

**PALMİYE BUDAMA ATIKLARININ  
GAZLAŞTIRILMASI**

**Gülizar DEMİRTAŞ**

**Yüksek Lisans TEZİ**

**BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU**

**2019**

**T.C**

**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PALMIYE BUDAMA ATIKLARININ GAZLAŞTIRILMASI**

**Gülizar DEMİRTAŞ**

**BIYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman: Prof. Dr. BİROL KAYIŞOĞLU**

**TEKİRDAĞ-2019**

**Her Hakkı Saklıdır**

Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU danıŐmanlıĐında Gölizar DEMİRTAŞ tarafından hazırlanan “Palmiye budama atıklarının gazlaştırılması” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri BaŐkanı : Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

*İmza:*

Üye : Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

*İmza:*

Üye : Prof. Dr.Habib KOCABIYIK

*İmza:*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PALMIYE BUDAMA ATIKLARININ GAZLAŞTIRILMASI

**Gülizar DEMİRTAŞ**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Gazlaştırma, karbon içeren biyokütle gibi katıların yüksek sıcaklıkta bozunması ile yanabilir gaz elde etme işlemidir. Bu tez çalışmasında pelet haline getirilmiş palmiye budama atığının gazlaştırma işlemi Biyosistem Mühendisliği Bölümünde imal edilmiş laboratuvar tipi sabit yataklı aşağı akışlı gazlaştırma ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma işleminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Enerji ve ekserji analizleri, sistemlerin verimliliğinin tespit edilmesinde kullanılan analizlerdir. Vakum pompası 25 Hz ve 35 Hz frekanslarda çalıştırılarak iki ayrı kademede denemeler gerçekleştirilmiştir. Hava fazlalık katsayısı değerleri  $ER=0,44$  (25 Hz) ve  $ER=0,53$  (35 Hz) olarak bulunmuştur. Gazlaştırma işlemi süresince kor bölgesindeki sıcaklık değerlerinin  $800-900^{\circ}C$  arasında değişimi gözlemlenmiştir. Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gazın alt ısıl değeri (LHV) sırasıyla  $4,09 MJ/Nm^3$  ( $ER=0,44$ ) ve  $3,76 MJ/Nm^3$  ( $ER=0,53$ ) olarak bulunmuştur. Biyokütle besleme oranları (FCR) sırasıyla  $3,89 kg/h$  ve  $4,27 kg/h$  ve gaz çıkış oranları (AFR)  $7,61 m^3/h$  ve  $10,23 m^3/h$  olarak hesaplanmıştır. Palmiye budama atığı peletinin 25 Hz ve 35 Hz kademesinde enerji verimliliği sırasıyla %47,6 ve %52,8, ekserji verimliliği ise sırasıyla %43,7 ve %48,1 olarak hesaplanmıştır. Gazlaştırma işleminde kayıp ekserji (irreversibility) değerleri  $11,72 kW$  (25 Hz) ve  $11,84 kW$  (35 Hz) olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Gazlaştırma, sentez gaz, palmiye budama atığı peleti, ekserji

2019, 36 sayfa

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **GASIFICATION OF PALM TREE PRUNING WASTE**

**Gülizar DEMİRTAŞ**

Tekirdağ Namik Kemal University

Graduate School Of Natural and Applied Science

Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Gasification is the process of obtaining combustible gas by decomposition of solids such as carbon-containing biomass at high temperature. In this thesis, the gasification process of the palm tree pruning waste was made into a laboratory type fixed bed downdraft gasification unit manufactured in Biosystem Engineering Department. Energy and exergy analyzes of gasification process were performed. Energy and exergy analyzes are used to determine the efficiency of the systems. The vacuum pump was operated at 25 Hz and 35 Hz frequencies. ER values were found to be 0,44 (25 Hz) and 0,53 (35 Hz). During the gasification process, it was determined that the temperature values in the core region were observed to change between 800-900°C. The lower heat value (LHV) of the synthesis gas obtained as a result of gasification was found to be 4,09 MJ/Nm<sup>3</sup> (ER= 0,44) and 3.76 MJ/Nm<sup>3</sup> (ER = 0,53), respectively. Biomass feed rates (FCR) were calculated as 3,89 kg / h and 4,27 kg/h and gas output rates (AFR) were calculated as 7,61 m<sup>3</sup>/h and 10,23 m<sup>3</sup>/h, respectively. The energy efficiency of the palm tree pruning waste in the 25 Hz and 35 Hz stages was calculated as 47,6% and 52,8%, and the exergy efficiency was calculated as 43,7% and 48,1%, respectively. Irreversibility values in gasification process were found to be 11,72 kW (25 Hz) and 11,84 kW (35 Hz).

**Key Words:** Gasification, syngas, palm tree pruning waste pellet, exergy

**2019, 36 pages**

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Biyokütle Kaynakları.....	1
1.2. Biyokütlenin Termokimyasal Dönüştürme Yöntemleri .....	2
1.2.1. Doğrudan Yakma.....	3
1.2.2. Piroliz .....	3
1.2.3. Sıvılaştırma (Hidrotermal İyileştirme) .....	4
1.2.4. Gazlaştırma.....	4
1.2.5. Gazlaştırıcı Reaktör Tipleri .....	6
1.3. Tezin Amacı .....	8
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>9</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>13</b>
3.1. Materyal.....	13
3.1.1. Gazlaştırma Denemesinde Kullanılan Palmiye Atığı Peleti.....	13
3.1.2. Gazlaştırma Ünitesi .....	14
3.1.3. Gaz Kromatografi Cihazı (GC) .....	16
3.2. Yöntem .....	17
3.2.1. Gazlaştırma İşlemi.....	17
3.2.2. Sentez Gazın Isıl Değerinin Hesaplanması .....	17
3.2.3. Gaz ve Hava Debisi ile Biyokütle Tüketim Hızının Ölçülmesi .....	18
3.2.4. Stokiyometrik Hava Miktarının Saptanması .....	18
3.2.5. Eşdeğerlik Oranı (ER) Değerinin Hesaplanması.....	19
3.2.6. Özgül Gaz Üretim Oranının Hesaplanması .....	19
3.2.7. Gazlaştırma İşleminde Sıcaklık Değişimlerinin Saptanması.....	19
3.2.8. Enerji ve Ekserji Analizi.....	19
3.2.9. Verilerin Değerlendirilmesi .....	24
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>25</b>
4.1. Sentez Gazın Isıl Değeri .....	25
4.2. Gazlaştırma Havası ve Gaz Çıkış Oranı Debileri.....	26
4.3. Stokiyometrik Hava Miktarı, Yakıt Tüketim Hızı ve ER Değerleri.....	26

4.4. Özgül Gaz Üretim Oranları .....	27
4.5. Gazlaştırma İşleminde Sıcaklık Dağılımı.....	27
4.5. Enerji ve Ekserji verimleri.....	29
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>32</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>33</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>36</b>

## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1. Palmiye budama atık peletlerinin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları.....	13
Çizelge 3.2. Sentez gazın bileşimindeki gazların özgül ısılarının hesaplanmasında kullanılan deneysel eşitlikler (Karamarkovic ve Karamarkovic 2010).....	21
Çizelge 3.3. Sentez gazı oluşturan gaz bileşenlerin referans koşullarındaki entropi değerleri	23
Çizelge 4.1. Sentez gaz bileşenlerinin oranları ve ısı değerleri.....	25
Çizelge 4.2. Gazlaştırma havası ve gaz çıkış debileri .....	26
Çizelge 4.3. Yakıt tüketim hızları ve ER değerleri .....	26
Çizelge 4.4. 25 Hz pompa kademesinde enerji ve ekserji dengesi.....	29
Çizelge 4.5. 35 Hz pompa kademesinde enerji ve ekserji dengesi.....	30



## ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri (McKendry 2002) .....	3
Şekil 1.2. Gazlaştırma reaktörü tipleri (Maki 2010) .....	6
Şekil 1.3. Sabit yataklı gazlaştırıcı reaktör tipleri .....	6
Şekil 3.1. Gazlaştırma ünitesi reaktörü (Aktaş ve ark 2017).....	14
Şekil 3.2. Gazlaştırma sisteminin üniteleri (Aktaş ve ark 2017).....	15
Şekil 3.3. Laboratuvar tipi gazlaştırma sistemi (Aktaş ve ark 2017) .....	15
Şekil 3.4. Otomasyon panosu (Aktaş ve ark 2017) .....	16
Şekil 3.5. Gaz kromatografi cihazı (GC) (Aktaş ve ark 2017).....	17
Şekil 3.6. Gazlaştırma işleminde kütle ve enerji akış diyagramı .....	20
Şekil 4.1. 25 Hz pompa kademesinde sıcaklık dağılımları .....	28
Şekil 4.2. 35 Hz pompa kademesinde sıcaklık dağılımları .....	28
Şekil 4.3. İki farklı kademe enerji ve ekserji dengesi.....	30

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$AFR$	: Gazlaştırma havası debisi ( $m^3/h$ )
$C_p$	: Sabit basınçta özgül ısı ( $kJ/kmolK$ )
$C_{p_i}$	: Her bir gaz bileşeninin özgül ısısı ( $kJ/kmolK$ )
$ER$	: Hava fazlalık katsayısı
$\dot{E}x_{ch_{gaz}}$	: Sentez gazın kimyasal ekserjisi ( $kW$ )
$\dot{E}x_{ph_{gaz}}$	: Sentez gazın fiziksel ekserjisi ( $kW$ )
$\dot{E}x_{biyokütle}$	: Biyokütlenin ekserjisi ( $kW$ )
$\dot{E}x_{elektrik}$	: Elektrik girdisi ekserjisi ( $kW$ )
$\dot{E}x_{gaz}$	: Sentez gazın toplam ekserjisi ( $kW$ )
$\dot{E}x_{katran}$	: Katranın ekserjisi ( $kW$ )
$ex_{ph_{gaz}}$	: Gaz bileşenlerinin fiziksel ekserjisi ( $kW$ )
$ex_{ch_{gaz}}$	: Gaz bileşenlerinin kimyasal ekserjisi ( $kW$ )
$FCR$	: Biyokütle yakıt tüketim hızı ( $kg/h$ )
$GFR$	: Gaz çıkış oranı ( $m^3/h$ )
$GM_b$	: Özgül gaz üretim oranı ( $Nm^3/kg$ -biyokütle)
$h$	: Gazın bulunduğu koşullardaki entalpisi ( $kJ/Kmol$ )
$h_o$	: Gazın referans koşullarındaki entalpisi ( $kJ/Kmol$ )
$HHV_g$	: Sentez gazın üst ısıl değeri ( $MJ/Nm^3$ )
$HHV_b$	: Biyokütlenin üst ısıl değeri ( $MJ/kg$ )
$\dot{I}_{gazlaştırma}$	: Gazlaştırma esnasında ölü hale gelen enerji ( $kW$ )
$LHV_b$	: Biyokütlenin alt ısıl değeri ( $MJ/kg$ )
$LHV_g$	: Sentez gazın alt ısıl değeri ( $MJ/Nm^3$ )
$LHV_k$	: Katranın alt ısıl değeri ( $MJ/kg$ )
$m_b$	: Bir operasyon süresince tüketilen biyokütle kütlesi ( $kg$ )
$\dot{m}_b$	: Biyokütle akış oranı ( $kg/s$ )
$\dot{m}_{gaz}$	: Sentez gaz akış oranı ( $kmol/s$ )
$\dot{m}_k$	: Katran akış oranı ( $kg/s$ )
$N_{2_{gaz}}$	: Sentez gazdaki azot oranı (%)
$N_{2_{hava}}$	: Havadaki azot oranı (%)
$\dot{Q}_{biyokütle}$	: Biyokütle enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{ch_b}$	: Biyokütlenin kimyasal enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{ch_k}$	: Katranın kimyasal enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{elektrik}$	: Elektrik enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{gaz}$	: Sentez gazın enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{katran}$	: Katranın gazın enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{ph}$	: Sentez gazın fiziksel enerjisi ( $kW$ )
$\dot{Q}_{pch}$	: Sentez gazın kimyasal enerjisi ( $kW$ )
$R$	: Üniversal gaz sabiti ( $8.314 kJ/kmolK$ )
$s$	: Gazın bulunduğu koşullardaki entropisi ( $kJ/KmolK$ )
$s_o$	: Gazın referans koşullarındaki entropisi ( $kJ/KmolK$ )
$SR$	: Stokiyometrik hava miktarı ( $kg$ -hava/ $kg$ -biyokütle)
$SR_v$	: Hacimsel stokiyometrik hava miktarı ( $m^3$ -hava/ $kg$ -biyokütle)

$t$	: Bir operasyonun süresi (h)
$T_o$	: Referans koşullarındaki mutlak sıcaklık (K)
$y_i$	: Her bir gaz bileşeninin molar fraksiyonu
$\beta$	: Yakıt kalite katsayısı
$\eta_{En}$	: Gazlaştırma işleminin ısısal verimi
$\eta_{Ex}$	: Ekserji verimliliği

## ÖNSÖZ

Dünyanın artan nüfusu ve sanayileşmesi ile giderek artan enerji gereksinimini çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek kaynaklardan en önemlisi biyokütle enerjisidir. Biyokütlenin temiz ve verimli bir şekilde enerjiye dönüşüm teknolojileri arasında gazlaşma teknolojisi büyük bir öneme sahip olup, son zamanlarda büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Gazlaştırma işlemi ile gaz ürünlerin eldesi termal dönüşüm süreçleri içerisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu tez kapsamında ülkemizde birçok bölgede park ve bahçelerde süs ağacı olarak değerlendirilen palmye bitkisinin budama atıkları sabit yataklı aşağı akışlı gazlaştırma işlemine gazlaştırılmış, elde edilen sentez gazın ısısal verimi saptanmış ve ekserji analizi yapılmıştır.

