

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SABİT YATAK BİOKÜTLE GAZLAŞTIRMA

AHMET ERDEM
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SABİT YATAK BİOKÜTLE GAZLAŞTIRMA

AHMET ERDEM
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. MURAT DOĞRU

GEBZE
2015

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

FIXED BED GASIFICATION OF BIOMASS

AHMET ERDEM
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. MURAT DOGRU

GEBZE
2015



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14/12/2015 tarih ve 2015/74 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/12/2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet ERDEM'in tez çalışması ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :Doç.Dr. Murat DOĞRU

ÜYE

:Prof.Dr. Bülent KESKİNLER

ÜYE

:Prof.Dr. Aziz TANRISEVEN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışma ile pilot ölçek sabit yatak yukarı yönlü (updraft) gazlaştırıcı kullanılarak biokütle gazlaştırılması yapılmış ve incelenmiştir. Bu tezde yakıt biokütle zeytin pirinası ve çekirdeği olarak seçilmiştir. Üretilen sentez gazı termal yağ kazanında direk olarak yakılarak organik yağın ısınması sağlanmış ve ORC türbin vasıtasıyla enerji üretiminde kullanılmıştır.

Tezde konusu geçen 300kWe/1625kWt pilot projenin sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırma sisteminin üretilmesi, dizaynı ve montajlaması hakkında kısmi bilgiler verilmiştir. Aynı şekilde kazan hakkında ve ORC türbini hakkında bilgiler içermektedir. Hazırlanmış biokütle yakıtının gazlaştırıcıdaki performansı deneysel çalışmalarda incelenmiş ve literatür ile karşılaştırılmıştır. Üretilen sentez gazın (syngaz) kazan da yakılarak termal yağın ısısını artırması ve ORC türbini ile enerji üretimi incelenmiştir. Biokütlenin yukarı yönlü gazlaştırıcıdaki etkisi, ORC türbinindeki enerji üretimi ve tüm bu ekipmanların bir arada çalışması bu tezin ana konusu olmuştur.

Aynı zamanda gaz analiz cihazı (MRU-Air Swg) bu şartlar altında üretilen sentez gazın kompozisyonunu belirlemede kullanılmıştır. Sentez gazı numunesi gaz kazanda yakılmadan hemen önceki şartlar altında alınmış ve analizi yapılmıştır. Sentez gazı kompozisyonunda H₂, N₂, CH₄, O₂, CO, CO₂ gazları ölçülmüştür.

Pilot sistem işletimi gerçekleştirilmiş, kütle ve enerji dengesi de bu araştırmada belirtilmiştir. Literatürde biokütleler için belirtilen kütle enerji dengesine yakın bir sonuç elde edilmiştir. Gazlaştırıcı deneyler sırasında mevcut biokütle ile başarılı bir şekilde işletilmiş kanallama veya köprüleme oluşmamıştır. Bunun nedeninin gazlaştırıcı tasarımının etkisi ve aynı zamanda biokütle yakıtın boyut ve hazırlanmasının etkisi olduğu tespit edilmiştir. En uygun kalitede üretilen sentez gazın sistemin %80 kapasite üzerinde dengeli çalıştığı esnada olduğu tespit edilmiştir.

İşletim sırasında yukarı yönlü gazlaştırıcının kuruma, piroliz, indirgenme ve oksidasyon bölgeleri gözlenmiştir ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gazlaştırıcı, Sabit yatak yukarı yönlü, ORC türbin, kızgın yağ kazanı, gaz analiz cihazı, biokütle, pirina, zeytin çekirdeği, kütle ve enerji dengesi.

SUMMARY

This work investigates the performance of a fixed-bed updraft gasifier using two kinds of biomass feed-stocks, which were olive pomace and olive pits, used in order to generate produced gas for direct use in boiler converted to power generation via ORC Turbine.

The pilot project included the fabrication, commissioning and design of a 300kWe/1625kWt fixed-bed updraft gasifier with a swirl burner flaring facility and ORC Turbine. Experiments were carried out on this unit to investigate the effect of dry biomass fuel capacity on gasifier performance. The influence of produced gas (syngas) in boiler for heating up the thermal oil and power generation via ORC Turbine was investigated. The effect of biomass in to the updraft gasifier, and power generation with ORC Turbine, and combination of these equipments were the main concern of this work.

In parallel, gas analyser (MRU-Air Swg) is also used which allows the data on the characteristics of gas composition to be measured under these conditions. The condition of the syngas was chosen before the combustion in boiler. Component analysis of the produced gas were carried out and H₂, N₂, CH₄, O₂, CO, CO₂ were found.

The pilot unit gasifier runs have been performed and mass and energy balances reported. It was found that good mass and energy balances closures were achieved. The gasifier was found to operate successfully with stated biomass fuel without much evidence of bridging, but this was linked to gasifier design, the other is fuel size and preparation as well. It was also found that the highest quality gas for stable operation was found to be at above 80% of the maximum capacity.

During the operation, updraft gasifier Drying-Pyrolysis-Rerduction-Oxidation zones were observed, and evaluated.

Key Words: Gasification, Fixed-bed updraft, ORC turbine, swirl burner, gas analyser, biomass, olive pomace, olive pits, mass and energy balances.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimin süresince bilgi birikimi ve deneyimleri itibarı ile bir yol gösterici olan değerli danışman hocam Sayın Doç.Dr. Murat Doğru'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Bu araştırmamda 3130469 numaralı TEYDEB projesi kapsamında çalışmalarımda yardımcı olduğu için Marmarabirlik Zeytin Tarım Koop. Birliğine ve TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederim. Her zaman desteklerini hissettiğim, değerli aile üyelerime ve hayat arkadaşım Hatice Erdem'e en içten duygularıyla teşekkür ederim. Rahman ve Rahim olan Allah'ın bizleri desteklemesi duası ile...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. GAZLAŞTIRMA	4
2.1. Tanım	4
2.2. Gazlaştırma Tarihi	5
2.3. Gazlaştırmanın Yakma ile Karşılaştırılması	7
2.4. Gazlaştırma Kimyası	8
2.4.1. Kuruma	9
2.4.2. Piroliz	10
2.4.3. İndirgenme	12
2.4.4. Oksidasyon	12
2.3.4.1. Gazlaştırma Termodinamiklerinin İncelenmesi	13
2.3.4.2. Gazlaştırma Reaksiyon Kinetikleri	15
2.5. Gazlaştırıcı Modelleri	18
2.5.1. Yoğun Faz Gazlaştırıcılar	19
2.5.2. Yalın Faz Gazlaştırıcılar	24
2.5.3. Diğer Model Gazlaştırıcılar	24
2.6 LİTERATÜR TARAMASI	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM	28
3.1. Deneysel Sistem	28
3.1.1. Biokütle Karakterizasyonu	29

3.1.2. Kütle ve Enerji Dengesi	32
3.2. Pilot lek Gazlaştırma Sistemi	34
3.2.1. Yakıt Besleme Sistemi	36
3.2.2. Yukarı Yönlü Gazlaştırıcı	38
3.2.3. Termal Yağ Kazanı	39
3.2.4. ORC Trbini	41
3.2.5. Scada Sistemi	43
4. BULGULAR ve TARTIşMA	45
4.1. Reaktör Sıcaklık Dağılımı	45
4.2. Sentez Gazı (Syngaz) Kompozisyonu	46
5. SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR	49
ZGEMIř	55

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
η	: Gazlaştırma Enerji Dönüşüm Verimliliği, %
cal	: Kalori
CH ₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
HF	: Hidrojen florür
HCl	: Hidrojen klorür
H ₂	: Hidrojen
H ₂ O	: Su
Kg	: Kilogram
kW	: Kilowatt
m	: Numunenin Kütlesi (g)
mg	: Miligram
MJ	: Megajoule
MW	: Megawatt
mL	: Mililitre
NO _x	: Azotoksitler
NO ₂	: Nitrojendioksit
Nm ³	: Norm metreküp
O ₂	: Oksijen
ppm	: Milyonda bir (Parts Per Million)
S	: Sülfür
sa	: Saat
SO _x	: Kükürtoksitler
SO ₂	: Sülfürdioksit
t	: Süre (dakika veya saat)
UM	: Uçucu Madde Miktarı, %

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Gazlaştırma gelişim tarihi çizelgesi.	5
2.2: Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaksiyon bölgeleri.	9
2.3: Yoğun faz gazlaştırma reaktörleri esasları.	20
3.1: Zeytin pirina numunesi.	29
3.2: Zeytin çekirdek numunesi.	29
3.3: Laboratuvar ortamında pirina yakıtı ile mini-gazlaştırıcı deneyi.	31
3.4: Kütle ve enerji dengesinin pirina biokütlesi için şekille gösterilmesi.	32
3.5: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi şeması.	34
3.6: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi yan görünümü.	35
3.7: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi görünümü.	36
3.8: Besleme sistemi ana bunker.	37
3.9: Besleme sistemi günlük bunker.	37
3.10: Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörü bölgeleri.	38
3.11: Sentez gazının termal yağ kazanında yanması.	40
3.12: Termal yağ kazanında bulunan serpantinler.	40
3.13: ORC türbin bileşenleri termodinamik döngüsü.	41
3.14: 300 kWe kapasiteli ORC Türbini, Bursa Marmarabirlik tesisleri.	42
3.15: ORC Türbini çalışması scada sistemi.	43
3.16: Gazlaştırma sistemi scada kontrol ekranı.	44
4.1: Yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörü bölgeleri zaman sıcaklık grafiği.	45
4.2: Sentez gazın (syngaz) yüzde oranda kompozisyonu.	46
4.3: Sentez gazı üretimi ve ölçümü.	47

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Yoğun faz gazlaştırıcı tiplerinin enerji üretimi için avantajları ve dezavantajları.	23
3.1: Pirina, Zeytin çekirdek ve odun parçacıkları analizleri sonucu.	30

1. GİRİŞ

Dünyada hızla artan nüfus ve bununla birlikte gelişen sanayileşme ile giderek artan enerji gereksinimi, insanlığı çevreyi kirletmeden ve sürdürülebilir olarak sağlayabilecek kaynaklar arayışlarına yöneltmeye başlamıştır. Bu kaynakların başında sayılabilecek biokütle enerjisi, ön plana çıkan enerji kaynakları arasında yerini almaktadır. Petrol ve doğalgaz gibi önemli enerji kaynaklarının yakın gelecekte tükenme ihtimali de alternatif enerji kaynağı olarak biokütlelerle ilgili araştırmaları son zamanlarda bir hayli artırmıştır. Biokütledeki potansiyelin fark edilmesi ile birlikte sera gazı (greenhouse gas) salınımını azaltmak için de yeni bir fırsat oluştu ve artık ülkemizde de yaygın bir şekilde biokütlelerde ki bu potansiyeli, faydalı bir yöntemle nasıl enerjiye dönüştürüleceği araştırılmaya başlandı. Biokütlelerden enerji direk yakarak üretilebileceği gibi, ileri teknolojiler kullanılarak da daha verimli ve kullanılabilir gaz, fuel oil ve kimya endüstrisinde değerlendirilebilecek yüksek değerli ürünlere dönüştürülebilir veya bu ürünlerden temiz enerji üretilebilir. Bitki yetiştirilmesi, güneş var olduğu süre süreceği için, biokütle tükenmez bir enerji kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Biokütle; yenilenebilir bir kaynak olması, her yerde bulunabilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu zamanda kırsal bölgelerde bu biokütleler ısıtma amacı ile kullanılmaktadır. Geleneksel ısıtıcı sistemleriyle biokütleler verimsiz bir şekilde yakılmaktadır.

Biokütle içeriğinde her tür orman ürünleri, yakıt kaynaklı enerji üretimi için yetiştirilen bitkiler, hasat atıkları, tarımsal atıkları, belediye katı atıkları (Municipal Solid Waste, MSW), arıtma çamurları, hayvansal atıklar, ayrıştırılmış evsel ve endüstriyel atıklar (Refuse Derived Fuel, RDF) mevcuttur. Fosil yakıtlar ile karşılaştırıldığında biokütlelerin yenilenebilir olması ve enerji üretirken doğaya CO₂ gazı emisyonu oluşturduğundan düşük kirletici kaynağı olma avantajına sahiptir. Biokütlelerin işlem yapılmadan direk olarak enerji üretiminde değerlendirilmesi genellikle zordur, enerji değerinin düşük olması, yüksek nem muhtevası, düşük kütle yoğunluğu, boyut ve şekil düzensizliği biokütlenin doğrudan kullanımın etkileyen faktörler arasında yer alır. Biokütlenin toplanması ve kullanılacak alana taşınması için de ekstra bir enerjiye ihtiyaç vardır. Biokütlenin katı, sıvı ve/veya gaz yakıtına

dönüştürülmesi yakıtın birim enerji miktarını artırdığı gibi taşınmasını kolaylaştırarak harcanan enerjiyi azaltır. Alternatif olarak, biokütle kaynağında yani yakıtın üretildiği yerden başka bir yere taşınmadan kurulacak sistemler ile ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılarak lokal bölgede kullanılabilir veya üretilen elektrik başka bölgelere aktarılabilir.

Biokütlelerin değerlendirilmesi için yapılan çalışmaların içinde yer alan ileri teknoloji olan gazlaştırma teknolojisi ile biokütleden verimli ve sürekli enerji elde etme son dönemlerde bu alandaki araştırmalara konu olmuş ve ön plana çıkmıştır. Gazlaştırma teknolojilerindeki yüksek verim, gaz yakıtların kolaylıkla ve temiz olarak değerlendirilmesi, uzun vadede de diğer teknolojilere nazaran ekonomik oluşu, çevresel etki yönünden uygunluğu sebeplerinden tercih edilecek metot olarak karşımıza çıkmıştır. Şu zamana kadar biokütleden gazlaştırma çalışması genellikle ağaç odun ürünleri üzerinde yapılmıştır, fakat son zamanlarda farklı biokütle kaynakları ile ilgili çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır. Bu tezde farklı biokütle kaynaklarının sabit yatak updraft reaktörlerde gazlaştırılabilirliği üzerine dikkat çekmek amaçlanmıştır.

Gazlaştırma, organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda kısmi oksidasyon ile termokimyasal dönüşümü sonucu yanıcı sentez gazı oluşturması olayıdır. Bu sentez gazı ısınmada, elektrik üretiminde veya yakıt olarak, metanol ve kimyasal madde üretiminde kullanılabilir. Gazlaştırma bilinen ve eski bir teknolojidir, 17.yy sırasında üst düzeyde kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında bir milyona yakın gazlaştırıcı güç üretiminde kullanılmıştır [Lindmark 1944]. Bunların bir çoğunluğu sabit yatak gazlaştırıcılar olup downdraft tipi gazlaştırıcılardır.

Birçok farklı reaktör tipi biokütle gazlaştırması için uygundur. Bunlardan sabit yatak gazlaştırıcılar reaktör boyunca gazın akış yönüne göre aşağı yönlü (downdraft) ve yukarı yönlü (updraft) olarak isim almışlardır. Akışkan yatak, hareketli yatak ve daha birçok özel reaktör tipi de mevcuttur. Biokütle yakıtın özelliği ve üretilecek gazın hangi amaçla kullanılacağına göre reaktör seçimi ve boyutlandırılması yapılır. Ancak, bu kadar çok gazlaştırıcı reaktör tipi olmasına ve gazlaştırıcıların uzun süredir bilinmesine rağmen hangi tip yakıtın hangi tip gazlaştırıcıda daha verimli sonuç vereceği şu zamana kadar net bir şekilde nitelendirilememiştir. Gazlaştırıcı tasarımını belirlerken birçok konu ele alınması gerekmektedir. Yakıtın özellikleri, gazlaştırmaya

besleme durumu, üretilecek sentez gazının hangi amaçlarla ve nerede kullanılacağı gibi bütün sistem göz önüne alınarak tasarım yapılması başarılı sonuçları beraberinde getirecektir. Bu tezde ele aldığımız sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı bütün bir sistem içerisinde yer alarak düşünülmüştür.

Artan çeşitli biokütle atıkları, kirleticilerin çevresel etkileri hakkındaki global endişe (Kyoto protokolündeki gibi) ve çevresel yöndeki iyileştirmelere olan teşvikler bu tür atıklardan verimli bir şekilde kurtulmak ve enerji üretmek için yeni bir algı oluşturmuştur. Tüm bunlarla birlikte bu bioküteller kaynakları ve çevresel boyutları el alınarak değerlendirildiğinde, en uygun ve ekonomik olarak ısı ve elektrik enerjisine dönüştürecek sistemlerin ufak ölçekli gazlaştırma sistemleri (500-2000 kWe) ile mümkün olabileceği net bir şekilde görülmektedir. Bu araştırmayı yaparken öncelikli hedeflerimiz:

- Sabit yatak gazlaştırıcılar hakkında literatür taraması yapmak.
- Gazlaştırma ve yakma arasındaki farka dikkat çekmek.
- Gazlaştırıcı reaktöründe kullanılacak farklı bir biokütlenin enerjiye dönüşüm sürecini incelemek.
- Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı üretimi ve işletimi hakkında gözlem ve araştırma yapmak.
- Üretilecek sentez gazının içeriği ve verimli şekillerde nasıl değerlendirilebileceği hakkında araştırma yapmak ve mevcut sistemi değerlendirmek.

