

**ÇİM PELETİNİN GAZLAŞTIRILMA PERFORMANSININ
SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Bahar DİKEN
Yüksek Lisans TEZİ
BIYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

2017

T.C

**NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİM PELETİNİN GAZLAŞTIRILMA PERFORMANSININ
SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Bahar DİKEN

BIYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. BİROL KAYIŞOĞLU

TEKİRDAĞ-2017

Her Hakkı Saklıdır

Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU danıŐmanlıĐında Bahar DİKEN tarafından hazırlanan “Çim Peletinin Gazlaştırılma Performansının Saptanması Üzerine Bir Araştırma” 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. Ali VARDAR

İmza :

Üye : Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇİM PELETİNİN GAZLAŞTIRILMA PERFORMANSININ SAPTANMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Bahar DİKEN

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Gazlaştırma, temel olarak karbon içeren kömür, petrol, biyokütle ve katı atıklar gibi hidrokarbonlu yakıtların kısmi olarak oksidasyonu ile CO, H₂, CO₂ ve CH₄ gibi gazlara dönüştürülmesi işlemidir. Bu çalışmada pelet haline getirilmiş çim, ER=0,29 ve ER=0,36 olmak üzere farklı hava fazlalık katsayısı kullanılarak gazlaştırma performansları saptanmıştır. Gazlaştırma işlemi Biyosistem Mühendisliği Bölümünde imal edilmiş mikro ölçekli gazlaştırma ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma işlemi süresince kor bölgesindeki sıcaklık 700-800 °C arasında değişmiştir. Gazlaştırma sonucu elde edilen sentez gazın alt ısıl değeri sırasıyla 3831,7 kJ/Nm³ (ER=0,29) ve 3925,5 kJ/Nm³ (ER=0,36) olarak bulunmuştur. Biyokütle besleme oranları (FCR) sırasıyla 8,6 kg/h ve 6,5 kg/h olmuştur. Gaz çıkış oranları (AFR) 10,01 Nm³/h ve 9,23 Nm³/h olarak hesaplanmıştır. Birim biyokütle başına üretilen gaz miktarları (GM_b) 1,57 Nm³/kg (ER=0,29) ve 1,96 Nm³/kg (ER=0,36) olmuştur. Gazlaştırmada ısıl verimler sırasıyla %39 ve %50 olarak bulunmuştur. Çim peletlerinin gazlaştırılmasında elde edilen performans değerleri, daha önceki çalışmalarda farklı biyokütlelerin gazlaştırılmasıyla elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çim peletinin gazlaştırılmasında ER=0,36 olan kademenin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gazlaştırma, biyokütle, sentez gaz, çim peleti

2017, 41 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

A RESEARCH ON THE DETERMINATION OF GASIFICATION PERFORMANCE OF GRASS PELLETS

Bahar DİKEN

Namik Kemal University

Graduate School Of Natural and Applied Science

Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Gasification is the process of converting hydrocarbon fuels such as coal, petroleum, biomass and solid wastes, which mainly contain carbon, into gases such as CO, H₂, CO₂ and CH₄ by partial oxidation. In this study, pelleted grass was gasified at two different levels, ER = 0.29 and ER = 0.36, and gasification performances were determined. Gasification was carried out in a micro-scale gasification system manufactured in the Department of Biosystems Engineering. During the gasification process, the temperature in the core zone varied between 700-800 °C. The lower heating value of the synthesis gas obtained as a result of gasification was 3831,7 kJ/Nm³ (ER = 0,29) and 3925,5 kJ/Nm³ (ER = 0,36), respectively. Biomass feed rates (FCR) were 8,6 kg/h and 6,5 kg/h, respectively. The gas output rates (AFR) were calculated as 10,01 Nm³/h and 9,23 Nm³/h. The amounts of syngas produced per unit biomass (GM_b) were 1,57 Nm³/kg (ER = 0,29) and 1,96 Nm³/kg (ER = 0,36). The thermal efficiencies in gasification were found to be 39% and 50%, respectively. The performance values obtained by gasification of grass pellets were compared with those obtained by gasification of different biomass in previous studies. According to results obtained by gasification of grass pellets were more suitable than for (ER=0,36) levels.

Key Words: Gasification, biomass, syngas, grass pellet

2017, 41 pages

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	iv
ŞEKİL DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
ÖNSÖZ	vii
1.GİRİŞ	1
1.1. Gazlaştırma işlemi	3
1.2. Gazlaştırıcı reaktör tipleri	5
1.3. Gazlaştırma Reaksiyonları.....	12
2.AMAÇ	16
3.KAYNAK ÖZETLERİ	17
4.MATERYAL VE YÖNTEM	20
4.1. Materyal.....	20
4.1.1. Denemede kullanılan çim peletinin özellikleri.....	20
4.1.2. Gazlaştırma ünitesi	20
4.1.4. Ölçüm ve kontrol donanımı	26
4.2. Yöntem	28
4.2.1. Gazlaştırma işlemi	28
4.2.2. Gaz bileşenlerinin analizi ve ısıl değerlerinin hesaplanması.....	28
4.2.3. Gaz ve Hava Debilerinin Ölçümleri	29
4.2.4. Stokiyometrik hava miktarının hesaplanması	30
4.2.5. Eşdeğerlik oranının hesaplanması	30
4.2.6. Özgül gazlaştırma oranının (SGR) hesaplanması.....	30
4.2.9. Özgül gaz üretim oranının (SGPR) hesaplanması.....	31
4.2.10. Birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarının saptanması	31
4.2.11. Gazlaştırma veriminin hesaplanması.....	32
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	33
5.1. Pelet örneğinin stokiyometrik hava miktarı	33
5.2. Gazlaştırma işlemi sırasında sıcaklık değişimleri	33
5.3. Elde edilen gazın kimyasal bileşimi ve ısıl değeri	34
5.4. Gazlaştırma işleminin performans değerleri.....	35
5.5. Gazlaştırma işleminin ısısal verimi	36
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	37
7. KAYNAKLAR	38

ÇİZELGE DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1. 1. Gazlaştırmada sıcaklığa bağlı reaksiyon aşamaları.....	13
Çizelge 4. 1. Çim peletinin nem, kül ve uçucu madde içerikleri (% ağırlık)	20
Çizelge 4. 2. Çim peletinin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlık)	20
Çizelge 5. 1. Sentez gazların bileşimi ve ısıl değerleri.....	34
Çizelge 5. 2. Gazlaştırma işleminde elde edilen performans değerleri	35
Çizelge 5. 3. Gazlaştırma işleminin ısıl verimi	36

ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1. Gazlaştırma işlemine dayalı enerji dönüşüm yöntemleri	3
Şekil 1. 2. Dünya genelinde gazlaştırma kapasitesinin birikimli toplamı	5
Şekil 1. 3. Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı.	6
Şekil 1. 4. Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı.	7
Şekil 1. 5. Akışkan yatak biçimleri.....	8
Şekil 1. 6. Yatak bağlamasına ait fotoğraflar	9
Şekil 1. 7. Lurgi dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırma sistemi	10
Şekil 1. 8. Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi	11
Şekil 1. 9. Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı.....	12
Şekil 1. 10. Gazlaştırma prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar	13
Şekil 4. 1. Gazlaştırma reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler	21
Şekil 4. 2. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma reaktörü	21
Şekil 4. 3. Gazlaştırma sisteminde karıştırıcı	22
Şekil 4. 4. Gaz temizleme sistemi	22
Şekil 4. 5. Filtrelerde kullanılan paslanmaz çelik talaşı	23
Şekil 4. 6. Gazlaştırma sistemi akış şeması	23
Şekil 4. 7. Altıgen Şase.....	24
Şekil 4. 8. GREENCO 2RB 210-7AH16 vakum pompası	24
Şekil 4. 9. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı.....	25
Şekil 4. 10. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüp	26
Şekil 4. 11. NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje ile geliştirilen ölçüm ve kontrol sistemi.....	26
Şekil 4. 12. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı	27
Şekil 4. 13. Gazlaştırma deneyinin başlaması (full yükleme) ve bitişi	28
Şekil 5. 1. Gazlaştırma işlemi sırasında sıcaklık değişimleri	33
Şekil 5. 2. İki farklı kademedeki yapılan gazlaştırma işleminde gaz bileşenleri.....	35

SİMGELER DİZİNİ

AFR	: Air Flow Rate (Hava debisi), (m^3h^{-1})
ER	: Equivalence Ratio (Hava fazlalık katsayısı)
FCR	: Fuel Consumption Rate (Yakıt tüketim hızı)
LHVb	: Lower Heating Value of Biomass (Biyokütle alt ısı değeri), ($MJ.kg^{-1}$)
LHVg	: Lower Heating Value of Gas (Gazın alt ısı değeri), ($MJ.Nm^{-3}$)
SGPR	: Specific Gas Production Rate (Özgül gaz üretim hızı), ($Nm^3.h^{-1}.m^{-2}$)
SGR	: Specific Gasification Rate (Özgül gazlaşma hızı), ($kg.h^{-1}.m^{-2}$)
SR	: Stokiyometrik hava miktarı (kütlesel), ($kg-hava).(kg - biyokütle)^{-1}$)
SRv	: Stokiyometrik hava miktarı (hacimsel), ($m^3-hava).(kg - biyokütle)^{-1}$)

ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde enerji kaynağı olarak büyük oranda fosil kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Geleneksel enerji kaynağı olarak da adlandırılan bu yakıtlar gerek maliyetlerinin yüksek gerekse yenilemez olmaları nedeniyle, son yıllarda alternatif enerji kaynaklarının arayışı içerisinde girilmiştir. Ayrıca, fosil kökenli yakıtların tüketilmesi önemli çevresel sorunlar yaratmaktadır. Alternatif enerji kaynakları içerisinde yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir yer tutmaktadır. Güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Son yıllarda bu kaynakların kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle konusunda yapılan çalışmalarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Biyokütle doğrudan enerji kaynağı olarak kullanılabilirdiği gibi, kimyasal ve termokimyasal yöntemler kullanılarak biyogaz, etanol, sentez gaz vb ürünler elde edilerek de değerlendirilmektedir. Özellikle bitkisel ve hayvansal ürünlerin atıklarının değerlendirilip enerji kaynağı olarak kullanılması, hem bu atıkların geri kazanılması hem de çevresel sorunların giderilmesi açısından önemlidir.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında, öncelikle gazlaştırma prosesi ve bu prosenin tarihsel gelişimi, uygulamaları hakkında bilgi verilmiş ve çim peletinin gazlaştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir.

Hasattan sonra değerlendirilmeyen bitki atıklarının yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi ve bunun yaygınlaştırılması araştırmanın en önemli gerekçesini oluşturmaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan sayın danışmanım Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU'na, Biyosistem Mühendisliği Bölümü Hocalarıma ve eğitim hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda her türlü sorunda desteklerini esirgemeyen, gazlaştırma prosesi hakkında gözlem yapmama destek olan Yrd. Doç. Dr. İbrahim Savaş DALMIŞ ve Dr. Serkan TUĞ'a teşekkür ederim

Haziran, 2017

Bahar DİKEN
Biyosistem Mühendisliği

1.GİRİŞ

Artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji gereksinimi dünyanın kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki açık hızla büyümektedir. Diğer taraftan, fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji üretim yöntemleri çevre kirliliğinin artmasına neden olan önemli bir faktördür. Ayrıca, fosil yakıtların bir süre sonra tükeneyeceği de yadsınamayacak bir gerçektir. Endüstriyel faaliyetler sonucunda her yıl atmosfere yaklaşık 20 milyar ton karbondioksit, 100 milyon ton kükürt bileşikler, 2 milyon ton kurşun ve diğer zehirli kimyasal bileşikler salınmaktadır (Kadıoğlu ve Telliöglü, 1996).