Yüksek lisans çalışmamda danışmanlığımı üstlenen, ilgi ve zamanını esirgemeyen, tezin her aşamasında büyük destek ve yardımlarını gördüğüm, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU'na saygı ve sevgiyle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda her türlü sorunda desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, gazlaştırma prosesi ve GC analizi hakkında bilgi veren ve gözlem yapmama destek olan Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ ve Dr. Serkan TUĞ'a; çalışmalarım boyunca yardımlarını ve desteklerini eksik etmeyen canım arkadaşlarım Biyosistem Yük. Müh. Bahar DİKEN ve Biyosistem Müh. Merve EREMKERE'ye sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, hayatım boyunca bu noktaya gelebilmem için büyük fedakârlıkta bulunan, her attığım adımda arkamda olduklarını hissettiğim sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Temmuz, 2019

Gülizar DEMİRTAŞ

## 1.GİRİŞ

Enerjiye olan gereksinim, teknolojinin gelişmesi ve nüfus artışına paralel olarak hızla artmaktadır. Dünyadaki birincil enerji kaynaklarının yaklaşık %70'i fosil kaynaklıdır ve hızla tükenmektedir. Geleneksel enerji kaynaklarının artan maliyeti ve çevresel olumsuz etkileri de önemli bir sorundur. Bu nedenlerden dolayı geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olabilecek enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır. Bu kaynaklar içerisinde yenilenebilir enerji önemli bir yer tutmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalar ve yatırımlar sonucunda günümüzde birincil enerji kaynağı olarak güneş, rüzgâr ve biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %13 dolaylarına yükselmiştir (Boztepe 2011).

Karbon, hidrojen ve oksijen içeren ve kısa sürede yenilenebilen tüm bitkisel ve hayvansal kökenli maddeler biyokütle olarak tanımlanmaktadır. Biyokütle, güneşten alınan enerji ve CO<sub>2</sub> kullanılarak bitkilerin fotosentezi sonucu oluşmaktadır. Bu esnada atmosfere oksijen salınmaktadır. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanılması sonucunda oksijen kullanılarak CO<sub>2</sub> salınmakta ve ısı enerjisi elde edilmektedir. Bu döngü biyokütlenin yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanıldığı sürekli yenilenebilen bir döngüdür. Fotosentez güneş var olduğu sürece devam edeceği için, biyokütle tükenmez bir enerji kaynağı olarak da tanımlanabilir. Biyokütle doğrudan yakılarak enerji sağlandığı gibi, termokimyasal ve biyokimyasal dönüştürme yöntemleriyle de enerji elde edilmektedir (Kurt ve Koçer 2010, Anonim 2019a).

### 1.1. Biyokütle Kaynakları

Biyokütle kaynaklarını, karalardan denizlere kadar hemen her yerde bulmak mümkündür. Tarımsal atıklar, orman atıkları, endüstriyel atıklar, hayvansal atıklar, evsel atıklar, kanalizasyon atıkları önemli biyokütle kaynakları olarak gösterilebilir. Biyokütle yalnız yenilenebilir olmasıyla değil, her yerde yetiştirilebilmesi, sosyoekonomik gelişmeye ve çevre korumasına katkı sağlaması, elektrik, kimyasal madde ve özellikle taşıt vasıtaları için yakıt üretiminde kullanılabilmesi nedeniyle de stratejik bir enerji kaynağı sayılmaktadır. Enerji üretiminde kullanılacak biyokütle kaynaklarını; bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, şehir ve endüstri atıkları olmak üzere 3 ana başlık altında sınıflandırmak mümkündür.

Bitkisel kaynaklı atıklar odun (enerji ormanları, çeşitli ağaçlar), yağlı tohum bitkileri (kolza, ayçiçek, soya), karbonhidrat bitkileri (patates, buğday, mısır, pancar, enginar), elyaf bitkileri (keten, kenevir, tatlı sorgum, miskantus), protein bitkileri (bezelye, fasulye, buğday) ve bitkisel artıklardır (Karaosmanoğlu 2003). Türkiye’de; bitki artıkları, fındık ve ceviz kabuğu, prina, ayçiçeği kabuğu, çığit ve mısır gibi artıklar enerji amacıyla değerlendirilmektedir. Enerji amacıyla değerlendirilen bu biyokütle kaynaklarının ısı değeri 3800-4300 kcal/kg arasında değişmektedir ( Koçer ve Ünlü 2007).

Büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan yetiştiriciliği ülkemiz hayvancılık sektörünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle biyokütle kaynakları içerisinde hayvansal atıklar önemli bir yere sahiptir. Hayvan yetiştiriciliğinden sağlanan atıklar biyogaz ve gazlaştırma gibi modern biyokütle teknolojileri kullanılarak enerjiye dönüştürülebilmektedir (Saz 2015).

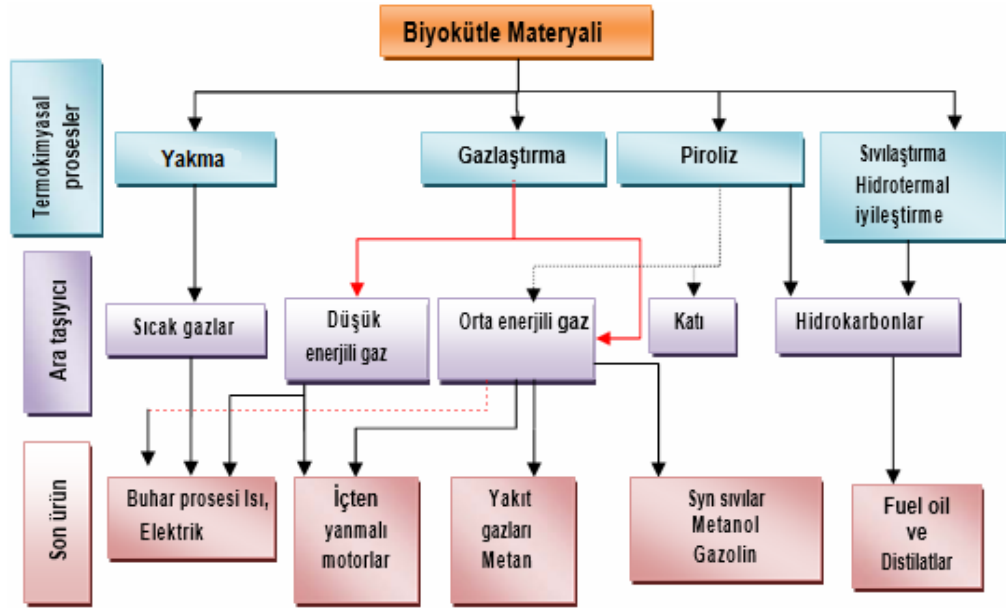
Çöp depolama alanlarındaki katı, evsel ve endüstriyel atıklar, evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları, kanalizasyon atıkları anaerobik organizmalar yardımıyla metan gazına dönüştürülebilen biyokütle kaynaklarıdır.

Çöp ve katı maddelerden enerji elde etmenin diğer bir yolu ise piroliz ve yüksek sıcaklıklarda yakmadır. Bu atıkların uygun yakma tesislerinde hava ile yakılmasıyla oluşan ısı elektrik üretiminde kullanılmaktadır (Koçer ve Ünlü 2007, Anonim 2019b).

## **1.2. Biyokütlenin Termokimyasal Dönüştürme Yöntemleri**

Biyokütle termokimyasal dönüşüm yöntemleri, biyokütleden yakıt ve kimyasal madde üretimi sağlayan yöntemlerdir. Bu yöntemler sayesinde biyokütlenin düşük enerji içeriği, düşük yoğunluk ve taşıma zorlukları gibi olumsuz durumlar ortadan kaldırılabilir (Özay ve ark. 2014). Biyokütle termokimyasal proseslerin amacı, fosil kaynaklı yakıtlara alternatif, kararlı özelliklere sahip, kolay depolanabilir ve taşınabilir yakıtlara ulaşmaktır. Biyokütle kaynağı için uygun dönüşüm yöntemlerinin seçiminde; biyokütle kaynağının tipi ve miktarı, enerji taşıyıcıları ve son kullanım uygulamaları, çevresel standartlar, ekonomik koşullar gibi faktörler rol almaktadır (Caputo ve ark. 2005).

Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1. 1. Biyokütlenin termokimyasal dönüşüm yöntemleri (McKendry 2002)

### 1.2.1. Doğrudan Yakma

Doğrudan yakma işlemi, biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesinde binlerce yıldır uygulanan en eski termokimyasal dönüştürme yöntemidir. Ancak yakma işlemi sırasında kullanılan basit yakma sistemlerinden dolayı, verim oldukça düşüktür. Son zamanlarda verimi yükseltmek için yeni yakma sistemleri geliştirilmektedir.

Orman biyokütle atıklarının yakılmasıyla elde edilen enerji, ısı ve elektrik üretiminde kullanılabilir. Ancak bu atıkların enerji değeri kömür ve petrole göre daha düşüktür. Bu yüzden enerji değeri yüksek diğer enerji kaynakları ile birlikte karıştırılarak da yakılabilir. (Leckner ve ark. 2004). Biyokütlenin doğrudan yakılması CO<sub>2</sub> emisyonunun fazla olması nedeniyle çok fazla önerilmemektedir.

### 1.2.2. Pirroliz

Pirroliz, biyokütleden sıvı ve gaz yakıt üretiminde kullanılan en uygun termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Pirroliz işlemi oksijensiz ortamda karmaşık organik moleküllerin 400–600 °C sıcaklık bölgesinde parçalanarak yanabilir gazlar, katran ve zift açığa çıkarması ile

oluşmaktadır. Genellikle bu yöntem ile biyokütle sıvılaştırılarak biyo-yağa dönüştürülmektedir (Xianwen ve ark. 2000). Biyo-yağ adı verilen sıvı yağ, furfural türevleri, fenol türevleri vb. organik bileşiklerinden oluşan bir karışımdır. Biyokütlenin sıvılaştırılmasıyla oluşan biyo-yağ, türbin veya motorlarda direkt olarak kullanım için uygun değildir. Elde edilen bu sıvı yağ, petrol naftası gibi işlemlere tabi tutularak kullanıma uygun hale getirilmektedir (Üçgül ve Akgül 2010).

Piroliz işlemi 3 aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar torrefaksiyon, yavaş piroliz, hızlı pirolizdir.

*Torrefaksiyon*, oksijensiz ortamda ılımlı piroliz anlamında kullanılmaktadır. Bu proses, gazlaştırma öncesi biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırmada önemli bir aşamadır.

*Yavaş piroliz*, uzun sürede gerçekleştirilen ve biyokütlenin daha değerli ürünlere dönüşümünü sağlamak amacı ile uygulanan piroliz yöntemidir. Odun, turba, maden kömürü gibi organik maddeler havasız ortamda ve sabit yatak reaktörlerde, 300°C civarındaki sıcaklıklarda, uzun ısıtma zamanlarında katı ve sıvı ürünlere dönüştürülürler (Üçgül ve Akgül 2010). Yavaş piroliz, geleneksel olarak odun kömürü üretiminde kullanılmaktadır.