2. GAZLAŖTIRMA

2.1. Tanım

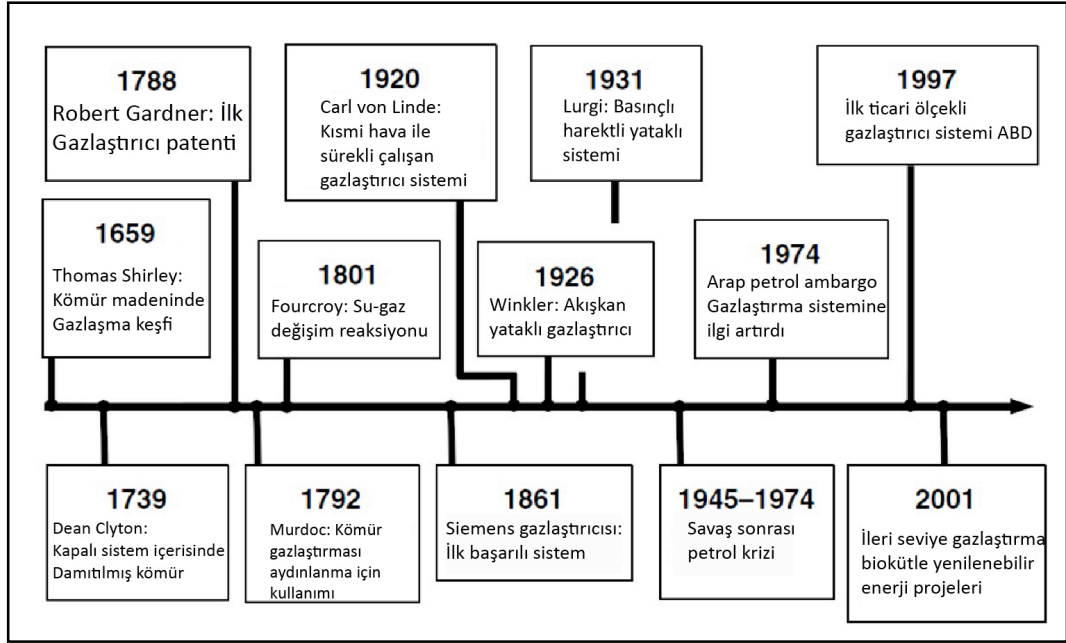
GazlaŖtırma, karbonlu organik maddelerin yüksek sıcaklıklarda kısmi oksijen kullanılarak termokimyasal dönüşüme uğratılması sonucu yakıt gazı oluşması olayıdır. GazlaŖtırma sırasında kısmi oksijen için hava kullanıldığı zaman üretilen sentez gazın da CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂, yüksek hidrokarbon gazları ile birlikte partiküller ve katran bulunur. Üretilen sentez gazın alt ısıl değeri yaklaşık olarak 5 MJ/Nm³ seviyelerindedir. [Beenackers, 1984], [Dogru and Howarth, 1998]. Üretilen sentez gazı kazan, fırın veya ocaklarda ısı elde edilmek için kontrollü bir şekilde yakılabilir. Üretilen sentez gaz genelde temizdir ve bu sentez gaz kazan da yakıldığında, direk biokütle yakmaya kıyasla bacadan çıkan egzoz gazının partikül madde ve kirletici emisyonları daha azdır. Üretilen gaz içten yanmalı motorlarda, gaz türbinlerinde veya organik renkin çevrim (ORC) türbinlerinde elektrik ve ısı üretiminde kullanılır. Bu uygulamalarda yakılacak gazın temiz olması yani partikül maddelerden ve katrandan arındırılmış olması önemlidir. Özellikle içten yanmalı gaz motorlarında partikül miktarının 10-50 mg/Nm³, gaz türbinlerinde ise 2-20 mg/Nm³ seviyelerinin altında olması gerekmektedir, aksi durumda kullanılacak olan gaz ekipmana zarar verir [Brown, 1987]. Aynı şekilde katran 0.5 g/Nm³ seviyesinin aşağısında olmalı katranın bu seviyelerden yüksek olması ekipmanda katranın birikmesi sistemin problem oluŖturmasına neden olur [Reed, 1988].

Literatür taramasında ele alınan konular sıralanacak olursa:

- GazlaŖtırma tanımı
- GazlaŖtırma tarihi
- GazlaŖtırma yakma ile karşılaştırılması
- GazlaŖtırma kimyası
- GazlaŖtırıcı reaktörleri modelleri
- Literatür özeti

2.2. Gazlaştırma Tarihi

Gazlaştırma ticari olarak bir asırdan daha fazla süredir uygulanmakta olan bir teknolojidir. Gazlaştırmanın geçmişi ilk olarak 1777 yılında Littlewood ve Overend incelenmiş olup, Kaupp tarafından da 1844 yılında geniş ölçüde irdelenmiştir. Gazlaştırma teknolojisi geçmişi 1833 yılında Foley ve Barnard taraflarından ele alınarak incelenmiştir.



Şekil 2.1: Gazlaştırma gelişim tarihi çizelgesi.

Bilinen ilk gazlaştırma Murdoch tarafından 1792 yılında kömür pirolizi yaptığı sırada üretilmiş ve evinin aydınlatmasında kullanmıştır. Murdoch'un keşfinden sonra kömür gazlaştırma Avrupa'nın bazı bölgelerinde aydınlatma amacıyla kullanılmıştır. Elektriğin keşfinden sonra önemini kaybetse de, sentez gazı her şeye rağmen ısıtmada ve yemek pişirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Odun gazlaştırma işlemi 1798 de Lebon tarafından deneysel düzeyde başlatılmıştır [Skov ve Papworth, 1975]. 1801 de Lampadius odunların kömürleştirilmesi sırasında açığa çıkan atık gazın kullanılabilirliğini kanıtlamıştır [Woods, 1938]. Bununla birlikte ticari olarak ilk gazlaştırıcı Bischof öncülüğünde 1840 yılında Fransa'da Audincourt demir işletmelerinde üretildi. Bundan sonra birçok araştırmacı ve mühendis gazlaştırma teknolojisini geliştirmeye çalıştı. 1861 de Siemens'in ürettiği gazlaştırıcı, düşük kaliteli yakıtların gazlaştırılması ve üretilen sentez gazın fırınlarda yakılmasını başarılı bir

şekilde gerçekleştirerek, bu alanda ilk başarılı sistem olmuştur. 19. yüzyılın sonuna kadar modern gazlaştırıcı teknolojisi başlarken görünen üç önemli olay vardı. Dawson Gaz üreticisinin 1878’de yaptığı gazlaştırıcı sistemi günümüz modern gazlaştırıcı sistemlerinin başlangıç sistemi olarak kabul edilebilir. Mond’un tanıtımı gazlaştırma yolu ile yan ürün olarak amonyak gibi değerli ürünlerin elde edilebilirliği kanıtlanmıştır. Bu işlemlerle elde edilen artık gazın ısıl değeri düşük olsa bile endüstriyel ısıtma amacıyla kullanılabilir. Üçüncü ve son olarak 1895 yılında Bernier’in tanıttığı vakum altında çalışan gazlaştırma sistemi bilinen küçük boyuttaki kompakt gazlaştırma ünitelerinin ilki olmuştur. 1930-1940 arasındaki dönem, küçük taşınabilir (skid-mounted) sentez gazı üretici sistemlerin gelişiminde ki on yıl olarak kabul edilebilir. Daha önceki modellere kıyasla yeni modeller aşağı yönlü (downdraft) ve karşıt yönlü (crossdraft) gazlaştırıcı gibi yeni kavramlar literatüre girmiş ve geliştirilmiştir. 1939 itibariyle sadece Avrupa’da 10,000 den fazla gazlaştırıcı bulunuyordu [Cash, 1940], [Goldman and Clarke, 1939], [Telford, 1940].

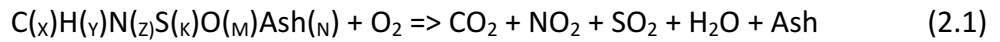
2. Dünya Savaşı’nın başlamasıyla gazlaştırma kullanımı daha yaygınlaştı. Avrupa kıtasında 100,000 den çok gazlaştırma sistemi mevcuttu. Savaş sırasında, gazlaştırma için yakıt olarak kömür ve odun ürünleri tercih edildi [Hurley and Fitton, 1959] [Lindmark, 1944]. Ancak savaşın bitmesinin ardından sıvı fosil yakıtların temininin kolaylaşması sonucunda benzin ve dizel ile çalışan motor sistemlerine olan rağbeti de arttırdı. Bu olaylar gazlaştırma alanında ki araştırmaları kayda değer oranda düşürmüştür. Bu alandaki makale ve yayınların sayısı 1950-1970 arasında önceki yıllara nazaran keskin şekilde düşmüş, yılda on yayının altına inmiştir [Foley and Barnard, 1983], [Kaupp and Goss, 1981]. Bu dönemde kayda değer tek araştırma çalışması İsveç’te olup üretilen gazın dizel motorlarda kullanımı için sistemin geliştirilmesi ve gaz temizleme sistemi alanında olmuştur [Anon, 1979].

1970 yılında küresel enerji krizi gazlaştırma konusunun tekrar dünya gündemine girmesine neden olmuştur. Bugünkü çalışmaların birçoğu eski fikirler ve 2. Dünya Savaşı sırasında geliştirilen teknolojilerin yeniden canlandırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yenilenen ilgi sonucunda küçük ölçekteki gazlaştırıcıların gelişmesi bununla birlikte odun ve kömür dışındaki yakıtların gazlaştırıcılarda kullanımı da araştırılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır [Tookey, 1984]. Çevre ile ilgili mevzuatlarda da yenilenebilir enerji kaynağı olarak geçen biokütlenin gazlaştırma

teknolojisi ile kullanımı bu tezin araştırma konusudur. Ülkemizde çokça bulunan evsel çöp, pirina, arıtma çamuru gibi biokütle kaynaklarının pilot ölçekli sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcılarda kullanımı ve verimliliği de ele alınacak konular arasındadır. Yine değerlendirilmeyen biokütlelerinde potansiyellerinin değerlendirilmesi ve pilot ölçekte kullanılabilirliği araştırılacaktır.

2.3. Gazlaştırmanın Yakma ile Karşılaştırılması

Binlerce yıldır biokütlelerden enerji üretimi yakma sonucu ısı elde edilmesiyle olmuştur. Biokütlenin yanması oksijenin yanıcı elementlerle kimyasal bileşimi olarak tanımlanabilir. Yanma işlemi için gerekli olan oksijen, havadan temin edilir. İdeal stokiyometrik hesaplama olan bir yanma için oksijen ihtiyacı aşağıdaki Denklem 2.1 ile hesaplanır.



Yanma sırasında yüksek miktarda oksijen kullanıldığından baca gazında uçucu kül, metal oksitler, partikül madde ve SO_x , NO_x , CO, HCl, HCN, HF, C_xH_y gibi kontrolü güç olan emisyonlar yüksek oranda oluşur. Yanma ve gazlaştırma prosesi arasındaki fark, gazlaştırma kısmi oksijen şartlarında yürütülmekte ve sistemde üretilen ısı ve sentez gaz yakıt sistemin besleme materyalleri olarak kullanılmaktadır. Gazlaştırma yakmaya kıyasla temiz ve verimli bir işlemdir. Gazlaştırma sonucu oluşan gaz kompozisyon yakıtının yanması, katı yakıtın yanmasından daha temizdir. Gaz yakıtlar yanma ortamında hacimce kolay yayılabilirliklerinden hava ile iyice karışabilirler, böylece yanma esnasında çok az hava fazlasına gerek duyarlar. Kül ve cüruf gibi artık bırakmazlar. Gazlaştırmada oluşan sentez gazı çoğu zaman tam yanma ile yanar. Böylelikle elde edilen bu gaz kompozisyonu türbin ve gaz motorlarında daha verimli bir şekilde enerjiye dönüştürülebilmektedir. Ayrıca, kısmi oksijen kullanıldığından yakmada sorun olan emisyonlar (NO_x , SO_x , Dioksin ve Furan) gazlaştırmada emisyon limitlerinin çok altındadır. Bu noktada yakma gazlaştırmaya göre daha verimsiz, yüksek maliyetli baca gazı temizleme ve kontrolü zordur.

Biokütle gazlaştırmanın genel olarak avantajları şunlardır:

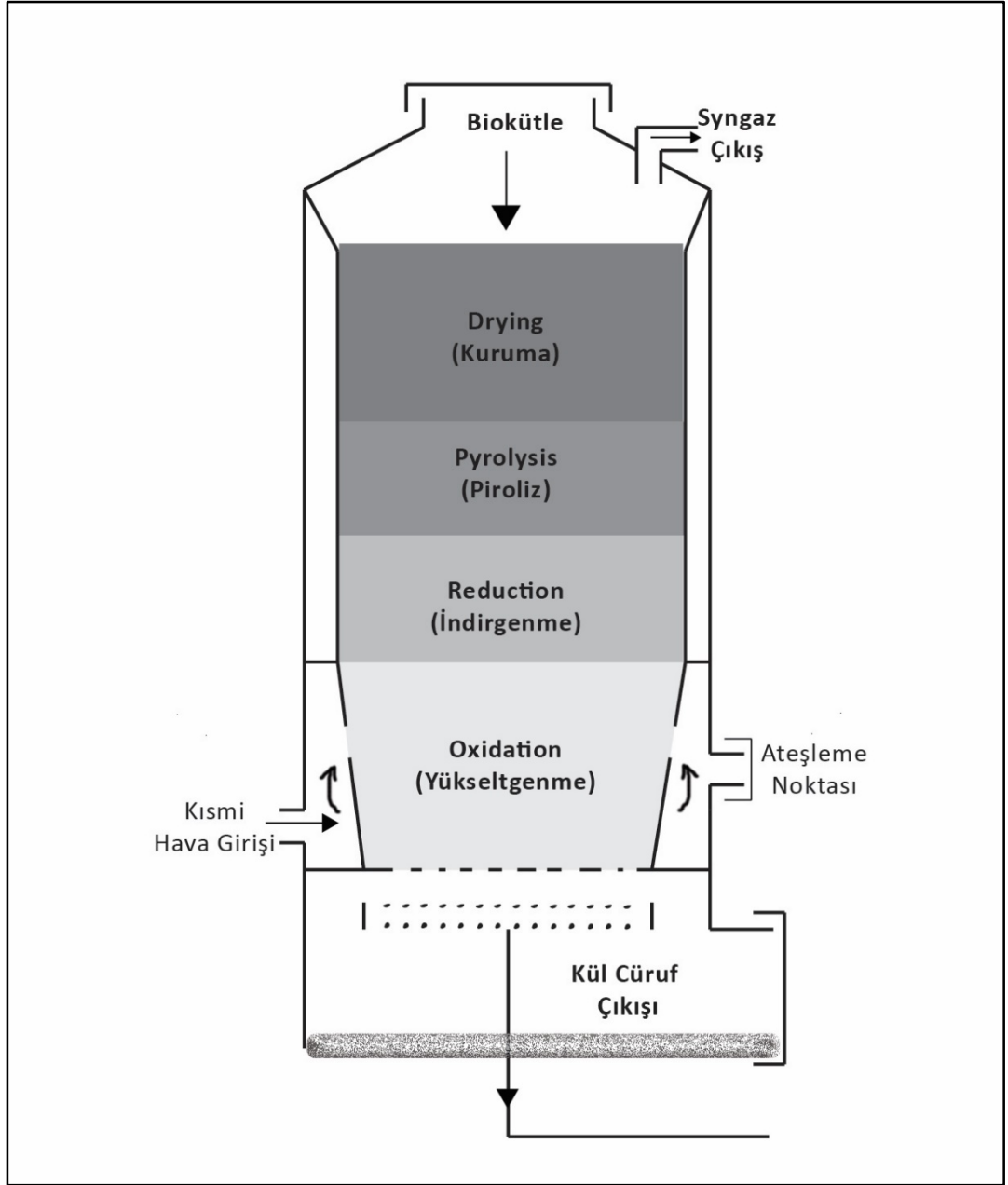
- Gaz katı veya sıvı yakıtlara göre daha yüksek verimlilikte yanar.
- Emisyonlar aşılmadan yüksek oranda ısı elde edilir.
- Açığa çıkan enerji daha kolay kontrol edilebilir.
- Gazlaştırılmış yakıt güç kaynakları için verimli bir enerji kaynağıdır.

Görüldüğü üzere biokütlede gazlaştırma alternatif enerji kaynağı olarak özellikle ısı ve elektrik üretimi açısından çok daha uygun bir prodestir.

2.4. Gazlaştırma Kimyası

Gazlaştırma bir dizi karmaşık, eşzamanlı, birbirini izleyen kimyasal reaksiyonların oluştuğu, termal bir prodestir. Uygulama alanlarındaki ve laboratuvar şartlarındaki veriler arasında farklılıklar oluşması sebebiyle tamamen netleştirilememiştir ve bu araştırmalar dünyanın birçok yerinde hâlâ incelenmektedir [Bangham, 1940], [Cogliali, 1986], [Kaupp, 1983].

Gazlaştırma işlemi enerjik olarak kendini idame ettiren (auto-thermal) bir süreç olduğundan ekstra termal bir girdi (ısı kaynağı) gerekli değildir. Gazlaştırmanın temel aşamaları, kuruma (drying), piroliz (pyrolysis), indirgenme (reduction) ve yükseltgenme (oxidation)'dir. Bununla birlikte işlem süreleri ve boyutları gazlaştırıcı reaktörü özelliğine göre değişiklik gösterir. Bu tezde sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı ele alınacaktır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi gazlaştırıcı bölgeleri bu şekillerdedir.



Şekil 2.2: Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaksiyon bölgeleri.

2.4.1. Kuruma

Sabit yatak gazlaştırıcılarda beslemenin yapıldığı ilk bölgedir. Bu bölgede daha önceden nemi ayarlanmış biokütle yakıtı, diğer reaksiyon bölgelerine geçmeden ısı olan bölgelerden gelen ısı ile biokütlenin bir miktar daha mevcut olan nemi giderilir. Beslenen biokütlenin kuruma hızı yakıtın yüzey alanına, etrafındaki sıcaklık ve kendi sıcaklık farkına, dış ortamın akış hızı ve bağıl nemine, yakıtın içsel nem yayılım oranına bağlıdır [Buekens, 1985]. Odunsu biokütlelerde su kimyasal tutunma (kemisorpsiyon)

yolu ile hücre duvarında tutulur ve gözeneklerin içerisinde serbest nem ve bağıl su oluşur. Su odunsu biokütlelerde gözeneklerin içerisinde ki hücre duvarları boyunca yayılma ve buhar basıncının olduğu bir bölgede buharlaşma yolu ile kılcallık hareketi ile taşınır. Lif önemli miktarda serbest su ile doyma noktasına ulaşıncaya kadar suyun kılcallık hareketi ile taşınması devam eder. Lifin doyma noktasından dolayı birçok odunsu %20-30 nem (kuru bazda) ihtiva eder. Kılcallık hareketi ile su muhtevası hesapları laboratuvar ölçekli çalışmalarda ufak bir denklik teşkil eder, fakat büyük ölçekli çalışmalarda hesaplanması gereken bir faktör olarak öne çıkar [Hills, 1985]. Kuruma bölgesinde tamamen bir kuruma (100% kuruma) olayından bahsetmek yanlıştır, piroliz bölgesi boyunca da sıcaklığın artmasıyla birlikte biokütle yakıtı üzerinde bir miktar daha kuruma gerçekleşir.