Türkiye güneş, rüzgar, jeotermal, biyokütle, hidro enerji gibi yenilenebilir kaynakları açısından zengin olmasına karşın, yenilenebilir enerjiler için resmi hedefler yoktur; fosil yakıt bağımlılığını daha da arttıracak enerji tesislerinin ithalini sağlayan ihale planları vardır. Türkiye’de elektrik enerjisinin %70’i çevre kirliliği yaratan ve küresel ısınmaya yol açan fosil yakıtlardan (%31-doğal gaz; %29-linyit, %10 petrol türevleri, taş kömürü, vb.) elde edilmektedir (Froggatt, 2000)

Biyokütle 100 yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan artıkları, besin endüstrisi ve orman ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik maddeler olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütlenin toplam enerji eşdeğeri 65376 MTEP olup bu değer 1997 dünya enerji tüketiminin yaklaşık 8 katına eşittir (Acaroğlu ve Ültanır, 2000).

Ülkemiz tarımsal üretim alanlarında yaygın olarak tahıllar, yağlı tohumlar ve yumrulu ürünler yetiştirilmektedir. Bu ürünler arasında üretim alanına bağlı olarak en fazla miktarı, mısır buğday ve pamuk yetiştiriciliğinden açığa çıkmaktadır. Toplam kullanılabilir miktar içerisinde mısır % 31.72, buğday % 27.01 ve pamuk % 16.12 ile en fazla paya sahip başlıca ürünlerdir. Bölgeler içerisinde tarla ürünleri artıklarının toplam ısı değeri açısından en büyük pay, 57 PJ ve % 25 oran ile Akdeniz Bölgesine aittir. Türkiye’de tarımsal artıkların yıllık toplam enerji eşdeğeri 50–65 MTEP düzeyindedir. Ülkemizde enerji üretmek amacıyla kullanılabilir tarımsal artıkların miktarı 13 milyon ton civarındadır ve bu artıkların ısı enerjisi değeri yaklaşık olarak 228 PJ’dir (Öztürk ve Başçetinçelik, 2006).

Biyokütle kaynaklarından çeşitli işlemler sonucunda katı, sıvı ve gaz yakıtlar vb. ürünler elde edilmektedir. Bunun yanında bu yakıtların yakılması ile de ısı ve elektrik üretilmesi mümkün olmaktadır. Biyokütle kaynakları olarak; tarımsal atıklar, ormansal

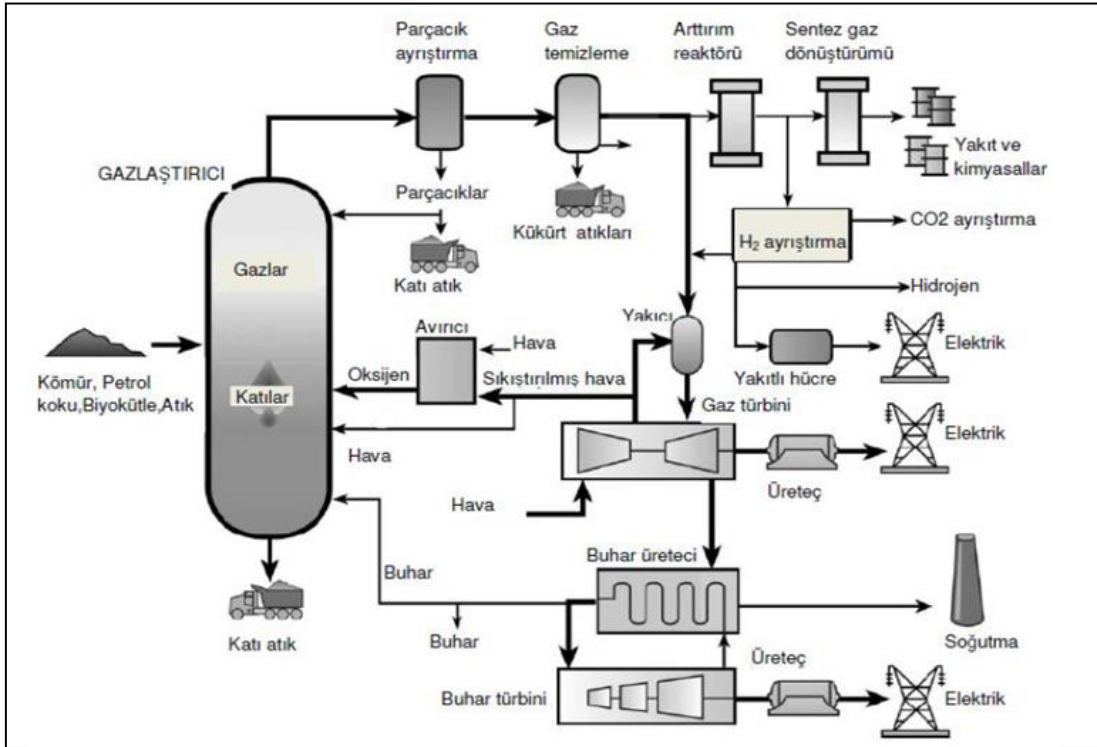
atıklar, endüstriyel atıklar, hayvansal atıklar, evsel atıklar, kanalizasyon atıkları gösterilebilir. Katı biyoyakıtlar geleneksel ve modern katı biyoyakıtlar olarak iki gruba ayrılır. Geleneksel biyoyakıtlar odunlar, ağaç dalları vb. kaynaklardır. Bunlar herhangi bir işleme tabi tutulmadan doğrudan yakılmaktadırlar. Modern katı biyoyakıt ise materyalin işlenerek yeni bir yakıt oluşturulmasıdır. Ayrıca modern biyoyakıtlar yakıtın daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Modern biyoyakıt için hammaddeler öğütülerek daha küçük parçalara getirilir ve daha sonra yüksek basınçla sıkıştırılarak büyük kütleli yakıtlar meydana getirilir. Bu yakıtlar daha sonra ısınmada, elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. Bunlara en iyi örnek peletler ve briketlerdir (Karaosmanoğlu, 2006; Karayılmazlar ve ark., 2011).

Tarımsal yayım çalışmaları ile çiftçiler bilinçlendirilerek tarımsal atıkların pelet ve briket gibi katı yakıtlara dönüştürülüp değerlendirilmesi sağlanmalıdır. Peletleme ve briketleme işlemi ile materyalin yoğunluğu artmakta taşıma, depolama ve nakliye masrafları azalmakta, boyut ve şekilde homojenlik sağlanmakta, ısıl amaçlı kullanımlarda yakma sistemlerine otomatik olarak beslenebilmekte ve böylelikle materyalin daha etkin kullanımı sağlanmaktadır (García-Maraver ve ark., 2011).

Türkiye’de hasat sonrası tarlada kalan tarımsal atıklar çiftçiler tarafından çürümeye bırakılmakta ya da yakılmaktadır. Bunun sonucunda toprakta bulunan mikroorganizmaların biyolojik aktivitelerinin yok olmasına sebep olmaktadır (Acaroğlu ve Hacıseferoğulları, 2014).

1.1. Gazlaştırma işlemi

Gazlaştırma, organik ya da fosil esaslı karbonlu yakıtların karbonmonoksit, karbondioksit, hidrojen, metan gibi gazlara dönüştürüldüğü ısıl bir işlemdir. Gazlaştırma işlemi sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucunda elde edilen gazı sentez gazı denilmektedir. Günümüze kadar olan süreçte ısı, buhar ve elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olan kömürün yakın gelecekte de önemli bir yere sahip olacağı öngörülmektedir. Kullanılan yakıtta ve gazlaştırma ortamına bağlı olarak gazlaştırıcılardan elde edilen sentez gazı doğrudan içten yanmalı motarlarda yakılabileceği gibi, yakıt hücrelerinde ya da metanol, Fischer Tropsch prosesinde kullanılarak sentetik yakıt üretimi de gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 1.1.'de gazlaştırma işlemi ve bu işleme bağlı enerji dönüşüm yöntemleri görülmektedir.



Şekil 1. 1. Gazlaştırma işlemine dayalı enerji dönüşüm yöntemleri (Kaya E, 2009)

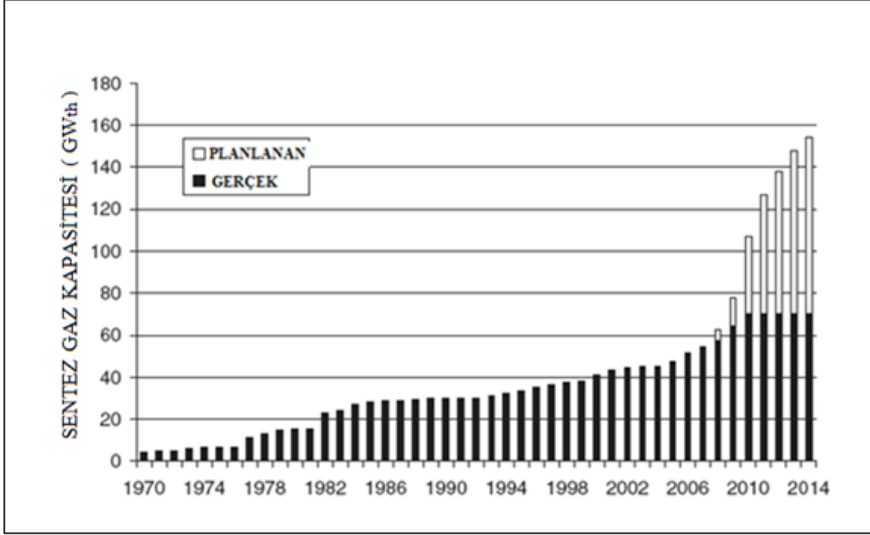
Gazlaştırma işlemi uzun zamandan beri bilinen ve uygulanan bir işlemdir. İlk sentez gaz üretimi İskoç mühendis Murdoch'un demir retordlaması sırasında kömürün pirolizi işlemiyle üretilmiştir. Daha sonra 1812 yılında ilk gaz şirketi Londra'da kurulmuş, kömürden gaz üretimi gerçekleştirilerek Westminster Köprüsü'nün aydınlatılması sağlanmıştır. 1816 yılında kömürden gaz üretimi yapan ilk gaz üretim tesisi Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulmuş üretilen sentez gazı ile Baltimore şehrinin sokakları aydınlatılmıştır. 1826 yılına

gelindiğinde New York, Boston gibi büyük şehirlerde gaz üretimi gerçekleştirilerek sokak aydınlatılması sağlanmış; proses tüm dünyadaki büyük şehirlerde uygulanmaya başlanmıştır (Rezaiyan ve Cheremisinoff, 2005).

1920’li yıllarda Carl von Linde’nin havanın soğutma çevrimiyle bileşenlerine ayrılmasını ticari olarak gerçekleştirmesiyle o zamana kadar havayla gerçekleştirilen gazlaştırma işleminde oksijenin kullanılmasıyla birlikte sentez gazı ve hidrojen üretimi yapılmaya başlanmıştır. Bunu izleyen süreçte 1926 yılında Winkler –Akışkan Yatak İşlemi, 1931 yılında Lurgi-Basınçlı Gazlaştırıcı İşlemi, 1940’larda Koppers – Totzek Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırma İşlemi bulunmuş ve uygulanmıştır. Tüm bu gelişmelere rağmen bu yeni teknolojinin uygulanma kapasitesi II. Dünya Savaşı sırasında Almanya’nın gazlaştırma ile sentetik yakıt üretim programı ve dünyada ise amonyak üretim endüstrisi ile sınırlı kalmıştır (Highman ve Burgt, 2006).

Ülkemizde ise gazlaştırma işleminin ilk uygulaması Dolmabahçe Sarayı eklentilerinden olan Dolmabahçe Gazhanesi’nde gerçekleştirilmiştir. Yaz kış oturulması planlanan büyük boyutlardaki sarayın aydınlatma ve ısıtma problemini çözmek için sarayın inşaatıyla birlikte sarayın yapıldığı yerin hemen arkasında Nişantaşı’na doğru uzanan vadi ağzına son derece stratejik bir havagazı fabrikası devlet eliyle Hazîne-i Hâssa-i Hümayun tarafından inşa ettirilmiştir. Saraya yakın olduğu için yapı Dolmabahçe Gazhanesi adıyla tanınmıştır. Dolmabahçe Gazhanesi’nin inşası sarayla birlikte 1853 yılında tamamlanmış; Kırım Savaşı’nın sona ermesi ve Paris antlaşmasının imzalanması akabinde saray ve eklentileri 7 Haziran 1856 tarihinde resmi bir törenle kullanıma açılmış ve sarayın aydınlatılması için gerekli havagazı Osmanlı Devleti sınırları içinde ilk defa burada üretilmiştir. Ayrıca Dolmabahçe Gazhanesinin üretim fazlası havagazı ile 1856 yılında Beyoğlu bölgesine havagazı verilmeye başlanmış; havagazı ile İstanbul’da ilk defa cadde-sokak aydınlatması İstiklal Caddesi (Cadde-i Kebir) aydınlatılarak gerçekleştirilmiştir (Tekin 2006).