*Hızlı piroliz*, yüksek sıcaklıkta kısa sürede gerçekleşen bir termokimyasal dönüşüm prosesidir. Biyokütleden en fazla sıvı ürün elde etmek, hızlı pirolizin temel amacıdır. Yüksek verim için hızlı ısıtma, reaktörde oluşan gazın kısa alıkonma zamanı ve yoğunlaşabilen gazın hızlıca soğutulması esastır.

### **1.2.3. Sıvılaştırma (Hidrotermal İyileştirme)**

Sıvılaştırma esas olarak pirolize benzeyen bir işlemdir. Katalizör varlığında, düşük sıcaklık ve yüksek basınçta uygulanan bir termokimyasal süreçtir. Bu süreç sonucunda ticari bir sıvı ürün oluşur. Sıvılaştırma, orta ve yüksek sıcaklıklarda, yüksek basınçlarda hidrojen ilavesiyle gerçekleştirilir (Özyurtkan 2006).

### **1.2.4. Gazlaştırma**

Gazlaştırma işlemi, biyokütlenin normal yanmaya oranla daha az oksijen kullanılarak yakılması sonucunda içerisinde H<sub>2</sub>, CO ve CH<sub>4</sub> gibi yanıcı gazlar bulunan sentez gaz elde edilmesi işlemidir. Gazlaştırma işleminde, bol ve ekonomik olduğu için, genellikle hava



kullanılmaktadır. Ancak, saf oksijen, oksijen+buhar ya da hava+buhar kullanılan gazlaştırma sistemleri de bulunmaktadır. Hava ya da saf oksijenle birlikte buhar kullanmanın amacı, sentez gaz içerisinde enerji değeri yüksek olan H<sub>2</sub> oranını arttırmaktır (Bozkurt 2005). Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gaz türbinlerde ve gazla çalışan gaz motorlarında doğrudan yakıt olarak kullanılabilir.

Gazlaştırma süreci 4 farklı aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar biyokütlenin kuruması, piroliz (kül ve uçucuların olmadığı tabaka), yanma ve indirgenmedir. Bu aşamalar farklı tabakalarda gerçekleşmektedir ve her birinde farklı kimyasal ve termal reaksiyonlar meydana gelmektedir.

*Kuruma aşamasında* biyokütlenin içerisinde bulunan nem uzaklaştırılmaktadır. Atmosferik basınçta yakıtın ortam sıcaklığından 150 °C'ye kadar ısıtılmasıyla gerçekleşir. Gazlaştırmada biyokütlenin nem oranının %30'u geçmemesi gerekmektedir. İçerisinde %35'den daha fazla oranda nem bulunduran biyokütlenin gazlaştırma verimi düşmektedir. Biyokütlenin içerisindeki nem miktarı, gazın kalorifik değeri ve gaz bileşenlerinin hacimsel miktarları üzerinde etkilidir. Bu nedenle gazlaştırma işleminde biyokütlenin nem içeriği çok önemlidir.

*Piroliz aşamasında* kurutulmuş olan materyal, 300-500°C sıcaklık aralığında ve oksijensiz ortamda ısınmaya devam eder. Bunun sonucunda H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O gibi hafif gazlar, kömür ve katran oluşmaktadır.

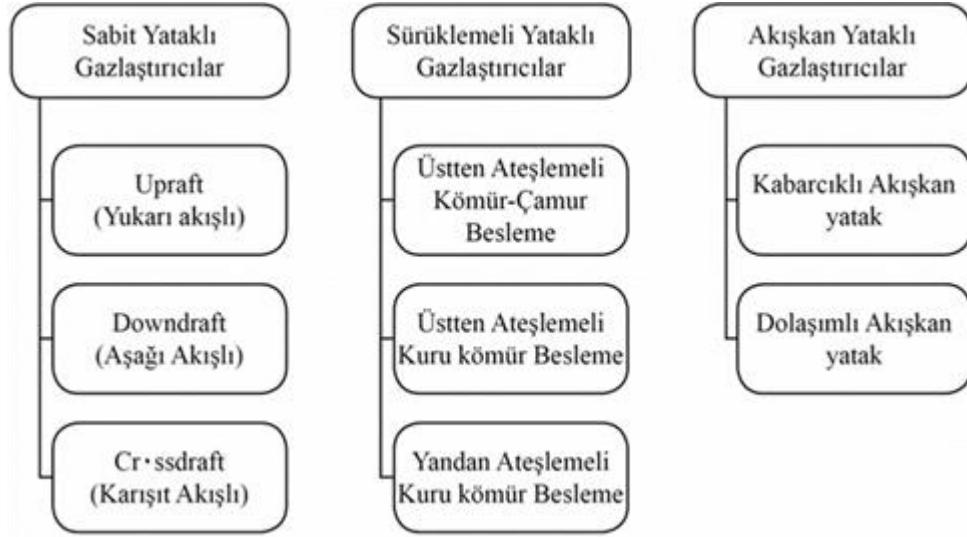
*Yanma aşamasında* biyokütle içerisinde bulunan karbon ve hidrojen oksijenle birleşmekte, CO, CO<sub>2</sub> ve su buharı oluşmaktadır. Kısmi yanma işlemi ekzotermiktir ve oksidasyon sıcaklığı 800-1500 °C arasında değişmektedir.

*İndirgeme aşamasında* piroliz ve yanma bölgesinde oluşan gazlar kor bölgesinden geçerken aşağıdaki temel reaksiyonlar gerçekleşmektedir (Tuğ 2016);



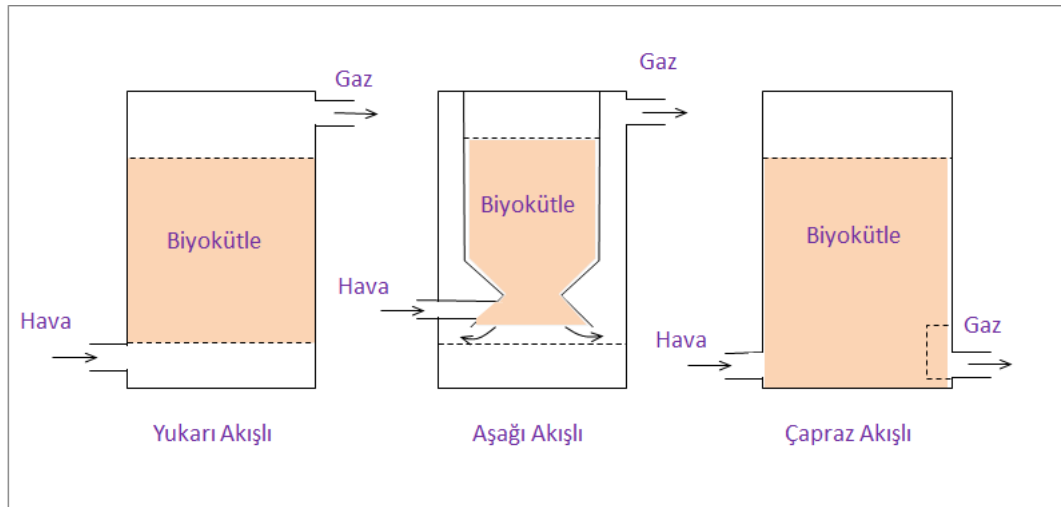
### 1.2.5. Gazlaştırıcı Reaktör Tipleri

Gazlaştırma işlemi gazlaştırma reaktöründe gerçekleşmektedir. Gazlaştırma prosesi için temel olarak kullanılan olarak üç reaktör tipi vardır. Bu reaktör tipleri sabit yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklemeli tip gazlaştırıcılardır (Şekil 1.2).



Şekil 1. 2. Gazlaştırma reaktörü tipleri (Maki 2010)

Sabit yataklı gazlaştırıcılar, genellikle daha düşük kapasiteli gazlaştırıcılardır. Hava ve gaz akış yönüne göre yukarı, aşağı ve çapraz akışlı tipleri bulunmaktadır.



Şekil 1. 3. Sabit yataklı gazlaştırıcı reaktör tipleri

- *Aşağı Akışlı Sabit Yataklı Gazlaştırıcılarda*, gönderilen hava, yakıtla aynı yönde olup aşağıya doğru hareket etmektedir. Ve oluşan sentez gaz da gazlaştırıcının alt kısmından dışarı alınmaktadır. Reaktör içerisinde oluşan ürünler piroliz bölgesindeki yüksek sıcaklıktan geçerken parçalanarak gaza dönüşürler. Böylece gaz karışımının içerisinde çok düşük oranda katran kalır. Aşağı akışlı gazlaştırıcının da en önemli avantajı, oluşan sentez gazının düşük miktarda katran içermesidir.

Katı yakıtın partikül büyüklüğü ve nem içeriği önemli olup işlem öncesi yakıt hazırlığı gerekmektedir. Reaksiyon bölgelerinde homojen sıcaklık dağılımı ve çar tabakalarındaki gaz geçirgenliğinin iyi oluşu gaz kalitesini etkileyen faktörlerdir.

-*Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılarda*, katı yakıt akışı reaktörün üst kısmından sağlanırken hava ya da diğer oksidantların akışı gazlaştırıcının alt bölgesinden reaktöre verilmektedir. Üretilen sentez gaz ise gazlaştırıcının üst kısmından alınmaktadır. Yukarı akışlı gazlaştırıcıların verimleri yüksektir. Bunun sebebi sıcak gazların yakıt kolonundan geçerek reaktörü düşük sıcaklıkta terk etmesidir.

Yukarı akışlı gazlaştırıcının dezavantajı, sentez gazda bulunan yüksek katran içeriğidir. Bunun sebebi piroliz ve kurutma bölgesinde meydana gelen ürünler yanma bölgesine geçmezler ve üretilen sentez gaz yüksek oranda katran içermektedir. Katran gazlaştırma sistemlerinde boruları tıkaması ve verimi düşürmesi sebebiyle istenmeyen bir durumdur. Bu gazlaştırıcı tipinin başlıca avantajları şunlardır. Sistemin basit olması, gaz çıkış sıcaklığının düşük olması ve yüksek gazlaştırma verimidir.

- *Karşıt akışlı gazlaştırıcılarda*, yakıtın akış yönü aşağı doğru olurken hava akış yönü yan taraftan verilmektedir. Bu tip gazlaştırıcılar da sentez gazın çıkış yönü diğer tiplerden farklılık göstermektedir. Üretilen sentez gaz karşı tarafta aynı seviyedeki noktadan çekilmektedir. Ocak bölgesi gaz çıkışı ile hava girişinin gerçekleştiği bölgenin ortasında yer almaktadır. Reaktörün içerisinde oluşan kül gazlaştırıcının alt kısmından alınmaktadır.

Karşıt akışlı gazlaştırıcılar, gaz çıkış sıcaklığının yüksek olması, yüksek gaz hızı, CO<sub>2</sub> indirgemesinin zayıf olması gibi nedenlerden dolayı aşağı akışlı ve yukarı akışlı gazlaştırıcılara göre daha az tercih edilmektedirler.

*Akışkan yataklı gazlaştırıcılar*, çeşitli yakıt kaynaklarını ve tiplerini yüksek verim ile yakarak temiz ve güvenli enerjiden buhar/kızgın yağ üretimi yapan gazlaştırıcılardır. Diğer bir deyişle bu gazlaştırıcılar performansı yüksek olan, çevre dostu ve ekonomik açıdan verimli çalışan yakma tekniği gelişmiş kazanlardır. Ülkemizde bol miktarda bulunan düşük kalorili linyit kömürü, ağaç talaşı, prina, fındık kabuğu vb. katı yakıtların ayrı ayrı veya birlikte

yakılmasına olanak tanımak için çok geniş işletme şartları göz önüne alınarak tasarlanmaktadır.

*Sürüklemeli Yatak Tipi Gazlaştırıcılarda* yakıt çok küçük boyutlarda olmaktadır. Bu sistemde yakıt, gazlaştırma ajanı ile aynı yönlü akışla reaktörün üst bölgesinden reaktör içerisine beslenmektedir. Kalma zamanı, 5-10 saniye zaman aralığındadır. Kalma zamanının az olması ve yüksek sıcaklıklarda çalışılması nedeniyle bu proseste karbon dönüşümü yüksektir. Sürüklemeli yatak gazlaştırıcılarda ortalama reaktör sıcaklığı 1500 °C ve yakıt partikül boyutu ortalama 250 µm'dir (Tarakçıoğu 2015 ).