Gazın ısı enerjisi nemli yakıtta kuru yakıtla kıyasla daha düşüktür, bunun sebebi yüksek nemli yakıt suyun buharlaşması için ısı tüketir ve buhar reaksiyon sonucu CO₂ ve H₂'e dönüşür. Su içeriği aynı zamanda reaktör ısısını düşürür, bunun sonucu olarak ısıya bağlı olan CO miktarı azalır, piroliz oranı yavaşlar ve katran oluşumunu artırır [Miles, 1985]. Sonuç olarak yapılan deneylerde de görüldüğü üzere sabit yataklı gazlaştırıcılarda biokütle yakıtından ısı ve enerji üretilmesi isteniyorsa yakıtın hava kuruluğunda %25 nemde olması gerekmektedir.

2.4.2. Piroliz

Piroliz organik maddenin oksijensiz ortamda geri çevrilemez bir biçimde termal olarak bozulmasıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda pirolizin oluşması için ihtiyaç olan bu ısı enerjisi piroliz ürünlerinin kısmi yükseltgenmesi (Kısım 2.4.4) sonucunda yayılan ısı enerjisi ile mümkün olur. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda uçucuların ortaya çıkmaya başlaması 250 °C civarındadır [Dogru and Olgun, 2000], [Kaupp, 1983] ve reaktör koşulu olduğu andan itibaren yakıtın orijinal kütlelerinin 80-95% lik kısmı su, katran, sıvı yakıtına ve CO, CO₂, H₂, hidrokarbonların oluşturduğu gaz fazlarına dönüşerek karmaşık bir sıvı gaz yakıtı fraksiyonları oluşturur, kütlelerin diğer 5-20% lik kısmı ise yüksek reaktif olan bioçar olarak çıkar [Reed, 1983]. Sabit yatak gazlaştırıcıları piroliz reaksiyonunda ki ısı oranı yaklaşık 10 W/cm² [≈2,39 cal/(s.cm²)] [Deglise, 1987] ve 500 °C ısıda meydana geldiği için hızlı piroliz olarak tanımlanır [Diebold, 1989].

Ürünlerin piroliz sırasındaki dağılımı öncelikle yakıtın bileşimine bağlıdır [Bilbao, 1994], [Di Blasi, 1999]. Piroliz bölgesinde ki ısı yayılımı, yakıt maddesinin ısı katsayısına, bekleme süresine, parça boyutuna ve sıcaklığına göre değişir. Piroliz bölümündeki sıcaklığın bioçar üretimi üzerinde ki etkisini Graham yaptığı çalışmada aldığı sonuçlarla tespit etmiştir, Graham piroliz sıcaklığının 500 °C de tüm yakıt kütesinin %18'i oranında bioçar, 800 °C de ise %3 oranında bioçar üretimi olduğunu görmüştür [Graham, 1988], sonrasında yaptığı çalışmada 650 °C de %7 de ve 900 °C de bioçarın %1 oranlarında olduğunu tespit etmiştir [Graham, 1993]. Hellgren ise yaptığı çalışmalarda bioçar üretiminin 800 °C de %20 iken, 1000 °C de minimum seviyeyi görerek %10 a düşüğünü, sonrasında 1400 °C de ise tekrar üretimin %20 olduğunu görmüştür [Hellgren, 1991]. Bunu bioçar ve gaz oluşturmak için partiküllerin içerisindeki katranın reaksiyon vermesiyle açıklamıştır. Graham çalışmasında piroliz sıcaklığının 650 °C den 900 °C ye çıktığında sıvı oranının %62 den %20 lere düşüğünü göstermiştir. Bu çalışma termal kırılmanın ısıyla birlikte arttığını gösterir fakat katran kırılma derecesi bilinemez çünkü bu sıvı içerisinde su mevcuttur.

Ayrıca büyük parçacık boyutu bioçar üretimini arttıran faktörler arasındadır [Chan, 1985], [Malik, 1991]. Partikül boyutu arttıkça uçucuların parçacık üzerinde kalma süresi artar bu da karbon çökeltisi oluşmasına olanak sağlar [Shamsuddin, 1992]. Gazlaştırmanın piroliz kademesinde de bunun gerçekleştiğini iddia edildi [Evans 1992]. Önemli bir problem olarak, kömür pirolizinde parçacık boyutunun çıkan ürünlere etkisini saptamaya çalışırken parçacık boyutunun artmasıyla ısıtmanın zorlaştığı tespit edildi [Malik, 1991] ve gazlaştırmada düşük ısı oranlarında çalışmanın da bioçar üretimine etki ettiği görülmüştür [Dogru and Olgun, 1998].

Sonuç olarak yukarıda bahsedilen piroliz ile ilgili çalışmalar sabit yatak gazlaştırmada ki piroliz bölümüyle ilgili sadece bulgu olabilir, çünkü deneysel piroliz sistemleri sabit yataklı gazlaştırma sistemleri ile özdeş olamaz. Sabit yataklı gazlaştırma sistemlerinde piroliz bölgesinin sıcaklık oranlarını ve kısmını net bir şekilde tespit etmek hayli zordur, ölçüm teknikleri yetersizliği ve piroliz bölgesinin gazlaştırma içerisindeki konumu net bir ölçüme engel teşkil etmektedir. Sonuç olarak gazlaştırma reaktörü içerisindeki farklı bölgelerdeki sıcaklık ölçümleri bize piroliz bölgesinin tespit edilmesi ile ilgili bilgiyi göstermektedir.

2.4.3. İndirgenme

İndirgenme (reduction) bölgesinde (gazlaştırma bölgesi olarak da geçer) bioçar yükseltgenme bölgesinden gelen sıcak gaz ile reaksiyon vererek ürün gazlarını oluşturur. Gazların büyük kısımda H₂ ve CO oluşturmak için azalır. Gazların bu bölgeye giriş sıcaklığı 1000-1200 °C'dir. Gazlaştırma reaksiyonlarının termodinamik ve kinetik bilgisi reaksiyon bölgesinin davranışını anlamada önemlidir ve bu ileriki kısımda açıklanacaktır. Gazlaştırma reaksiyonlarının piroliz sıvı ürünleri karmaşıktır ve literatürde de geniş bir şekilde ele alınmamıştır. Bunların termal ayırımla veya gazlaştırıcı etki maddeleri ve başka piroliz ürünleri tarafından gaz haline geçebileceğini iddia edilmiştir [Reyes 1989]. Küçük bioçar parçalarının üretilen gaz akımı ile sisteme karışması bioçarın kütesinin üretimini azaltacaktır. Bioçar kütesinin 2-5% 'inin gazlaştırma sisteminde üretilen gaz ile birlikte taşındığı, bu nedenle bioçarın gaz temizleme hattına taşınmaması için gazlaştırma reaktör tasarımının ve üretilen gazın akış rejiminin önemine vurgu yapılmıştır [Reed 1983].

2.4.4. Oksidasyon

Yakıttaki uçucu ürünler yüksek ekzotermik reaksiyonlar ile kısmi olarak yükseltgenirler (Denklem 2.2 ve 2.3). Bu reaksiyonlar sıcaklığın hızla 1200-1600 °C yükselmesine neden olurlar [Groeneveld, 1980]. Yüksek sıcaklık nedeni çok küçük bir bölgede, çok yoğun ısı ve ekzotermik reaksiyonların yer almasındandır. Bununla birlikte, yakıtın yüzeyi ve diğer yakıt parçalarıyla arasındaki boşluk çok sıcak olup (>1200 °C) yakıtın iç sıcaklığı henüz soğuktur [Reed, 1999]. Burada üretilen ısı, yakıtın piroliz ve gazlaştırma reaksiyonlarının oluşmasında ve kuruma bölgesinde etken rol alır. Uçucuların yükseltgenme reaksiyonları çok hızlı bir şekilde gerçekleşir ve oksijen, indirgenme bölgesindeki bioçarın yüzeyine yayılmadan tükenir, böylelikle bioçar katısı üzerinde yanma gerçekleşmeden sadece yanıcı gazların çıkması sağlanır [Bangham, 1940], [Littlewood, 1977].



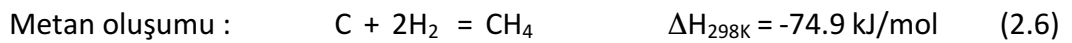
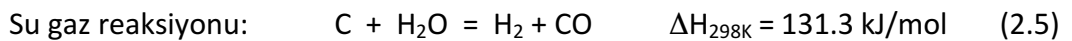
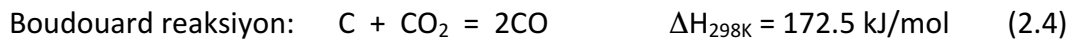
Sonuç olarak yükseltgenmede yoğuşabilir organiklerin molekül ağırlığı düşük ürünler formunda olması gazlaştırmacı tarafından üretilen katran miktarının azaltılması açısından önemlidir. Sabit yataklı gazlaştırmacılar da piroliz ve yükseltgenme prosesleri piroliz yanması adıyla bir arada da tanımlanabilir. Oluşan ürünler CO₂, CO, H₂, H₂O, hidrokarbon gazları ve katran buradan indirgenme (gazlaştırma) bölümüne geçer.

2.4.4.1. Gazlaştırma Termodinamiklerinin İncelenmesi

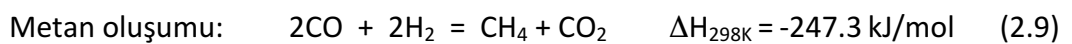
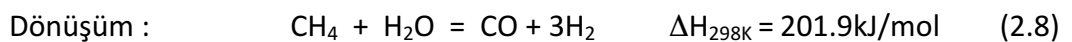
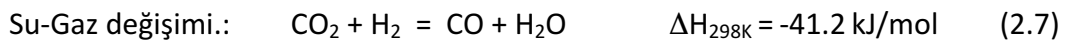
Genel olarak kabul gören gazlaştırmadaki temel kimyasal reaksiyonlar 1950 yılında Gumz tarafından belirlenmiştir. Aşağıda gösterilen bu reaksiyonlar sonrasında Littlewood ve Reed tarafından kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır.

Boudouard (Denklem 2.4) ve su-gaz (Denklem 2.5) reaksiyonu endotermik reaksiyonlardır, kısmi oksidasyon bölgesinden gelen sıcak gaz ve bioçar'daki enerji ile bu reaksiyonlar oluşmaktadır. Bioçar dönüşümü olurken sıcaklık gittikçe düşer, dolayısıyla reaksiyonların kinetik hızları azalır, 700°C altına düşünce reaksiyonlar etkisini yitirir. Böylelikle bioçar miktar azalmasındaki hızlanmanın, gazlaştırma bölgesine giren enerjiye bağlı olduğu gözlemlenmiştir [Chern, 1989].

- Heterojen Gaz-Katı (Heterogeneous Gas-Solid) Reaksiyonları:



- Homojen Gaz-Gaz (Homogeneous Gas-Gas) Reaksiyonları:



Su-gaz değişim (water-gas shift) Denklem 2.7 reaksiyonu, Denklem 2.4 ve 2.5'in bir araya gelmesiyle elde edilir. Buradaki en önemli reaksiyonlar Denklem 2.4, 2.5 ve 2.7'deki yer alan reaksiyonlardır, çünkü bunlar gazlaştırmanın temelini oluşturan reaksiyonlardır. Yukarıda ki geriye kalan reaksiyonlar kinetik sınırlardan dolayı daha az yer alırlar. Denklem 2.3, 2.4 ve 2.6 de gösterilen reaksiyonlar gazlaştırma prosesinin tanımı için yeterlidirler [Chern, 1989]. Bu reaksiyonlar için denge sabitesi ifade edilecek olunursa:

$$K_{P1} = \frac{P_{CO}}{P_{CO2}} \quad (2.11)$$

$$K_{P2} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H2}}{P_{H2O}} \quad (2.12)$$

$$K_{P3} = \frac{P_{CO2} \cdot P_{H2}}{P_{H2O} \cdot P_{CO}} \quad (2.13)$$

Standart reaksiyondaki denge sabiti, Gibbs serbest enerjisi yasası kullanılarak hesaplanabilir:

$$\Delta \Delta_r G^\circ = RT \ln K_p \quad (2.14)$$

Burada kullanılan T sıcaklık ve R ise sabittir [Fogler, 1992]. Yukardaki denklemler temel kimyasal yanma termodinamiklerini tanımlar ve kullanılan denklemler, sentez gaz kompozisyonunun tahmin edilmesinde sıklıkla kullanılırlar [Rampling, 1993].

2.4.4.2. Gazlaştırma Reaksiyon Kinetikleri

Termodinamikte sentez gazı kompozisyonu belirli bir sıcaklıkta olduğu zaman tahmin edilebilir. Bununla birlikte, gazlaştırma reaksiyonları kinetikleri hangi derecede termodinamik dengeye ulaştığına karar vermek için önemlidir. Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 deki bioçar ile birlikte H₂O ve CO₂ ile oluşan reaksiyonların hızına etki eden unsurlar; kütle geçişi hızını veya reaksiyon kinetik hızını doğrudan etkileyen sıcaklık, gaz akış hızı ve parçacık boyutuna bağlıdır. Kütle geçiş direnci yüksek sıcaklıklarda belirgin bir hal alırken, düşük sıcaklıklarda kimyasal reaktiviteler sınırlı hale gelir. Kütle geçişi için sınır başlangıç sıcaklık derecesi de 900 °C olarak belirtilmiştir [Reed, 1988]. Çünkü bazı reaksiyonlar endotermiktir ve bu reaksiyonların oluşmasıyla ısı kaybı oluşur, ayrıca reaktörün farklı bölgelerine göre ısı dağılımı da değişiklik gösterir ve ısının yayılımından dolayı ısı kaybı da söz konusudur. Bu sebepten yukarı yönlü gazlaştırıcılarda alt oksidasyon bölgesinde kimyasal reaksiyon kinetiği hızı sıcaklıkla birlikte belirleyici hale gelirken, gazlaşma (reduction) bölgesine doğru çıktıkça altındaki sıcak bölgede kütle geçişi sınırı belirgin hale gelir, piroliz bölgesinde sıcaklığın düşmesiyle de bu endotermik reaksiyonlar etkisini kaybeder ve durur. Reed'in belirttiği 900 °C limiti yakıtın özelliğine, porozitesine göre değişiklik gösterebileceği hesaba katılmalıdır.

Denklem 2.15 bioçarın CO₂ ile gazlaştırılmasının tipik bir kinetik ifadesini gösterir [DeGroot, 1984], [Fogler, 1992]:

$$\text{Rate} = \frac{d[X]}{dt} = kW_o \left(p_{CO_2}^n \right) \quad (2.15)$$

Bioçar dönüşümünde gösterilen Denklem 2.16 da, X, şu şekilde hesaplanır:

$$X = 1 - \frac{\text{bioçar ağırlığı}}{\text{başlangıç bioçar ağırlığı}} \quad (2.16)$$

W_o bioçarın ilk ağırlığı, pCO₂ CO₂'in kısmi basıncı, n CO₂ ile ilgili sıra ve k reaksiyon hızı sabiti (Denklem 2.17) genellikle Arrhenius denklemi ile bulunur;

$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (2.17)$$

Aktivasyon enerjisi (E_a) biokütlenin çeşidine göre farklılık gösterir. Groeneveld hesap metoduna kimyasal reaksiyon hızını ve bioçar dönüşümünün bir işlevi olarak reaktant gazların etkin difüzyonlarını kattı [Groeneveld, 1980]. Reaksiyon hızının ifadesi:

$$\frac{d[X]}{dt} = k C_A^n C_S \quad (2.18)$$

Denklem 2.18'deki C_A parçacık boşluğundaki etkin difüzyon kullanılarak hesaplanan reaktant gazın konsantrasyonu. C_S katı reaktantın konsantrasyonu. Etkin difüzyon, porozite ve moleküler difüzyonun bir işlevi olarak hesaplandı.

Yapılan diğer bir çalışmada başlangıçtaki parçacık boyutunun (D_o) etkisi incelendi ve gazlaştırma sırasındaki dönüşüm ile biokütle parçacık boyutunun değişimi arasındaki ilişki bilimsel olarak tespit edildi [Standish and Tanjung, 1988]. Başlangıçtaki gazlaşma hızı ilk parçacık boyutu $D_o^{0.81}$ için farklı olurken, tamamen dönüşümün olduğu zaman (τ), $D_o^{1.01}$ parçacık boyutunda farklılık göstermektedir. Parçacık yoğunluğunun ise %75 dönüşümle bir azalma olana kadar önemli derecede etkisi görülmemiştir. Parçacık boyutunun gösterilmesi Denklem 2.19 de gösterilmiştir.

$$D/D_o = (1-X)^{1/3} \quad (2.19)$$

Bu sonuçlar gaz film difüzyonu ve kimyasal reaksiyon hızlarının kontrol edildiği (Denklem 2.20) Küçülen Çekirdek Modeli (Shrinking Core Model, SCM) ile tutarlıdır.

$$\tau = \rho_B \frac{D}{k_S C_A} \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'de ρ_B kütle yoğunluğu (bulk density), ve k_S yüzey reaksiyon hızı katsayısıdır. Sonuçlar parçacığın dış yüzeyindeki gazlaşmanın %75 dönüşüm olana

kadar sürdüğünü gözeneklerdeki reaksiyonunda ayrıca bir rol oynadığı olduğunda destekler [Standish, 1998]. Bu çalışmanın tersine dönüşüm olayının parçacığın bütün hacminin tamamında olduğu daha önceki bir çalışmada iddia edilmişti [Groeneveld, 1980]. Bunun bu şekilde olması beklenebilir, fakat iç kütledeki transfer sınırlıdır. Gazlaştırma (indirgenme) bölgesi gibi sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde gazlaşma reaksiyonları parçacığın genellikle dış yüzeyinde olur ve bu şekilde parçacık boyutu küçülerek devam eder, oysa düşük sıcaklık derecelerinde reaksiyon kinetik hızı daralır ve bioçar parçacığı tüm hacmiyle birlikte dönüşüme girer.

Piroliz hızı, biokütle parçacığı içindeki ısı transfer hızı ile kontrol edilir. [Buekens, 1985]. Pirolizin tamamen gerçekleşmesi için gereken sürenin matematiksel formülü mümkündür. Isının nüfuz süresini, Fourier sayısının kullanıldığı Denklem 2.21'i kullanılarak hesaplanmıştır [Groeneveld, 1980]:

$$\text{Zaman,sn.} = \frac{F_o D^2}{\alpha} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21'de α ısı yayılımı, D parçacık çapı ve F_o Fourier sayısı. Groeneveld tüm parçacık boyutları için Fourier sayısını 0.1 olarak almış ve dış sıcaklığın etkisini, pirolizin meydana geldiği sıcaklığı da hesabına katmamıştır.