Gazlaştırma teknolojileri bugün en hızlı gelişen enerji teknolojilerinden birisi haline gelmiştir. Özellikle son 10–15 yıllık dönem incelendiğinde gazlaştırma işleminin enerji üretim sistemleri arasında büyük bir atılım yaptığını söyleyebiliriz. Şekil 1.2. incelendiğinde gazlaştırma işlemine olan bu ilgi artışı açıkça görülebilir.



Şekil 1. 2. Dünya genelinde gazlaştırma kapasitesinin birikimli toplamı (Highgman ve Burgt 2006)

Bu artan ilginin birçok sebebi olmakla birlikte temel nedenin enerji maliyetlerindeki artış ve gazlaştırma teknolojisinin çevresel üstünlüklerinin farkına varılması olduğu söylenebilir.

1.2. Gazlaştırıcı reaktör tipleri

Seçilen reaktör tipine bağlı olarak karbon dönüşümü, reaktör boyunca sıcaklık dağılımları, ürün gazı içerisindeki tanecik miktarı değişeceğinden elde edilecek nihai ürünlerin bileşimi ve ısıl değerleri de reaktör tipinden doğrudan etkilenmektedir. Reaktör tipleri temel olarak sabit yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklemeli tip gazlaştırıcılar olmak üzere üçe ayrılır.

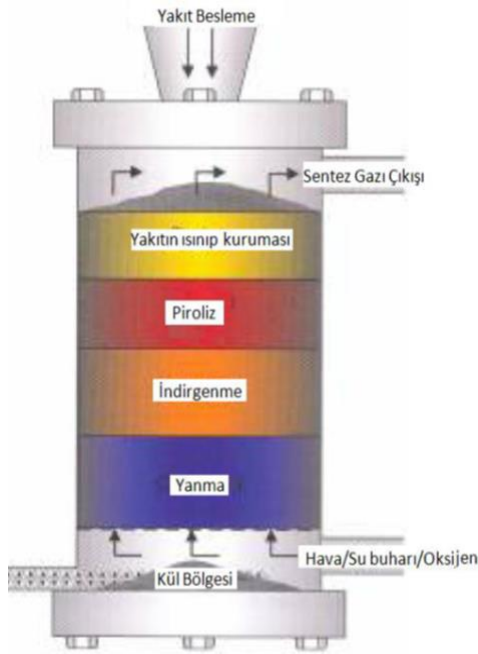
Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

Sabit yataklı gazlaştırıcılarda beslenen yakıtı desteklemek ve belirli bir reaksiyon bölgesi oluşturmak amacıyla bir metal ızgara bulunmaktadır. Sabit yataklı gazlaştırıcılar havanın ve gazın akış yönüne göre yukarı akışlı gazlaştırıcılar, aşağı akışlı gazlaştırıcılar ve karşıt akışlı gazlaştırıcılar olmak üzere sınıflandırılabilir.

Yukarı Akışlı Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılarda karbon içeren kömür ve biyokütle gibi yakıtlar reaktörün üstünden sisteme beslenirken hava ya da diğer oksidantlar gazlaştırıcının alt

bölgesinden reaktöre verilir. Gazlaştırıcıya beslenen yakıtın nemi aşağıdan gelen sıcak gazın ısıyla buharlaşır daha sonra piroliz bölgesinde katı yakıt bünyesindeki uçuculara ve çara ayırır. Yanma ve gazlaştırma reaksiyonları ızgaranın üzerindeki ocak bölgesinde gerçekleşir ve sıcak gaz ürünleri bu bölgede oluşur. Yukarı akışlı sabit yataklı sistemlerde pirolizden çıkan ürünler tam olarak tepkimeye giremediklerinden ve sıcaklıkların düşük olmasından dolayı oluşan katranın parçalanması tam olarak gerçekleştirilemez ve üretilen sentez gazı içeriğindeki katran miktarı yoğundur. Katran gazlaştırma sistemlerinde istenmeyen bir üründür ve borularda yoğunlaşarak tıkanmalara neden olmaktadır. Aynı zamanda enerji verimini de olumsuz yönde etkilemektedir (Marcio L.2004). Şekil 1.3.'te yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcının şematik resmi görülmektedir.

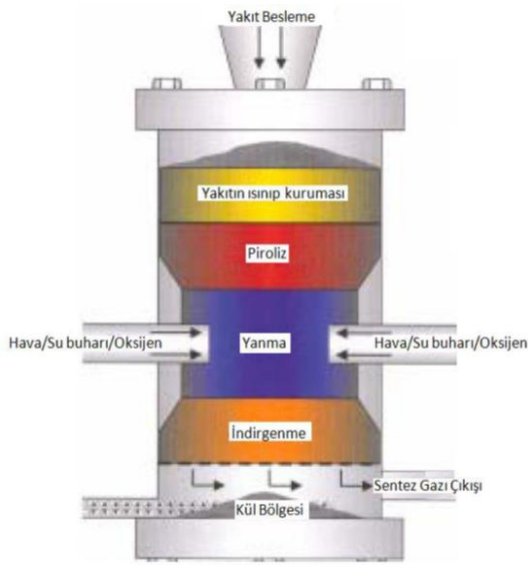


Şekil 1. 3. Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Yinesor, 2008)

Aşağı Akışlı Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırma sisteminde yakıt ve oksidantlar sisteme yukarıdan beslenir. Açığa çıkan gazlaştırma ürünleri ise sistemin alt bölgesinden alınır. Piroliz bölgesinden çıkan ürünler sıcak yatak bölgesinden geçtiği için oluşan katranın büyük bir kısmı bu bölgede parçalanır. Bu tip gazlaştırıcılar özellikle biyokütle gazlaştırmada çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda yüksek sıcaklıklarda topaklaşan yakıt tıkanmalara sebep olabilir. Bunun önüne geçmek için hareketli ızgaralar kullanılmalıdır. Çıkan gazların sıcaklığı yüksek olduğundan bu tip sistemlerde ilave bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Şekil 1.4.'te aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcının yapısı görülmektedir.



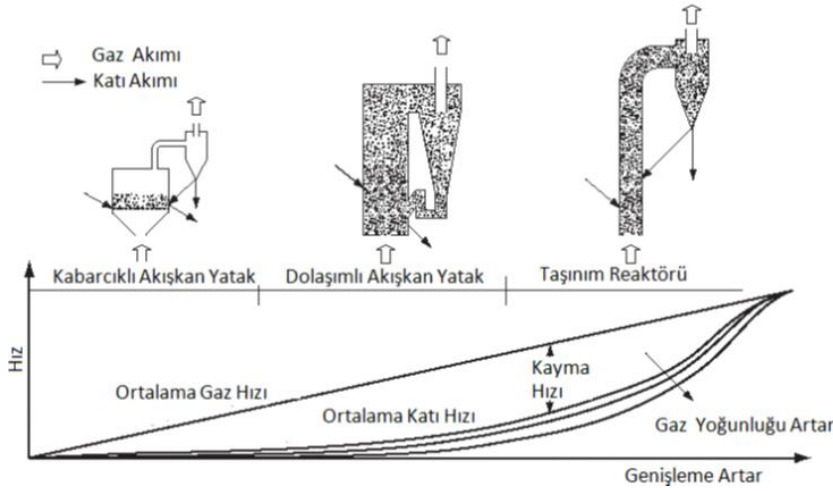
Şekil 1. 4. Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Yinesor, 2008)

Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar

Akışkan yataklı gazlaştırma sistemi Alman bilim adamı Fritz Winkler tarafından 1921 yılında bulunmuştur. Akışkan yataklı gazlaştırıcının keşfi ile bu sistemler ticari hale getirilmiş ve ticari sistemlerin kurulmasıyla hava kullanılarak yapılan gazlaştırma işlemi sonucu üretilen gazlar gaz motorlarında kullanılmıştır. 1929 yılına kadarki süreçte toplamda 5 adet olan bu sistemlerden toplamda 100 MW güç üretilmiştir (Basu, 2006).

Akışkan yataklı gazlaştırma sistemlerinde uygun parçacık boyutuna getirilmiş yakıt uygun gazlaştırma ortamında akışkan hale getirilerek gazlaştırılmaktadır. Bu tip sistemler

0.5–5 mm aralığındaki kömür ve biyokütle parçacıklarının gazlaştırılması için uygundur. Yatak malzemesi olarak kum, kireç taşı ya da yakıtın kendi külü kullanılabilir. Kireç taşı eklenmesi durumunda sülfürün bir kısmının reaktör içerisinde tutulumu sağlanır. Biyokütlelerin gazlaştırılması sırasında inert yatak malzemesi olarak silika kum da kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerde akışkanlaşma hızının üzerine çıkıldığında karışım artmakta, yüksek ısı transferi ve reaktör boyunca homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Şekil 1.5.'de çeşitli akışkan yatak biçimleri verilmiştir.



Şekil 1. 5. Akışkan yatak biçimleri (Highman ve Burgt 2006, Basu 2006)

Reaktör işletilirken dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri yatak sıcaklığının külün ergime sıcaklığının üstüne çıkmamasıdır. Aksi halde kül ergiyerek cüruf oluşmasına neden olabilir. Oluşan cüruf yatağı tıkararak akışkanlaşmayı bozabilir. Bu olaya yatak bağlaması da denilmektedir. Bu sebeple akışkan yataklı sistemler daima kül ergime sıcaklığının altında çalıştırılmalıdır. Kömürle çalışan gazlaştırıcılarda bu değer 950–1100 °C biyokütle ile çalışan sistemlerde ise 800-950 °C mertebesindedir. Şekil 1.6.'da yatak bağlamasına ait fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 1. 6. Yatak bağlamasına ait fotoğraflar (a) Reaktördeki ergimiş yatak (b) Reaktörden çıkan ergimiş kül ve yatak malzemesi.

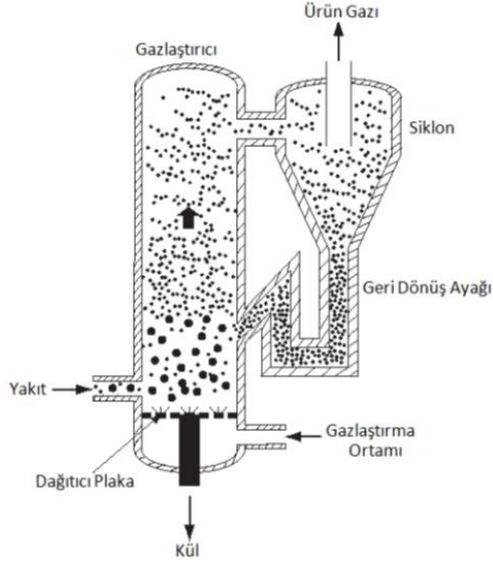
Akışkan yataklı sistemlerde reaktöre verilecek gazlaştırıcı ortamın homojen bir şekilde olması, reaktörde ölü bölgelerin oluşmaması reaktörün hidrodinamiği açısından son derece önemlidir. Ayrıca dağıtıcı plakalar katı taneciklerin hava, su buharı ya da oksijenin sisteme beslendiği kanala gitmesine de engel olmaktadır.