### **1.3. Tezin Amacı**

Dünyanın enerji ihtiyacının her geçen gün artması, fosil kaynaklı enerji üretim ve kullanımından kaynaklanan çevresel olumsuzluklar fosil kaynakların kısıtlılığı gibi konular göz önünde bulundurulduğunda çevresel olumsuzlukları az olan ve kaynak kısıtlılığı olmayan yeni ve yenilebilir enerji kaynaklarına talep artmıştır.

Biyokütle, fosil yakıtlar ile karşılaştırıldığında, uygulama alanı en geniş olan yenilenebilir enerji kaynağıdır. Avrupa Birliği, Kyoto Protokolü gereksinimlerini ve yüksek enerji taleplerini karşılamak için olası enerji kaynağı olarak biyoyakıtların kullanılmasını teşvik etmektedir. Bu nedenle ülkemizin de yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı olan biyokütleye yönelmesi ve biyokütlenin biyoyakıtlara dönüşüm proseslerini geliştirmesi büyük önem taşımaktadır. Biyokütle çeşitli prosesler sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüşerek orijinal hallerine kıyasla daha yüksek ısıl değere sahip ve taşınabilmesi, depolanması kolay yakıtlara dönüştürülebilirler (Özay ve ark. 2014).

Çalışma kapsamında ülkemizde birçok bölgede park ve bahçelerde süs ağacı olarak değerlendirilen palmye bitkisinin budama atıklarının değerlendirilmesi, peletlenerek sabit yataklı aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda gazlaştırılması ve elde edilen sentez gazın ısıl veriminin saptanması ile enerji ve ekserji analizlerinin yapılması amaçlanmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Gazlaştırma prosesinde düşük miktarda katı, sıvı ve gaz atığa sahip olan çok çeşitli hammaddeler yakıt olarak kullanılabilir. Bu süreçte etkili olan parametreleri belirlemek için birçok deneysel çalışma yapılmaktadır. Bu alanda yapılan deneysel çalışmalar oldukça maliyetli olmakta ve yüksek basınç ve sıcaklıklarda çalışan sistemler için güvenlik açısından da riskler bulunmaktadır. Ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır.

Pellegrini ve Oliveira (2007) yaptıkları çalışmada, kimyasal dengelere dayanan gazlaştırma süreci için basitleştirilmiş bir model sunmaktadırlar. Model, Gibbs'in üretilen gazın serbest enerjisinin, sistem için kütle ve enerji dengeleriyle sınırlandırılmış olarak en aza indirgenmesinden oluşmaktadır. Modele özgü gazlaştırma sıcaklığı, nem içeriği ve hava sıcaklığı gibi birçok değişkenin etkisinin doğrulanmasına yönelik parametrik bir çalışma yapılmıştır. Sonuçlar literatürde ve gerçek sistemlerde bulunan verilerle karşılaştırılmıştır. Bu parametrik çalışmanın ardından, sürece bağlı geri dönüşümsüzlükleri ve sıcaklık, nem, kömür üretimi ve termal kayıpların bunlara olan etkisini değerlendirmek için bir ekserji analizi yapılmıştır.

Karamarkovic ve Karamarkovic (2010) çalışmada, farklı gazlaştırma sıcaklıklarında farklı nem oranlarına sahip olan biyokütlenin hava ile gazlaştırılmasına odaklanmışlardır.  $CH_{1.400.59}N_{0.0017}$  ile temsil edilen tipik biyokütle besleme ile 1 ve 10 bar basınçlarda bir kimyasal denge modeli geliştirilmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. 900–1373 K sıcaklık aralığında, biyoküttele nemin artması, incelenen işlemler için etkinliklerin azalmasına yol açmıştır. Kimyasal enerji ve ekserji temelli verim ile karşılaştırıldığında, biyokütle besleme hammaddesinin ürün gazına duyarlı ısı ile kurutulması, toplam ekserji temelli verim için daha az faydalı olmaktadır. Belirli bir gazlaştırma sıcaklığında gazlaştırma işlemi, kuru biyokütle kullanılarak ve gazlaştırma basıncının değişmesiyle veya işlemde ısı ilavesiyle istenen sıcaklığa yaklaşan karbon sınır sıcaklığı ile iyileştirilebilmektedir.

Gai ve Dong (2012) yaptıkları çalışmada, mısır samanının gazlaştırılmasını atmosferik basınç altında, aşağı akışlı sabit yataklı bir gazlaştırıcıda, anoksitleyici olarak hava kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma koşullarının, gazlaştırıcının sıcaklık profilleri, üretici gazın bileşim dağılımı ve mısır samanının gazlaştırılması sırasında kükürt ve klorin bileşiklerinin salınması açısından etkileri incelenmiştir. Ayrıca, gazlaştırma özellikleri alt ısı değeri (LHV), gaz verimi, gazlaştırma etkinliği ve ham gazdaki katran konsantrasyonu açısından

değerlendirilmiştir. Deneme sonuçlarına göre, çalışma koşulları gazlaştırıcının sıcaklık profilleri ve ürün gazının bileşim dağılımı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ayrıca, incelenen eşdeğerlik oranı (ER) aralıkları üzerinde, daha yüksek veya düşük ER'nin hem gaz kalitesini hem de gazlaştırma verimini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Zhang ve ark. (2015), sürüklemeli yataklı bir gazlaştırıcıda pirinç kabuğunun gazlaştırmasından elde edilen sentez gazın enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Sonuçlar, sentez gazın ekserji değerlerinin enerji değerlerinden düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, en yüksek enerjinin ve ekserji değerlerinin, 1000°C reaktör sıcaklığında ve eşdeğerlilik oranı 0,25 olan kg yakıt başına yaklaşık 10,062 ve 7990 kJ elde edildiğini göstermiştir.

Anukam ve ark. (2016) bu çalışmada, küspenin ön işlemlerinin ve enerjiye dönüştürülmesinde kullanılan gazlaştırma teknolojisi seçeneklerinin, aşağı akışlı gazlaştırma teknolojisine özel bir vurgu yaparak kapsamlı olarak incelemişlerdir.

Tuğ (2016), çeltik saplarını parçalayıp belirli oranlarda katkı maddesi eklemiştir. Daha sonra da çeltik saplarını pelet haline getirerek gazlaştırmasını sağlamıştır. Araştırmacı katkısız çeltik sapı peletlerinin gazlaştırılmasında en iyi sonucun elde edildiğini ve en uygun ER değerinin 0,2 olduğunu belirtmiştir. En yüksek alt ısıl değer 4,430 MJ.Nm<sup>-3</sup> ile yalnızca çeltik sapının olduğu (PRF) peletlerle, en düşük alt ısıl değer 3,899 MJ.Nm<sup>-3</sup> ile %15 kömür tozunun katkı maddesi olarak kullanıldığı (PC15) peletlerle yapılan gazlaştırma işleminde elde edilmiştir. En yüksek gazlaştırma verimi PRF örneklerinde %64,8 değeri ile elde edilmiştir. En düşük gazlaştırma verimi %59,6 ile PC15 peletinde olmuştur. Biyokütlenin özgül gaz üretim oranı (GM<sub>b</sub>) 1,78 ile 1,93 Nm<sup>3</sup>/kg arasında değişmiştir.

Aktaş ve ark. (2017), Trakya Bölgesi'nde yoğun olarak yetiştirilen çeltik bitkisinin hasattan sonra tarlada kalan saplarının gazlaştırılarak enerji içeriklerinin değerlendirilmesi için laboratuvar tipi bir gazlaştırıcı tasarlamış ve imalatını gerçekleştirmiştir. Bölgeden toplanan çeltik sapları %100 sap ve %15 oranında kömür tozu ile karıştırılmış şekilde peletlenmiş ve peletlerin analizleri yapılmıştır. Gerek hammadde ve gerekse pelet örnekleri için gazlaştırma denemeleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen gaz örneklerinin içerikleri belirlenmiştir. Gazlaştırma denemeleri sonucunda, kömür katkısının çeltik sapı peletleri için sentez gaz ısıl değerini arttırdığı (3,686 MJ/Nm<sup>3</sup> değerinden 3,71 MJ/Nm<sup>3</sup> değerine) ancak özgül gazlaşma hızının da artmasıyla beraber verime etkisinin olumsuz olduğu gözlemlenmiştir (Katkısız peletlerde maksimum %61,9, kömür katkılı peletlerde en fazla %57,41). Çeltik sapı peletlerinin içerdiği yüksek silisyum sebebiyle 800 °C ve yukarı sıcaklık

değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Peletlenerek enerji yoğunluğu artırılmış biyokütlenin gazlaştırılması için ise tasarım sorunsuz bir şekilde çalışmış fakat peletlenmemiş, saman halindeki çeltik saplarının gazlaştırılması için reaktör konstrüksiyonunun mevcut şekliyle uygun olmadığı, uygun olması için sürekli biyokütle besleme donanımlarına ilave edilmesi ve ebatlarda değişiklik yapılması gerektiği görülmüştür. Peletlenmemiş çeltik samanı için %37,14 gibi düşük bir verim elde edilmiştir.

Diken (2017), pelet haline getirilmiş çimi, ER=0,29 ve ER=0,36 olmak üzere iki farklı hava fazlalık katsayısı kullanarak gazlaştırma performanslarını saptamıştır. Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gazın alt ısıl değerini sırasıyla 3831,7 kJ/Nm<sup>3</sup> (ER=0,29) ve 3925,5 kJ/Nm<sup>3</sup> (ER=0,36) olarak bulmuştur. Biyokütle besleme oranları (FCR) sırasıyla 8,6 kg/h ve 6,5 kg/h olmuştur. Gaz çıkış oranları (AFR) 10,01 Nm<sup>3</sup>/h ve 9,23 Nm<sup>3</sup>/h olarak hesaplanmıştır. Birim biyokütle başına üretilen gaz miktarları (GM<sub>b</sub>) 1,57 Nm<sup>3</sup>/kg (ER=0,29) ve 1,96 Nm<sup>3</sup>/kg (ER=0,36) bulunmuştur. Araştırmacı gazlandırmada ısıl verimleri sırasıyla %39 ve %50 olarak saptamış ve elde ettiği sonuçlara göre çim peletinin gazlandırılmasında ER=0,36 olan kademelerin daha uygun olduğunu belirtmiştir.

Manatura ve ark. (2017), kurutma işlemi uygulanmış biyokütlenin gazlaştırma işlemi değerlendirmek için ekserji analizi yapmışlardır. İki ayrı grup pirinç kabuklarına gazlandırılmadan önce 1 saat kurutma işlemi uygulanmıştır. Birinci grubun sıcaklığı 250°C diğer grubun ise 350 °C'dir. Gazlaştırma, 30 kWh kabarcıklı akışkan yataklı gazlandırıcıda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, kurutma işleminin, düşük O/C ve H/C değerleri nedeniyle pirinç kabuğu peletinin kimyasal enerjisini (ekserji) artırabileceğini göstermiştir. Verimlilik düşüşü, 350°C'de kurutma durumunda daha fazla görülmüştür. 250°C ve 350°C'de işlenmiş pirinç kabuğu peletinin genel ekserji verimliliği, sırasıyla % 30 ve % 21'dir.

Yahaya ve ark. (2019), hindistan cevizi kabuğu (CS) ve hurma çekirdeği kabuğunun (PKS) gazlandırılmasında, partikül büyüklüğünün (1-3 mm, 4-7 mm ve 8-11 mm) ve sıcaklığın etkisini (700, 800 ve 900°C) saptamak için sabit yataklı aşağı akışlı reaktörde gazlaştırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. 700–900°C'de 1-11 mm biyokütle partikül büyüklüğü kullanılarak hindistan cevizi kabuğu için ölçülen gaz bileşimi % 8,20–14,6 H<sub>2</sub>, % 13,0–17,4 CO, % 14,7–16,7 CO<sub>2</sub> ve % 2,82–4,23 CH<sub>4</sub>, hurma çekirdeği kabuğu için ölçülen gaz bileşimi ise % 7,01-13,3 H<sub>2</sub>, % 13,3-17,8 CO, % 14,9- 17,1 CO<sub>2</sub> ve % 2,39 – 3,90 CH<sub>4</sub>'tür. Benzer koşullarda, yüksek sıcaklıkta sentez gaz, kuru gaz verimi, karbon dönüşüm verimi ve soğuk gaz verimi hindistan cevizi kabuğu için sırasıyla 4,01–5,39 MJ/Nm<sup>3</sup>, 1,50–1,95 Nm<sup>3</sup>/kg, %52,2-75,9 ve % 30,9-56,4, hurma çekirdeği kabuğu için sırasıyla 3,82–5,09

MJ/Nm<sup>3</sup>, 1,48–1,92 Nm<sup>3</sup>/kg, % 59,0-81,5 ve % 33,0-57,1 olarak saptanmıştır. Sonuçlar, sıcaklığın, gazlaştırma reaksiyon oranını etkilemede parçacık boyutundan daha büyük bir rolü olduğunu ortaya koymuştur.