Biokütle bioçarının gazlaşma reaksiyon hızı, gazlaştırma reaktörü tasarımında önemli bir rol oynar. İdeal olarak, reaktör hacmi (veya yüksekliği) belirlenmesi için tam bir dönüşümün elde edilebilecek şekilde tasarım edilmesi gerekli olmaktadır. Yapılan bir çalışma sonucunda çam odunları bioçarları için 900 °C gazlaşmasının 8 dakikada, 700 °C de ise 518 dakikaya çıktığı tespit edilmiştir [Smith, 1987]. Reaksiyon ısısının düşmesi sonucu endotermik reaksiyonların daralması söz konusudur ve böylelikle bioçarın gazlaşma hızı düşer. Gazlaşma hızı iç ve dış kütle transfer direnci yanı sıra kimyasal kinetik ile de sınırlı olabilir. Görüldüğü üzere gazlaşma hızını bir dizi faktörler etkilemektedir, dolayısıyla reaktör yüksekliği, hacmi yani tasarımı belirlenirken bu tip faktörleri göz önüne alınıp değerlendirilmesi sonucunda reaktör performansı öngörülebilir.

2.5. Gazlaştırıcı Modelleri

Şu zamana kadar gazlaştırma için birçok reaktör tasarımı yapılmıştır. Bu karbonlu organik maddelerin pirolizi ve gazlaştırılması için yapılan reaktör çeşitleri sabit yatak, hareketli yatak, akışkan yatak, kabarcıklı akışkan yatak, döner (rotary) fırın ve eriyik yatak (molten salt) tipleridir. Bu reaktör çeşitlerinin her biri kendi içinde farklı tekniklerle geliştirilmektedir.

Sabit yatak gazlaştırıcı çeşitleri küçük ölçekli tesisler için daha uygundur. Aynı şekilde bir yerden başka bir yere taşınması gerektiğinde transferi daha kolay tesislerdir. Böylelikle biokütle kaynağının olduğu merkezlere transferi yapılabilir. Sabit yataklı gazlaştırıcılar yoğunluk faktörlerine göre sınıflanırlar, bunun tespiti reaktör içindeki mevcut biokütle hacminin, reaktörün normal çalışma koşulu altındaki toplam reaktör hacminin oranı kıyası ile bulunur [Earp, 1988]. Yoğunluk faktörü gazlaştırıcının yoğun veya yalın faz reaktör olup olmadığının tespiti için önemli bir özelliktir.

Yoğun faz reaktörler farklı reaksiyon bölgelerine sahip olma eğilimine sahiptirler. Bu reaktörlerde genelde kurutma, piroliz, indirgenme ve yükseltgenme bölümleri mevcuttur. Dağılımı eşit olmayan yakıtlar için ideal tipte reaktörler yoğun faz reaktörelere seçilebilir. Yoğun faz reaktörler daha çok tercih edilen özellikte olmuştur. Bu reaktör tipleri geliştirilemeye daha müsait tiptedirler. Yalın faz reaktörler ise reaksiyon dağılımı homojen özellikli olup farklı reaksiyon bölgesi bulunmayan tiplerdir. Spesifik yakıtlar için özel reaktörlerdir. Yoğun faz reaktörlere göre işletimleri genelde daha zordur. Maliyet açısından da çok yüksektir. Yoğunluk faktörü bu tip reaktörler için belirleyici özellikleridir. Yoğunluk için tipik değerler şunlardır:

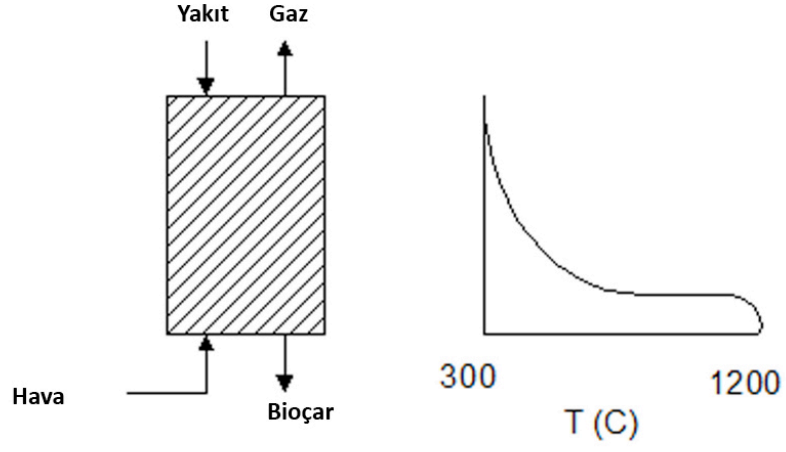
- 0.3 ve 0.6 aralığı yoğun faz reaktörler.
- 0.05 den 0.2 aralığında yalın faz sistemlerdir [Bridgwater and Double, 1988].

2.5.1. Yoğun Faz Gazlaştırıcılar

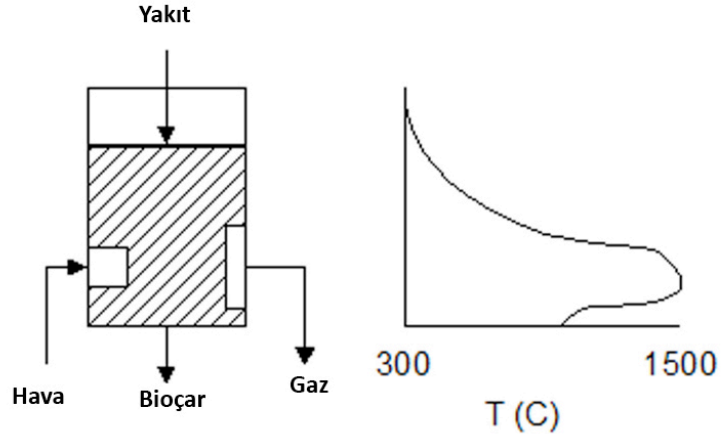
Literatürde tanımlanan dense faz gazlaştırıcılar üç tiptir. Yukarı yönlü (counter-current updraft), aşağı yönlü (co-current downdraft) ve çapraz yönlü (crossdraft) gazlaştırıcılar. Eskiye nazaran crossdraft gazlaştırıcılara kıyasla updraft ve downdraft gazlaştırıcı tipleri daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [Bridgwater, 1986]. Tüm bu gazlaştırıcı tiplerinde yakıt, yatak içerisinde ızgara tarafından desteklenir, akış yönü ise yerçekimi doğrultusunda reaktörün aşağısına doğru gerçekleşir. Bununla birlikte reaktörler arasındaki temel fark reaktör içerisindeki katı fazın gaz fazına geçerken yaptığı bağıl hareket ile belirlenir. Şekil 2.3'de temel özellikler gösterilmiştir.

Yukarı yönlü gazlaştırıcılar gazlaştırıcıların eski tiplerindedir, genel olarak kömür ve yüksek nem ihtiva eden odun gazlaştırmasında ısıyı kullanma uygulamalarında kullanılmıştır [Anon, 1993], [Reed, 1988]. Yukarı yönlü bu tip gazlaştırıcılarda üretilen gaz yukarı yönünde yakıt beslemesinin tersi boyunca hareket eder. Gaz yukarı yön boyunca ilerlediği için piroliz bölgesinden çıkan piroliz gazları yüksek sıcaklıktaki oksidasyon bölgesinden geçmeden kurutma bölgesinden direk olarak geçtikten sonra gazlaştırıcıdan çıkar, bu sebeple üretilen gazda yüksek oranda katran mevcut olur [Dogru, 1998], [Payne, 1986], [Shand and Bridgwater, 1984]. Bu tip reaktörleri, üretilen gaz direk olarak yakılarak enerji üretilecekse kullanımı daha uygundur, aksi durumda tasarım ve kolay ölçeklendirilmesi avantaj gibi gözükse bile üretilen gazın temizleme işlemine tabi tutulması bir hayli zor ve maliyetli olur. Yukarı yönlü gazlaştırıcılar genellikle herhangi bir ileri gaz temizleme ünitesinden geçmeden yakma kazanlarında direk olarak yakılırlar [Dogru and Howarth, 1998].

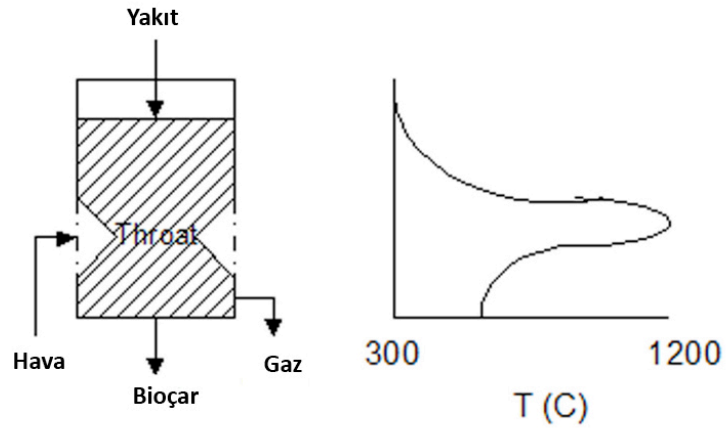
I - YUKARI YÖNLÜ



II - KARŞIT YÖNLÜ



III - AŞAĞI YÖNLÜ



Şekil 2.3: Yoğun faz gazlaştırma reaktörleri esasları.

Yukarı yönlü gazlaştırıcılar birleşik ısı ve güç (Combined heat and power, CHP) sistemlerinde yüksek potansiyele sahiptir. ABD, Güney Kore ve Türkiye’de büyük ölçekli şirketleri kendi ürettikleri biokütleleri (odun atıkları, evsel çöpler, arıtma çamurları, zeytinyağı üretimi prosesinden geriye kalan pirina atıkları, deri, kağıt atıkları gibi) yukarı yönlü gazlaştırıcı/birleşik ısı ve güç sistemlerini kullanarak enerji giderlerini azaltabileceklerini ve bu gibi sistemlerin verimliliğini fark ettiler. Son dönemde Avrupa’da biokütle ve atıkların taşınması ve bertarafında ki sıkılaştırılmış emisyon kontrolleri sonucu firmaların ilgisi orta ölçekli (500-2000 kWe) updraft gazlaştırma sistemlerine yönelmiş ve bu da sistemlerin incelenmesine yol açmıştır.

Karşıt yönlü gazlaştırıcılarda gaz akışı reaktör yatağı doğrultusuna dik bir açı ile olurken yakıt reaktöre yukarıdan beslenir ve yerçekimi doğrultusunda hareket eder. Bu tip reaktörler de gaz yüksek oranda katran ile çıkar, fakat yapılan deneylerde yük hızındaki değişime diğer reaktör tiplerine göre daha hızlı tepki verdiği gözlenmiştir. Böylelikle motorlar için kullanımı daha uygundur [Maniatis, 1986]. Karşıt yönlü gazlaştırıcılar, odun türevli yakıtlara göre daha az katran ihtiva ettiğinden dolayı kömür ve türevleri gibi yakıtlarla kullanıma daha uygundur [Sirois and Calhoun, 1985].

Yoğun faz gazlaştırıcıların üçüncü diğer tipide aşağı yönlü gazlaştırıcıdır, gaz reaktörde aşağı yönü boyunca hareket eder. Bu tip gaz akışında piroliz gazları yataktaki ızgara bölümünde bulunan sıcak bioçarların olduğu bölümden geçer, böylelikle yoğunlaşmayan gazların ve suyun içerisindeki karmaşık moleküllerin (katran) parçalanma olayı yüksek oranda gerçekleşir. Bu katran parçalama prosesini iyileştirmek için, genellikle aşağı yönlü gazlaştırıcılarda bir çeşit iyileştirme olarak oksidasyon bölgesinde daraltma yapılır, böylece fazla miktarda katranlı ürünler oksidasyon bölgesi boyunca yüksek türbülansta geçerek katranın daha iyi bir reaksiyon vermesi sağlanmış olur. Bu tip reaktörler boğaz (throat) tipli aşağı yönlü gazlaştırıcılar olarak adlandırılır. Bu tip gazlaştırıcılarda nispeten daha temiz gaz ürettiklerinden ve katran yükü daha az olduğundan içten yanmalı motorlarda kullanım açısından daha çok tercih edilebilir. Bununla birlikte, boğaz tipli aşağı yönlü gazlaştırıcıların kapasitesi tasarımından dolayı sınırlıdır. Son dönemdeki yapılan çalışmalar ile açık (open-core) tipli aşağı yönlü gazlaştırıcıların geliştirilmesi boğaz tipi gazlaştırıcıların ihtiyacını devre dışı bırakmıştır ve hava yatağın üstünden

çekilmektedir [Milligan, 1994]. Bu gelişmeyle kapasiteye etki eden tasarım problemi giderilmiştir, ancak reaktördeki katran emisyonunun artmasına sebep olabilir.

Bu üç gazlaştırıcı tipi için çalışma prensibi ve reaktör dereceleri bu bölümde tartışılmış ve Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yukarı yönlü ve aşağı yönlü gazlaştırıcılar 1000°C ve 1200°C ‘lere kadar çıkabilmekteyken crossdraft gazlaştırıcı daha yüksek sıcaklıklara 1500°C civarına kadar çıkabilmektedir.

Gelecekte yoğun faz gazlaştırıcı reaktörleri için dikkate alınacak çalışmalar genellikle yakıt boyutlandırması ve beslemesi konusunda olacaktır. Yoğun faz gazlaştırıcılar genellikle sınırlı boyutlarda ki yakıtlarla çalışabilmektedir, reaktöre beslenen yakıt boyutunun ayarlanamaması reaktörün tıkanmasına ve dolayısıyla aşırı basınç kayıplarına sebep olacaktır. Bu da sistemin gazı üretmesinde aksaklıklara sebebiyet verir. Tablo 2.1’de yoğun faz gazlaştırıcı tiplerinin avantajlarından ve dezavantajlarından kısmen bahsedilmiştir.

Tablo 2.1: Yoğun faz gazlaştırıcı tiplerinin enerji üretimi için avantajları ve dezavantajları.

Advantajlar	Dezavantajlar
Yukarı Yönlü Gazlaştırıcı	
Düşük sıcaklıkta gaz çıkışı*	Yüksek katran ihtivasi
Yüksek karbon dönüşümü	Düşük özgül kapasite
Düşük kül çıkışı	Düzensiz boyutlu yakıt
Kolay tesis inşası	Besleme esnasında köprüleme
	Izgara üzerinde klinker oluşumu
Karşıt Yönlü Gazlaştırıcı	
Düşük reaktör ağırlığı	Yüksek katran ihtivasi
Düşük Kül çıkışı	Düşük özgül kapasite
Yük hızı değişimine hızlı tepki	Izgara üzerinde klinker oluşumu
	Boyutu yükseltmek zor
Aşağı Yönlü Gazlaştırıcı	
Düşük katran ihtivasi	Yüksek sıcaklıkta gaz çıkışı*
Yüksek karbon dönüşümü	Düşük özgül kapasite
Kolay tesis inşası	Düzensiz boyutlu yakıt
Yük hızı değişimine hızlı tepki	Besleme esnasında köprüleme
	Izgara üzerinde klinker oluşumu
	Zayıf turndown kabiliyeti
	Modelleme zorluğu
	Yakıtta kısıtlı nem muhtevası
<p>* Düşük gaz sıcaklığı yüksek yoğunlukta gaz üretir, bu da içten yanmalı motorlar için ekstra soğutmaya ihtiyaç duyulmadığından kullanışlıdır. Yüksek sıcaklıkta çıkan sentez gazlar direk yakma kazanlarında ısı kullanımını için kullanışlı olabilir.</p>	

2.5.2. Yalın Faz Gazlaştırıcılar

Yalın faz gazlaştırıcı reaktörleri iki çeşittir, akışkan yatak (fluidized bed) ve sürüklenen (entrained) akışlı reaktörler, bu reaktör tiplerinin her ikisinde kömür gazlaştırmada fluidized gazlaştırıcı Winker tarafından 1926'da, sürüklenen tipli gazlaştırıcı Schmalfeld ve Winterschall tarafından 1940'da geliştirilmiştir [Groeneveld and Van Swaaij, 1980]. Yoğun faz gazlaştırıcılardan farklı olarak reaktör içerisinde herhangi bir reaksiyon bölge ayrımı yoktur, kuruma, piroliz, indirgenme ve oksidasyon etkin olarak her bir parçacık çevresinde aynı bölgede meydana gelir.

2.5.3. Diğer Model Gazlaştırıcılar

Bir önceki bölümlerde izah edilen yoğun faz ve yalın faz gazlaştırıcı reaktörlerine ek olarak, birçok farklı reaktör tipi geliştirilmiştir. Bu diğer reaktör tipleri yatay hareketli yatak (horizontal moving bed) [Bridgwater, 1986], döner fırın (rotary kiln) ve (çoklu ocak (multiple hearth) [Bridgwater, 1986], [Reed and Jantzen, 1980], siklonik (cyclonic) [Lede, 1980], ve eriyik yatak (molten salt) reaktörleri [Maund and Earp, 1988]. Ancak bu tip reaktörlerin tasarımları bulunduğu şartlara özel ihtiyaçlardan kaynaklanmıştır ve başarılarında genellikle bu özel şartlara bağlıdır. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi hiçbir reaktör tipi sorunsuz değildir, bu tezde küçük ölçekli modellere uygun işletimi kolay, düşük katran üretimi ve birleşik ısı ve güç enerji üretim sistemlerine uygunluğu sebebiyle sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı konusu üzerinde durulmuştur.

2.6. Literatür Özeti

Sabit yatak gazlaştırma için yapılan literatür taramasında özet olarak elde edilen bilgiler ele alınacak olursa; yapılan bir çalışmada küçük ölçekli biokütle gazlaştırıcılarda başarılı bir uygulamanın kilit noktasının katran giderimi olduğu ve gelişmelere ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir [Hasler and Nussbaumer, 1998]. Atık biokütlelerinden enerji elde etme konusunda alternatif bir yaklaşımın gazlaştırma olduğu ve maliyet açısından yakma tesislerinden daha ucuz olan bu sistemde elektrik elde etme verimliliği %50 daha fazla olacağı belirtilmiştir [Morris and Waldheim,

1998]. Yapılan farklı bir çalışmada atık biokütellerinin gazlaştırılmasının bilinen evsel atık bertaraf sistemlerine karşı avantajlı olduğu belirtilmiştir [Björklund, 2001]. Ticarileştirilmiş bir sistem olmadığı için proses performansında ve teknoloji seçiminde bir belirsizlik taşıdığı belirtilmiştir. Gazlaştırma sistemlerinin başarısı için en az bu çalışmalar kadar önemli bir konunun da yardımcı ekipmanların performansı (temizleme ve ön işlemler) olduğu belirtilmiştir [Cummer and Brown, 2002]. Biokütlenin uygun olarak kurutulmuş ve boyutlandırılmış olması gerektiği belirtilmiştir. Sentez gazında katran ve kurum oluşumunun biokütle gazlaştırılmasında karşılaşılan büyük problemlerden biri olduğu belirtilmiştir [Dogru, 2002]. Bazı ileri düzey metotlarla katran miktarının önemli düzeyde düşürülmesinin yanı sıra ekonomik bir metodun daha da önemlisi bu sistemin kullanılabilir gaz oluşumuna olumsuz etkisi bulunmaması gerektiği vurgulanmıştır.