Bu sebeple gazlaştırma reaktörlerinde çeşitli tiplerde dağıtıcı plakalar kullanılmaktadır. Akışkan yataklı sistemler kendi içinde dolaşimli akışkan yataklı sistemler ve kabarcıklı akışkan yataklı sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Dolaşimli akışkan yataklı sistemler

Dolaşimli akışkan yataklı sistemlerde yakıt ve yatak malzemesi sıcak bir ortamda karışmaktadır. Bu tip sistemlerde yoğun katı - gaz karışımı gerçekleşmesinden dolayı reaktörün farklı bölgelerinde kuruma, piroliz, indirgenme ve oksidasyon reaksiyonları gerçekleşmektedir. Reaktöre beslenen gazlaştırıcı ortam gazları sisteme bir dağıtıcı plaka aracılığıyla verilir. Böylece homojen bir karışım oluşturulması sağlanır. Dolaşimli akışkan yataklı sistemlerde yatak malzemesi bütün reaktör boyunca bulunduğu için reaktör boyunca sıcaklık dağılımının daha homojen olduğunu söyleyebiliriz. Akışkanlaşma hızı yatak malzemesini reaktörden çıkartabilecek 5-10 m/s mertebelerindedir. Dolaşimli akışkan yataklı sistemlerde gazlaştırıcı ortamın hızı yüksek olduğu için beslenen yakıtın reaksiyona girme süresi kabarcıklı akışkan yataklı sistemlere göre daha kısadır. Bu durum reaksiyon veriminin daha düşük olmasına neden olabilir. Bu yüzden bu tip sistemlerde reaktöre beslenecek yakıt daha küçük boyutta olmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılara kıyasla hava/yakıt oranı kolayca

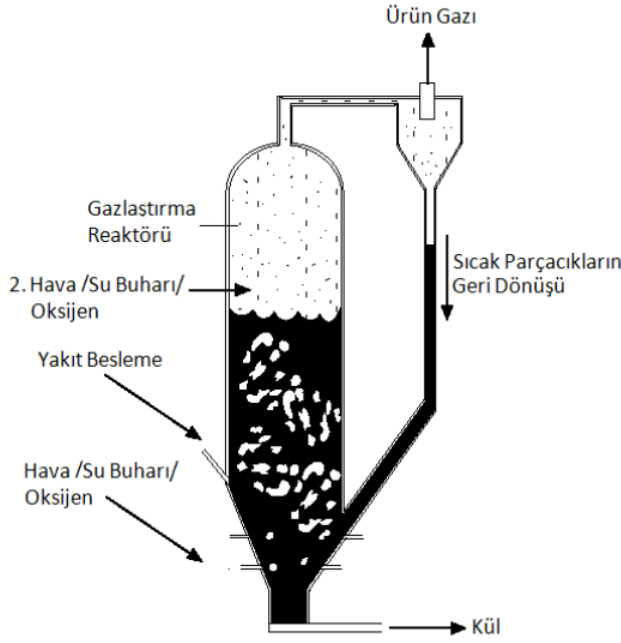
değiştirilebildiği için yatak sıcaklığı kolay bir şekilde kontrol edilebilmektedir. Şekil 1.7.'de dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırma sistemine ait şematik resim görülmektedir.



Şekil 1. 7. Lurgi dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırma sistemi (Highgman ve Burgt, 2006)

Kabarcıklı akışkan yataklı sistemler

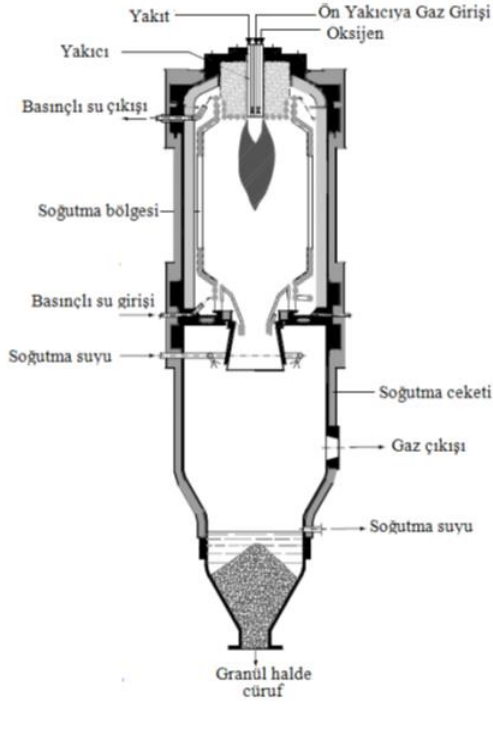
Kabarcıklı akışkan yataklı sistemlerde, yatağa beslenen yakıtın akışkanlaşmaya başlaması için gazlaşma ortamının hızının belli bir seviyede olması gerekmektedir. Bu noktadaki hıza minimum akışkanlaşma hızı denilmektedir. Bu tip reaktörlerdeki akışkanlaşma hızı 2-3 m/s mertebesinde tutulmaktadır. Daha yüksek hızlara çıktığında yatak genişleyerek yatak malzemesinin reaktörden dışarı çıkıp siklonda birikmesine neden olur. Bu sebeple kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yüksek hızlara çıkmaktan sakınılmaktadır. Şekil 1.8.'de kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemine ait şematik resim görülmektedir.



Şekil 1. 8. Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi (Basu 2006)

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar genellikle kömürlerin gazlaştırılması işleminde tercih edilen gazlaştırıcılardır. Bu tip sistemlerde yatak sıcaklıkları 1000- 1600 °C mertebesinde olduğundan yatak içerisindeki kül ergimiş halde sistemden uzaklaştırılmaktadır. Yüksek yatak sıcaklıklarından dolayı ürün gazında istenmeyen katran gibi maddelerin neredeyse tamamı parçalanmaktadır ve katran içermeyen temiz sentez gazı üretimi bu tip gazlaştırıcılarda gerçekleştirilebilmektedir. Karbon dönüşümü bu tip sistemlerde % 99 mertebesindedir. Başarılı şekilde işletmesi gerçekleştirilen 20 – 70 bar basınçtaki ticari boyutlardaki sürüklemeli akışlı gazlaştırıcıların çoğunluğu 1950’li yıllardan sonra kurulmuştur. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar daha çok yüksek enerjili kömürlerin gazlaştırılmasında gazlaştırma entegreli kombine çevrimli güç santrallerinde kullanılmaktadır. Kömür besleme sistemleri kuru kömür besleme ya da kömür su karışımı şeklinde olabilmektedir. Şekil 1.9.’da Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırıcının şematik resmi görülmektedir.



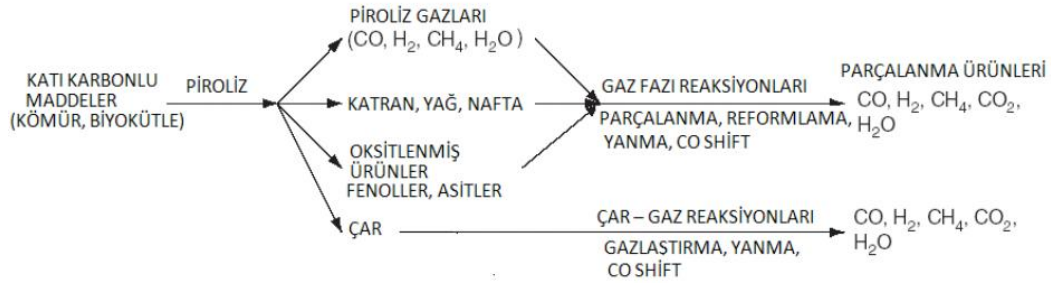
Şekil 1. 9. Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı (Basu 2010)

Plazma gazlaştırma sistemleri

Plazma gazlaştırma yöntemi daha çok evsel atık biyokütlelerin ve diğer katı atıkların gazlaştırılmasında kullanılan bir gazlaştırma yöntemidir. Bu tip sistemler plazma piroliz adıyla da bilinmektedir. Sistemin temel elamanı plazma ateşleyicileridir. İki elektrod arasında oluşan yoğun elektrik arkı neticesinde yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Beslenen atıklar yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girerek gazlaştırma işlemi gerçekleşir. Reaktördeki yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşan katranlı yapılar kırılmakta ve dioksin ve furan gibi gazlar parçalanmaktadır.

1.3. Gazlaştırma Reaksiyonları

Gazlaştırma işlemi kömür ve biyokütle gibi katı yakıtların oksidantlar (oksijen, hava, su buharı ya da bunların çeşitli oranlarda karışımlarının) ile temas edeceği bir ortamda, reaktörlerin içerisinde gerçekleştirilmektedir. Gazlaştırma proseslerinde farklı fazlarda birçok reaksiyon meydana gelmektedir. Şekil 1.10.'da kömür ve biyokütle ürünlerinin ısıl dönüşümü ve bu dönüşüm sonucu elde edilen ürünler görülmektedir.



Şekil 1. 10. Gazlaştırma prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar (Highman ve Burgt, 2006)

Genel olarak gazlaştırma sistemlerinde sıcaklığa bağlı olarak farklı fizikokimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir. Kömür ve biyokütlelerin kimyasal yapıları farklılık gösterdiğinden gazlaştırma prosesi boyunca gerçekleşme kademeleri de farklılık göstermektedir. Gerçekleşen bu reaksiyonlar ve reaksiyonların gerçekleştiği sıcaklık aralığı değerleri Çizelge 1.1’de görülmektedir.

Çizelge 1. 1. Gazlaştırmada sıcaklığa bağlı reaksiyon aşamaları (Basu, 2006)

Kuruma	>150 °C
Piroliz	150 – 700°C
Yanma	700 – 1500 °C
İndirgenme	800– 1100 °C

Kuruma işlemi katı yakıtın ısınması sırasında gerçekleşen ilk işlemdir. Atmosferik basınçta yakıtın ortam sıcaklığından 150 °C’ye kadar ısıtılmasıyla gerçekleşir. Basit gibi görünmesine karşın kuruma işlemi sıvı haldeki su, su buharı ve gözenekli yapının içindeki suyun uzaklaşması gibi üç aşamalı karmaşık bir işlemler bütünüdür.

Piroliz safhası, ısı ve kütle transferi mekanizmaları ile organik ve inorganik gazların, sıvıların çeşitli reaksiyonlarla tanecikten çevreye bırakıldığı karmaşık bir safhadır. Bu gaz ve sıvı salınımı genellikle tanecik sıcaklığının artırılması ile artmaktadır.

Kömür ve biyokütlenin pirolizi aşamasında üç tip ürün oluşumu gözlenmektedir.

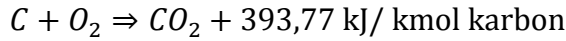
Hafif gazların oluşumu: Bu fazda H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄ gibi gazlar açığa çıkar.

Katran oluşumu: Katran genellikle katı taneciklerden gaz halinde açığa çıkan ya da sıvı kısımdan duman formunda oluşan oldukça ağır, siyah organik ve inorganik moleküllerdir.

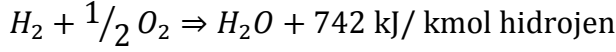
Çar oluşumu: Katı fazdan geriye kalan kısım çar olarak adlandırılmaktadır.

Çeşitli tipteki kömürlerde ve hemen hemen tüm biyokütlelerde uçucu maddeler karbonlu yapının önemli bir kısmını teşkil etmektedirler. Özellikle işletme sürecinde piroliz sırasında açığa çıkan gaz ve sıvılar tanecik etrafında yanabilir bir ortam oluşturmaları nedeniyle son derece önemlidir. Ayrıca gazlaştırma sistemlerinde piroliz ürün gazı üreten bir aşama olması bakımından da önemlidir.

Gazlaştırma sistemlerinde çarın yanması endotermik reaksiyonlar için gerekli ısının sağlandığı önemli bir safhadır. Gazlaştırıcıya verilen oksijen var olan yanabilir maddelerle reaksiyona girerek CO₂ ve H₂O oluşturur. Oluşan bu ürünler çarın piroliz ürünleri ile olan bağlantısını azaltmaktadır.



Diğer bir yanma reaksiyonu ise yakıt içerisindeki hidrojenin oksidasyonudur.



Gazlaştırma reaksiyonları, yanma sonucu açığa çıkan enerjiyle desteklenen çeşitli endotermik reaksiyonlardır. Gazlaştırma sonucu açığa çıkan karbon monoksit, hidrojen ve metan gibi yanabilir gazlar bu reaksiyonlar sonucunda oluşmaktadır. Temel olarak gazlaştırma reaksiyonları dört temel başlık altında toplanabilir.

1.3.1. Su - gaz reaksiyonu

Su-gaz reaksiyonu heterojen fazda gerçekleşen bir reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda aynı molar oranda karbonmonoksit ve hidrojen oluşumu gerçekleşir.



