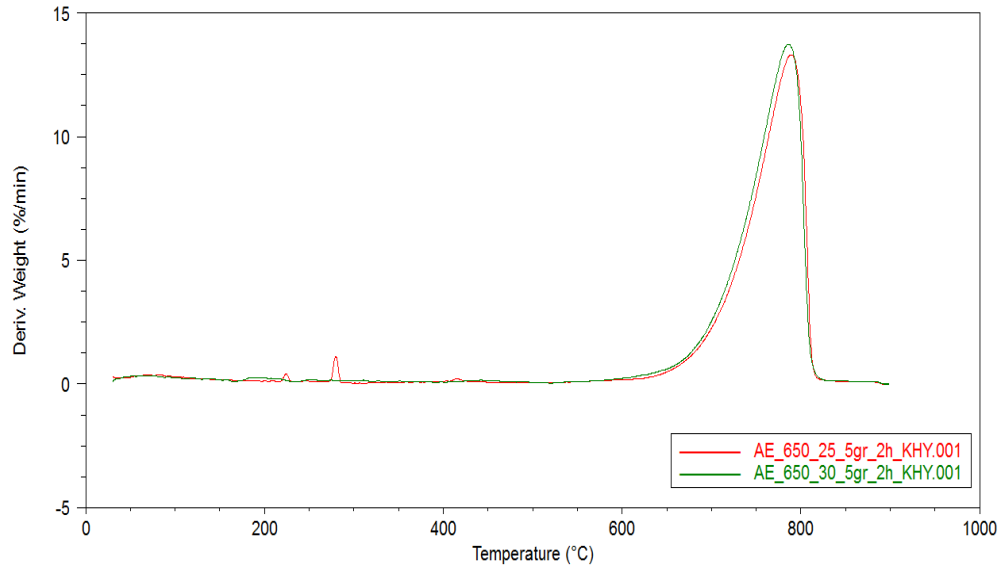
Şekil A. 10 Afşin Elbistan 600°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.



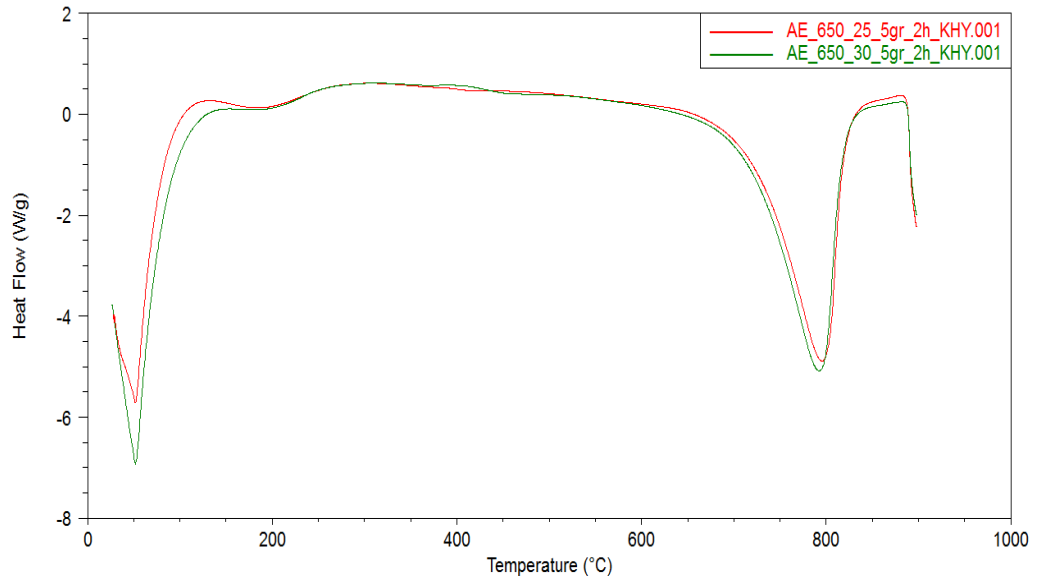
Şekil A. 11 Afşin Elbistan 600⁰C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.