Zhang ve ark. (2019) çalışmalarında, biyokütlenin buharla gazlaştırılmasından kaynaklanan hidrojen üretiminin ekserji analizini incelemişlerdir. Deneme sonuçlarına göre gazlaştırma sıcaklıklarındaki artışların ekserji verimliliğini arttırırken, partikül boyutlarındaki artışların genellikle ekserji verimliliğini azalttığını gözlemlenmiştir. Genel olarak, hem buhar/biyokütle oranı hem de buhar akış hızı başlangıçta ekserji verimliliğini arttırdığını daha sonra azalttığını gözlemlemişlerdir. Bir reaksiyon katalizörü ekserji verimliliği üzerinde pozitif, negatif veya önemsiz bir etkiye sahip olabilirken, kalma süresi genellikle ekserji verimliliği üzerinde düşük bir etkiye sahiptir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Gazlaştırma Denemesinde Kullanılan Palmiye Atığı Peleti

Tez çalışmasında kullanılacak olan palmiye bitkisinin yapraklarından ev duvarları ve çatılarının yapımında, yaprakçıklar ve yaprak saplarından örme çanta, sepet, şapka hatta bir çeşit kağıt yapılmasında, palmiye gövdeleri ise inşaat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, sulama kanalları, küçük tekne, ok, mızrak yapımında da kullanılırlar. Türkiye'de palmiye süs ağacı olarak park ve bahçelere dikilmektedir. Bu çalışmada pelet haline getirilen budama atıkları gazlaştırılmış, ısıl verimi saptanmış ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Denemelerde kullanılan palmiye budama peleti Akdeniz Üniversitesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümünden temin edilmiş, Giresun Üniversitesi GRÜMLAB laboratuvarında analizleri yapılmıştır. Palmiye budama peletine ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

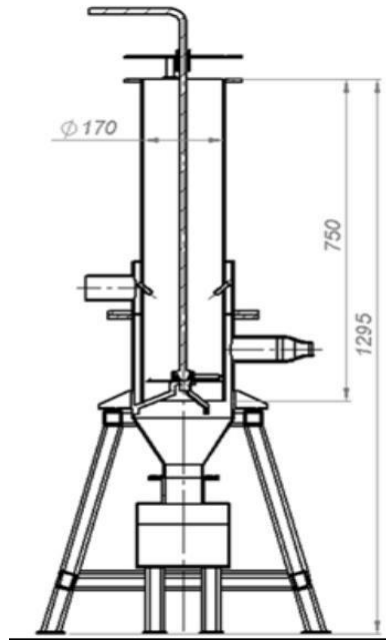
**Çizelge 3.1.** Palmiye budama atık peletlerinin fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Nem (% kb)	5,95
Alt Isıl değer (MJ/kg)	16,637
Üst Isıl değer (MJ/kg)	17,727
Pelet hacim yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	1000
Kül İçeriği (%)	6,30
Orijinal bazda uçucu madde içeriği (%)	69,33
Kuru bazda uçucu madde içeriği (%)	73,12
Sabit Karbon içeriği (%)	20,58
C (%)	44,15
Hidrojen (%)	5,63
Azot (%)	1,02
Oksijen (%)	42,09

### 3.1.2. Gazlaştırma Ünitesi

Palmiye budama atıklarının gazlaştırılması için yapılan denemelerde Biyosistem Mühendisliği Bölümü Gazlaştırma Laboratuvarında bulunan NKUBAP.00.24.AR.14.28 numaralı araştırma projesi kapsamında imal edilmiş olan gazlaştırıcı kullanılmıştır. Bu gazlaştırıcı sabit yataklı, aşağı akışlı, ve boğazsız tiptedir. Aşağı akışlı gazlaştırıcı tipleri en önemli etken reaktör kesitidir. Bu tasarımda reaktör çapı 170 mm ve boyu 750 mm olarak alınmıştır. Izgara, reaktör gövdesi alt kısmından 50 mm yüksekliktedir ve bu durumda reaktör efektif yüksekliği 700 mm olarak alınmıştır. Reaktör silindiri yüksek sıcaklık ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten (AISI310S) 5 mm kalınlıkta imal edilmiştir. Diğer üniteler ise imalat çeliğinden (St37) imal edilmiş ve kalınlık olarak 3 mm alınmıştır (Aktaş ve ark 2017). İmalatı tamamlanmış gazlaştırma sistemi Şekil 3.1’de görülmektedir.

Reaktör yüzeyinde ek hava girişleri için nozullar bulunur. Ayrıca yalıtımı sağlamak amacıyla reaktör sıcak hava ceketıyla sarılmıştır. Ek hava girişi bu sıcak hava ceketinden geçerek nozullara ve oradan reaktör içerisine (oksidasyon bölgesine) aktarılmaktadır. Reaktörün alt kısmında, ızgaradan geçen sentez gazının çıkış hattına sevk edildiği ve aynı zamanda külün toplandığı “gaz ve kül toplama ünitesi” yer almaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Gazlaştırma ünitesi reaktörü (Aktaş ve ark 2017)

Gazlaştırma ünitesinin akış şeması ile gazlaştırma sistemi Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Gazlaştırma sisteminde 7 ayrı noktada sıcaklık sensörleri bulunmaktadır. Bu sensörler 1200 °C sıcaklığa kadar sorunsuz çalışmaktadır. Ayrıca, 3 farklı noktada basınç sensörleri vardır. Sistem üç adet yük hücresinin üzerine yerleştirilmiştir ve ağırlık kontrolleri yapılmaktadır. Tüm bu sensörlerden alınan veriler otomatik kontrol ünitesi yardımıyla toplanmakta ve bilgisayara aktarılmaktadır. Ayrıca, gaz çıkış hattında orifis tipi bir debi ölçüm sistemi de bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Gazlaştırma sisteminin üniteleri (Aktaş ve ark 2017)



Şekil 3.3. Laboratuvar tipi gazlaştırma sistemi (Aktaş ve ark 2017)

Reaktöre hava vakum pompası yardımıyla girmektedir. Vakum pompası gaz çıkış hattında bulunmakta ve aynı zamanda sentez gazın emişini sağlamaktadır. Pompa trifaze akımla çalışmaktadır 0,37 kW anma gücüne ve maksimum 80 m<sup>3</sup>/h debiye sahiptir. Vakum pompasının devri otomasyon sisteminin üzerine yerleştirilen bir invertör yardımıyla kontrol edilmektedir.

Tüm sistem otomasyon panosu ile kontrol edilmektedir. Pano üzerinde verilerin alınması için alıcılar ve kontrol şalterleri ile PLC ekran bulunmaktadır. Veriler pano üzerinde bulunan USB girişine bağlı taşınabilir belleğe kaydedilmekte ve daha sonra bilgisayara aktarılmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Otomasyon panosu (Aktaş ve ark 2017)

### 3.1.3. Gaz Kromatografi Cihazı (GC)

Gazlaştırma işlemi sonucunda elde edilen sentez gazın bileşiminde bulunan gazların miktarlarını ölçmek amacıyla AGILANT 7890B GC model gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Cihaz ile CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gazlarının hacimsel yüzdeleri belirlenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Gaz kromatografi cihazı (GC) (Aktaş ve ark 2017)

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Gazlaştırma İşlemi

Pelet haline getirilmiş palmye budama atıkları laboratuvar tipi sabit yataklı aşağı akışlı gazlaştırma sisteminde gazlaştırılmıştır. Gazlaştırma işlemine başlanmadan önce bir miktar pelet reaktör içerisine konularak tutuşturulmuş, yanma bölgesindeki sıcaklık 100 °C dolaylarına ulaştığında reaktör tamamen yüklenerek düzenli gaz çıkışı oluncaya kadar yani sistem rejime girinceye kadar beklenmiş ve bu aşamadan sonra ölçümlere başlanmıştır. Gazlaştırma işlemi, vakum pompası 25 Hz ve 35 Hz frekanslarda çalıştırılarak iki ayrı kademede gerçekleştirilmiştir. Her gazlaştırma periyodunda 5'er adet sentez gaz örneği alınarak gaz analizleri yapılmıştır.

### 3.2.2. Sentez Gazın Isıl Değerinin Hesaplanması

Sistemin gaz çıkış hattında bulunan gaz örneği alım noktasından özel bir şırınga yardımıyla gaz örneği alınarak gaz kromatografi cihazında sentez gaz analizi yapılmıştır. Yanıcı özelliği bulunan H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve CO gazlarının gazın birim kütledeki hacimsel oranları bulunarak aşağıdaki bağıntılar yardımıyla sentez gazın alt ve üst ısıl değerleri hesaplanmıştır (Waldheim ve Nilsson 2001);

$$LHV_g = (10,8. \%H_2 + 12,63. \%CO + 35,8. \%CH_4)/100 \quad (3.1)$$

$$HHV_g = (12,76. \%H_2 + 12,63. \%CO + 39,76. \%CH_4)/100 \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde sentez gazın içindeki yanıcı gazların hacimsel yüzdeleri ve MJ/m<sup>3</sup> olarak ısı değerleri çarpılmaktadır.

### 3.2.3. Gaz ve Hava Debisi ile Biyokütle Tüketim Hızının Ölçülmesi

Gaz debisi gaz çıkış hattında bulunan orifis tip debimetre ile ölçülmüştür. Orifis debimetrede debi ölçümü EN ISO 5167-2 standardına göre yapılmıştır (Anonim 2019c). Hava Debisi (AFR) ise aşağıdaki bağıntı ile bulunmuştur (Tuğ 2016);

$$AFR = GFR \frac{N_{2gaz}}{N_{2hava}} \quad (3.3)$$

Gazlaştırma işleminde biyokütle tüketim hızı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$FCR = \frac{m_b}{t} \quad (3.4)$$

### 3.2.4. Stokiyometrik Hava Miktarının Saptanması

Stokiyometrik hava miktarı biyokütlenin tam yanması için gerekli hava miktarıdır. Aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır (Corven 2002);

$$SR = 0,31. HHV_b \quad (3.5)$$

Yukarıda kütle olarak hesaplanan stokiyometrik hava miktarı, 25 °C sıcaklıkta hacimsel olarak dönüştürülerek (SR<sub>v</sub>) kullanılmıştır.

### 3.2.5. Eşdeğerlik Oranı (ER) Değerinin Hesaplanması

ER değeri kısmi yanma da önemli bir parametredir. Biyokütlenin yanması esnasında tam yanmada gerekli olan stokiyometrik hava miktarına göre ne kadar daha az hava kullanıldığının ölçüsü olarak ifade etmek mümkündür. Aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır (Reed ve Das 1988);

$$ER = \frac{(AFR/FCR)}{SR_V} \quad (3.6)$$

ER değeri gazlaştırma işleminde biyokütlenin türüne göre 0,2-0,5 arasında değişmektedir (Zhu ve Venderbosch 2005).

### 3.2.6. Özgül Gaz Üretim Oranının Hesaplanması

Özgül gaz üretim oranı birim biyokütleden üretilen sentez gaz miktarını ifade etmektedir ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur (Tuğ 2016);

$$GM_b = \frac{GFR}{FCR} \quad (3.7)$$

### 3.2.7. Gazlaştırma İşleminde Sıcaklık Değişimlerinin Saptanması

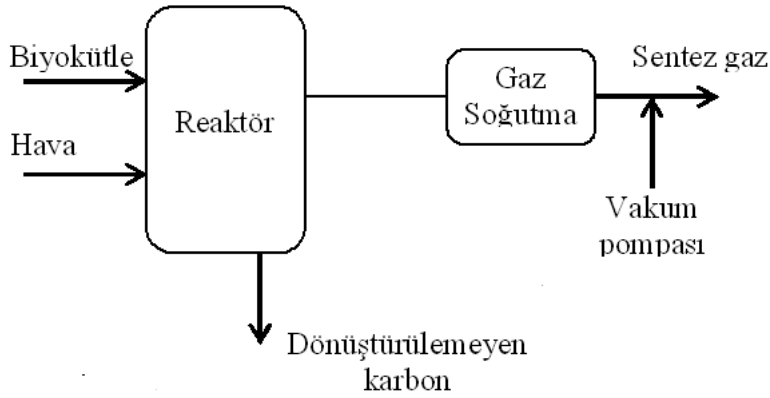
Bu amaçla gazlaştırma sisteminde kor bölgesi ( $T_1$ ), reaktörden gaz çıkış sıcaklığı ( $T_2$ ) ve soğutma işleminden sonra en son gaz çıkış noktasındaki sıcaklık ( $T_3$ ) değerleri bu bölgelere yerleştirilen sıcaklık sensörleriyle ölçülerek gazlaştırma süreci boyunca kaydedilmiştir.