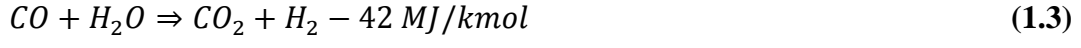
1.3.2. Boudouard reaksiyonu

Boudouard reaksiyonu reaktör içindeki karbondioksitin çarla reaksiyona girerek karbonmonoksit oluşturduğu endotermik bir reaksiyondur.



1.3.3. Shift dönüşümü

Reaktör içerisindeki karbonmonoksitin su buharı ile reaksiyona girerek hidrojen ve karbondioksit oluşturduğu ekzotermik bir reaksiyondur.



1.3.4. Metanizasyon reaksiyonu

Metanizasyon reaksiyonu heterojen fazda gerçekleşen bir reaksiyondur.



2. AMAÇ

Ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişmelerinin sürükleyici unsuru ve en temel gereksinimlerinden biri enerjidir. Bu nedenle de ülke yönetimlerini üstlenenler, enerjiyi kesintisiz, güvenilir, temiz ve ucuz yollardan bulmak ve bu kaynakları da mutlaka çeşitlendirmek durumundadırlar. Kimi geleneksel enerji kaynakları ile geri kalmış teknoloji kullanımının, doğal çevrede geri dönülmez tahribatlara yol açmaması içinse, alternatif enerji kaynakları gündeme gelmektedir.

Özellikle son yıllarda bu kaynakların kullanımı hızla artış göstermiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyokütle konusunda yapılan çalışmalarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Biyokütle doğrudan enerji kaynağı olarak kullanılabilirdiği gibi, kimyasal ve termokimyasal yöntemler kullanılarak da değerlendirilmektedir. Araştırma kapsamında kullanılan çim hem doğal hem de kültür bitkisi olarak yetiştirilen gelişme dönemlerinin uzun olması ve adaptasyon kabiliyetlerinin yüksek olması nedeniyle hayvansal ve bitkisel üretimde birçok alanlarda yararlanılmıştır. Bu sebeple bitkisel ürün olan çim atıklarının değerlendirilip enerji kaynağı olarak kullanılması ve hem bu atıkların geri kazanılması amaçlanmıştır.

Bu araştırmanın asıl amacı, biyokütle kaynağı olarak çim peletlerinin gazlaştırılması ve elde edilen sentez gazın ısı verimlerinin saptanmasıdır.

3. KAYNAK ÖZETLERİ

Rajvanshi (1986), Biyokütlenin gazlaştırılması, kısmi yanma sonucunda CO, H₂, CH₄ gibi yanıcı içeriğe sahip sentez gazı adı verilen gaz elde etme işlemi olarak tanımlanmıştır. Bu işlemin yapıldığı reaktöre gazlaştırıcı denmektedir. Sabit yataklı gazlaştırıcılar yukarı, aşağı, yatay ve sürüklemeli akışlı olarak sınıflandırılmaktadır. Gazlaştırma işleminde biyokütle 4 aşamadan geçmektedir: kuruma, piroliz, yanma ve redüksiyon. Araştırıcı, peletlenmiş çeltik kavuzundan, %16.1 CO, %9.6 H₂, %0.95 CH₄ içeren ve ısıl değeri 3.25 MJ/m³ olan sentez gazı elde edilebildiğini bildirmiştir. Gazın, reaktörden çıkış sıcaklığının da ortalama 300-400°C olduğunu ifade etmiştir.

Khater ve ark. (1992), yaptıkları araştırmada, 30 cm çaplı, 140 cm boyundaki gazlaştırıcılarında çeltik kavuzu gazlaştırarak, sentez gazı içerisindeki yanıcıların maksimizasyonuna çalışmışlardır, %13.67 CO, %5.13 H₂, %2.42 CH₄ bileşiminde gaz üretmişlerdir.

Warren ve ark. (1995), odun talaşının gazlaştırılması amacıyla boğazlı tip sabit yataklı gazlaştırıcı kullanmışlardır. Bu gazlaştırıcıda partikül boyutunun gazlaştırma üzerine etkilerini belirlemişlerdir. Sistemde toz halindeki partiküller boğaz kısmındaki hava akışına engel olmuştur. Bundan dolayı boğaz bölgesindeki sıcaklık düşmüştür. Yakıt karıştırıcısı bu problemi çözmek amacıyla kullanılmış fakat bu çözüm yetersiz kalmıştır. Yakıtın daha yoğun hale getirilmesi gerekmiştir. Izgara delik genişliği azaltılarak ve delik yüksekliği artırılarak çar toplanma problemi çözülmüştür.

Chopra ve Jain (2007), yukarı akışlı sistemlerin yüksek kül ve nem içeriğine sahip yakıtlar için uygun olduğunu ancak elde edilen sentetik gazın yüksek katran içeriği olduğunu, eğer sıcaklık arttırılırsa katranın azalacağını ancak bu kez de gazın kalorifik değerinde de azalma olacağını belirlemişlerdir. Aşağı akışlı sistemlerde daha temiz gaz üretilmektedir. Sabit kesitli (boğazsız) gazlaştırıcılarda çeltik kavuzu, odun cipsi, hindistan cevizi kabuğu, şeker pancarı yaprağı gibi biyoküteller başarıyla gazlaştırılabilmektedir. Bu tip gazlaştırıcılarda gazlaştırıcının izolasyonu, ürün gazının yakılmasıyla elde edilen egzoz gazı ısısının kullanılması, hava dağılımının iyileştirilmesi performansın artmasına ve katran oranının azalmasına yardımcı olmaktadır. Üstü açık boğazsız tip gazlaştırıcıların, yüksek kül içeriğine sahip küçük boydaki biyoküteller için uygun olduğu da saptanmıştır.

Rozainee ve ark. (2008), akışkan yataklı yakıcılarda çeltik kavuzu yakılarak amorf silika külü elde etmişler; bu yakma sistemlerinde yanma verimi yüksek olduğundan düşük sıcaklıklarda (600-800 °C) çalışma olanağının olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun akışkan yataklı yakma sisteminin diğer yakma sistemlerine bir üstünlüğü olduğunu, çünkü 700 °C üzeri sıcaklıklara çıkıldıkça çeltik kavuzu külünün kristalize olmaya başladığını belirtmişlerdir. Potasyum oksit ve sodyum oksit gibi alkalilerin, düşük ergime sıcaklıklarında eriyerek yüzeye yapışması nedeniyle karbon dönüşümünü olumsuz etkilediği, kül içerisinde saklı kalan karbonun ise yüksek sıcaklıklara çıkılması halinde dahi dönüşemediğini bildirmişlerdir.

Tinaut ve ark. (2008), parçacık boyutu ve hava akış hızının aşağı akışlı sabit yataklı tip bir gazlaştırıcı (50 mm reaktör çapı ve 700 mm yüksekliğe sahip) kullanılarak yapılan gazlaştırma işlemi üzerine deneysel ve modelleme çalışması yapmışlardır. Denemeler 6, 12 ve 18 l/dak hava hızı ve biyokütle partikül büyüklüğü 2–6 (4), 6–12 (9) ve 12–19 (15) mm. Maksimum etkinlik daha küçük partikül boyutları ve daha düşük hava akış hızı koşullarında saptanmıştır. Gazlaştırıcıda yüksek yakıt/hava oranı, daha yüksek ısıl değerli (kalorifik değerli) gaz elde edilmesi sağlanmıştır.

Simone ve ark. (2012), laboratuvar ölçekli aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda yalnızca odun talaşı ve %50 ayçiçeği çekirdeği ile %50 odun talaşını peletleyerek gazlaştırmışlardır. Araştırmacılar, her iki pelet örneğinde de alt ısıl değerinin 5,7 MJ/Nm³, birim biyokütle başına gaz üretiminin 2,2 ile 2,4 Nm³/kg arasında ve ısıl verimin %67,7 ile %70 arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Dutta ve Baruah (2014), çay bitkisinin dallarını peletleyerek aşağı akışlı gazlaştırma sisteminde gazlaştırmışlardır. Araştırmacılar biyokütlenin alt ısıl değerinin 18,5 MJ/kg, elde edilen sentez gazın alt ısıl değerinin 4,2 MJ/Nm³ olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, gazlaştırmanın ısıl veriminin %65 olduğunu belirtmişlerdir.

Galindo ve ark (2014), aşağı akışlı gazlaştırma ünitesi kullanarak 6 cm boyutlarında küp şeklinde hazırladıkları okalipütüs odunlarını gazlaştırmışlardır. Biyokütlenin alt ısıl değerinin 18,06 MJ/kg olduğunu belirten araştırmacılar, elde edilen sentez gazın alt ısıl değerini 4,11 MJ/Nm³ ile 5,12 MJ/Nm³ arasında bulmuşlardır.

Jangsawang ve ark. (2015), kor bölgesindeki sıcaklıklara bağlı olarak optimum ER değerlerini belirlemek amacıyla model geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, 600-900 K arasında optimum ER değerinin 3,0; 900-1600 K arasında 2,0 ve 1600-2000 K arasında 1,5 olduğunu belirtmişlerdir.

Tuğ (2016), çeltik saplarını parçalayıp belirli oranlarda katkı maddesi kattıktan sonra pelet haline getirmiş ve gazlaştırma performanslarını saptamıştır. 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⁻³ ile yalnızca çeltik sapı kullanılan (PRF) peletlerle, en düşük alt ısıl değer 3,899 MJ.Nm⁻³ ile %15 kömür tozunun kullanıldığı (PC15) peletlerle yapılan gazlaştırma işleminde elde edilmiştir. En yüksek gazlaştırma verimi katkısız pelet (PRF) örneklerinde %64,8 değeri ile elde edilmiştir. En düşük gazlaştırma verimi %59,6 ile %15 kömür karışımında olmuştur. Biyokütlenin özgül gazlaşma oranı (GM_b) 1,78 ile 1,93 Nm³/kg arasında değişmiştir.

Manatura ve ark. (2017), çeltik kavuzundan elde ettikleri peletleri farklı koşullarda gazlaştırarak enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Araştırmacılar gazlaştırma ısıl veriminin %44 ile %68 arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

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/Nm³ değerinden 3,71 MJ/Nm³ 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.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Denemede kullanılan çim peletinin özellikleri

Denemelerde kullanılan çim peleti Akdeniz Üniversitesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümünde Tubitak destekli yürütülen bir araştırmada imal edilmiştir. Çim peletine ait elementel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. Çim peletinin nem, kül ve uçucu madde içerikleri (% ağırlık)

Kül içeriği (%)	Nem	Uçucu Madde		FC(Sabit karbon)
		Orijinal Baz	Kuru Baz	Kuru Baz
14,91	7,98	65,78	71,85	13,24

Çizelge 4. 2. Çim peletinin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlık)

C	H	N	S	O
40,01	5,19	2,33	-	37,56

4.1.2. Gazlaştırma ünitesi

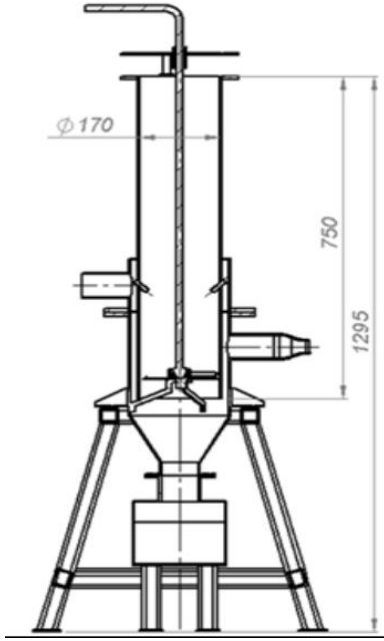
Gazlaştırma denemeleri NKUBAP.00.24.AR.14.28 numaralı araştırma projesi kapsamında tasarlanan gazlaştırıcı aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız tiptedir (Şekil 4.1.). Bu tip gazlaştırıcılar için kritik parametre reaktör kesitidir ve bu tasarımda reaktör çapı 170 mm ve boyu 750 mm olarak alınmıştır. Izgara, reaktör gövdesi alt kısmından 50 mm yüksekliktedir ve bu durumda reaktör efektif yüksekliği 700 mm olarak alınmıştır.