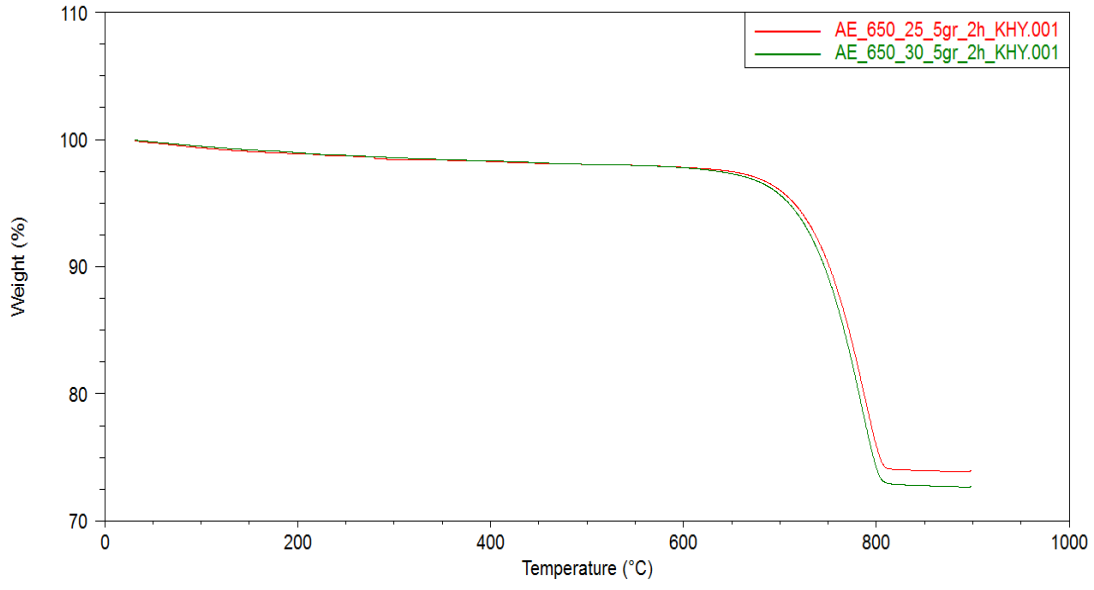
Şekil A. 12 Afşin Elbistan 650⁰C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTA eğrileri.



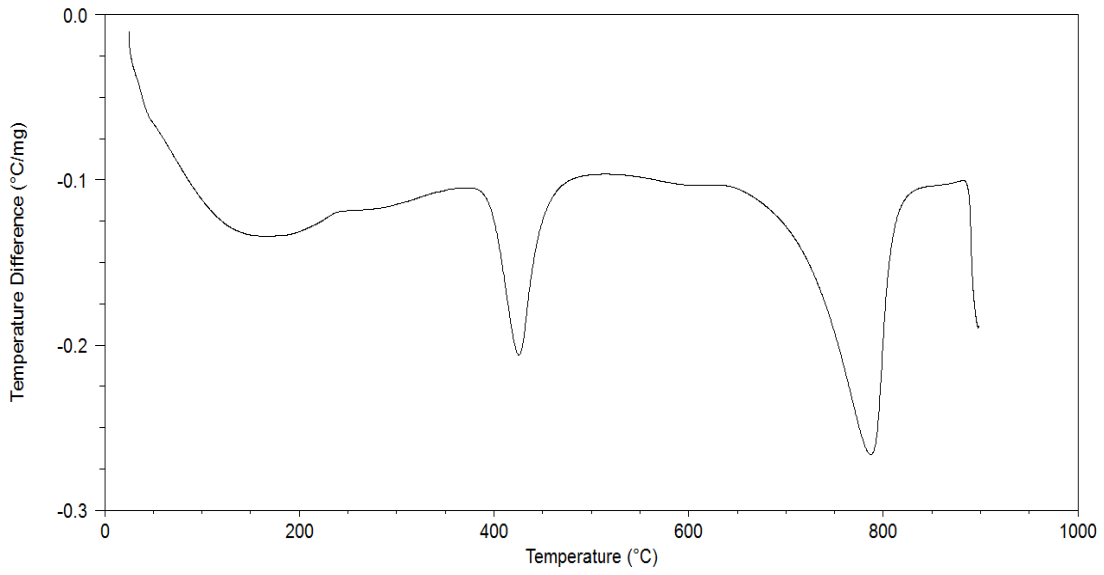
Şekil A. 13 Afşin Elbistan 650°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DTG eğrileri.



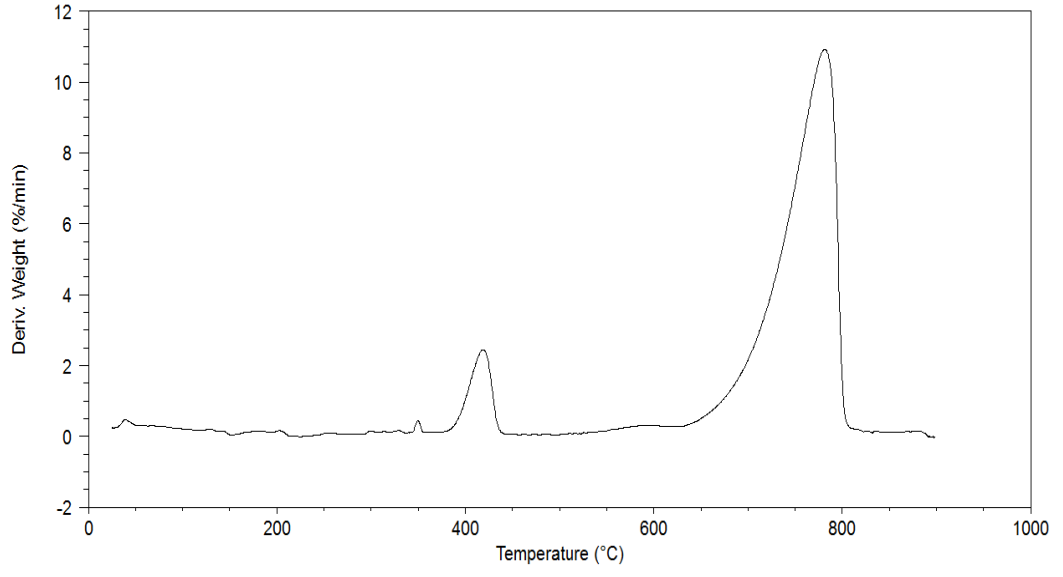
Şekil A. 14 Afşin Elbistan 650°C’deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki DSC eğrileri.