### 3.2.8. Enerji ve Ekserji Analizi

Gazlaştırma işleminin enerji ve ekserji analizi aşağıdaki koşullar kabullenerek yapılmıştır (Szargut ve ark. 1988, Lewandowski ve Kicherer 1996);

- Sistem kararlı bir şekilde çalışmaktadır.
- Potansiyel ve kinetik enerji ihmal edilmiştir.
- Referans (ölü hal) koşulları  $T_0=298,15$  K ve  $P_0=1$  atm
- Gazlaştırma sonucu oluşan kül ihmal edilmiştir.
- Sentez gaz ideal gaz olarak kabul edilmiştir.

Gazlaştırma işleminin enerji ve kütle akış diyagramı Şekil 3.6’da verilmiştir.



**Şekil 3.6.** Gazlaştırma işleminde kütle ve enerji akış diyagramı

Gazlaştırma işleminde enerji dengesi aşağıdaki bağıntıyla açıklanmaktadır (Manatura ve ark. 2017);

$$\dot{Q}_{biyokütle} + \dot{Q}_{elektrik} = \dot{Q}_{gaz} + \dot{Q}_{katran} + \dot{Q}_{kayıp} \quad (3.8)$$

Sentez gazın fiziksel ve kimyasal enerjileri toplam enerjisini oluşturmaktadır;

$$\dot{Q}_{gaz} = \dot{Q}_{ph_{gaz}} + \dot{Q}_{ch_{gaz}} \quad (3.9)$$

Fiziksel (duyulur) enerji aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır;

$$\dot{Q}_{ph_{gaz}} = \dot{m}_{gaz} \sum_i \Delta h_i = \dot{m}_{gaz} \sum_i \int_{T_0}^T C_{p_i} dT \quad (3.10)$$



3.10 no'lu eşitlikte gaz kütle akış oranı ( $\dot{m}_{gaz}$ ) kmol/s olarak alınmıştır. Her bir gaz bileşeninin özgül ısıları deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ampirik eşitliklerden yararlanarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).

**Çizelge 3.2.** Sentez gazın bileşimindeki gazların özgül ısılarının hesaplanmasında kullanılan deneysel eşitlikler (Karamarkovic ve Karamarkovic 2010)

Gaz	$C_p \left( \frac{kJ}{kmolK} \right), \quad \theta = \frac{T (Kelvin)}{100}$	Aralık (K)	Max. Hata (%)
N <sub>2</sub>	$C_p = 39.060 - 512.79\theta^{-1.5} + 1072.7\theta^{-2} - 820.4\theta^{-3}$	300-3500	0.43
H <sub>2</sub>	$C_p = 56.505 - 702.74\theta^{-0.75} + 1165.0\theta^{-1} - 560.70\theta^{-1.5}$	300-3500	0.60
CO	$C_p = 69.145 - 0.704634\theta^{0.75} - 200.77\theta^{-0.5} + 176.76\theta^{-0.75}$	300-3500	0.42
CO <sub>2</sub>	$C_p = -3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2$	300-3500	0.19
CH <sub>4</sub>	$C_p = -672.87 + 439.74\theta^{0.25} - 24.8754\theta^{0.75} + 323.88\theta^{-0.5}$	300-3500	0.15

Gazın kimyasal enerjisi aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$\dot{Q}_{ch_{gaz}} = \dot{m}_{gaz} LHV_g \quad (3.11)$$

3.11 no'lu eşitlikte  $LHV_g$  değerinin birimi kJ/kmol olarak kullanılmıştır.

Biyokütlenin kimyasal enerjisi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\dot{Q}_{ch_b} = \dot{m}_b LHV_b \quad (3.12)$$

Katranın kimyasal enerjisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$\dot{Q}_{ch_k} = \dot{m}_k LHV_k \quad (3.13)$$

Gazlaştırma işleminin enerji verimliliği aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\eta_{En} = \frac{\dot{Q}_{gaz}}{\dot{Q}_{biyok\ddot{u}tle} + \dot{Q}_{elektrik}} \quad (3.14)$$

Gazlaştırma işleminde ekserji dengesi aşağıdaki gibidir;

$$\dot{E}x_{biyok\ddot{u}tle} + \dot{E}x_{elektrik} = \dot{E}x_{gaz} + \dot{E}x_{katran} + \dot{I}_{gazlaştırma} \quad (3.15)$$

Biyokütlenin ekserjisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$\dot{E}x_{biyok\ddot{u}tle} = \dot{m}_b \beta LHV_b \quad (3.16)$$

$\beta$  aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır;

$$\beta = \frac{1.0414 + 0.0177(H/C) - 0.3328(O/C)[1 + 0.0537(H/C)]}{1 - 0.4021(O/C)} \quad (3.17)$$

Burada, O, H ve C değerleri sentez gaz içerisindeki oksijen, hidrojen ve karbonun molar fraksiyonlarıdır.

Sentez gazın ekserjisi fiziksel ve kimyasal ekserji olarak hesaplanmıştır;

$$\dot{E}x_{gaz} = \dot{E}x_{ph_{gaz}} + \dot{E}x_{ch_{gaz}} \quad (3.18)$$

Sentez gazı oluşturan her bir gazın fiziksel ekserjisi kJ/mol olarak aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$ex_{ph_{gaz}} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (3.19)$$

Entalpi değerleri gazların kimyasal özelliklerini veren tablolardan bulunmaktadır. Entropi ise aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır;

$$s_i = s_{0,i} + \int_{T_0}^T C_{p,i}(dT/T) - R \ln(P_i/P_o) \quad (3.20)$$

Sentez gazı oluşturan gaz bileşenlerinin referans koşullarındaki özgül entalpileri Çizelge 3.3’de verilmiştir;

**Çizelge 3.3.** Sentez gazı oluşturan gaz bileşenlerin referans koşullarındaki entropi değerleri

Gaz bileşenleri	$s_o$ (kJ/kmolK)
N <sub>2</sub>	191.610
H <sub>2</sub>	130.684
CO	197.653
CO <sub>2</sub>	213.795
CH <sub>4</sub>	186.256

Gazın toplam fiziksel ekserjisi;

$$\dot{E}x_{ph_{gaz}} = \dot{m}_{gaz} \sum_i ex_{ph} \quad (3.21)$$

Sentez gazın kimyasal ekserjisi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\dot{E}x_{ch_{gaz}} = \dot{m}_{gaz} \left( \sum_i y_i ex_{ch_{gaz}} + RT_0 \sum_i y_i \ln y_i \right) \quad (3.22)$$

3.22 no’lu eşitlikte her bir gazın kimyasal ekserjisi ( $ex_{ch}$ ) termodinamik tablolardan bulunarak kullanılmıştır.

Ekserji verimi aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır;

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}x_{gaz}}{\dot{E}x_{biyokütle} + \dot{E}x_{elektrik}} \quad (3.23)$$

### **3.2.9. Verilerin Değerlendirilmesi**

Gaz akış ve hava akış oranlarının belirlenmesi amacıyla orifis debimetre ile elde edilen veriler, Excel'de hazırlanan makro ile değerlendirilmiştir. Isı ve ekserji analizleri için de ayrı bir makro hazırlanmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Sentez Gazın Isıl Değeri

Sentez gazın ısıl değerini saptamak amacıyla her iki kademedeki gazlaştırma işlemi sırasında yapılan gaz analizlerinin sonuçlarının ortalamaları ve hesaplanan ısıl değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. 25 Hz frekans kademesinde CH<sub>4</sub> oranı daha yüksek olmuştur. 35 Hz kademedeki ise N<sub>2</sub> oranı daha fazla bulunmuştur. 25 Hz frekansla çalışma koşullarında alt ve üst ısıl değerler daha yüksek bulunmuştur. Bu durum bu kademedeki ısıl değeri yüksek olan metan (CH<sub>4</sub>) gazının sentez gaz içerisindeki oranının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Sentez gaz bileşenlerinin oranları ve ısıl değerler

Vakum Pompası Frekans	Sentez Gaz Bileşenlerinin Oranları (%)					Isıl Değer (MJ/Nm <sup>3</sup> )	
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	LHV	HHV
25 Hz	13,79	13,21	2,62	15,49	54,88	4,09	4,47
35 Hz	12,77	13,29	1,97	12,95	59,03	3,76	4,09

Tuğ (2016) çeltik saplarını gazlaştırdığı çalışmada sentez gazın alt ısıl değerini 3,61 MJ/Nm<sup>3</sup> ile 4,59 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında bulmuştur. Diken (2017) çim peletini gazlaştırmış ve alt ısıl değerini 3,83 MJ/Nm<sup>3</sup> ile 3,92 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında bulmuştur. Galindo ve ark (2014) yaptıkları çalışmada okaliptüs odunlarını farklı koşullarda gazlaştırmışlar ve alt ısıl değerini 4,11 MJ/Nm<sup>3</sup> ve 5,12 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında bulmuşlardır. Odun talaşı peletinin gazlaştırılmasında alt ısıl değer 5,7 MJ/Nm<sup>3</sup> civarında olmuştur (Simone ve ark 2012). Pellegrini ve Oliveria (2007) şeker kamışının buhar+hava ile gazlaştırılmasında alt ısıl değeri 4,7 MJ/Nm<sup>3</sup> ile 5,1 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında bulmuşlardır. Rao ve ark. (2004) farklı biyokütlelerin gazlaştırılması sonucu elde edilen sentez gazların üst ısıl değerlerini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, bu değerlerin kentsel atıklarda 5,6 MJ/Nm<sup>3</sup>, odun talaşında 5,0 MJ/Nm<sup>3</sup>, soya sapları peletlerinde 4,82 MJ/Nm<sup>3</sup>, mısır koçanında 4,95 MJ/Nm<sup>3</sup>, bezelye saplarında 4,76 MJ/Nm<sup>3</sup>, yer fıstığı kabuklarında 4,80 MJ/Nm<sup>3</sup> olduğunu bildirmişlerdir. Palmiye sap artıklarını gazlaştırdığı bu

çalışmada sentez gazın alt ısıl değerlerinin daha önce farklı biyokütleler kullanarak yapılan gazlaştırma işlemlerinde elde edilen değerlere yakın olduğu görülmüştür.

#### 4.2. Gazlaştırma Havaşı ve Gaz Çıkış Oranı Debileri

Her iki kademede elde edilmiş olan gazlaştırma havaşı debisi ve gaz çıkış oranı değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. 25 Hz ve 35 Hz pompa kademelerinde AFR sırasıyla 7,61 m<sup>3</sup>/h ve 10,23 m<sup>3</sup>/h, GFR 9,57 m<sup>3</sup>/h ve 12,09 m<sup>3</sup>/h olmuştur. Her iki değer de 35 Hz pompa çalışma frekansında yüksek olmuştur. Aynı gazlaştırma sistemiyle çim peletinin gazlaştırılmasında AFR 9,23 m<sup>3</sup>/h ile 10,01 m<sup>3</sup>/h, GFR 12,71 m<sup>3</sup>/h ve 13,54 m<sup>3</sup>/h arasında değişmiştir (Diken 2017).