Bir yüksek lisans tezinde gazlaştırmanın atık biokütellerinden enerji üretme sistemleri içinde daha verimli bir teknoloji olduğundan bahsedilmiştir [Klein, 2002]. Parçalanmış ve kurutulmuş biokütle atıkların gazlaştırılması konusunda en önemli problem olarak katran oluşması öngörülmüştür. Katranın gaz temizleme ve enerji üretme ünitelerinde zarara yol açtığı bu nedenle pahalı bir teknoloji kullanılarak gaz temizliği ve katran giderimi'nin gerekliliği belirtilmiştir. Başka bir çalışmada doğru ve verimli bir gazlaştırma işlemi için homojen bir karbonlu karışımın gerekliliğinden bahsedilmiştir [Belgiorno, 2004]. Aynı zamanda bu çalışmada entegre atık yönetim sistemlerinin bir parçası olarak gazlaştırmanın kullanılması önerilmiştir.

Küçük ölçekli bir atık biokütle gazlaştırma sistemi için fizibilite çalışması yapılmıştır [Choy, 2004]. Amaç atık biokütellerin içindeki tüm geri dönüşümsüz kısmı gazlaştırma sisteminden geçirerek enerji elde etmektir. Sistemin öncesinde atık biokütellere parçalama, karıştırma ve sıkıştırma işlemleri uygulanmıştır. Çoğunluğunu tahta ve plastiğin oluşturduğu pelletlenmiş atık biokütellerin yüksek sıcaklıkta gazlaştırılması tekniği yapılan başka bir çalışmada test edilmiştir [Ponzio, 2006]. Karışık biokütle atıklar/yakıtlar için termal dönüştürme prosesleri üzerine yapılan çalışmaların çok az olduğu belirtilmiştir.

Biokütle atıklarından, çöpten enerji elde edilmesinde sürdürülebilir kalkınma açısından alternatif bir teknoloji olarak laboratuvar ölçekli olarak bir çalışmada uygulanmış, gazlaştırma teknolojisi ele alınmıştır [Kikuchi, 2005]. Atıkların parçalama,

kurutma, ayrıştırma gibi ön işlemden geçirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Biokütle için en uygun metot olan gazlaştırma/piroliz sırasında yakıt olarak kullanılabilir gaz, kömür ve kimyasallar dışında uçucu kül, NO_x, SO₂ ve tar gibi yan ürünlerin de oluştuğunu ve bu yan ürünlerin aynı zamanda da verimliliği düşürdüğü belirtilmiştir [Han and Kim, 2007]. Yapılan bir diğer çalışmada sentez gazı temizleme teknolojilerinin temel kısıtlamalarından ve pratiğe geçirme aşamasındaki zorluklardan bahsedilmiştir [Sharma, 2007].

Peletlenmiş plastik atıkların gazlaştırılması yoluyla ekonomik ve çevresel açıdan etkin bir enerji üretimi için önemli olan noktanın gaz içindeki kirliliğin oluşmasının ve bu kirleticilerin giderilmesi olduğu yapılan bir çalışmada belirtilmiştir [Arena, 2008]. Evsel katı atık yönetimi bir çalışmada detaylıca incelenmiş ve bu biokütle atıkların parçalama, kurutma, peletleme ve sıkıştırma gibi işlemlerden geçirildikten sonra gazlaştırmada kullanılabilirliği belirtilmiştir [Sharholly, 2008]. Bir yayında İtalya'daki bir kent için biokütle atıklarından enerji elde edilmesi konusunda farklı stratejileri incelenmiştir [Giugliano, 2008]. En iyi sonuç verenin biyogaz, geri kazanım ve gazlaştırma yöntemlerini içeren entegre sistemin olduğu fakat bu stratejinin ticari anlamda güvenilirliğinin kanıtlanmadığı belirtilmiştir. Atık biokütlelerin Almanya ve birçok Avrupa Birliği ülkelerinde değişen yönetmeliklerden dolayı düzenli deponi sahasında (landfill) kullanılmasının kısıtlanmasından ve bu kısıtlamaların atık biokütlelerin bertarafı için termal metotlara yönelmeye sebebiyet verdiğinden bahsedilmiştir. Gazlaştırmanın bu metotlar arasında en verimli olduğundan, üretilen gazın enerji üretiminde kullanılması ve ortaya çıkan atık ısı enerjisinin de arıtma çamurunun kurutulmasında kullanılması gazlaştırmanın yeni düzenlemelere uygun, avantajlı ve geliştirilmesi gereken bir metot olduğundan bahsedilmiştir. Ayrıca içten yanmalı gaz motorları için katran ve kurumun (karbon partiküllerinin) gazlaştırmada en önemli problem olduğu belirtilmiştir. Arıtma çamuru ile ilgili bir çalışmada arıtma çamuru bir biokütle kaynağı gibi değerlendirilip enerjiye dönüştürülme metotları incelenmiş ve termal metotlar arasında bulunan gazlaştırmanın avantajlı olduğunun üzerine dikkat çekilmiş ve geliştirilebileceğinden bahsedilmiştir [Wim, 2008]. Atık biokütlelerin Avrupa Birliğindeki değişen yönetmeliğinden dolayı düzenli deponi sahasında kullanımının kısıtlandığını, bundan dolayı gelecekte alternatif teknolojilerin kullanılması gerekliliğinden bahsedilmiş bunlar arasında gazlaştırmanın bu

biokütlelerin bertarafında ve enerji üretiminde kullanılacağını ve geliştirileceğini öngörülmüştür [Fytli and Zabaniotou, 2008]. Atık biokütlelerin nüfusun artmasıyla daha da artacağını ve Avrupa Birliğinin bu konudaki kısıtlamaları sonrasında düzenli deponi sahasında kullanım alanının daraldığını bir çalışmada irdelenmiştir [Juan, 2011]. Bu atık biokütlelerden kurutularak gazlaştırılmasının enerji üretiminde verim sağlayacağını söyleyip, katran ve partikül madde (kurum) üzerinde çalışmıştır. Arıtma çamuru ile odun parçaları biokütlelerini karıştırarak yukarı yönlü gazlaştırıcıda test edilmiş, fakat arıtma çamuru oranını arttırdıklarında reaktörün oksidasyon bölgesinde fazla cüruf oluşumundan dolayı tıkanma yaşandığı belirtilmiştir [Seggiani, 2012]. Atık biokütlelerin bertarafında gazlaştırmanın enerji üretimiyle birlikte en avantajlı metot olduğu bir yayında detaylıca anlatılmış ve bunun üzerinde durulmuştur [Christian, 2012].

Tüm bu çalışmalar incelendiğinde görülmektedir ki, biokütlelerin sabit yatak yukarı yönlü reaktörleri ile gazlaştırılması yoluyla bertarafı konusunda genel bir kabul bulunmaktadır. Araştırmalar genellikle tek tip biokütle ve atık biokütleler için yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırma tezinin hedefi sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı ile seçilecek uygun bir biokütlenin sentez gazı üretmesini değerlendirmek ve üretilen bu sentez gazın sonrasında kazanda yakılarak elektrik ve ısı enerjisi üretiminin mümkün olup olmadığını irdelemektir. Bu kısımda tezin yazılması aşamasında Bursa Marmarabirlik tesislerinde TÜBİTAK-TEYDEB projesi kapsamında kurulan sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı ve pilot gazlaştırma sisteminin deneme aşamalarındaki çalışmaları ele alınacaktır. Yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktöründe kullanılacak biokütle yakıtı, zeytinyağı üretimi sırasında geriye kalan pirina (zeytin posası) ve zeytin çekirdekleri olacaktır. Bu biokütle yakıtların karakterizasyonu deneysel sistemin hazırlanması sırasında tespit edilecektir. Bu biokütle yakıtı ile syngaz üretimi, sonrasında üretilen sentez gazın kompozisyonu ve sistemde enerji üretiminde nasıl rol aldığı değerlendirilecektir. Ayrıca üretilen sentez gazının kızgın yağ kazanında yakılarak ORC Türbini için kızgın yağ üretmesinden bahsedilecektir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında gazlaştırıcı reaktörünün her bir biokütle için farklı şekilde tasarım ve işletim gerektiğinden reaktörün detaylı bir tasarımına girilmeyecek, seçilmiş olan bu biokütle yakıtı üzerinden hareket edilerek sistem izah edilecektir.

Tezin bir amacı da uygun tipte sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırma sisteminin, biokütle kaynaklarına yakın kırsal alanlarda bile kurulum, işletilmesi ve enerji üretilmesi olanağının gösterilmeye çalışılmasıdır.

3.1. Deneysel Sistem

Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırma prosesi sırasında biokütlenin kısmi hava ile optimum olarak 800-1200 °C civarlarına ulaşabiliyor olması gereklidir. Bu değerlere ulaşmak için biokütle yakıtının yaklaşık olarak en az 15 MJ/kg üst ısıl değerine sahip olması gereklidir. Kullanılacak yakıt biokütlenin bu ısıl değerlere ulaşıp ulaşamadığını belirlemek için biokütlenin karakterizasyonu önceden belirlenmeli ve yakıtın özelliğine göre sistemin tasarımı yapılmalıdır.

3.1.1. Biokütle Karakterizasyonu

Belirlenen biokütleler Bursa Marmarabirlik tesislerinde Zeytin prosesi sonrasında üretilen Pirina ve zeytin çekirdeğinin element (ultimate) ve kısa (proximate) analizleri sonucu Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Karşılaştırılması açısından parçalanmış odun parçacıkları (wood chips) analizleri de tabloda gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Zeytin pirina numunesi.



Şekil 3.2: Zeytin çekirdek numunesi.

Tablo 3.1: Pirina, Zeytin çekirdek ve odun parçacıkları analizleri sonucu.

	Pirina	Zeytin Çekirdek	Odun parçacıkları
Mutlak Yoğunluk, kg/m³	916	897	837
Yığın Yoğunluk, kg/m³	589	502	250
C (%)	35	49,62	42.70
H (%)	5,10	5,81	6.58
O (%)	24.70	32,46	47.77
N (%)	1.56	1,54	0.45
S (%)	0.26	0.44	0.37
Kül (%)	5.01	11,87	2.20
Nem (% wet)	15	10,11	21.10
UM (%)	71,13	58,71	70.20
Sabit Karbon (%)	16,20	19,31	7.72
Üst Isıl Değer (MJ/kg)	17,87	17,50	16.89

Pirina zeytinyağı üretiminin yan ürünü, atık biokütle maddesidir. Zeytinyağı üretimi sırasında zeytinler önce kırılırlar, sonra üretim tipine göre ya sadece mekanik yöntemlerle sıkılarak yağı çıkartılır ya da iki veya üç fazlı sistemlerde sisteme ilave edilen sıcak su vasıtası ile hamur haline getirilen zeytinler santrifüj esasına dayanan bir sistem ile işlenir. Bu işlemin sonucunda üretim tipine göre %30 ila %60 arasında su içeren biraz da yağ içeren bir posa kalır. Yağı alınan arta kalan nemli ve içerisinde bir miktar yağda bulunan posanın adıdır. Bu posaya pirina denir. Pirina işlenmeden doğaya olduğu gibi bırakılırsa çevreye zararı olabilecek bir kütle haline dönüşebilir. Nemli ortamlarda aside dönüşen yağı ve kara suyu ile çevresel bir etki oluşturabilir.

Zeytinyağı üreticilerinin bir kısmı bu pirinayı üretim tesisinde hekzan solventi ile işleyerek rafine pirina yağı elde ederler. Yağlı ve nemli posa işlendiği zaman hem ikinci bir yağ üretici hem yenilenebilir yakıt kaynağına dönüşüyor. Bu rafine pirina yağı ülkemizde çok tercih edilmesede yemeklik yağ olarak birçok ülkede kullanılmaktadır. Ülkemizdeki pek çok zeytinyağı fabrikası pirinayı işlemeyi tercih etmez. Biokütle atık olarak görünen zeytinyağı fabrikalarının işletmediği pirina biokütlesinin sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcıda sentez gazı üretiminde denenmek üzere analizleri yapıldı.

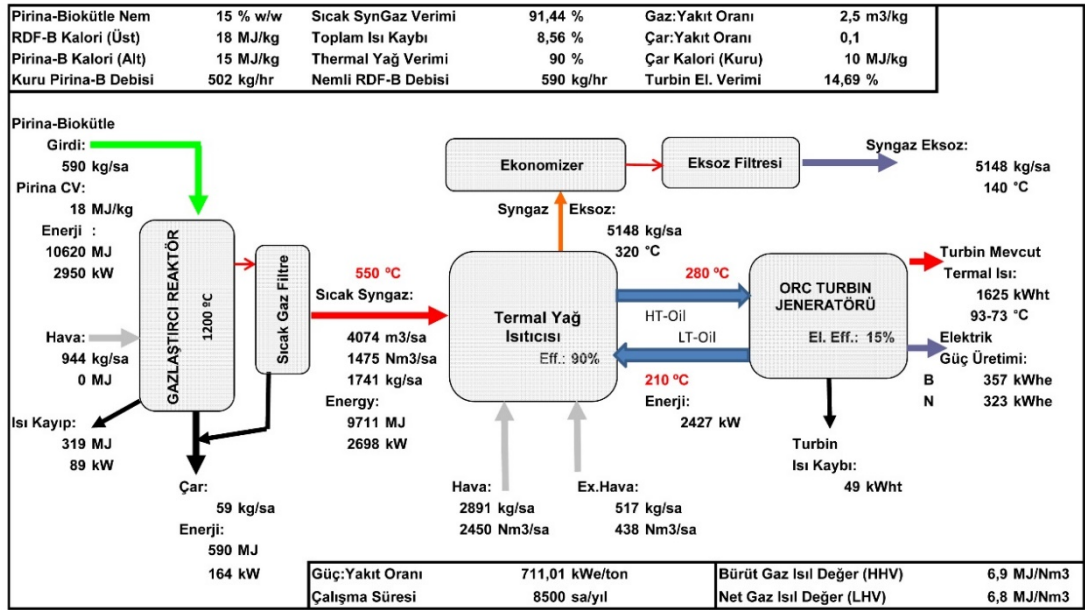


Şekil 3.3: Laboratuvar ortamında pirina yakıtı ile mini-gazlaştırıcı deneyi.

Tablo 3.1 de görüldüğü üzere pirina ve zeytin çekirdeklerinin üst ısıl değerleri 18 MJ/kg civarında olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle literatür taramasında da belirtildiği gibi her iki biokütlenin yukarı yönlü reaktörde gazlaştırma için uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.3’de görüldüğü gibi laboratuvar ortamında mini-gazlaştırıcı düzeneği ile yapılan çalışma sonucunda bu biokütleden sentez gazı üretilmiştir. Biokütle analizlerinin sonuçlarından anlaşılacağı üzere bu uygun biokütle için bir sonraki aşama olarak kütle ve enerji dengesinin çıkartılması gelmektedir. Böylelikle bu biokütle yakıtı ile kurulacak pilot ölçekli sistemde ne kadar ısı ve elektrik enerjisi üretileceği tahmin edilecektir.

3.1.2. Kütle ve Enerji Dengesi

Pirina biokütlesinden sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı ile enerji üretimi potansiyelinin ortaya konması açısından sistemin kütle ve enerji dengesinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Gazlaştırma sistemi için kütle ve enerji dengesinin belirlenmesi sistemin yakıtın sentez gazına dönüşümü verimliliğinin ve enerji üretiminin belirlenmesinin, bu süreç sonucunda da ne kadar enerji elde edilebilirliğinin tahmini açısından belirleyici bir unsur oluşturur. Kütle ve enerji dengesinin belirlenmesi her yakıtın tipi ve karakterizasyonuna göre farklılıklar gösterdiği gibi termodinamik denge ve reaksiyon kinetiklerinin, yani literatür bölümünde belirtildiği gibi gazlaştırmada esas olan üç reaksiyon dengesine göre, gazlaştırıcı tipine ve işletimine göre de farklılıklar teşkil edebilmektedir.



Şekil 3.4: Kütle ve enerji dengesinin pirina biokütlesi için şekille gösterilmesi.