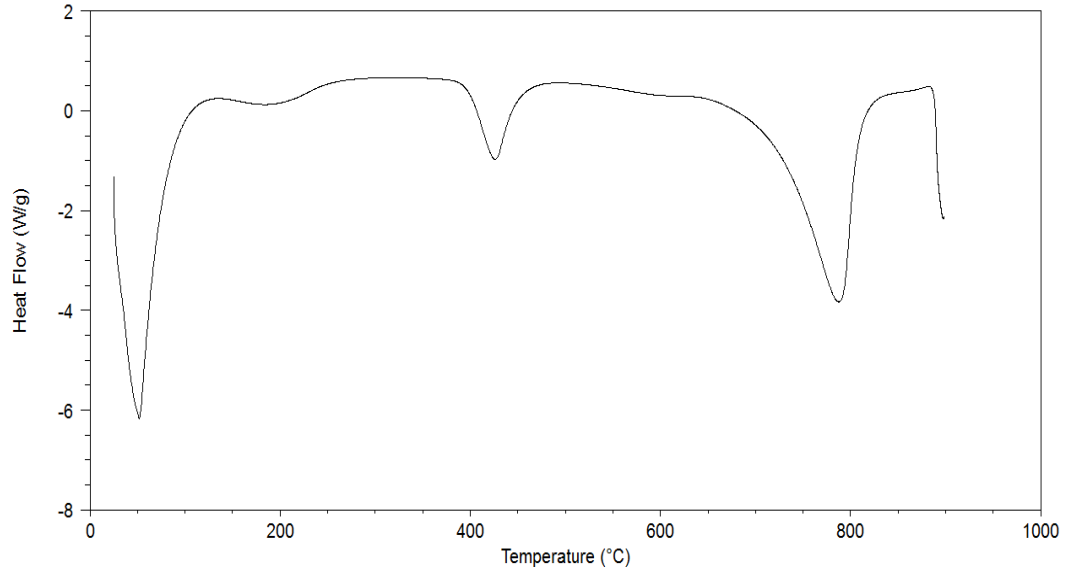
Şekil A. 15 Afşin Elbistan 650°C'deki numunelerinin farklı oksijen yüzdelerindeki TGA eğrileri.



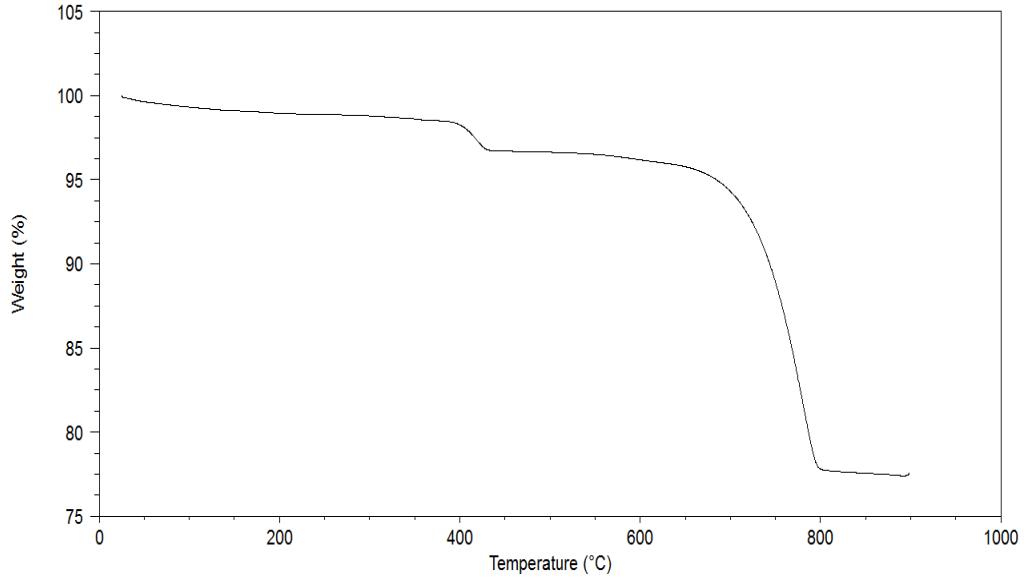
Şekil A. 16 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi.