Çizelge 4.2. Gazlaştırma havaşı ve gaz çıkış debileri

Vakum Pompası	AFR	GFR
Frekans	(m <sup>3</sup> /h)	(m <sup>3</sup> /h)
25 Hz	7,61	9,57
35 Hz	10,23	12,08

#### 4.3. Stokiyometrik Hava Miktarı, Yakıt Tüketim Hızı ve ER Değerleri

Biyokütle yakıtın (palmiye budama atıkları) hacimsel stokiyometrik hava miktarına ve AFR ile FCR değerlerine bağlı olarak ER değerleri hesaplanmıştır. Yakıt tüketim hızları ve ER değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. ER değeri 25 Hz ve 35 Hz pompa kademelerinde sırasıyla 0,44 ve 0,53 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. Yakıt tüketim hızları ve ER değerleri

Vakum Pompası	SR <sub>v</sub>	FCR	ER
Frekans	(m <sup>3</sup> -hava/kg-biyokütle)	(kg/h)	
25 Hz	4,486	3,89	0,44
35 Hz		4,27	0,53

Tuğ (2016) çeltik saplarıyla yaptığı gazlaştırma işleminde ER değerini 0,15 ile 0,35 arasında bulmuştur. Diken (2017) çim peletinin gazlaştırılmasında ER değerini 0,29 ile 0,36 arasında hesaplamıştır. Simone ve ark (2012) odun talaşı peletinin pilot ölçekli aşağı akışlı gazlaştırıcıda gazlaştırılmasında ER değerinin 0,30 olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada bulunan ER değerleri biyokütlenin gazlaştırıldığı önceki çalışmalara göre daha fazla olmuştur. Bu durum palmye saplarının gazlaştırılmasında yakıt tüketim hızının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

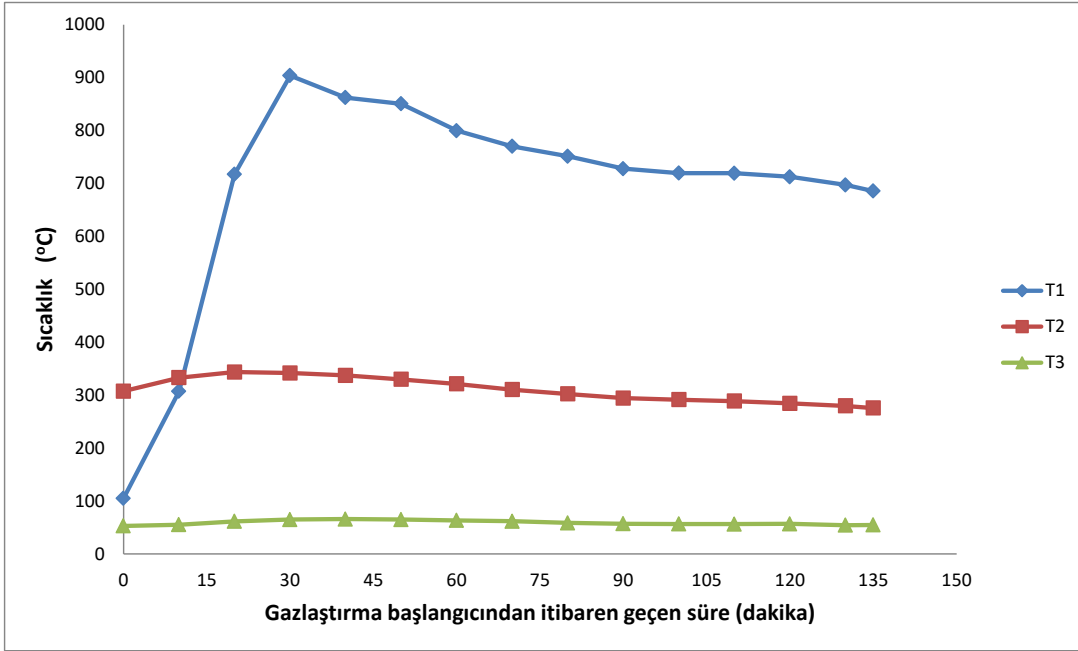
#### **4.4. Özgül Gaz Üretim Oranları**

25 Hz ve 35 Hz pompa çalışma frekanslarında özgül gaz üretim oranları sırasıyla 2,46 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle ve 2,83 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle olmuştur. İki kademedede de bu değerler birbirine yakın bulunmuştur. Diken (2017) çim peletinin gazlaştırılmasında özgül gaz üretim oranını 1,57 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle ile 1,96 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle arasında bulmuştur. Gunarathne ve ark (2013) kauçuk ağaçlarının odun parçacıklarını aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda gazlaştırmışlar ve özgül gaz üretim oranını 2,84 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle ile 2,91 m<sup>3</sup>/kg-biyokütle arasında bulmuşlardır. Bu çalışmada elde edilen özgül gaz üretim oranları Gunarathne ve arkadaşlarının bulduğu değere yakın olmuştur.

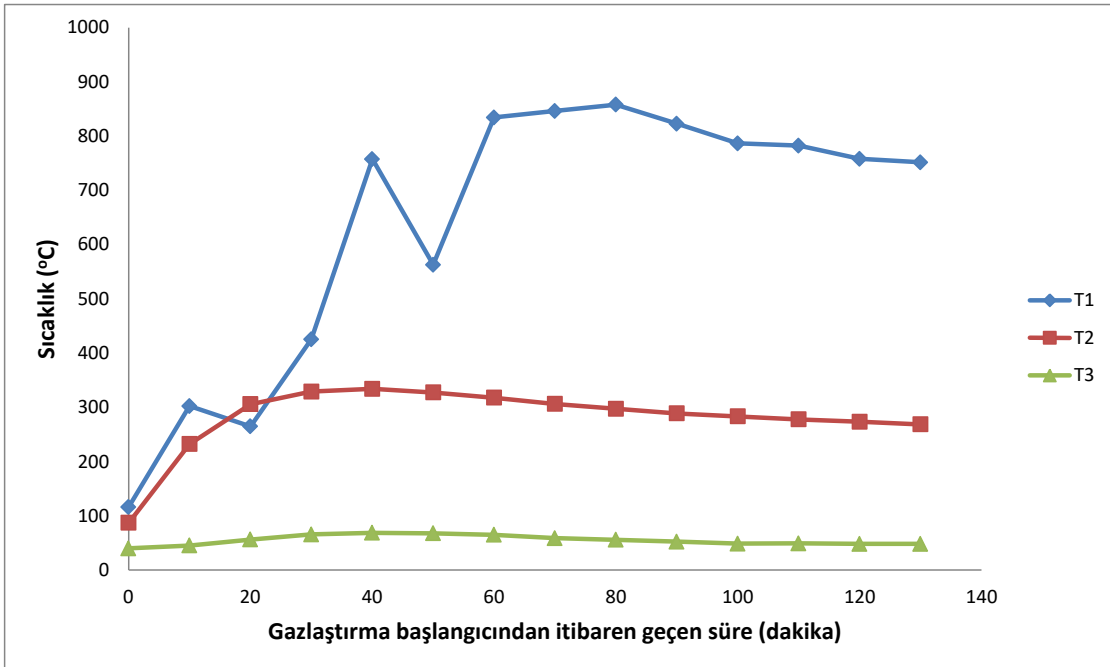
#### **4.5. Gazlaştırma İşleminde Sıcaklık Dağılımı**

Gazlaştırma işlemi sırasında ölçüm yapılan noktalardaki sıcaklık değişimleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. 25 Hz pompa kademesinde gazlaştırma işlemi rejime girdikten sonra kor bölgesi sıcaklığı 900 °C dolayına yükselmiş ancak gazlaştırma sürecinin büyük bölümünde 700 ile 800 °C arasında kalmıştır. Reaktör çıkışındaki gaz sıcaklığı 300 °C, gaz temizleme işleminden sonraki gaz sıcaklığı 60-65 °C civarında olmuştur. Bu bölgelerde gazlaştırma periyodu boyunca sıcaklıklarda aşırı değişiklikler olmamıştır. 35 Hz pompa kademesinde başlangıçta kor bölgesi sıcaklığı 800 °C olmuş, daha sonra 600 °C'nin altına düşmüş ve yükselerek 800 °C dolaylarında devam etmiştir. Sıcaklığın 600 °C'nin altına düşmesi o esnada reaktöre yükleme yapılmasından kaynaklanmaktadır. Reaktörden ve temizleme sonrası gaz çıkış sıcaklıkları 25 Hz pompa kademesinde ki gibi 300 °C ve 60-65 °C dolaylarında olmuştur. Tuğ (2016) yaptığı çalışmada kor bölgesindeki sıcaklığın ER

değerlerine bağlı olarak 612 °C ile 857 °C, Diken (2017) 800 °C ile 900 °C arasında değiştiğini belirtmişlerdir.



Şekil 4.1. 25 Hz pompa kademesinde sıcaklık dağılımları



Şekil 4.2. 35 Hz pompa kademesinde sıcaklık dağılımları



#### 4.5. Enerji ve Ekserji verimleri

25 Hz pompa kademesinde hesaplanan enerji ve ekserji dengesi Çizelge 4.4'de verilmiştir. Toplam enerji girişi 19,52 kW, enerji çıkışı 9,28 kW ve kayıp enerji 10,23 kW olmuştur. Enerji verimliliği %47,6 olarak hesaplanmıştır. Toplam ekserji girişi 20,82 kW, ekserji çıkışı 9,10 kW ve kayıp ekserji (Irreversibilty) 11,72 kW olarak bulunmuştur. Ekserji verimi %43,7 olmuştur.

**Çizelge 4.4.** 25 Hz pompa kademesinde enerji ve ekserji dengesi

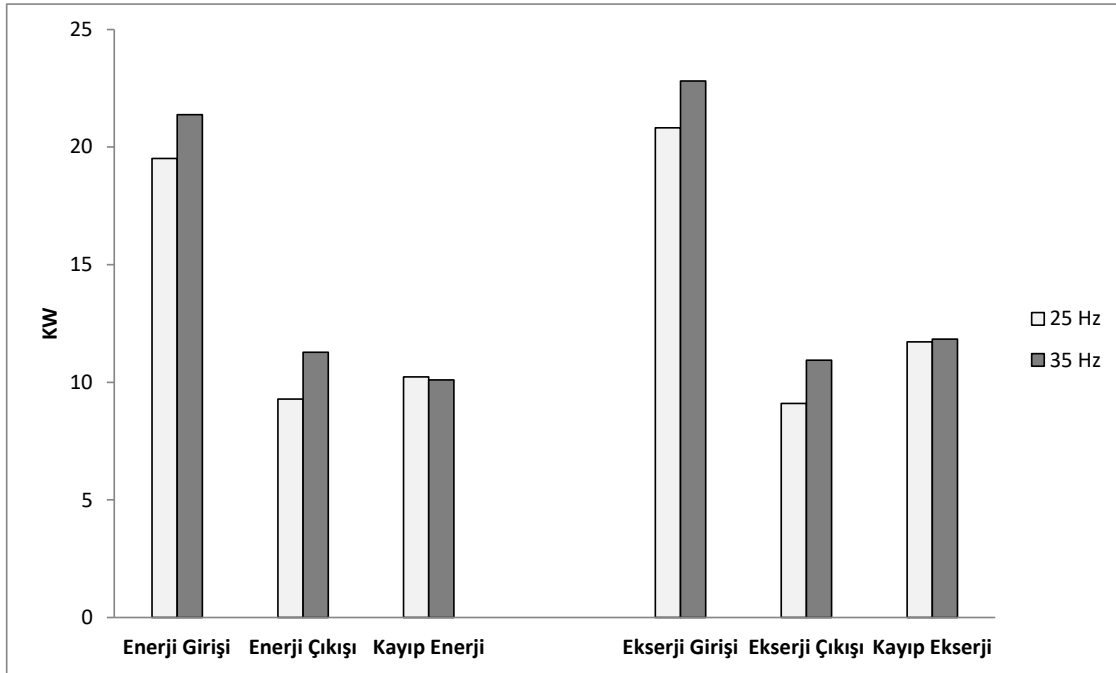
ENERJİ DENGESİ		EKSERJİ DENGESİ	
Enerji Girişi	kW	Ekserji Girişi	kW
Biyokütle	19,15	Biyokütle	20,45
Elektrik	0,37	Elektrik	0,37
<b>TOPLAM</b>	<b>19,52</b>	<b>TOPLAM</b>	<b>20,82</b>
Enerji Çıkışı		Ekserji Çıkışı	
Kimyasal Enerji	8,65	Kimyasal Ekserji	8,59
Fiziksel Enerji	0,12	Fiziksel Ekserji	0,002
Tar	0,51	Tar	0,51
<b>TOPLAM</b>	<b>9,28</b>	<b>TOPLAM</b>	<b>9,10</b>
Kayıp Enerji	10,23	Kayıp Ekserji	11,72
Enerji Verimi (%)	<b>47,6</b>	Ekserji Verimi (%)	<b>43,7</b>

35 Hz pompa kademesinde hesaplanan enerji ve ekserji dengesi Çizelge 4.5'de verilmiştir. Toplam enerji girişi 21,38 kW, enerji çıkışı 11,28 kW ve kayıp enerji 10,10 kW olmuştur. Enerji verimliliği %52,8 olarak hesaplanmıştır. Toplam ekserji girişi 22,81 kW, ekserji çıkışı 10,97 kW ve kayıp ekserji (Irreversibilty) 11,84 kW olarak bulunmuştur. Ekserji verimi %48,9 olmuştur.