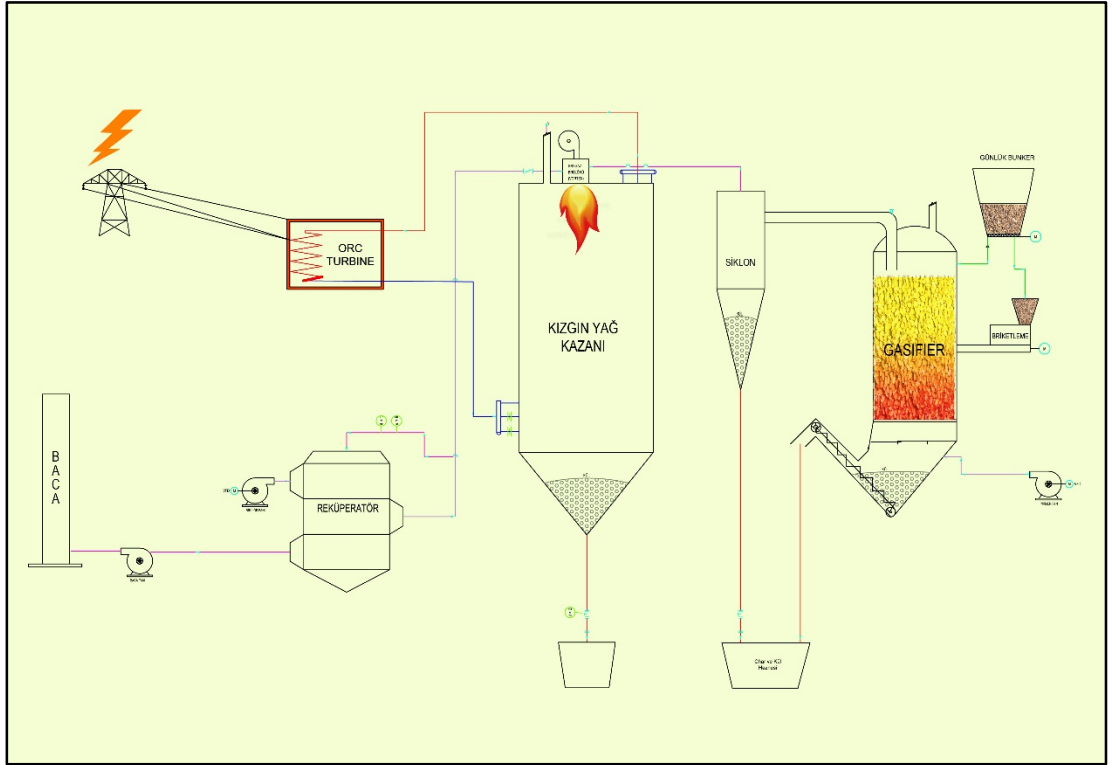
Kütle ve enerji dengesi çıktılarının belirlenmesi için pirina analizleri sonucunda elde edilen değerler, 500 kg/sa kapasiteli sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı, termal yağ kazanı, ORC Türbin verimlilikleri ele alınmıştır. Kütle ve enerji dengesinin belirlenmesinde tespit edilen değerler %100 kesinlik arz etmez, fakat daha önceki yapılmış çalışmalar referansı ile %99 bir yakınlığın sağlanması neredeyse mümkündür. Şekil 3.1'de gösterilmiş olan şematik diyagram mevcut pirina biokütle yakıtı ile belirlenmiş kütle ve enerji dengesidir. Burada verilen yaklaşık değerler literatürde

kabul görmüş değerlerden tahmini olarak üretilmiştir. Kütle ve enerji dengesine göre pirina üst ısıl değeri 18 MJ/kg olarak alındığında yaklaşık 590 kg/sa, %15 nem ihtiva eden pirina 10620 MJ (2950 kW) net enerji değerinde hesaplanabilir. Yukarı yönlü gazlaştırıcı için literatürde de belirtildiği üzere hava yakıt oranını yaklaşık 1kg yakıt 1,6kg hava (1:1,6) dan 944 kg/sa hava ihtiyacı belirlenir. Yine yukarı yönlü gazlaştırıcı için %3 oranında ısı kaybı 319 MJ (89 kW) tahmin edilebilir. Genel olarak literatürde de kabul gören yukarı yönlü gazlaştırıcıda biokütle gazlaştırılması sonrasında %10 oranında bioçar çıktısı kabul gördüğünden 59 kg/sa bioçarın kuru bazda ısıl değeri 10 MJ/kg olduğundan 590 MJ (164 kW) ısı değeri de bioçar ile çıkar. Yukarı yönlü gazlaştırıcıda biokütlenin gazlaşma sonrasında ortaya çıkacak sentez gazına kütle oranı 1:2,5 kabul edilirse oluşacak sıcak syngaz 1250 Nm³/sa olarak yazılabilir. Sentez gazının yoğunluğu yaklaşık 1,18 kg/Nm³ alındığında 1475 kg/sa sentez gazı üretimi olur. Yine üretilen sentez gazının sıcaklığını 500 °C de olduğunu varsaydığımızda, bu sıcaklıkta üretilen sentez gazı debisinin 3452 m³/sa olarak hesaplanabilir. Burada ısı kayıpları hesaplandığında ise yaklaşık 500 °C sentez gazı 2421 kW (8715 MJ) değerinde olur. Üretilen sentez gazın termal yağ kazanında yakıldığında yaklaşık %10 verimlilik kaybına uğrayacağı varsayıldığında kazanda kızgın yağ 2178 kW enerji üretecektir. ORC Türbin verimliliği %14,69 verildiği için ORC Türbini 320 kWe bürüt, %10'luk iç tüketim olduğundan net 290 kWe üretebilir. ORC Türbini aynı zamanda 1625 kW termal enerji üretecektir. Zeytinyağı üretiminde meydana gelen kara su çevresel yönden problem oluşturmaktadır. Bu kara suyun evaporasyon sistemi kurularak suyun buharlaştırılması ve arta kalan maddeninde gazlaştırılma sisteminde değerlendirilmesi üzerine çalışma yapılmaktadır. Bu şekilde gazlaştırma sonrasında üretilen sentez gazın kazanda yakılması sonrasında ısınan termal yağın ORC türbininde elektrik enerjisine dönüşmesi, termal yağ kullanıldıktan sonra arta kalan mevcut atık ısının tasarlanan evaporasyon sistemini çalıştırması mümkündür. Bu şekilde mevcut atık ısının da tesis içerisinde değerlendirilmesi düşünülmektedir.

3.2. Pilot Ölçek Gazlaştırma Sistemi

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, biokütleden elektrik enerjisi üretimi amaçlı kurulmuş pilot sistemin ekipmanlarından bahsedecek olursak:

- Yakıt besleme sistemi.
- 500 kg/sa kapasiteli yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörü.
- Syngaz Brülörü ve Kızgın Yağ Kazanı.
- ORC Türbini (net 250 kWe, 1210 kWth).
- Scada Sistemi.



Şekil 3.5: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi şeması.

Sistemin Bursa Marmarabirlik tesislerinde imalatı tamamlanmış (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7) ve test aşamalarına geçilmiştir. Bu sistemde daha öncede belirlediğimiz üzere pirina biokütlesinin test işlemleri gerçekleştirildi. Bu testler sırasında hali hazırda bir miktar zeytin çekirdeği de gazlaştırma sisteminde denenmiştir.



Şekil 3.6: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi yan görünümü.



Şekil 3.7: Pilot ölçekli gazlaştırma sistemi görünümü.

3.2.1. Yakıt Besleme Sistemi

Gazlaştırma sistemine saatte yaklaşık 500 kg/sa pirina biokütlesi beslemesi yapabilecek kapasitede vidalı yakıt besleme ünitesi tasarımı ve imalatı yapılmıştır.

Besleme sisteminde ana bunker (Şekil 3.8) biokütle yakıtının toplandığı haznedir. Biokütle yakıtı buradan bir vida vasıtası ile elevatör sistemine taşınır oradan da günlük bunkere (Şekil 3.9) aktarılır. Biokütle yakıtı buradan bir vida vasıtasıyla gazlaştırıcı reaktörüne beslenir. Günlük bunkerden reaktöre beslenen biokütle yakıtı işlemi sırasında sistemin hava kaçırmaması önemli bir unsurdur. Tasarım yapılırken bunlar göz önünde bulundurulmuştur. Tüm bu işlemler scada sistemi ile otomatik olarak gerçekleştirilir.



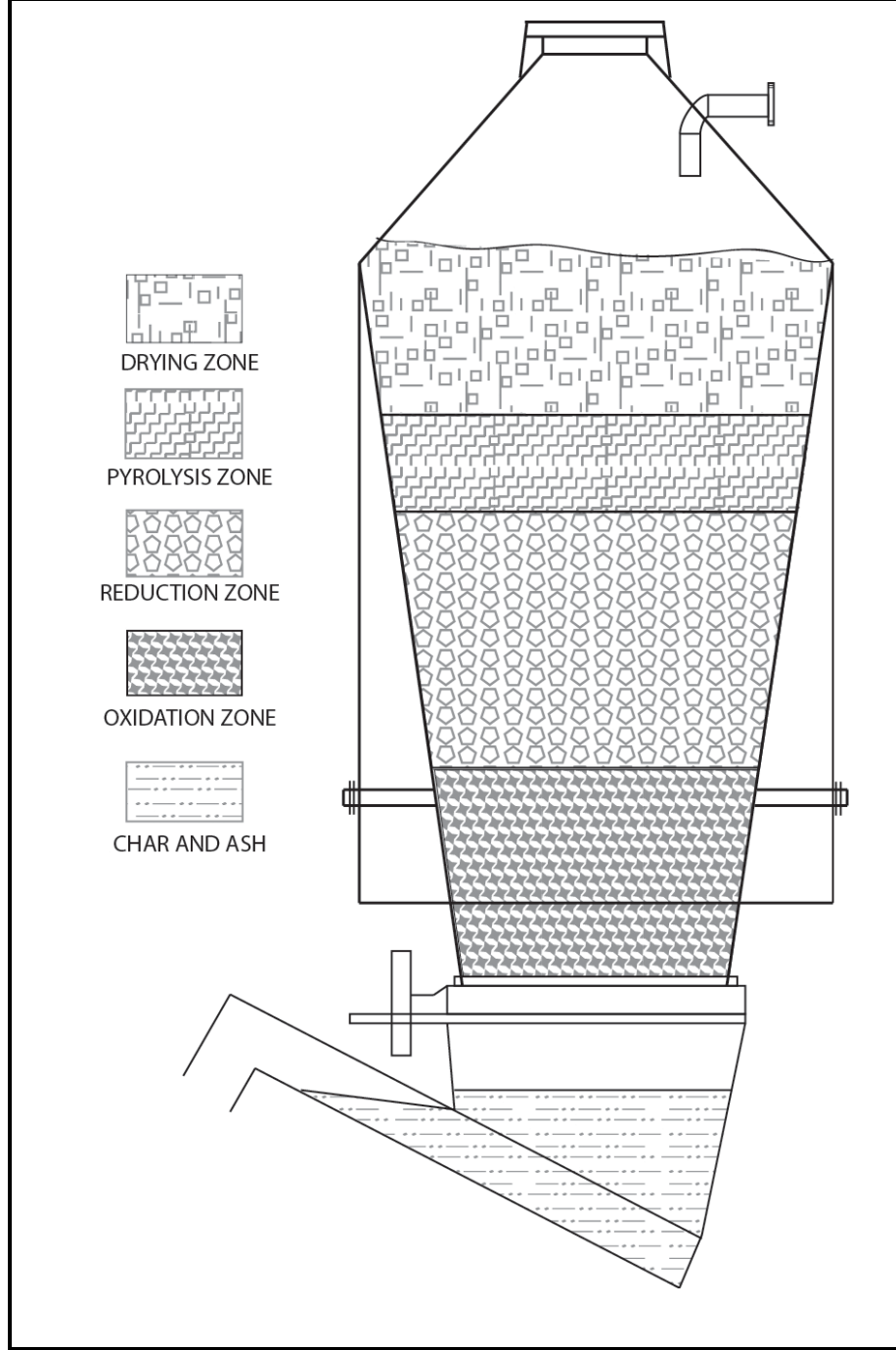
Şekil 3.8: Besleme sistemi ana bunker.



Şekil 3.9: Besleme sistemi günlük bunker.

3.2.2. Yukarı Yönlü Gazlaştırıcı

Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı 500 kg/sa kapasitede pirina biokütlesine göre tasarımları yapılmıştır (Şekil 3.10). Daha önceden yapılan deneylerle yakıtın karakterizasyonu tespit edilmiş ve bu yakıtı uygun bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 3.10: Sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörü bölgeleri.

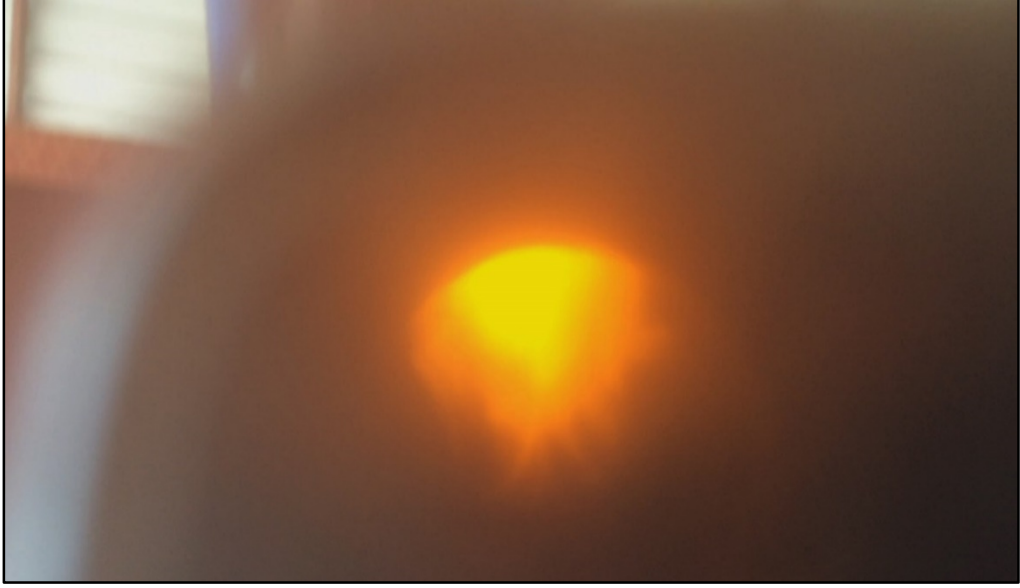
Yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörünün bölgeleri Şekil 3.10'de gösterilmiştir. İşletim esnasında biokütle, gazlaştırıcı reaktörünün üst tarafından vidalı besleme sistemi ile reaktöre beslenmektedir. Gazlaştırma prosesi için ihtiyaç olan kısmi hava reaktörün alt kısımda bulunan ızgara bölümünden hava nozulları ile temin edilir. Reaktörün alt kısmında bulunan ızgara bölgesinde, hava ve biokütleden oluşan çar reaksiyona girer ve yüksek sıcaklıklarda CO₂ ve H₂O üretir. Sırayla bu CO₂ ve H₂O çar ile birlikte endotermik reaksiyona girerek CO ve H₂ formlarına dönüşür (Denklem 2.3 ve 2.4'de gösterilen reaksiyonlardaki gibi). Artan sıcaklıkla birlikte biokütleden gelen indirgeyici gazlar piroliz bölgesine geçer ve bu gazlar proste bir miktar soğumuş olurlar. Geriye kalan sıcaklık biokütlenin beslendiği ilk bölgeden geçer ve bu esnada bioküttelede bir miktar kurutma görevi görerek reaktörün tepesindeki gaz çıkış bölgesinden ayrılır.

Gazlaştırıcı bölgelerine termokapıl yerleştirilerek reaktör içerisindeki sıcaklık dengeleri testler sırasında kontrol edilmiştir. Yine test aşaması sırasında üretilen sentez gazı değerleri "MRU-Air Swg" markası gaz analiz cihazı ile ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar ve veriler 4. Bölüm olan bulgular ve tartışma bölümünde ele alınacaktır.

3.2.3. Termal Yağ Kazanı

Pirina biokütle yakıtından ele edilerek üretilen sentez gazı özel tasarlanmış kıvrım (swirl) tipli brülör ile kızgın yağ kazanında direk olarak yakılıyor (Şekil 3.11). Sentez gazın içerisinde bulunan katran ve partiküller bu kıvrım tipli brülör sayesinde tamamen yakılarak ısı enerjisine dönüştürülmesi sağlanır. Böylelikle sentez gazının reaktörden çıktıktan sonra ekstra bir gaz temizlemeye girmesine gerek kalmamaktadır. Böylelikle sistem ekonomik yönden de uygun duruma gelmektedir.

Termal yağ kazanında sentez gazın sıkışmasını önlemek üzere gerekli emniyet vanaları yerleştirilmiştir. Basınç yükselmesi durumunda emniyet vanaları açılarak sıkışan gaz bu vanalar sayesinde havaya tasfiye edilir. Böylelikle sistem güvenliği de sağlanmış olur.



Şekil 3.11: Sentez gazın termal yağ kazanında yanması.



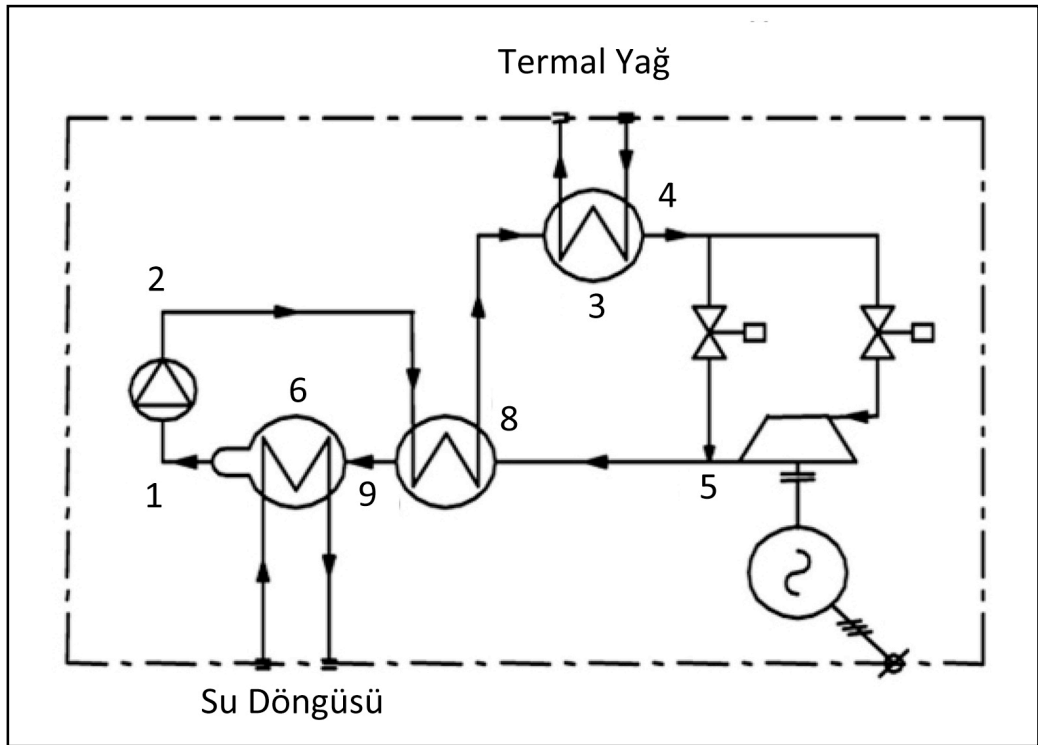
Şekil 3.12: Termal yağ kazanında bulunan serpantinler.