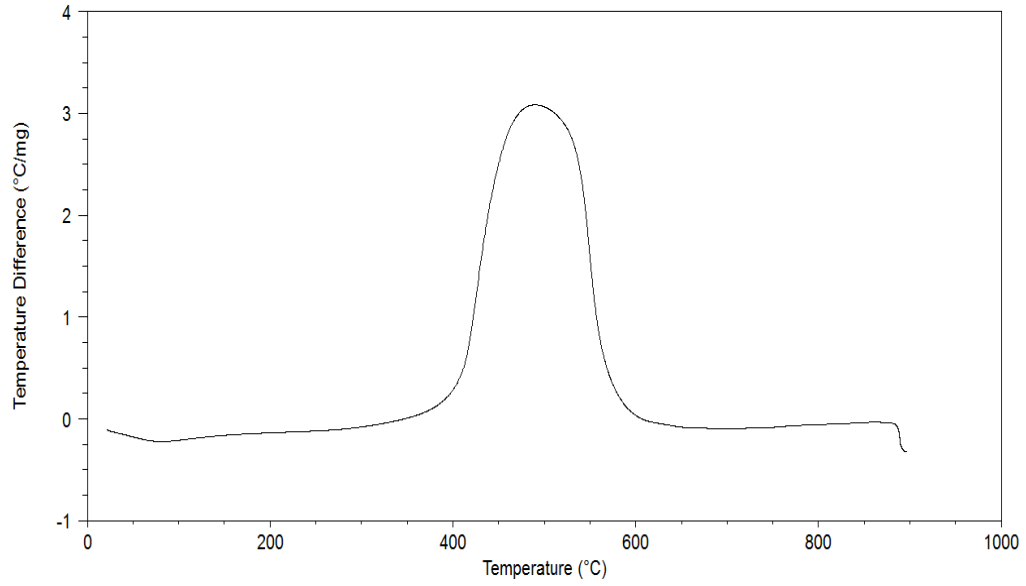
Şekil A. 17 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi.



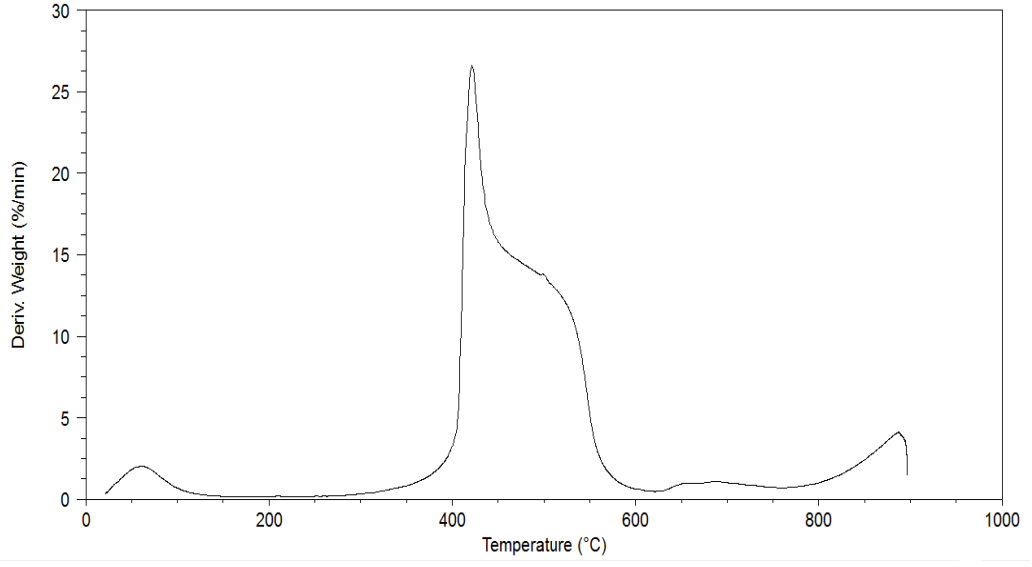
Şekil A. 18 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi.



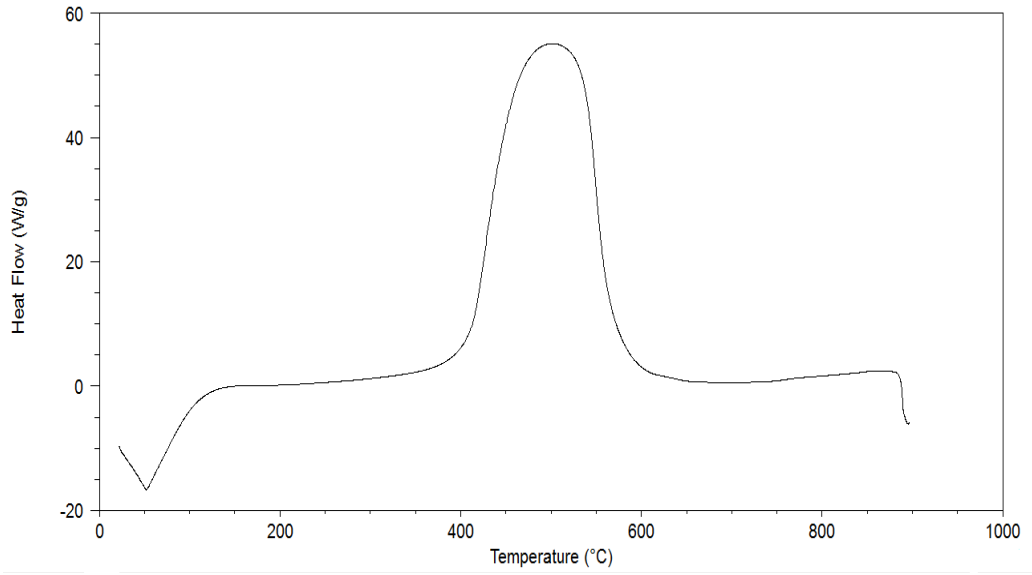
Şekil A. 19 Afşin Elbistan 700°C'deki %25O₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi.



