

**DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA DÜŞÜK SICAKLIKLARDA
ORMAN ÜRÜNLERİNDEN OLUŞAN GAZ ÜRÜNLERİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Burcu BOYACI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2007

ANKARA

Burcu BOYACI tarafından hazırlanan DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA DÜŞÜK SICAKLIKLARDA ORMAN ÜRÜNLERİNDEN OLUŞAN GAZ ÜRÜNLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TOPAL
Tez Danışmanı Makina Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ali DURMAZ
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TOPAL
Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. S. Ferda MUTLU
Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih: 19/10/2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burcu BOYACI

**DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA DÜŞÜK SICAKLIKLARDA
ORMAN ÜRÜNLERİNDEN OLUŞAN GAZ ÜRÜNLERİN DENEYSEL
İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Burcu BOYACI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2007**

ÖZET

Tüm fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları güneş kökenlidir. Güneşte oluşan hidrojen fizyon reaksiyonları ile açığa çıkan enerji ısıma yoluyla uzaya yayılmakta, bu enerjinin dünyamıza ulaşabilen kısmı fotosentez ve metabolizma süreçlerinde rol oynamaktadır. Bitki yaprakları havadan karbondioksiti, yerden suyu ve mineralleri alarak bünyesindeki mineral kökenli katalizör etkisi ve güneş ışınımı enerjisi ile bitkisel hidrokarbonları (C_mH_n) üretmekte ve çevreye oksijen vermektedir. Bitkisel hidrokarbonlar, canlılar tarafından tüketilerek metabolizma süreçleri ile metabolik hidrokarbonlara ve yağa dönüşmektedir. Bitkisel ve hayvansal hidrokarbonlar çeşitli tektonik hareketler sonunda yer altında yüksek sıcaklık ve basınçlarda kalarak, milyonlarca yıl süren karbonizasyon süreçleri ile katı (kömür), sıvı (petrol) ve gaz (doğalgaz) fosil yakıtların oluşumunu sağlamaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtlar tekrar oluşum döngüsü milyonlarca yıl süren bir bakıma yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Yeniden oluşum döngüsü, çok daha kısa, yüz yılın altında, olan fotosentezle oluşan bitkisel hidrokarbonlar ve hayvansal metabolik hidrokarbonlardan oluşan enerji kaynakları ise yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilebilir. Bitkisel ve hayvansal, fosilleşmemiş artıklardan ya da

kalıntılardan oluşan bu enerji kaynaklarına genel olarak biyokütle denilmektedir.

Bu araştırmada, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Isıl - Güç laboratuvarının altyapısı ve bilgi birikimi kullanılarak çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu gibi biokütlelerin gazlaştırılması için dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırma sistemi tasarımlanmış ve imal edilmiştir. Başlangıçta gazlaşma da buhar kullanımı öngörölmüş, gerekli kaynak sağlanamadığı için, buhar kullanmaksızın gazlaştırma araştırmaları yapılmıştır. Gazlaştırma ısı kaynağı olarak yatak dış yüzeylerine konumlanan elektrikli ısıtıcılar ve biyokütlenin eksik yanma ısıları kullanılmıştır. Gazlaşma derecesini belirlemek için brüt gazlaşma verimi tanımlanmıştır. Sisteme verilen elektrik enerjisi dikkate alınmayarak, birim biyokütle başına üretilen sentetik gaz ısı değeri, birim biyokütlenin alt ısı değeri olarak kabul edilmiştir. Tez çalışması, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu üzerine yapılmış, yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğunun gazlaşma verimleri sırasıyla %26,1, %26,7, %9,9 bulunmuştur. Buradan da göröldüğü gibi biyokütle gazlaşma potansiyelinin en az yararlanılan gürgen ağaç kabuğu, en fazla yararlanılan gürgen ağaç talaşıdır. Bunun nedenleri incelenmiş, bu biyokütlelerde gazlaşma verimlerini artırılması ile ilgili yapılması gerekenler irdelenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.038
Anahtar Kelimeler : Gazlaştırma, akışkan yatak, biyokütle.
Sayfa Adedi : 136
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TOPAL

**EXPERIMENTAL INVESTGATION OF GASIFICATION PRODUCTS AT
LOW TEMPERATURE FROM WOOD WASTES IN A CIRCULATING
FLUIDIZED BED**

(M.Sc. Thesis)

Burcu BOYACI

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2007

ABSTRACT

All fossil fuels and renewable energy sources are solar based. The energy generated in the Sun from the fusion of hydrogen is emitted to the space continuously. The part of this energy, which reaches to the earth, plays an active role in photosynthesis and metabolism processes. Plant leaf produces plant hydrocarbons (C_mH_n) and emit oxygen to the environment by taking carbon dioxide from air, water and minerals from ground through photosynthesis of chlorophyll by using solar radiation. Plant hydrocarbons are converted to metabolic hydrocarbons and fat in food chains. Coal, petroleum and natural gas have been evolved hundreds of millions of years ago as plant and metabolic matter decomposed and converted at conditions of high temperature and pressure under the earth's surface into the hydrocarbon compounds that is called, in general fossil fuels. Since the period of formation of fossil fuels is in the order of millions, these energy sources are considered as non renewable. Biomass, on the other hand, refers to living and recently dead biological material, hydrocarbons, for which the period of formation is relatively very short, less than hundred years. Biomass is a renewable energy source.