Şekil 3.12’da gösterildiği gibi termal yağ kazanı içerisinde serpantinler mevcuttur. Bu serpantinlerin içerisinde bulunan organik yağ 345 °C seviyelerine kadar özelliğini koruyabilen kapasiteli, 15 °C de 1011 kg/m³ yoğunluğuna, 40 °C de 30 mm²/sn kinematik akışkanlığa, 280 °C de 2500 KJ/kg.K ısı kapasitesi ve 20 kPa buhar basıncına sahip organik termal yağdır. Bu serpantinlerdeki termal yağ 280 °C

seviyelerine geldiğinde ORC Türbin başlangıç koşusu aşamasına geçilir ve elektrik enerjisi üretimi başlar.

3.2.4. ORC Türbini

ORC sistemleri şu ana kadar biokütlede yakma tesislerinde üretilen ısı sonucunda enerji üretiminde kullanılmıştır. Yaklaşık 25 yıldır mevcut bulunan ORC türbinleri biokütle bertaraf tesislerinde birleşik ısı ve güç (combined heat power, CHP) sistemleri ile çalıştırılmaktadır (Bini R., 2009). ORC türbin termodinamik döngüsü ve bileşenlerin ilgili şeması Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Bu proje ile ORC Türbini ilk defa sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı sistemiyle birlikte test edilmiştir.



Şekil 3.13: ORC türbin bileşenleri termodinamik döngüsü.

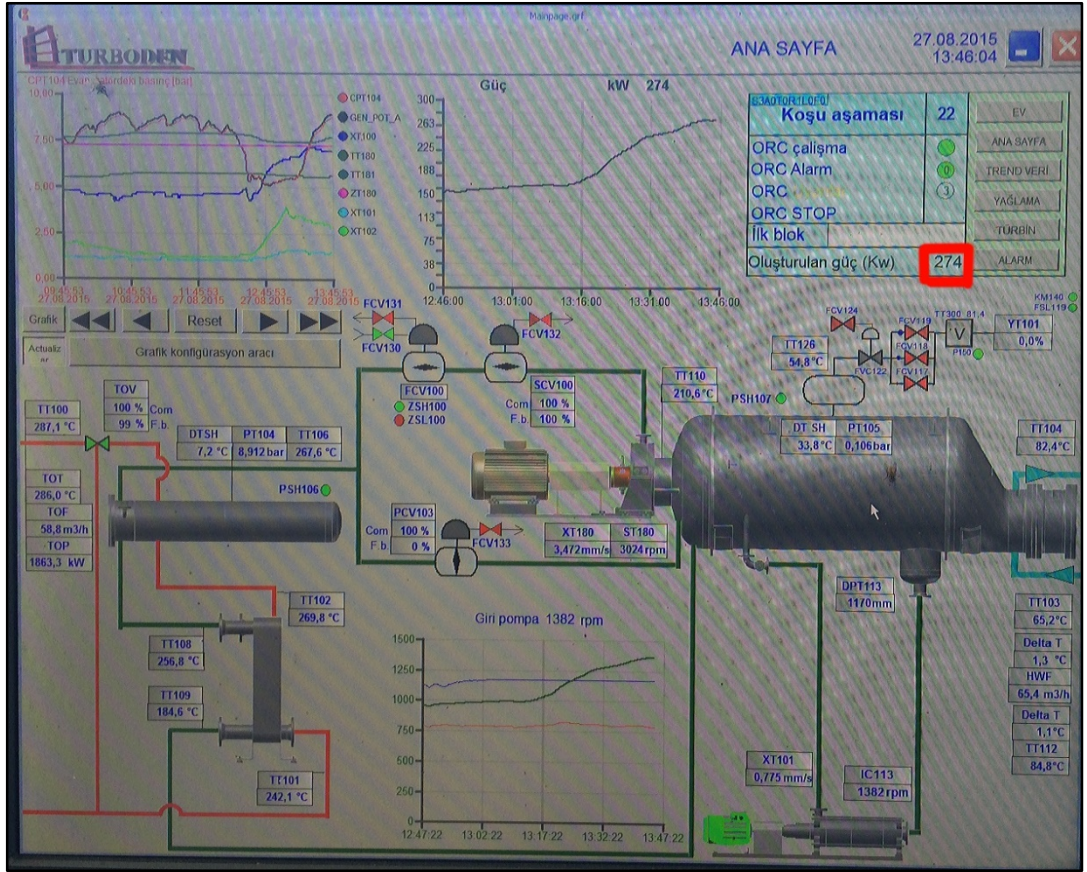
Şekil 3.14’de görülen 300 kWe kapasiteli ORC türbini, kızgın termal yağ kazanında ısınan ve yaklaşık 280 °C’ye gelen termal yağın döngüsü sonrasında ORC içerisinde bulunan özel bir formüllü silikon yağı akışkanının buharlaşma ve yoğunlaşma döngüsü prensibiyle elektrik jeneratörünü harekete geçirir (4->5) ve enerji üretimini gerçekleştirir (8->3->4). Bu esnada buharlaşan organik akışkan rejenerasyon ünitesinde tekrar yoğunlaşır (9->6->1), bu rejenerasyon 70-90 °C su

soğutma gücü 1491 kW döngüsü ile gerçekleşir (5->9). Yoğuşmuş organik akışkan tekrar döngüye girer (1->2). Büt aktif elektrik üretimi 300 kWe, 25 kWe iç tüketimi ile net 275 kWe üretimi gerçekleşir. ORC türbini scada kontrolü ile gerçekleşir (Şekil 3.15).



Şekil 3.14: 300 kWe kapasiteli ORC Türbini, Bursa Marmarabirlik tesisleri.

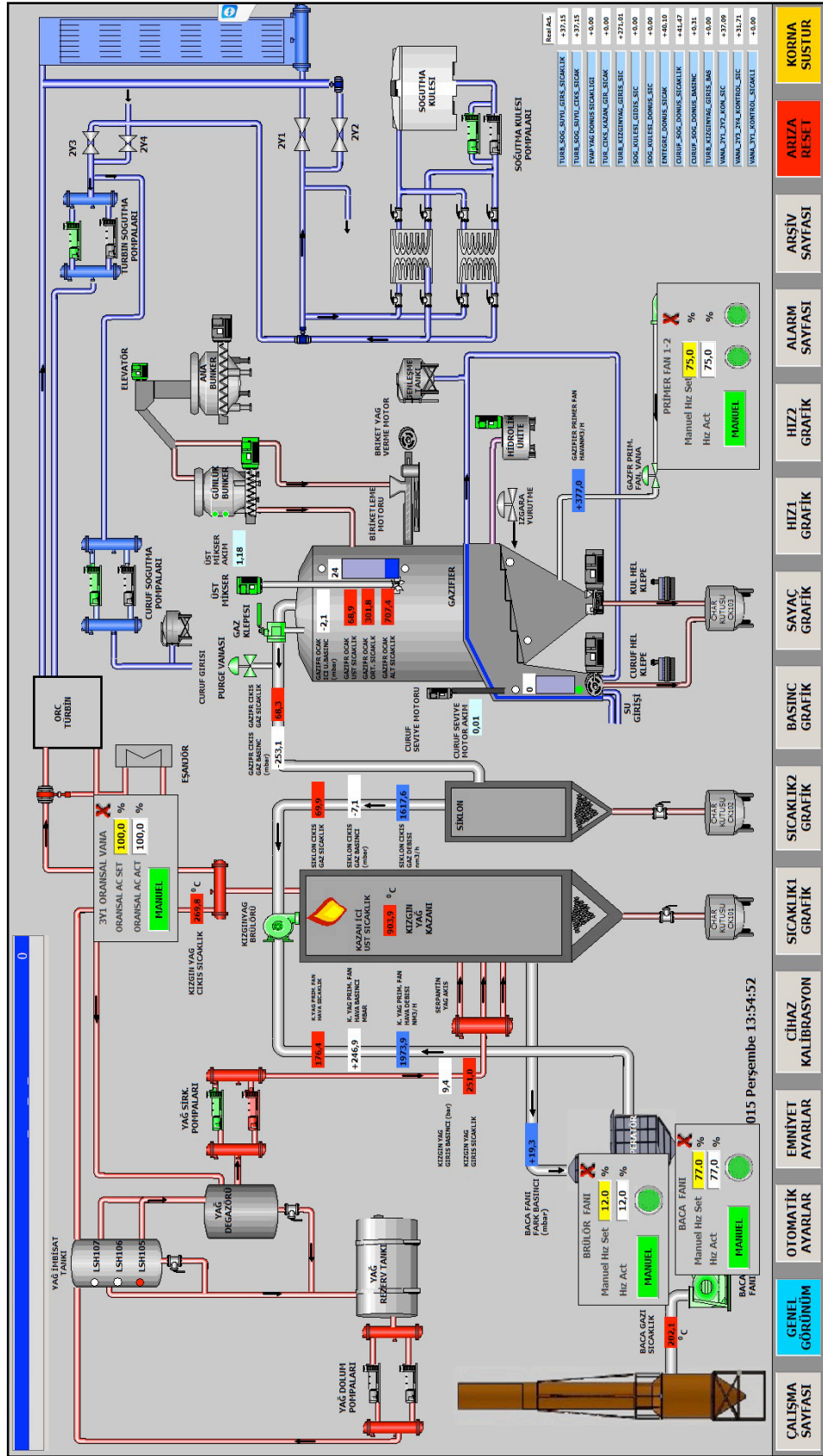
Buhar türbinleri ile kıyas edilecek olursa ORC sistemlerinin avantajları şunlardır; Yüksek döngü verimliliği (özellikle cojenerasyon tesislerinde kullanıldığında), çok yüksek türbin verimi (%85 in üzerinde), türbinin düşük mekanik gerilmesi (düşük çevre hızından), redüksiyon dişlisi olmadan elektrik jeneratörüne doğrudan sürücü sağlayan düşük RPM'li türbin; buhar püskürtme uçlarının olmayışından dolayı nemlilik oluşmaması bu sayede türbin bıçaklarında aşınma olmaması. Kullanılan akışkan su buharı özelliğinde olmadığından uzun süreli işletim ömrü sağlar. Su arıtım sistemine ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca işletim kolaylığı, start-stop prosedürleri, daha güvenli ve sessiz çalışması, bakım maliyetleri azlığı, yük performansının fazla olması başlıca avantajlarıdır.



Şekil 3.15: ORC Türbini çalışması scada sistemi.

3.2.5. Scada Sistemi

Gazlaştırma sistemi işletilmesinin tamamı PLC sistemi ile kontrol edilmektedir. Şekil 3.16'de görüldüğü gibi bilgisayar ekranına bağlanan ve uzaktan kontrol edilebilme imkânı sağlayan Scada sistemi ile gazlaştırma reaktörü ve tüm ekipmanların gidişatı anlık olarak kontrol edilir, böylelikle sistem sürdürülebilir bir şekilde işletilir. İşletim esnasında gazlaştırma ile ilgili veriler her saniye kayıt altına girer. Bu sayede sistemin detaylı bir şekilde kontrolü sağlanmış olur. Gazlaştırma sistemine uzaktan bağlantıda mümkündür. Böylelikle sistem dışarıdan da kontrol edilip gözlenebilmektedir.



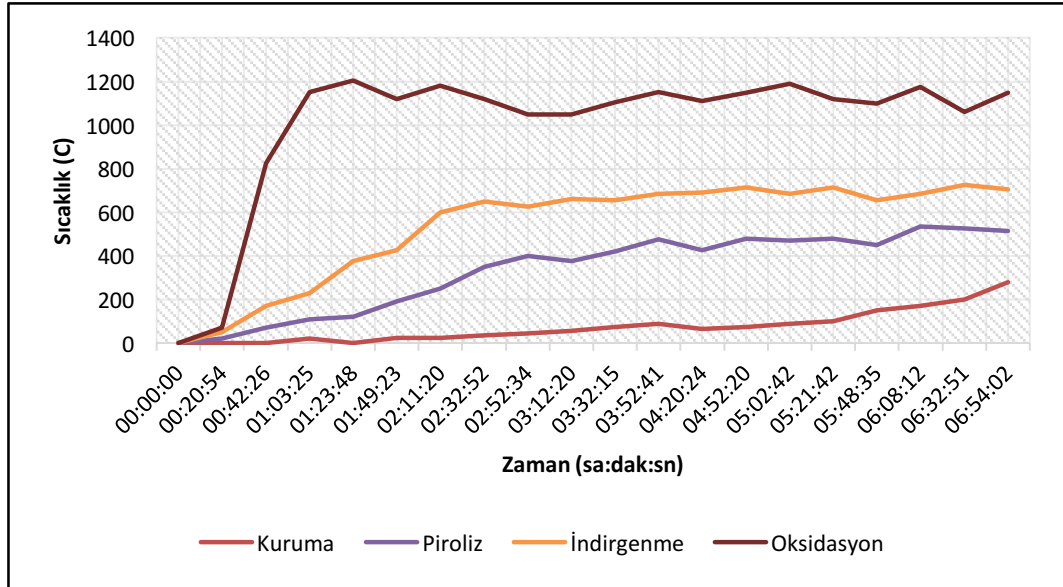
Şekil 3.16: Gazlaştırma işletimi scada kontrol ekranı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Biokütellerin sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörlerinde verimli bir şekilde bertaraf edilebilirliğinin gösterilmesi amacıyla hazırlanmış bu tezde, Bursa Marmarabirlik tesislerinde Tübitak TEYDEB projesi kapsamında kurulmuş pilot tesiste pirina ve zeytin çekirdeği biokütlesi yakıtı ile yapılmış gazlaştırma deneyleri ele alınmıştır. Yaklaşık 500 kg/sa besleme ile üretilen syngaz gaz kromatografi cihazı ile analiz edilmiş Şekil 4.2'deki veriler elde edilmiştir.

4.1. Reaktör Sıcaklık Dağılımı

Şekil 4.1'de gösterilen sıcaklık profilleri işletim esnasında yukarı yönlü reaktörün bölgelerindeki ısı dağılımını göstermektedir. Bu sıcaklıktaki değişimlere etki eden parametreler; gazlaştırıcı reaktörüne yakıt besleme, ızgara hareketi, kısmi hava oranı ve bioçar çıkışındaki helezonunun hızları etki etmektedir.



Şekil 4.1: Yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörü bölgeleri zaman sıcaklık grafiği.

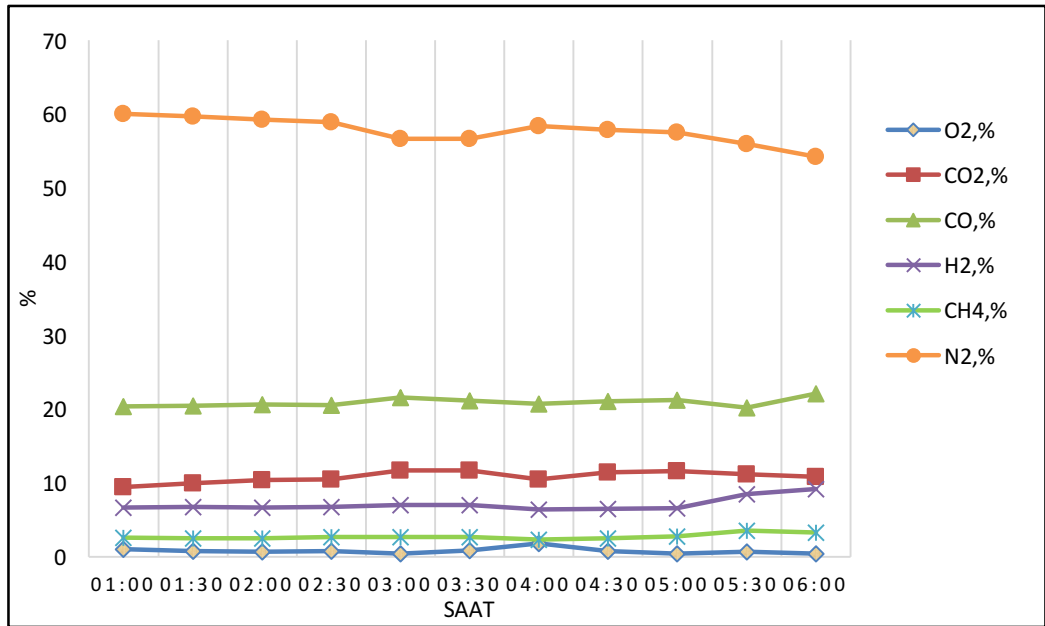
Şekil 4.1'den anlaşılacağı üzere, ateşlemeden yaklaşık 30 dakika süre sonra reaktör içerisinde reaksiyonlar başlamış, syngaz üretimi gerçekleşmiştir. Reaktöre yaklaşık 650 Nm³/sa kısmi hava verilerek oksidasyon bölgesi sıcaklığı 1000-1200 °C'ye ulaşmış ve 1520 Nm³/sa syngaz üretilerek termal yağ kazanında yakılmıştır.

Ateşlemeden yaklaşık 2 saat süre sonra ızgara ve çar helezonları çalıştırılmış ve yaklaşık 50 kg/sa bioçar alınmıştır. Besleme de belirli aralıklarla yaklaşık 500 kg/sa olarak yapılmıştır. Sonuçta bu parametreler doğrultusunda sistemin işletimi sürekli bir şekilde sağlanmıştır.

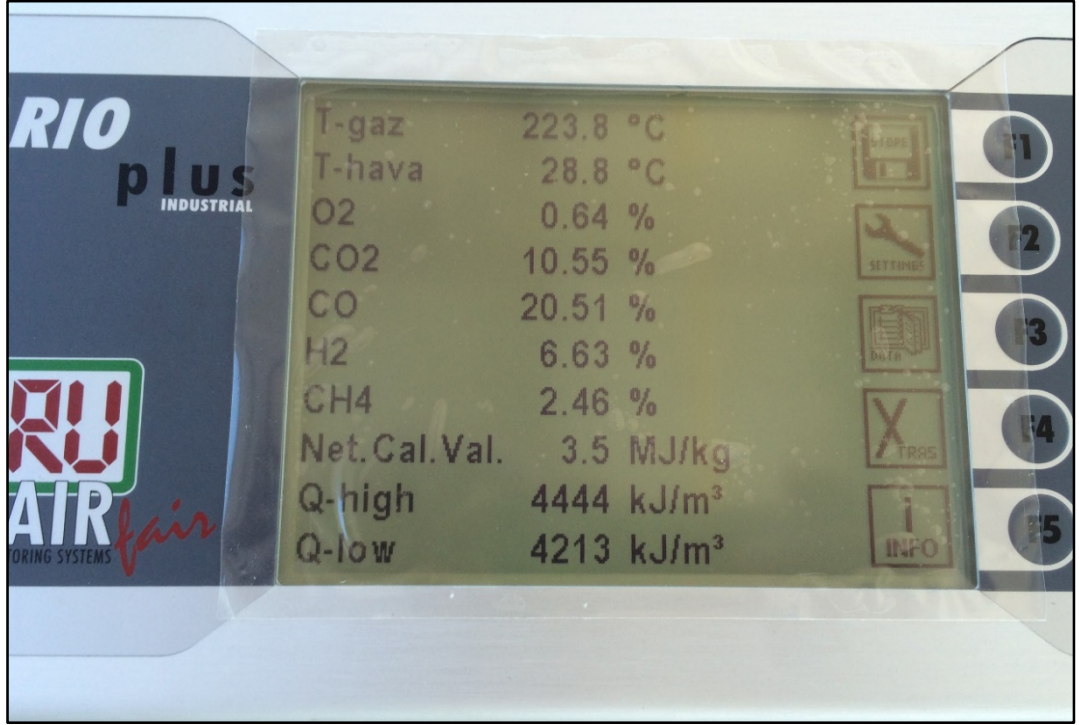
Elde edilen veriler literatür de belirtilen updraft reaktör değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü üzere oksidasyon bölgesi sıcaklığı yaklaşık olarak 1000-1200 °C'e olarak ölçülmüştür. Piroliz ve indirgenme (reduction) bölgesi de literatür'de belirtilen değerlerle uygunluk göstermiştir.