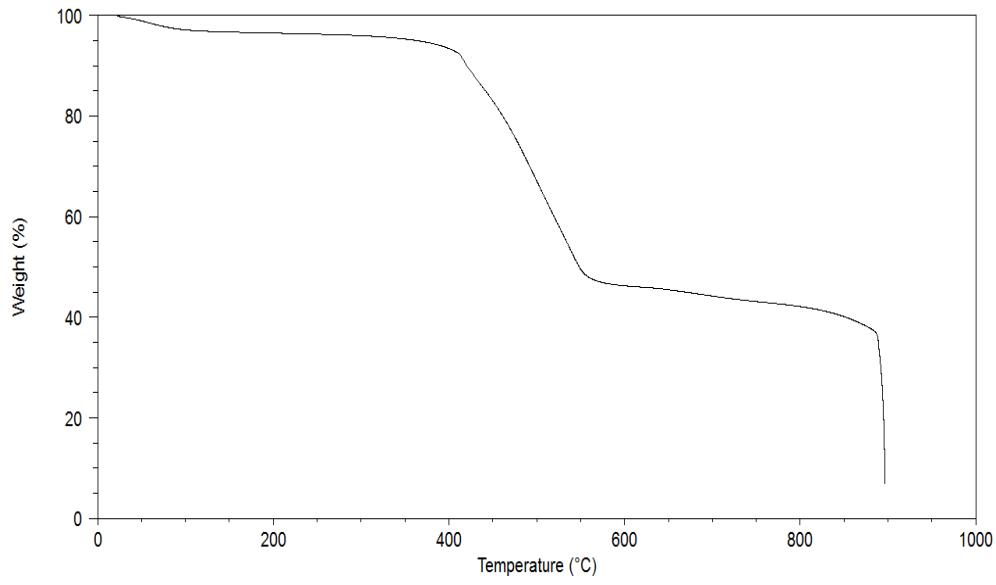
Şekil A. 20 Pirina 400°C'deki %25O₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi.



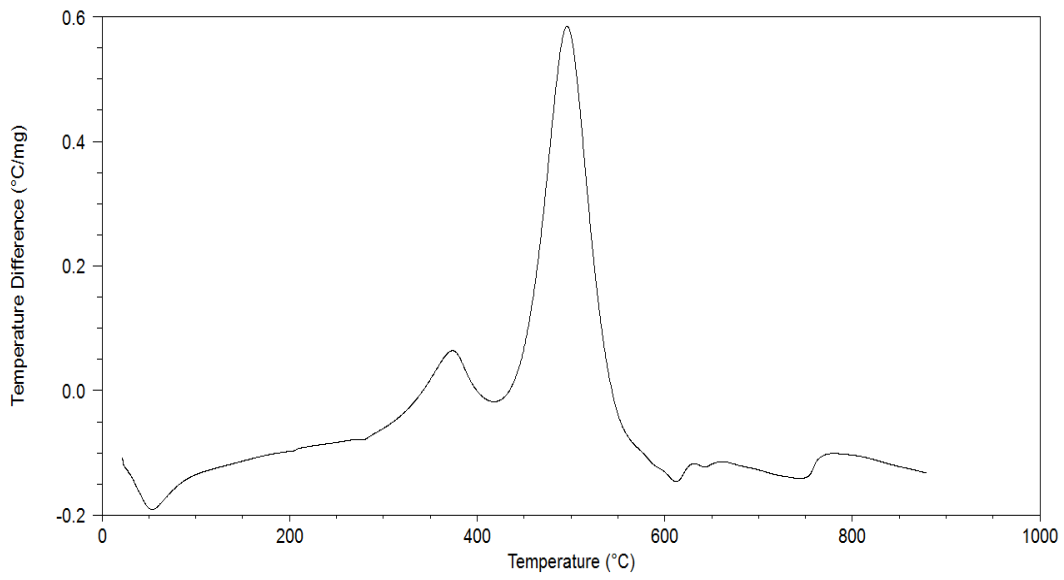
Şekil A. 21 Pirina 400°C’deki %25O₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi.