Biyokütle gazlaştırıcılarda gazlaştırıcı kapasitesi ve gücü, kullanılacak yakıtı ve reaktör kesit alanına bağlıdır.

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. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma sistemi Şekil 4.2.'te görülmektedir.

Reaktör üzerinde ek hava girişleri için nozullar ve sıcak hava ceketini bulunmaktadır. Ek hava girişi bu sıcak hava ceketinden geçerek nozullara ve oradan reaktör içerisine (oksidasyon bölgesine) sevk edilebilmektedir. Reaktörün altında, ızgaradan geçen sentez gazının çıkış hattına sevk edildiği ve aynı zamanda külün toplandığı “gaz ve kül toplama ünitesi” bulunmaktadır.

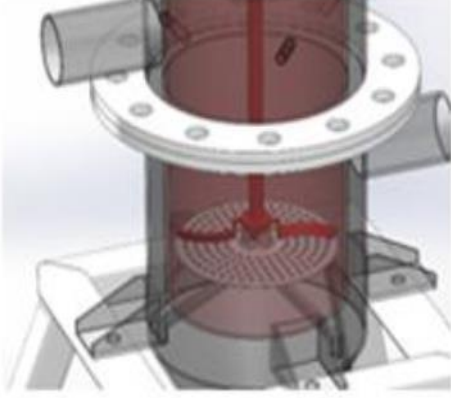


Şekil 4. 1. Gazlaştırma reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)



Şekil 4. 2. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma reaktörü (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Reaktör alt kısmından 50 mm yukarıda sabit ızgara bulunmaktadır. Izgara, gaz ve kül toplama ünitesi üzerinde bulunan ayaklar tarafından desteklenmektedir. Kül manipülasyonu, ızgara üzerine oturtulan ve manuel olarak tahrik edilen bir karıştırıcı ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.3.).



Şekil 4. 3. Gazlaştırma sisteminde karıştırıcı (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Gaz çıkışında bulunan siklon gaz temizlemenin ilk aşamasını gerçekleştirmektedir. Siklondan sonra sentez gazı, tutucu malzeme olarak paslanmaz çelik talaşlarının kullanıldığı filtreden geçerek soğutma ünitesine geçmektedir. Soğutma ünitesinden sonra ikinci bir filtre gaz temizleme prosesinin son adımını da tamamlamaktadır (Şekil 4.4.). Sistemdeki yoğuşma siklon altından ve birinci soğutma ünitesinin altından tahliye edilmektedir. Buralarda aynı zamanda su kilidi uygulaması yapılmıştır.



Şekil 4. 4. Gaz temizleme sistemi (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Filtre malzemesi olarak kullanılan paslanmaz çelik talaşı Şekil 4.5.'te görülmektedir.



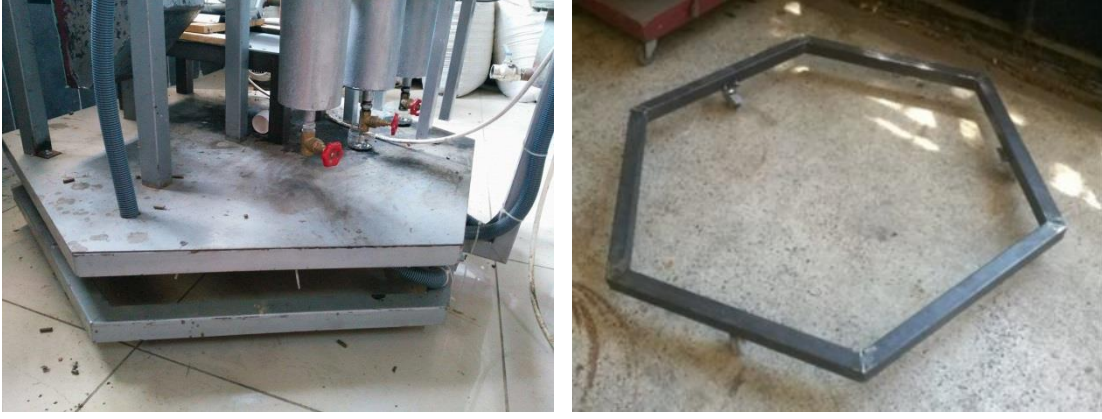
Şekil 4. 5. Filtrelerde kullanılan paslanmaz çelik talaşı (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Elde edilen gazın debisi orifis plakası ve fark basınç ölçer yardımıyla ölçülmektedir. Sistem içerisinde gazın emişi devir kontrollü bir vakum fanı tarafından sağlanmaktadır. Vakum fanından çıkan sentez gazı yakma ünitesinde (flare) yakılmaktadır. Sisteme ait akış şeması Şekil 4.6.'de verilmiştir.



Şekil 4. 6. Gazlaştırma sistemi akış şeması (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Gazlaştırma sistemi tümüyle mobil olabilmesi ve çalışma kolaylığı için altıgen bir platform üzerine yerleştirilmiş ve bu platform da yine aynı ölçülerde bir altıgen şase üzerine yük hücreleri üzerinde monte edilmiştir (Şekil 4.7.)



Şekil 4. 7. Altıgen Şase (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Sistemden gaz emişini bir vakum pompası sağlamaktadır. Kullanılan vakum pompası GREENCO 2RB 210-7AH16 modeldir (Şekil 4.8). Bu vakum pompası tek fazlı ve iki kutupludur. 50 Hz ve 60 Hz frekanslarında çalışabilmekte ve 50 Hz frekansında basınç 13 kPa ve maksimum hava akışı 80 m³/h, 60 Hz frekansında ise basınç 11 kPa ve maksimum hava akışı 98 m³/h'dir.



Şekil 4. 8. GREENCO 2RB 210-7AH16 vakum pompası (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

4.1.3. Gaz kromatografi cihazı

Gazlaştırma işleminde üretilen sentez gazı bileşiminde CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂ gibi bileşenler bulunmaktadır. Sentez gazının bileşimini tespit etmek amacıyla AGILANT 7890B GC (Şekil 4.9.) gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır.

GC ölçümleri için taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta Argon, cihaz üzerindeki pnömatik valflerin sağlıklı çalışabilmesi için de kuru hava tüpü kullanılmıştır. Cihazın ölçüm metodu oluşturularak kalibre edilmesi için kullanılan referans gaz tüpü, kuru hava ve argon tüpleri Şekil 4.10.'de görülmektedir.



Şekil 4. 9. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)



Şekil 4. 10. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüp (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

4.1.4. Ölçüm ve kontrol donanımı

Gazlaştırma sisteminin proses şartlarını kontrol etmek ve elde edilecek verileri görüntüleyerek kaydetmek üzere NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje desteği ile geliştirilen PLC kontrollü ölçüm, kontrol ve otomasyon cihaz ve donanımları kullanılmıştır. Sistem yapısal olarak genişletilmeye uygun analog ve dijital giriş/çıkış kanalları ile donatılmıştır. Geliştirilen sistemin reaktör üzerine monte edilmiş hali Şekil 4.11.'de verilmiştir.



Şekil 4. 11. NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje ile geliştirilen ölçüm ve kontrol sistemi (Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, 2016)

Geliştirilen bu sistemde Şekil 3.13'de görüldüğü gibi ortam sıcaklığı dahil 7 ayrı sıcaklık ölçümü, 2 basınç ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca sistemin toplam ağırlığında proses sırasında meydana gelecek ağırlık değişimleri de altıgen şase üzerine yerleştirilen 3 ayrı yük hücresi tarafından algılanarak ekranda görüntülenmektedir. Vakum bloverin devir kontrolü de inverter yardımıyla HMI pano üzerinden kontrol edilebilmektedir. Ölçülen değerler USB bağlantısı ile herhangi bir bilgisayar bağlantısı olmaksızın kaydedilebilmektedir. Değerler sistem üzerinde 7" TFT ekran üzerinden görüntülenmektedir. Şekil 4.11.'de kontrol ve görüntüleme ekranı görülmektedir.



Şekil 4. 12. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı

Sıcaklık ölçümü için K tipi termokupllar kullanılmıştır. Nikel ve krom alaşımli bu termokupllar 1200 °C'ye kadar kullanılabilir. Kor bölgesi T1 olmak üzere T2, T3 ve T4 nolu termokupllar 150 mm aralıklarla reaktör gövdesi boyunca yerleştirilmiştir. Reaktör çıkış sıcaklığı T5 ve soğutma grubu çıkış sıcaklığı da T6 olmaktadır. Ayrıca ortam sıcaklığı da ölçülmekte ve görüntülenmektedir. Reaktör üzerinde termokuplların yerleşimi Şekil 4.12.'te görülmektedir.

Reaktör çıkışında ve soğutma grubu çıkışında olmak üzere iki ayrı basınç ölçer, sistem üzerindeki basınç düşüşünü ve vakumu gözlemlemek üzere yerleştirilmiştir. Sistem negatif basınç altında çalışmaktadır.

4.2. Yöntem

4.2.1. Gazlaştırma işlemi

Pelet örneklerinin gazlaştırılması işlemleri materyal bölümünde detayları verilmiş olan ve bu proje kapsamında imal edilmiş olan laboratuvar tipi aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız olarak tasarlanan gazlaştırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma işleminin de 2 kademe uygulanmıştır. Birinci kademedeki hava debisi=3,5 m³/h, ikinci kademedeki hava debisi=4 m³/h olarak ayarlanmıştır.

Izgara üzerine yaklaşık 1 kg pelet tutuşturulmak üzere konmuş ve korun üst bölgeye ulaşması beklenmiştir. Ardından reaktör üst kısmına kadar yüklenmiştir. Yükleme yapılması deney başlangıcı olarak alınmış, 1 saat sonra biyokütle miktarındaki azalma tamamlanarak eklenen miktar ölçülmüştür. Bu değer yakıt tüketim hızı FCR (kg/h) olarak kaydedilmiştir (Fuel consumption rate) (Singh ve ark., 2006). Şekil 4.13.'de deneyin başlama (tam yükleme yapılması) ve bitişi (korun reaktör üzerinden görülmesi) anları görülmektedir.



Şekil 4. 13. Gazlaştırma deneyinin başlanması (full yükleme) ve bitişi (korun üst kısımdan görünmesi)

4.2.2. Gaz bileşenlerinin analizi ve ısı değerlerinin hesaplanması

Ana gaz hattından debi ölçümünden sonra bir şırınga sistemi kullanılarak gaz numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler Agilent 7890B GC gaz kromatografisi cihazına şarj edilerek analiz edilmiştir. Elde edilen gazın CO, H₂, CH₄, CO₂ ve N₂ oranları GC cihazına ait yazılım kullanılarak kaydedilmiştir.

Gazın alt ısıl değeri üretilen gazın birim kütlesindeki bileşenlerin oranları ve enerji içerikleri dikkate alınarak bulunmuştur (Waldheim ve Nilsson 2001).

Sentez gaz ısıl değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$LHV_g = (10,8. \%H_2 + 12,63. \%CO + 35,8. \%CH_4)/100 \quad (4.1)$$

Burada LHV_g (MJ.Nm⁻³) sentez gazın alt ısıl değeridir. Sentez gazı içerisindeki yanıcı gazların kütleli yüzdeleri GC ile ölçülmektedir. Bu bileşenlerin enerji değerleri de 1 atm basınç ve 0 °C sıcaklık için aşağıda verilmiştir (Waldheim ve Nilsson 2001);

$$H_2 : 10,8 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$CH_4 : 35,8 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$CO : 12,63 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

Gazın üst ısıl değeri üretilen gazın birim kütlesindeki bileşenlerin oranları ve enerji içerikleri dikkate alınarak bulunmuştur (Walheim ve Nilsson 2001).