4.2. Sentez Gazı (Syngaz) Kompozisyonu

Sentez gazı değerleri Şekil 4.3'de görüldüğü gibi "MRU-Air Swg" markası gaz analiz cihazı ile ölçülmüştür. Gazın sıcaklığı genel olarak 200-300°C aralığında seyretmiştir. Şekil 4.2'de sentez gazı kompozisyonu ölçülmüş ve grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Sentez gazın (syngaz) yüzde oranda kompozisyonu.



Şekil 4.3: Sentez gazı üretimi ve ölçümü.

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere gazlaştırma prosesi boyunca 1520 Nm³/sa sentez gazı üretilmiştir. CO₂ sürekli 10-12 % aralığında devam etmiştir. Sentez gazın kalori değerini belirleyen H₂ 7-10 %, CO 20-22 %, CH₄ ise 2-3 % olarak analiz edilmiştir. Bu verilerle sentez gazın kalori değeri ise 4,5-5 MJ/Nm³ olarak hesaplanır. Sonuç olarak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktöründe pirina biokütlesi ile üretilen sentez gazın değerleri literatürde belirtilen değerlere yakın olarak üretildiği görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada pilot sistemde yapılan pirina biokütlesi ile deneme sonuçlarında da görüldüğü üzere üretilen sentez gazının termal yağ kazanında yakılarak, ORC türbini ile elektrik ve ısı enerji üretimine uygun olduğu görülmüştür. Daha öncede belirtildiği üzere yukarı yönlü gazlaştırıcıların birleşik ısı ve güç sistemlerinde yüksek potansiyele sahip olduğu bu çalışma ile de gösterilmiş oldu.

Literatürde belirtilen sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı reaktörleri için oksidasyon bölgesi sıcaklığı 1000-1200°C bu çalışmada gözlenmiştir. Yine üretilen sentez gazı kalori değeri 5 MJ/Nm³ olarak analiz edilmiştir. Gazlaştırıcı reaktörünün sıcak gaz verimi % 80 üzerinde ölçülmüştür ki bu verimliliğin yüksek olduğunu gösterir. Reaktöre düzenli olarak yaklaşık 500 kg/sa biokütle beslemesi yapılması ve 50 kg/sa bioçar alımı herhangi bir tıkanıklığın olmadığına ve sistemin başarılı bir şekilde işletildiğinin göstergesidir.

Sonuç olarak pirina ve zeytin çekirdekleri biokütlesinin sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcı ile temiz enerji üretiminde kullanılabilir olması gösterilmiştir. Bu çalışma ile biokütlelerde gazlaştırmanın yapılabilmesi için reaktör seçiminin ve tasarımının literatürde de belirtildiği üzere önemi de anlaşılmıştır.

Gelecekte çeşitli biokütleler ile daha büyük ölçekli sabit yatak yukarı yönlü gazlaştırıcılar kullanarak enerji üretmek hedefimizdir.

KAYNAKLAR

Arena U., Zaccariello L., Mastellone M. L., (2009), "Tar removal during the fluidized bed gasification of plastic waste", *Waste Management*, 29 (2), 783–791.

Bangham D., Benett J., (1940), "The Chemistry of Gasification with Reference to Small Gas Producers", *Fuel*, 19, 95-101.

Beenackers A., Van S., (1984), "Gasification of Biomass-A State of the Art Review", *Thermochemical Processing of Biomass Conference*, 91-136, London, UK, 12-14 March.

Belgiorno V., (2004), "Energy from gasification of solid wastes", *Fuel and Energy Abstracts*, 45 (4), 253.

Bini R., Guercio A., Duvia A., (2009), "Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass applications for cogenerative systems in association with adsorption chillers", 5th Dubrovnik conference, 61-76, Dubrovnik University, Croatia, 20-24 January .

Björklund A., Melaina M., Keoleian G., (2001), "Hydrogen as a transportation fuel produced from thermal gasification of municipal solid waste: an examination of two integrated Technologies", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26 (11), 1209–1221.

Bridgewater A., Double M., Earp D. (1986), "Technical and market assessment of biomass gasification in the United Kingdom", ETSU Report, 2220-3269, UKAEA, Harwell, UK.

Bridgewater A., Double M., (1988), "Biomass Solid Waste: Opportunities and Constraints for Gasification and Pyrolysis", *Proceedings of Gasification Conference*, 126-133, Institute of Energy, Harrogate, UK, 21-23 April.

Bridgewater A., (1995), "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation", *Fuel*, 74, 631–53.

Brown M., Baker E., Mudge L., (1987), "Evaluation of Processes for Removes of Particulate, Tars, and Oils from Biomass Gasifier Product Gases", *Energy from Biomass and Wastes X Conference*, 7-11, 655-676, Elsevier Applied Science and Institute of Gas Technology, Washington DC, 14-16 May.

Buekens A., Schoeters J., (1985), "Modelling of Biomass Gasification, *Proceedings of Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*", Elsevier Applied Science Publishers, 18-22.

Cash J., Cash M., (1940), "Producer Gas for Motor Vehicles", Angus and Robertson Publisher, 142-157.

Chan W., Kelbon M., Krieger B., (1985), "Modelling and Experimental Verification of Physical and Chemical Processes During Pyrolysis of a Large Biomass Particle", *Fuel*, 65, 1505-1513.

Chern S., (1989), "Equilibrium and Kinetic Modelling of Co-current (Downdraft) Biomass Gasifiers", *Doctoral Thesis, Kansas State University*.

Choy K., Porter J., Hui C., McKay G., (2004), "Process design and feasibility study for small scale MSW gasification", *Chemical Engineering Journal*, 105, 31-41.

Christian B., Johannes W. Judex A., Michael G., (2012), "Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant", *Waste Management*, 32, 719-723

Coglioli G., (1986), "Gasification of Biomass for the Production of Synthetic Gas with the intention to produce Synthetic Fuel in the Further Process", *Advance Gasification-Methanol Production from Wood Results of EEC Pilot Program Report, ESE-P-070-I, Reidal Publishing Company, Dordrecht, Holland*.

Cummer K., Brown R., (2002), "Ancillary equipment for biomass gasification", *Biomass and Bioenergy*, 23 (2), 113-128.

Deglise X., Magne P., (1987). "Pyrolysis and Industrial Charcoal", *Biomass Regenerable Energy*, 10, 19-32.

DeGroot W., Shafizadeh F., (1984), "Kinetics of Wood Gasification by Carbondioxide and Steam", *Proceedings of Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion Conference, 275-292, London, UK, 14 May*.

Di Blasi C., Signorelli G., Portoricco G., (1999), "Counter Current Fixed-Bed Gasification of Biomass at Laboratory Scale", *Industrial Engineering Chemistry Research*, 38, 2571-2581.

Dogru M., Howarth C., Malik A., Olgun H., (1998), "The Performance of a Small Scale Updraft Biomass Gasifier", *Proceedings of the TIESS-98 Conference, 835, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 26-29 July*.

Dogru M., Olgun H., Howarth C.R., Malik A.A., (1998), "Gasification and Thermochemical Studies on Bio and Waste Fuels with Particular Reference to Hazelnut Shells", *Proceedings of the TIESS-98 Conference, 309-313, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 26-29 July*.

Dogru M., Howarth C., Malik A., (1998), "Energy Recovery from Biofuel Utilizing Gasifiers in Rural Areas", *Bulletin of Mechanical Engineering Society*, 33, 7-10.

Dogru M., Olgun H., Howarth C., (1999), "Use of Various Wastes for Energy Production and Gasifiers", *IVth National Installation Engineering Congress and Exhibition, 12, Izmir, Turkey, 4-7 November 1999*.

Dogru M., Olgun H., Howarth C., Malik A., (2000), "Preliminary Studies of Lignocellulosics and Waste Fuels for Fixed Bed Gasification", *International Journal of Global Energy Issues*, 15, 264-280.

Dogru M., (2000) "Fixed Bed Gasification of Biomass", Ph.D. Thesis, University of Newcastle, UK.

Dogru M., Howarth C., Akay G., Keskinler B., Malik A., (2002), "Gasification of Hazelnut Shell in a Downdraft Gasifier", *Energy*, 27 (5), 415-427.

Dogru M., (2005), "Catalytic Gasification", International Patent, PCT/GB2004/004651 (WO05047435A2).

Dogru M., (2013), "Experimental Results Of Olive Pits Gasification in a Fixed Bed Downdraft Gasifier System", *International Journal of Green Energy*, 10, 1-14.

Earp D., (1988), "The Gasification of Biomass in a Downdraft Reactor", Doctoral Thesis, Chemical Engineering Department, Aston University, United Kingdom.

Evans G., (1992), "Development and Operation of an Open-Core Downdraft Gasifier", Doctoral Thesis, University of Aston, Birmingham, UK.

Fytily D., Zabaniotou A., (2008), "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods", *Renewable and Sustainable Energy*, 12, 116-140.

Fogler H., (1992), "Elements of Chemical Reaction Engineering", 2nd Edition, Prentice-Hall International Publication.

Foley G., Barnard G., (1983), "Biomass Gasification in Developing Countries", *Eartscan Energy Information*, 17, 3.

Gezer I., Dogru M., Akay G., (2009), "Gasification of apricot pit shells in a downdraft gasifier", *International Journal of Green Energy*, 6(2), 218.

Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L., (2008), "Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district", *Waste Management*, 28, (1), 39-50.

Goldman B., Clark J., (1939), "The Modern Portable Gas Producer", *Journal Institute of Fuel*, 12(63), 103-140.

Graham R., Bergougnou M., (1988), "The Production of Pyrolytic Liquids, Gas and Char from Wood and Cellulose by Fast Pyrolysis", *Research in Thermochemical Biomass Conversion*, 629, Arizona, USA, 25-27 April.

Graham R., (1993), "A Characterisation of the Fast Pyrolysis of Cellulose and Wood Biomass", Doctoral Thesis, University of Western Ontario, Canada.

Groeneveld M., Swaaij W., (1980), "The Design of a Co-current Moving Bed Gasifier", *American Chemical Society Symposium Service*, 463-477, NY, USA, 21-23 October.

Gumz W., (1950), "Gas Producers and Blast Furnaces", 1st edition, John Wiley and Sons Publishers.

Han, J., Kim, H., (2008), "The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, (2), 397–416.

Hasler P., Nussbaumer T, (1998), "Particle Size Distribution of the Fly Ash from Biomass Gasification", *Biomass for Energy and Industry*. 10th European Conference and Technology Exhibition, 1623 – 1625, Würzburg, Germany, 8-11 June 1998.

Hellgren R., Lindblom M., Andersson L., Bjerle I., (1991), "High Temperature Pyrolysis of Biomass", *Energy from Biomass and Wastes-XV Conference*, 360, Institute of Gas Technology, Chicago, USA, 24-27 June.

Hills W., (1985), "Wood and Biomass Ultrastructure", *Proceedings of Fundamentals of Thermochemical Biomass*, 14, 27-33.

Hurley T., Fitton A., (1959), "Producer Gas for Road Transport", *Proceedings of Institute of Mechanical Engineering*, 161, 81-97.

Juan M., Andres A., Adolfo N., Maria R., (2011), "Behaviour of dolomite, olivine and alumina as primary catalysts in air–steam gasification of sewage sludge", *Fuel*, 90, 521–527.

Kaupp A., Goss J.R., (1981), "State of Art for Small Scale Gas Producer Engine Systems Gas Producer Engine Systems", *USDA Forest Service Repor 53-319R-0-141*, Timber Management Research, USA.

Kaupp A., (1984), "Small-scale Producer Gas", *GTZ/FB Report*, 212, Federal Republic of Germany.

Kaupp A., (1983), "The Myth and Facts about Gas Producer Engine Systems", *Proceedings of Conference of Producer Gas with Emphasis on Applications for Developing Countries*, 25-46, The Beijer Institute, Stockholm, Sweden, 2-4 November.

Kikuchi R., (2005), "Penetration of hydrogen-based energy system and its potential for causing global environmental change: scoping risk analysis based on life cycle thinking", *Environmental Impact Assessment Review*, 26 (2), 206-218.

Klein A., (2002), "Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes", *Master Thesis*, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.

Lede J., Ferzaro F., Antoine B., Villermaux J., (1980), "Cyclone Reactor for the Flash Pyrolysis of solid Particles", *Specialists Workshop on Fast Pyrolysis of Biomass SERI Report*, CP-622-1096, Colorado, USA.

Lindmark G., (1944), "Swedish Gas Producer", *Bus and Coach*, 266-269.

Littlewood K., (1977), "Gasification: Theory and Applications", in Progress in Energy and Combustion Science, 3(1), 35-71.

Malik A., (1991), "A study of Coal Combustion Using a Rotating Retort", Doctoral Thesis, Department of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom.

Maniatis K., (1986), "Fluidized Bed Gasification of Biomass", Doctoral Thesis, Aston University, United Kingdom.

Mathieu, P., Dubuisson R., (2002), "Performance analysis of a biomass gasifier. Energy Conversion and Management, 43, 1291–99.

Maund J., Earp D., (1988), "Fuels from Biomass by Conversion in Molten Salts", Thermochemical Biomass Conversion – International Conference, 113-126, Arizona, USA, 2-6 May.

Miles T., (1985), "Preparation and Supply of Wood for Gasification ", Proceedings of Symposium of Forest Products in International Achievements and Future, 5, Pretoria South Africa, 12-16 March.

Milligan J., (1994), "Downdraft Gasification of Biomass", Doctoral Thesis, Chemical Engineering Department, University of Aston, United Kingdom.

Morris M., Waldheim L., (1998), "Waste Management", Elsevier, 18 (6), 557-564.

Payne F., Chandra P., (1986), "Predicting Ash Particulate Emission form Updraft Biomass Gasifier", Transactions of American Society of Agricultural Engineering, 29(2), 597-600.

Ponzio A., Kalisz S., Blasiak W., "Effect of operating conditions on tar and gas composition in high temperature air/steam gasification (HTAG) of plastic containing waste", Fuel Processing Technology, 87, 3, 223–233.

Rampling T., Gill P.J., (1993), "Fundamental Research on the Thermal Treatment of Wastes and Biomass: Thermal Treatment Characteristics of Biomass", Report ETSU B/T1/00208/REP/2, Energy Technology Support Unit, Harwell, United Kingdom.

Reed T.B. and Jantsen G.R., (1979), "A Survey of Biomass Gasifiers-Principles of Gasification", Solar Energy Research, 2, 6-11.

Reed T., Levie B., Das A., (1984), "Biomass Gasification for Powers, Fuels and Chemicals", 5th Canadian Bioenergy R&D Seminar, 167, Elsevier, Canada, 13-15 April.

Reed, T., (1988), "Handbook on biomass downdraft gasifier engine systems", CO: SERI/SP-271-3022, Colorado.

Reed T., (1999), Private Communication Conference, 67-98, California, US, 21-25 May.

Seggiani M., Vitolo S., Puccini M., Bellini A., (2012), "Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier", *Fuel*, 93, 486–491.

Shamsuddin A., Williams P., (1992), "Devolatilization Studies of Oil Palm Solid Wastes by Thermogravimetric Analysis", *Journal of the Institute of Energy*, 65, 31-34.

Shand R., Bridgewater A., (1984), "Fuel Gas From Biomass: States and Modelling Approaches", the Thermochemical Processing of Biomass Conference, 265-287, London, United Kingdom, 18-21 March.

Sharholy M., Ahmad K., Mahmood G., Trivedi R.C., (2008), "Municipal solid waste management in Indian cities", *Waste Management*, 28 (2), 459–467.

Sharma S., Dolan M., Park D., Morpeth L., Ilyushechkin A., McLennan K., Harris D., Thambimuthu K., (2008), "A critical review of syngas cleaning Technologies fundamental limitations and practical problems", *Powder Technology*, 180 (1–2), 115–121.

Sirois R., Calhoun J., (1985), "Retrofit Wood Gasification Systems for Boilers-Commercial Case Studies", *Energy from Biomass Wastes IX*, 17, Washington DC, USA, 28 January - 1 February.

Skov N., Papworth M., (1975), "The Pegasus Unit", E856-I0524, Pegasus Publisher Inc.

Standish N., Tanjung A., (1988), "Gasification of Single Wood Charcoal Particles in CO₂", *Fuel*, 67, 666-672.

Smith E., Shand R., (1987), "Design and Evaluation of Biomass Gasification Systems", *Biomass for Energy and Industry*, 4th EC Conference, 37, Orleans, France, 11-15 May.

Telford W., (1940), "Some notes on the Design of Mobile Gas Producer Units", *Journal of Industrial Engineering of Australia*, 12(11), 299-304.

Tookey W., (1984), "Suction Gas Development Fifty Years Ago", *Engineer*, 5028, 54.

Van S., (1981), "Gasification-The Process and Technology", *Energy from Biomass – 1st EC Conference*, 273, London, UK, 6-9 July.

Woods W., (1938), "Producer Gas Vehicles", *Institutions of Engineers Journal Australia*, 10(3), 448-450.

Wim R., (2008), "Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options", *Energy & Fuels*, 22, 9–15.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Malatya'da doğdu. 2009 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2013 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans programına başladı. 2015 yılının Aralık ayında Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühensiliği Bölümü'ne Araştırma görevlisi olarak atandı ve halen bu görevini sürdürmektedir.