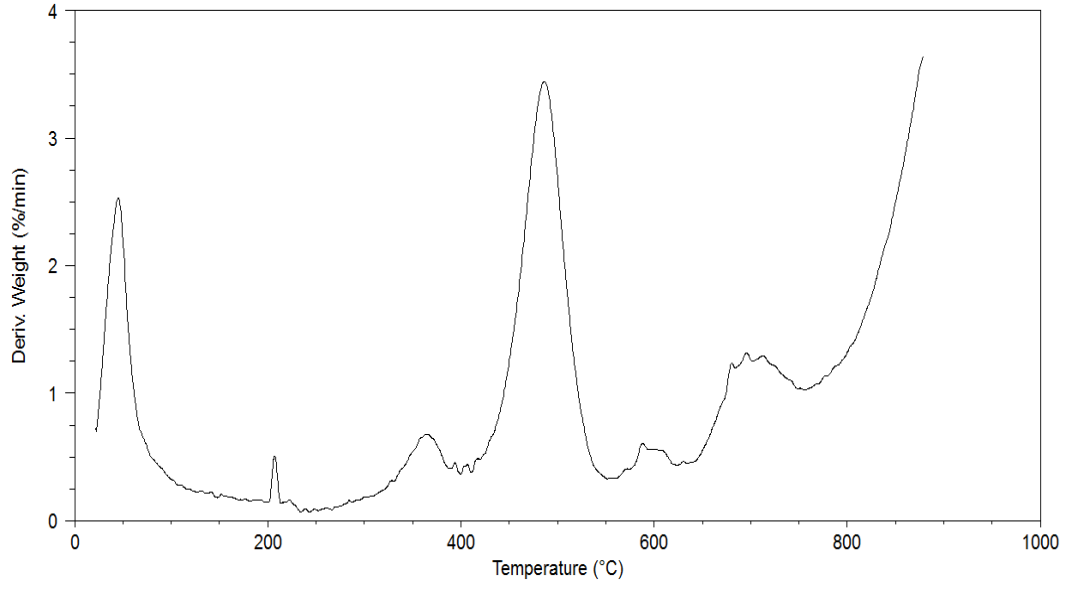
Şekil A. 22 Pirina 400°C’deki %25 O₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi.



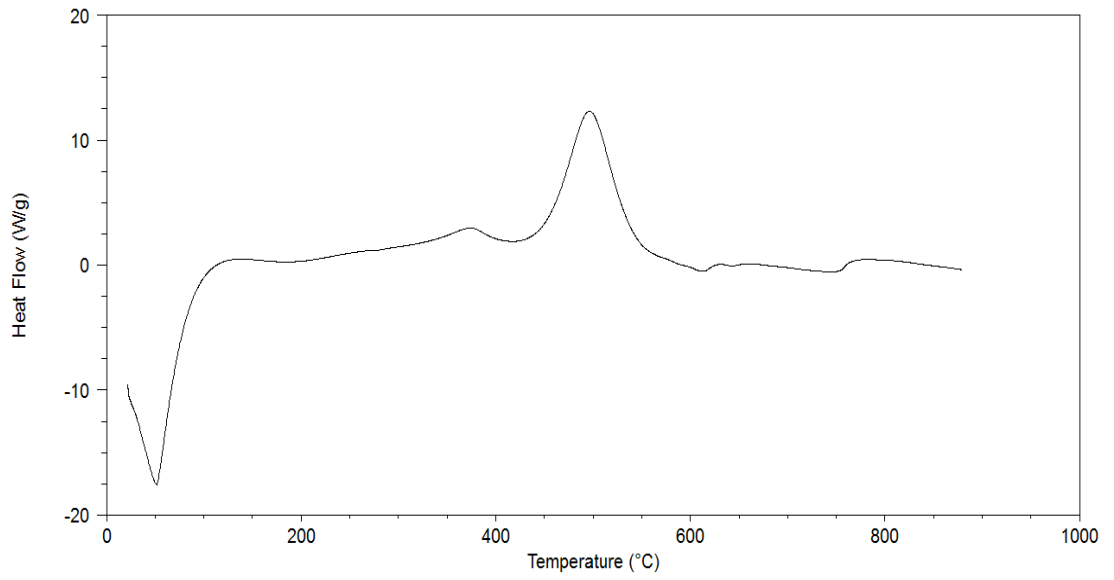
Şekil A. 23 Pirina 400°C'deki %25 O₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi.