**Çizelge 4.5.** 35 Hz pompa kademesinde enerji ve ekserji dengesi

ENERJİ DENGESİ		EKSERJİ DENGESİ	
Enerji Girişi	kW	Ekserji Girişi	kW
Biyokütle	21,01	Biyokütle	22,44
Elektrik	0,37	Elektrik	0,37
<b>TOPLAM</b>	<b>21,38</b>	<b>TOPLAM</b>	<b>22,81</b>
Enerji Çıkışı		Ekserji Çıkışı	
Kimyasal Enerji	10,61	Kimyasal Ekserji	10,46
Fiziksel Enerji	0,16	Fiziksel Ekserji	0,003
Tar	0,51	Tar	0,51
<b>TOPLAM</b>	<b>11,28</b>	<b>TOPLAM</b>	<b>10,97</b>
Kayıp Enerji	10,10	Kayıp ekserji	11,84
Enerji Verimi (%)	<b>52,8</b>	Ekserji Verimi (%)	<b>48,1</b>

Palmye budama atıklarının 2 farklı kademe de gazlaştırılması işleminde enerji ve ekserji dengesi Şekil 4.3’de grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 4.3.** İki farklı kademe de enerji ve ekserji dengesi

Manatura ve ark (2017) eltik kavuzu peletini gazlaştırdıkları çalışmada enerji ve ekserji verimlerini sırasıyla %44 ve %31 olarak belirlemişlerdir. Pellegrini ve Oliveria (2007) şeker kamışında 0,2-0,3 ER aralığında ekserji veriminin %40-50 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ER değeri artınca ekserji verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir. Rao ve ark. (2004), yaptıkları araştırmada kentsel atıkların gazlaştırılmasında enerji verimliliğinin %76, ekserji verimliliğinin %56, odun talaşında ise bu değerlerin %67,5 ve %48 olduğunu belirtmişlerdir. Tüm çalışmalarda ekserji verimliliği enerji verimliliğinden daha düşük olmuştur. Bu durum biyokütlenin enerjisinin ekserjisinden daha düşük, sentez gazın kimyasal enerjisinin kimyasal ekserjisinden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bunu etkileyen en önemli faktör yakıtın kalite katsayısı ( $\beta$ ) olmaktadır. Bu araştırmada da her iki kademedeki ekserji verimlilikleri daha düşük bulunmuştur. Gazlaştırılan biyokütlenin ve gazlaştırma sisteminin özelliklerine göre enerji ve ekserji verimliliği değişiklik göstermekle birlikte %30 ile %70 arasında değerler almaktadır. Bu araştırmada elde edilen değerler de bu sınırlar içerisinde olmuştur. Hatta bazı biyokütle kaynaklarına göre palmiye budama atıklarının verimlilik değerlerinin daha yüksek olduğunu söylemek mümkündür.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Palmiye budama atıklarının gazlaştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada, pilot ölçekli aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcıda iki farklı hava debisinde atık peletleri gazlaştırılmıştır. Gazlaştırma hava debileri 25 Hz pompa kademesinde 6,61 m<sup>3</sup>/h, 35 Hz pompa kademesinde 10,23 m<sup>3</sup>/h olmuştur. Daha az hava akış oranına sahip olan birinci kademede ER değeri, gaz çıkış oranı (AFR), yakıt tüketim hızı (FCR) daha düşük olmuştur. Ancak, elde edilen gazın ısı değeri daha yüksek olduğu görülmüştür. 25 Hz pompa kademesinde elde edilen sentez gazın içeriğinde ısı değeri yüksek olan metan gazının (CH<sub>4</sub>) daha fazla olması sentez gazın ısı değerini yükseltmiştir. Her iki kademede de kor bölgesi sıcaklıkları hemen hemen aynı düzeyde olmuştur. Özgül gaz üretim oranının hava debisi daha fazla olan ikinci kademede daha yüksek olduğu saptanmıştır. Enerji ve ekserji verimliliği 35 Hz pompa kademesinde yapılan gazlaştırma işleminde daha fazla bulunmuştur.

Daha önce biyokütlenin gazlaştırılması ile ilgili çalışmalara bakıldığında, palmiye budama atıklarının gazlaştırılması sonucu elde edilen performans değerlerinin saptanan sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir. Elde edilen gazın ısı değeri ve verimliliği bazı biyokütle kaynaklarından düşük bazılarında fazla olmuştur. Bu anlamda gazlaştırma performansı açısından biyokütle kaynakları içerisinde ortalama bir değer taşıdığını söylemek mümkündür.

Özellikle Akdeniz bölgesinde park, bahçe ve rekreasyon alanlarında yoğun olarak bulunan palmiye ağaçlarının budanması sonucu ortaya çıkan atıkların enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada palmiye budama atıklarından elde edilen peletlerin gazlaştırma performansı ile ilgili elde edilen veriler, bu konuda çalışan araştırmacılara kaynak olacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, Dalmış F, Kayışoğlu B (2017). Çeltik Sapının Gazlaştırılması Amacıyla Laboratuvar Tipi Bir Gazlaştırıcının Geliştirilmesi ve Denenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 14(02):119-128.
- Anonim 2019a. Temiz Enerji Yayınları Biyokütle Enerjisi. <https://habitatderneği.org/wp-content/uploads/BiyoKutle.pdf>. Erişim Tarihi :28.04.2019.
- Anonim 2019b. Biyokütle Enerjisi. [eng.harran.edu.tr/~ccetiner/biyokutle\\_enerjisi\\_6.pdf](http://eng.harran.edu.tr/~ccetiner/biyokutle_enerjisi_6.pdf). Erişim Tarihi : 30.04.2019.
- Anonim 2019c. Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full – Part 2: Orifice Plates (ISO 5167-2:2003). <https://archive.org/details/OrificePlatesISO51672>. Erişim Tarihi: 08.07.2019.
- Anukam A, Mamphweli S, Reddy P, Meyer E, Okoh O (2016). Pre-processing of Sugarcane Bagasse for Gasification in a Downdraft Biomass Gasifier System: A Comprehensive Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66: 775-801.
- Bozkurt Y (2005). Kömür ve Koklarının Katalitik Gazlaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Boztepe A (2011).Çeşitli Biyoatık Malzemelerinin Gazlaştırılması ve Elde Edilen Ürünlerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Caputo AC , Palumbo M , Pelagagge PM , Scacchia, F (2005).Economics of Biomass Energy Utilization in Combustion and Gasification Plants: Effects of Logistic Variable, Biomass and Bioenergy, 28 (1): 5-51.
- Corven D (2002). From Biomass to Diesel-Technical and Economic evaluation: Biomass Conversion to Diesel by Pyrolysis, Gasification and Fischer–Tropsch. Graduation report. University of Twente.
- Diken B (2017). Çim Peletinin Gazlaştırılma Performansının Saptanması Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Gai C, Dong Y (2012). Experimental Study on Non-Woody Biomass Gasification in a Downdraft Gasifier. International Journal of Hydrogen Energy, 37: 4935-4944.

- Galindo AL, Lora ES, Andrade RV, Giraldo SY, Jae'n RS, Cobas VM (2014). Biomass Gasification in a Downdraft Gasifier with a Two-stage Air Supply: Effect of Operating Conditions on Gas Quality. *Biomass & Energy*, 61: 236-244.
- Gunarathne D, Jatunarachchi SSJ, Senanayake NS, Wei B (2013). The Effect of Throat Diameter on the Performance a Downdraft Biomass Gasifier. *International Journal of Energy Engineering*, 3(3):171-175.
- Karamarkovic R, Karamarkovic V (2010). Energy and Exergy Analysis of Biomass Gasification at Different Temperatures. *Energy*, 35: 537-549.
- Karaosmanoğlu F (2003). Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Türkiye, *Görüş Dergisi*, Mart, 30 –34.
- Koçer NN, Ünlü A (2007). Doğu Anadolu Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 175 – 181.
- Kurt G, Koçer NN (2010). Malatya İlinin Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 26(3): 240-247.
- Leckner B, Amand L-E, Lücke K, Werther J.(2004). Gaseous Emissions from Co-Combustion of Sewage Sludge and Coal/Wood in a Fluidized Bed. *Fuel*, 83:477-486.
- Lewandowski I, Kicherer A (1996). Combustion Quality of Biomass: Practical Relevance and Experiments to Modify The Biomass Quality of *Miscanthus x Giganteus*. *European Journal of Agronomy*, 6: 163-177.
- Maki DY (2010). Döner Tip Biyokütle Gazlaştırıcı Tasarımı ve Prototip İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Manatura K, Lu JH, Wu KT, Hsu HT (2017). Exergy Analysis on Torrefied Rice Husk Pellet in Fluidized Bed Gasification. *Applied Thermal Engineering*, 111: 1016-1024.
- McKendry P (2002). Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies. *Bioresource Technology*, 83: 47-54.
- Özay Y, Ateş H, Taner F (2014). Biyokütle Dönüşüm Süreçleri. *ISEM2014*, 1042-1050
- Özyurtkan MK (2006). Melez Kavağın Karbonizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Pellegrini LF, Oliveira S (2007). Exergy Analysis of Sugarcane Bagasse Gasification, *Energy*, 32:314–327.
- Rao MS, Singh SP, Sodha MS, Dubey AK, Shyam M (2004). Stoichiometric, mass, energy and exergy balance analysis of countercurrent xed-bed gasi cation of post-consumer residues. *Biomass and Bioenergy*, 27:155-171.

- Reed TB, Das A (1988). Gasifier Fabrication and Manufacture. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Solar Technical Information Program Operated for U.S. Energy Department 38-47, 48-50, Colorado, USA.
- Saz S (2015). Biyokütle Enerjisi ve Yararlanma Yöntemleri. Bitirme Tezi, On Dokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Samsun.
- Simone M, Barontini F, Nicoletta C, Tognotti L (2012). Gasification of Pelletized Biomass in a Pilot Scale Downdraft Gasifier. Bioresource Technology, 116:403-412.
- Szargut J, Morris DR, Stewart FR (1988). Exergy Analysis of Thermal, Chemical Metallurgical Processes. Edwards Brothers, Inc.
- Tarakçıoğlu A (2015). Bazı Türk Linyitlerinin Akışkan Yataklı Gazlaştırıcıda Gazlaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tuğ S (2016). Çeltik Saplarının Gazlaştırılması için Mekanik Karıştırıcılı Aşağı Akışlı Prototip Bir Gazlaştırıcı Tasarımı. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Üçgül İ, Akgül G (2010). Biyokütle teknolojisi, Yekarum Dergi, 1(1):3-11.
- Yahaya AZ, Somalu MR, Muchtar A, Sulaiman AS, Daud WRW (2019). Effect of Particle Size and Temperature on Gasification Performance of Coconut and Palm Kernel Shells in Downdraft Fixed Bed Reactor. Energy, 175: 931-940.
- Zhang Y, Zhao Y, Gao X, Li B, Huang J (2015). Energy and Exergy Analyses of Syngas Produced from Rice Husk Gasification in An Enytrained Flow Reactor. Journal of Cleaner Production, 95: 273-280.
- Zhang Y, Xu P, Liang S, Liu B, Yong S (2019). Exergy Analysis of Hydrogen Production from Steam Gasification of Biomass: A Review. International Journal of Hydrogen Energy, 44: 14290-14302.
- Zhu X, Venderbosch R (2005). A Correlation Between Stoichiometrical Ratio of Fuel and Its Higher Heating Value. Fuel, 84, 1007-1010.
- Waldheim L, Nilsson T (2001). Heating Value of Gases from Biomass Gasification. Report Prepared for: IEA Bioenergy Agreement, Task 20 – Thermal Gasification Process. Report no TPS-01/16 TPS Termiska Processer AB, Studsvik.
- Xianwen D, Chuangzhi W, Haibin L, Yong C (2000). The Fast Pyrolysis of Biomass in CFB Reactor. Energy Fuels, 14: 552-557.

## **ÖZGEÇMİŞ**

28.04.1994 yılında Gönen’de doğdu. Lise eğitimini Gönen Mustafa Uşdu Lisesinde tamamladı. 2012 yılında Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği’nden mezun oldu. Aynı yıl Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini başladı.