Sentez gaz ısıl değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$HHV_g = (12,76. \%H_2 + 12,63. \%CO + 39,76. \%CH_4)/100 \quad (4.2)$$

Standart gazın üst ısıl değeri HHV_g (MJ.Nm⁻³) dir. Bu bileşenlerin enerji değerleri de 1 atm basınç ve 0 °C sıcaklık için aşağıda verilmiştir (Waldheim ve Nilsson 2001);

$$H_2 : 12,76 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$CH_4 : 39,76 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

$$CO : 12,63 \text{ MJ.Nm}^{-3}$$

4.2.3. Gaz ve Hava Debilerinin Ölçümleri

Gaz debisi ölçümü gaz hattında gaz numunesi alınmadan önce yerleştirilmiş bir orifis tipi debimetre ile yapılmıştır. Hava girişlerindeki debi de yine orifis plakası ve fark basınç ölçerle ölçülmüştür. Nozul çapı hesabında öncelikle kullanılması düşünülen en fazla hava debisi AFR (m³.h⁻¹) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır (Tuğ, 2016).

$$AFR = FCR. ER. SR_v \quad (4.3)$$

4.2.4. Stokiyometrik hava miktarının hesaplanması

Tam yanma için gerekli oran stokiyometrik hava miktarı ve üst ısıl değeri arasında benzersiz korelasyon görülmektedir. Stokiyometrik hava miktarı aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur (Corven, 2002);

$$SR = 0,31. HHV \quad (4.4)$$

SR ise 1 kg biyokütlenin tam yanması için gereken hava kütesini vermektedir. Hesaplanan hava kütesi 25 °C sıcaklıktaki hacimlerine dönüştürülerek ifade edilmiştir (SR_v).

4.2.5. Eşdeğerlik oranının hesaplanması

Hava fazlalık katsayısı (ER) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır (Reed ve Das, 1988);

$$ER = \frac{(AFR/FCR)}{SR_v} \quad (4.5)$$

Burada, ER eşdeğerlik oranı; AFR (m³.h⁻¹) ortama verilen havanın debisi; FCR (kg.h⁻¹) biyokütle yakıt tüketim hızı ve SR_v (m³.kg⁻¹) ise 1 kg biyokütle yakıtın yanması için gereken stokiyometrik havanın hacimsel debisidir.

Eşdeğerlik oranı ER, piroliz reaksiyonlarında 0, gazlaştırmada 0,2 – 0,5 arasında ve yanma olayında 1'den büyük alınmaktadır (Zhu ve Venderbosch, 2005).

4.2.6. Özgül gazlaştırma oranının (SGR) hesaplanması

Özgül gazlaştırma oranı reaktörün birim kesitinin birim zamanda gazlaştırdığı biyokütle miktarıdır. Reaktörün performansını belirleyen önemli parametrelerden birisidir (Jain, 2006).

Bu amaçla, öncelikle reaktörün bir operasyon boyunca tükettiği biyokütle miktarı ve operasyon zamanına bağlı olarak, biyokütle tüketim oranı (FCR) hesaplanmıştır.

$$FCR = \frac{m_b}{t} \quad (4.6)$$

Burada; FCR (kg.h⁻¹) biyokütle tüketim oranı, *m_b* (kg) bir operasyon boyunca tüketilen biyokütle miktarı, *t* (h) operasyon süresidir.

Daha sonra aşağıdaki bağıntı yardımıyla özgül gazlaştırma oranı bulunmuştur;

$$SGR = \frac{FCR}{A_R} \quad (4.7)$$

Burada; SGR ($\text{kg.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$) özgül gazlaştırma oranı, A_r (m^2) reaktörün kesit alanıdır.

4.2.7. Sentez gaz debi (GFR) hesaplanması

Gazlaştırma sırasında sentez gazın hesaplanmasında azot oranında ihmal edilecek NO_x birleşenler ortaya çıkmaktadır.

Sentez gaz debisi aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur (Tuğ, 2016);

$$GFR = \frac{AFR \cdot (N_2)_{hava}}{(N_2)_{gaz}} \quad (4.8)$$

Burada; GFR ($\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$) sentez gaz debisi, N_2 havadaki azot oranı (%), AFR ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) ortama verilen havanın debisi, N_2 gazdaki azot (%) oranıdır.

4.2.9. Özgül gaz üretim oranının (SGPR) hesaplanması

Gazlaştırma süresince birim zamanda üretilen gaz miktarının (GFR) reaktör kesit alanına oranlanmasıyla bulunmuştur. Burada üretilen gaz debisi 1 atm basınç ve 0°C şartlarındaki miktardır (Tuğ, 2016).

$$SGPR = \frac{GFR}{A_R} \quad (4.9)$$

Burada; SGPR (m.h^{-1}) özgül gaz üretim oranı, GFR ($\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$) çıkıştaki gaz debisi A_r (m^2) reaktörün kesit alanıdır.

Çıkıştaki gaz debisi (GFR), gazlaştırma işlemi başladıktan ve sistem rejime girdikten sonra ölçülmüştür.

4.2.10. Birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarının saptanması

Özgül gaz üretim oranının (SGPR), özgül gazlaştırma oranına bölünmesiyle hesaplanmıştır (Tuğ, 2016);

$$GM_b = \frac{SGPR}{SGR} \quad (4.10)$$

Burada; GM_b ($\text{Nm}^3\text{kg}^{-1}$) birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarıdır.

4.2.11. Gazlaştırma veriminin hesaplanması

Biyokütlenin alt ısı değeri alınarak hesaplanan ısı gücünün gazlaştırma sonucu elde edilen gazın alt ısı değeri alınarak hesaplanan ısı gücüne oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Buna soğuk gaz verimi de denmektedir.

Biyokütlenin ısı gücü aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur (Tuğ, 2016);

$$P_b = \frac{FCR \cdot LHV_b}{3600} \quad (4.11)$$

Burada; P_b (kW) biyokütlenin ısı gücü ve LHV_b (kJ.kg^{-1}) alt ısı değeridir.

Elde edilen gazın ısı gücü de aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur (Tuğ, 2016);

$$P_g = \frac{GFR \cdot LHV_g}{3600} \quad (4.12)$$

Biyokütle ve gazın ısı güçleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki bağıntıyla gazlaştırma işleminin ısısal verimleri bulunmuştur (Tuğ, 2016);

$$\eta_G = \frac{P_g}{P_b} \cdot 100 \quad (4.13)$$

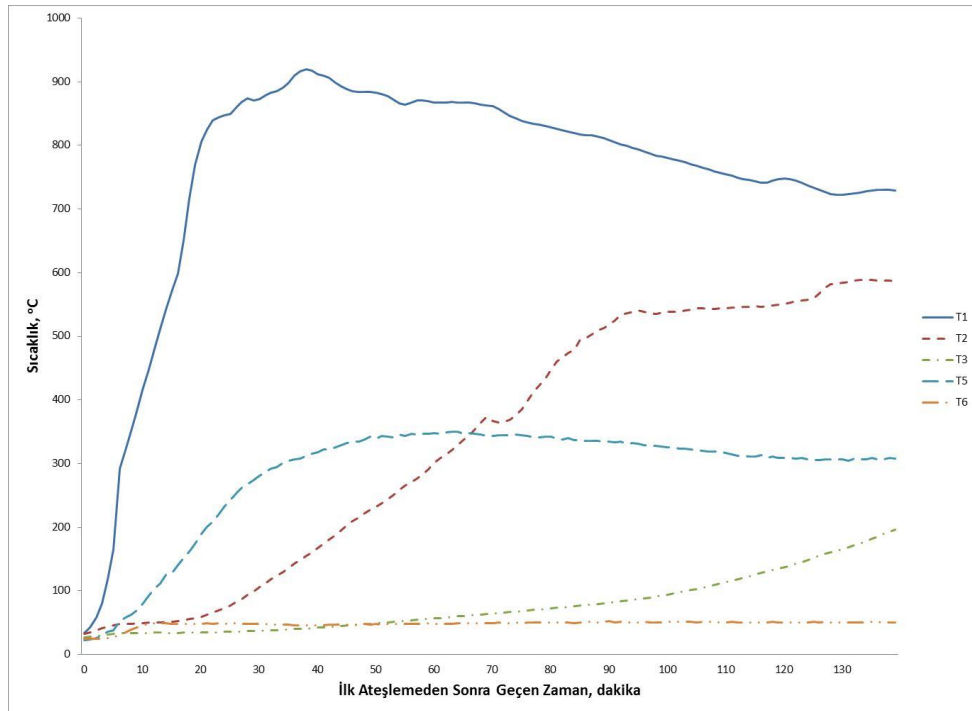
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Pelet örneğinin stokiyometrik hava miktarı

Çim peletinin tam yanması için gerekli olan stokiyometrik hava miktarı SR_m değeri 5,093 kg-hava/kg-biyokütle hesaplanan hava kütlesi 25 °C sıcaklıktaki hacimsel stokiyometrik hava miktarı $3,934 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ olarak saptanmıştır.

5.2. Gazlaştırma işlemi sırasında sıcaklık değişimleri

Gazlaştırma işlemi sırasında kor (T_1), indirgeme (T_2), piroliz (T_3), kuruma bölgeleri (T_4) ve gazın reaktör çıkış (T_5) ile temizlemeden sonraki (T_6) sıcaklıklarının değişimi Şekil 5.1.'de grafik olarak verilmiştir. Kor bölgesinin sıcaklığı gazlaştırma işlemi (tutuşurma) başladıktan 30 dakika sonra 900 °C'nin üstünde maksimum düzeye ulaştırmıştır. Kor bölgesinin sıcaklığı daha sonra 700 °C ile 800 °C arasında değişmiştir. En son elde edilen gaz sıcaklığının gazlaştırma işlemi boyunca 50 °C civarında sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 5.1. Gazlaştırma işlemi sırasında sıcaklık değişimleri

Biyokütlenin gazlaştırılması ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda kor bölgesindeki sıcaklığın 800 °C civarında olduğu belirtilmiştir (Tuğ, 2016; Manatura ve ark., 2017).

Jangsawang ve ark. (2015) geliştirdikleri modelde kor bölgesi sıcaklıklarında optimum ER değerlerini belirtmişlerdir. Bu çalışmada kor bölgesi sıcaklığı literatürlerde belirtilen değerler arasında olmuştur. Çalışılan ER kademeleri de bu sıcaklıklara bağlı olarak optimum düzeylerde dir.

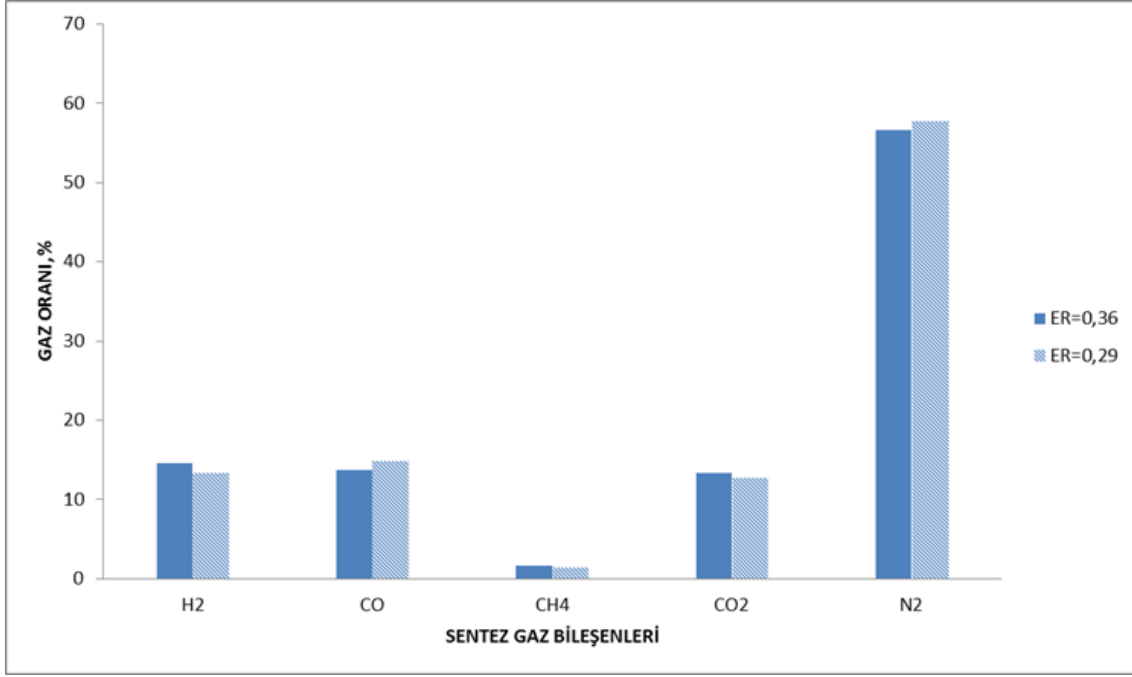
5.3. Elde edilen gazın kimyasal bileşimi ve ısıl değeri

Denemeler yöntemde de belirtildiği gibi iki kademed e yapılmıştır. Birinci kademed e ER=0,36, ikinci kademed e ER=0,29 olarak hesaplanmıştır. Denemeler sonucu elde edilen sentaz gazların bileşenleri ve ısıl değerleri izelge 5.1.'de verilmiştir. Birinci kademed e (ER=0,36) alt ısıl değer 3925,5 kJ/Nm³, ikinci kademed e (ER=0,29) 3831,7 kJ/Nm³ olarak bulunmuştur. Hidrojen ve metan oranı birinci kademed e elde edilen sentez gazda daha yüksek olmuştur (izelge 5.1.).