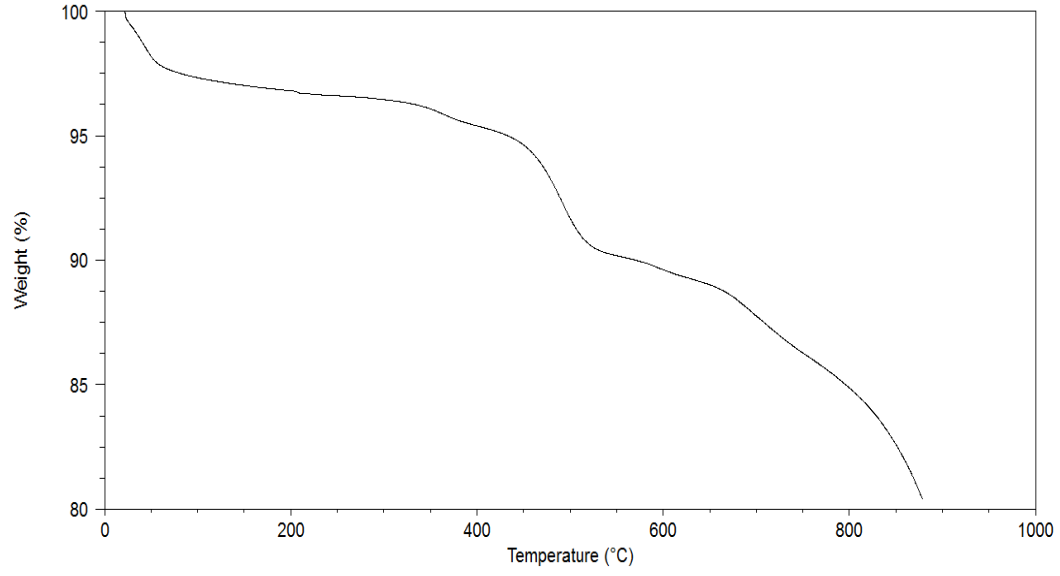
Şekil A. 24 Pirina 450°C'deki %25 O₂ ile yakılan numunenin DTA eğrisi.



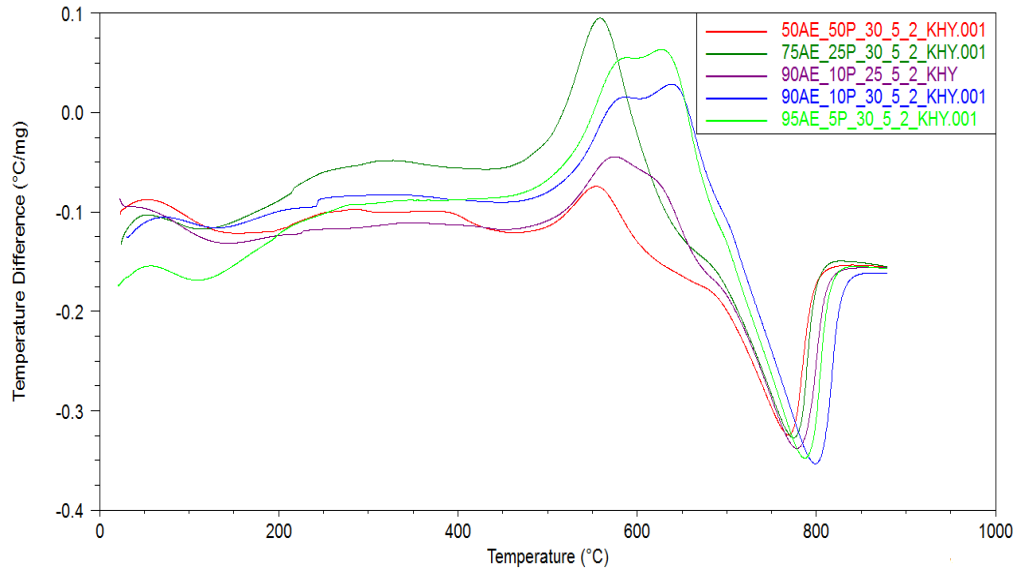
Şekil A. 25 Pirina 450°C’deki %25 O₂ ile yakılan numunenin DTG eğrisi.



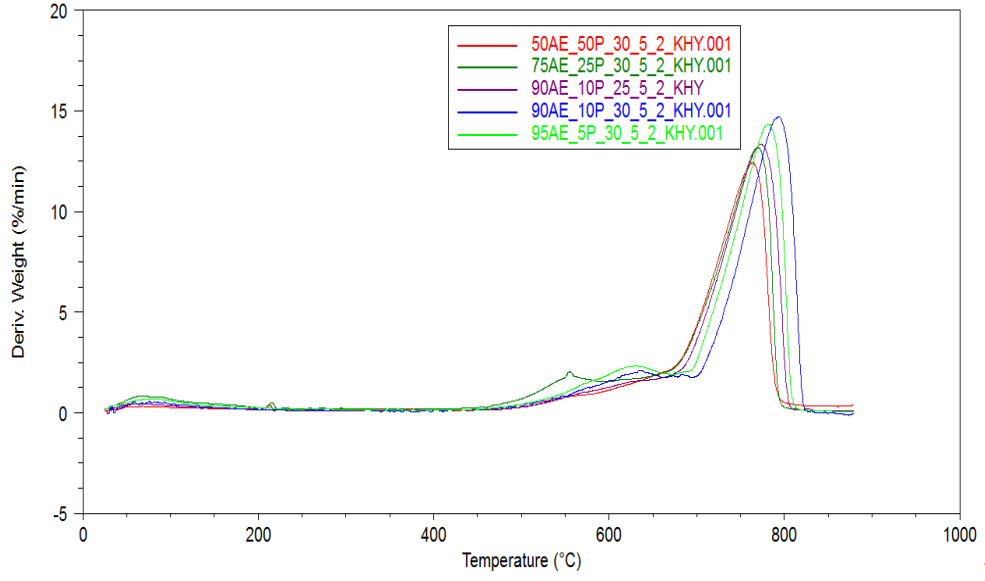
Şekil A. 26 Pirina 450°C’deki %25 O₂ ile yakılan numunenin DSC eğrisi.



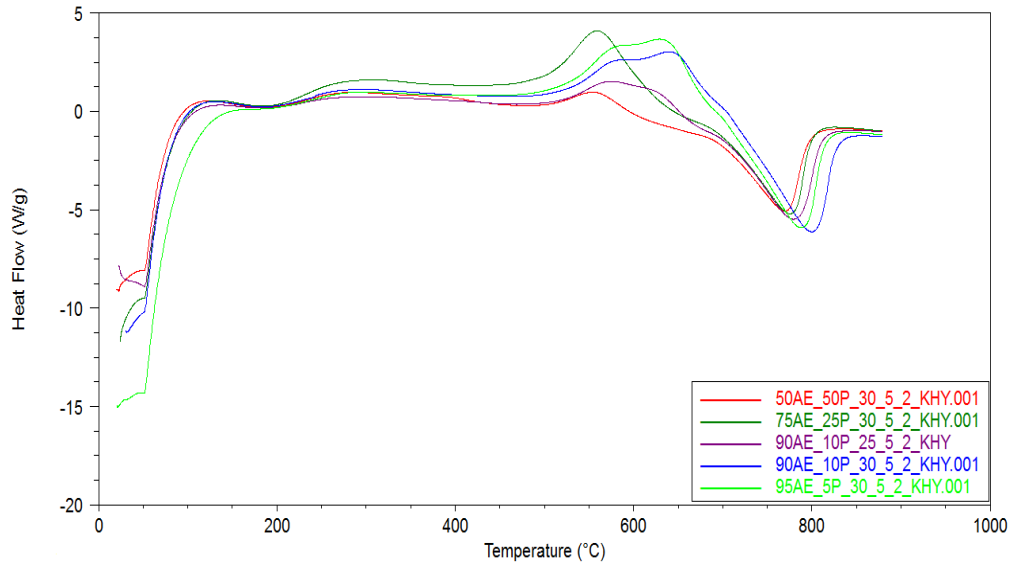
Şekil A. 27 Pirina 450°C'deki %25 O₂ ile yakılan numunenin TGA eğrisi.



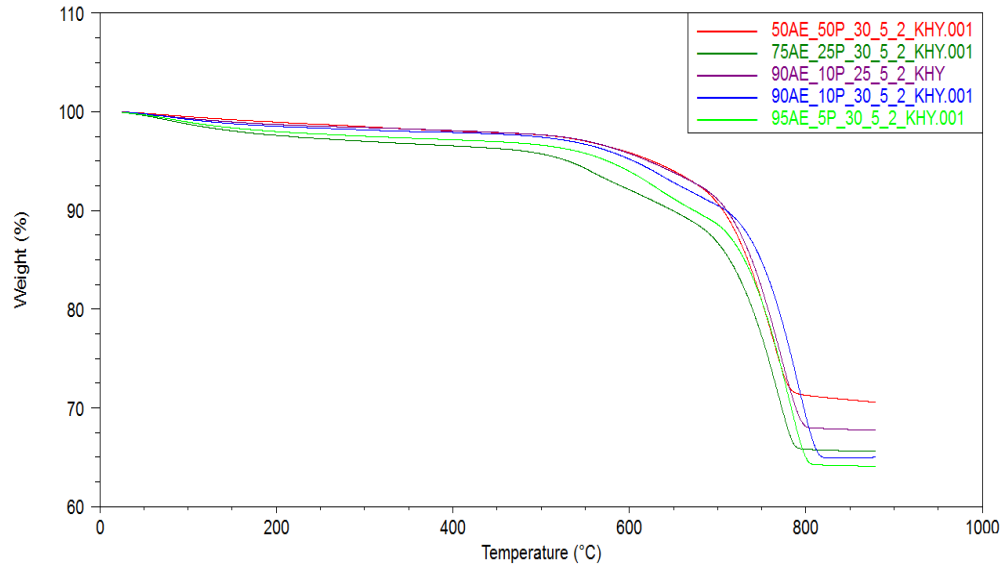
Şekil A. 28 Karışımların DTA eğrileri.



Şekil A. 29 Karışımların DTG eğrileri.



Şekil A. 30 Karışımların DSC eğrileri.



Şekil A. 31 Karışımların TGA eğrileri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Onur TORU

Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA 13.11.1990

E-Posta : onurtoru@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Kimya Mühendisliği