Çizelge 5. 1. Sentez gazların bileşimi ve ısıl değerleri

ER	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	N ₂	LHV (kJ/Nm ³)	HHV (kJ/Nm ³)
0,29	13,33	14,87	1,45	12,68	57,67	3831,7	4154,7
0,36	14,56	13,78	1,72	13,33	56,61	3925,5	4283,2

im peletinden elde edilen sentez gazın ısıl değeri eltik saplarından elde edilen sentez gazın ısıl değerine yakın olmuştur (Tuğ, 2016). Ancak, odun talaşı (Simone ve ark., 2012), çay dalları (Dutta ve Baruah, 2014), okalıptüs odun parçaları (Galindo ve ark, 2014) ile yapılan gazlaştırma işleminde elde edilen ısıl değerler çim peletinden elde edilen sentez gazın ısıl değerinden daha yüksektir.



Şekil 5. 2. İki farklı kademede yapılan gazlaştırma işleminde gaz bileşenleri

5.4. Gazlaştırma işleminin performans değerleri

Gazlaştırma işleminde birinci kademede (ER=0,36) biyokütle besleme oranı daha düşük olmuştur (FCR=6.5 kg/h), ancak birim biyokütle başına üretilen gaz miktarı daha yüksek olmuştur ($GM_b=1.96 \text{ Nm}^3/\text{kg}$). İkinci kademede gaz çıkış oranı daha yüksek olmuştur (Çizelge 5.2).

Çizelge 5. 2. Gazlaştırma işleminde elde edilen performans değerleri

ER	FCR (kg/h)	GFR (Nm^3/h)	AFR (Nm^3/h)	SGR ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	SGPR ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	GM_b ($\text{Nm}^3\text{kg}^{-1}$)
0,29	8,6	13,54	10,01	378,85	596,40	1,57
0,36	6,5	12,71	9,23	286,34	560,11	1,96

Birim biyokütle kütlesi başına üretilen gaz miktarı çeltik sapıyla yapılan çalışmada 1,78 ile 1,93 Nm^3/kg olarak bulunmuştur (Tuğ, 2016). ER değerinin 0,29 olduğu koşullarda elde edilen değer bu değerlerin altındadır. Ayrıca, Simone ve ark. (2012) odun talaşıyla yaptıkları çalışmada biyokütlenin özgül gazlaşma oranını 2,2 ile 2,4 Nm^3/kg arasında bulmuşlardır. Önceki çalışmalara bakıldığında çim peletinin özgül gazlaşma oranının diğer biyokütle kaynaklarına göre biraz daha düşük olduğunu söylemek mümkündür.

5.5. Gazlaştırma işleminin ısısal verimi

İki kademedeki yapılan gazlaştırma işleminde elde edilen ısısal veri değerleri Çizelge 5.3.'de verilmiştir. Birinci kademedeki gazlaştırma verimi % 50 değeri ile ikinci kademedeki gazlaştırma veriminden daha yüksek olmuştur.

Çizelge 5. 3. Gazlaştırma işleminin ısısal verimi

ER	Pb (kW)	Pg (kW)	Verim %
0,29	36,66	14,41	39
0,36	27,71	13,86	50

Daha önce yapılan çalışmalarda Manatura ve ark. (2017) çeltik kavuzunda ısısal verimi %44-68 arasında, Simone ve ark. (2012) odun talaşında %67-70 arasında, Dutta ve Baruah (2014) çay dallarında %65, Tuğ (2016) çeltik saplarında %59-64 arasında bulmuşlardır. Bu çalışmada özellikle ER=0,29 kademesinde ısısal verim önceki çalışmalara göre oldukça düşük olmuştur. ER=0,36 kademesindeki ısısal verim çeltik sapı ve kavuzuyla yapılan gazlaştırma işlemine yakın değerde olmuştur.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çim peletinin farklı iki hava fazlalık katsayısı kademesinde aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırma ünitesinde gazlaştırılması işleminde gazlaştırma performansının saptandığı bu araştırmada, elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

Birinci kademede ER değeri 0,36; ikinci kademede ise 0,29 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatürlerde belirtilen 0,20 ile 0,50 arasındadır (Tuğ, 2016; Manatura ve ark., 2017).

Birinci kademede FCR (Biyokütle tüketim hızı) ve GFR (gaz üretim hızı) sırasıyla 6,5 kg/h ve 12,71 Nm³/h olmuştur. İkinci kademede bu değerler 8,6 kg/h ve 13,54 Nm³/h olarak saptanmıştır.

Birim biyokütle başına gaz üretimi sırasıyla 1,96 Nm³/kg ve 1,57 Nm³/kg olarak bulunmuştur. Bu değerlerin ER değeriyle orantılı arttığını söylemek mümkündür.

Gazlaştırmada ısısal verim değerleri ER=0,36 kademesinde %50, ER=0,29 kademesinde %39 olarak bulunmuştur.

Gazlaştırma esnasında kor bölgesinin sıcaklığı 30-40 dakika da 900 °C ve üzerinde değişim göstermiştir ve daha sonraki zaman aralığında 700-800 °C arasında değişmiştir. Bu değerler diğer biyokütle gazlaştırma değerleriyle uyumludur.

Elde edilen sonuçlara göre çim peletinin gazlaştırılmasında ER=0,36 olan kademenin daha uygun olduğu, bu değer altına düştüğünde biyokütlenin birim biyokütle başına üretilen gaz miktarı ve ısısal veriminin düştüğünü söylemek mümkündür.

7. KAYNAKLAR

- Acaroğlu M, Haciseferoğulları H (2014). 2014. Biyokütle enerjisinde briketleme ve peletlemede yeni test prosedürleri. Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, 7-30, Samsun.
- Acaroğlu M, Ültanır MÖ (2000). Türkiye'de biyokütle (biomas) enerji potansiyeli ve değerlendirilmesi için öneriler. Türkiye 8. Enerji Kongresi Cilt:2, 161-171, Ankara.
- Aktaş T, Dalmış İS, Tuğ S, Dalmış F, Kayışoğlu B (2016). Çeltik sapının gazlaştırılması amacıyla laboratuvar tipi bir gazlaştırıcının geliştirilmesi ve denenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakóltesi Dergisi, 14(02):119-128.
- Basu P (2006). Combustion and gasification in fluidized beds. Taylor & Francis Group LLC, Canada.
- Basu P (2010) Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory Taylor & Francis Group LLC, Canada.
- Chopra S, Jain A (2007). A review of fixed bed gasification systems for biomass. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, Invited Overview No. 5. Vol. IX:55-60.
- 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.
- Dutta PP, Baruah DC (2014). Gasification of Tea (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) Shrubs for Black Tea Manufacturing Process Heat Generation in Assam, İndia. Biomass and Bioenergy, 66: 27-38.
- Froggatt A (2000). The liberalisation of Europe's electricity markets – Is the Environment Paying the Price for Cheap Power?. Greenpeace: 13.
- Galindo AL, Lora ES, Andrade RV, Giraldo SY, Jaen RL, Cobas VM (2014). Biomass gasification in a downdraft gasifier with a two-stage air supply: Effect of Operating conditions on gas quality. Biomass and Bioenergy 61: 236-244.
- García-Maraver A, Popov V, Zamorano M (2011). A review of European standards for pellet quality. Renewable Energy, 36: 3537-3540.
- Highman C, Burgt M (2006). Gasification. E-Book Elsevier Second Edition.
- Jain AK (2006). Design parameters for a rice husk throatless gasifier. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Manuscript EE 05 012, Vol VIII: 45-49.
- Jangsawang W, Laohalidanond K, Kerdsuwan S (2015). Optimum equivalence ratio of biomass gasification process based on thermodynamic equilibrium model, Energy Procedia 79: 520-527.
- Kadioğlu S, Tellioğlu Z (1996). Enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye etkileri. TMMOB Türkiye Enerji Sempozyumu, 55-67.
- Karaosmanoğlu F (2006). Biyoyakıt teknolojisi ve İTÜ araştırmaları. ENKÜS 2006-İTÜ Enerji Çalıştayı ve Sergisi: 110-125, İstanbul.

- Kaya E (2009). Kömür ve gazlaştırma ürünlerinin kimyasal denge kuramıyla incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karayılmazlar, S., Saraçoğlu, N., Çabuk, Y., Kurt, R., 2011. Biyokütlenin Türkiye’de Enerji Üretiminde Değerlendirilmesi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi. Cilt: 13, Sayı 19, S: 63-75, Bartın.
- Khater EM, N. N. El-Ibiary, I. A. Khattab and M. A. Hamad (1992). Gasification of rice hulls. Biomass and Bioenergy, Vol. 3, No. 5: 329-333.
- 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.
- Marcio L (2004). Solid fuels combustion and gasification modeling, simulation and Equipment Operation. State University at Campinas São Paulo, Brazil.
- Öztürk H.H ve Başçetinçelik A. 2006, "Energy Exploitation Of Agricultural Biomass Potential In Turkey", ENERGY EXPLORATION, no.4-5, pp.313-330.
- Rajvanshi AK (1986). Alternative energy in agriculture. CRC Press, Vol II, Chapter 4: 83-102.
- 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.
- Rezaiyan J, Cheremisinoff NP (2005). Gasification technologies modelling: a primer for engineers and scientists. Taylor & Francis Group 600 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton.
- Rozainee M, Ngo SP, Salema AA, Tan KG, Ariffin M, Zainura ZN (2008). Effect of fluidizing velocity on the combustion of rice husk in bench scale fluidized bed combustor for the production of amorphous rice husk ash. Bioresource Energy, 99: 703-713.
- Simone M, Barontini F, Nicoletta C, Tognotti L (2012). Gasification of pelletized biomass in a pilot scale downdraft gasifier, Bioresource Technology, 116: 403-412
- Singh R. N., Jena U., Patel J. B., Sharma A. M., 2006. Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock. Renewable Energy. 31: 481-487.
- Tekin HS (2006). Dolmabahçe gazhanesi'nin kuruluşu ve işletmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü, Türk Tarihi Anabilim Dalı, Yakınçağ Tarihi Bilim Dalı.
- Tinaut FV, Melgar A, Perez JF, Horrillo A (2008). Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study. Fuel Processing Technology, 89(11):1076–1089.
- Tuğ S (2016). Çeltik Saplarının Gazlaştırılması İçin Mekanik Karıştırıcılı Aşağı Akışlı Prototip Bir Gazlaştırıcı Tasarımı. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Yinesor G, (2008). Design and Operation of a Bench Scale Fixed Bed Gasification System. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 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.

- Warren TJB, Poulter R, Parfitt RI (1995). Converting biomass to electricity on a farm-sized scale using downdraft gasification and a spark-ignition Engine. *Bioresource Technology*, 52: 95-98.
- Zhu X, Venderbosch R (2003). A Correlation Between Stoichiometrical Ratio of Fuel and Its Higher Heating Value. *Fuel*, 84, 1007-1010.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini tamamladıktan sonra 2010 yılında üniversite eğitimi için Tekirdağ'a yerleşti. 2005 yılında Namık Kemal Üniversitesi Biyosistem Mühendisliği'nden bölüm 2.si olarak mezun olduktan sonra 2015 yılında Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini başladı.