In this study, a circulating fluidized-bed biomass gasification system has been designed and set up for investigating the gasification conditions and properties

of biomass wastes from pine and hornbeam chips and barks, by using the facilities of the Thermal Power Laboratory of Engineering Faculty, Gazi University. Due to some shortcomings, steam could not be used in gasification. The thermal energy for the gasification was obtained from the electrical resistance heaters located around the side walls of the bed, and from the heat, which is released in the incomplete combustion in the gasification process. To determine the degree of gasification gross gasification efficiency has been defined. The heating value of the produced gas has been considered as the lower heating value of the biomass, without taking the thermal energy from the electrical heater into account. The research has been conducted for pine and hornbeam chips and hornbeam barks and the gasification efficiencies have been determined as 26,1%, 26,7% and 9,9%, respectively. The possible reasons of inefficiencies in gasification process have been discussed and some methods recommended for increasing the efficiency.

Science Code : 914.1.038

Key Words : Gasification, fluidized bed, biomass.

Page Number: 136

Adviser : Assist. Prof. Dr. Hüseyin TOPAL

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarında danışmanlığımı üstlenen, tezimin gerçekleşmesi için gerekli çalışma ortamını sağlayan, anlayış ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin TOPAL'a, çalışmalarım süresince beni yönlendiren, her aşamada yardımını gördüğüm ve teorik ve deneysel çalışmalarında yardımını esirgemeyen Araş. Gör. Dr. Oğuzhan ERBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca sabrından ve desteğinden dolayı nişanlıma ve tüm yaşıntım boyunca göstermiş oldukları her türlü maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜRLER.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
3. ENERJİ, BİYOKÜTLE, BİYOKÜTLEDEN ENERJİ ÜRETİM SÜREÇLERİ VE AKIŞKAN YATAKLI GAZLAŞTIRICILAR.....	21
3.1. Enerji	21
3.1.1. Dünyada ve türkiye’de enerji alanında eğilimler	21
3.1.2. Dünyada fosil yakıt kullanımı.....	24
3.1.3. Türkiye’de fosil yakıt rezervleri ve kullanımı	26
3.1.4. Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan çevre sorunları	29
3.1.5. Güneş ışıma enerjisinin kısa erimde depolanan biçimini oluşturan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları	31
3.2. Biyokütle	36
3.2.1. Biyokütlenin tanımı	36
3.2.2. Biyokütle kaynakları.....	38
3.2.3. Dünyada’da biyokütle potansiyeli ve kullanılabilirliği	38

	Sayfa
3.2.4. Biyokütle enerjisi.....	41
3.2.5. Türkiye'nin biyokütle enerjisi potansiyeli	42
3.2.6. Tarım ve orman biyokütlesi	43
3.3. Biyokütleyle Uygulanan Dönüşüm Süreçleri	44
3.3.1. Termokimyasal süreçler.....	44
3.4. Akışkanlaşma ve Akışkan Yataklar	51
3.4.1. Akışkanlaşma	51
3.4.2. Tane gruplarının tanımı	55
3.4.3. Akışkan yatak sisteminin sınıflandırılması	56
3.4.4. Akışkan yatakları birbirinden ayıran özellikler.....	61
3.4.5. Akışkan yatak sisteminin temel elemanları	63
3.4.6. Akışkan yatak performansını etkileyen faktörler	64
3.5. Akışkan Yataklar ile İlgili Temel Kavramlar	65
3.5.1. Akış rejimi.....	65
3.5.2. Akışkan yatakta basınç düşüşü.....	67
3.5.3. Minimum akışkanlaşma hızı	67
3.5.4. Terminal hız	69
3.5.5. Minimum akışkanlaşma boşluk kesri	71
3.5.6. Dağıtıcı tasarımı	72
3.5.7. Taşınım serbest bırakma yüksekliği	73
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR	74
4.1. Dolaşımli Akışkan Yatak Test Sistemi	75
4.2. Ölçme ve Veri Değerlendirme Sistemi	79

	Sayfa
4.3. Deney Prosedürü	82
4.4. Deney Programı	83
4.5. Deney Çalışmaları İle İlgili Ön Deneyler.....	84
4.6. Kullanılan Numunenin Özellikleri.....	85
4.6.1. Boyut küçültme ve elek analizi	86
4.6.2. Nem tayini.....	86
4.6.3. Kül miktarı tayini	86
4.6.4. Uçucu madde miktarı tayini	87
4.6.5. Üst ısı değeri tayini.....	88
4.7. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Sonuçlar.....	88
4.7.1. Kullanılan hammaddenin özellikleri	88
4.7.2. Gaz Ürünü ısı değeri hesabı	89
4.7.3. Eksenel ve radyal yönde gaz bileşen profili.....	91
4.7.4. Farklı sıcaklık artışı ile gaz ürün eldesi	99
4.7.5. Gaz bileşenleri ile işletme sıcaklığı arasındaki ilişki.....	102
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	106
KAYNAKLAR.....	110
EKLER.....	116
EK-1 Çam Ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler	117
EK-2 Gürgen Ağaç kabuğu ile yapılan ön deneyler.....	120
EK-3 Gürgen ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler	123
EK-4 Yakıtların ve yatak malzemelerinin boyut analizi.....	125
EK-5 Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı.....	127
EK-6 Sistem hata analizi.....	134
ÖZGEÇMİŞ	

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Dünya fosil yakıt rezervleri	25
Çizelge 3.2. Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi	27
Çizelge 3.3. Türkiye birincil enerji kaynakları üretiminin yıllara göre değişimi	27
Çizelge 3.4. Türkiye birincil enerji kaynakları tüketiminin yıllara göre değişimi	28
Çizelge 3.5. Dünya’da biyokütle enerji kullanımı.....	34
Çizelge 3.6. Türkiye’nin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli	35
Çizelge 3.7. Dünyanın2000 yılındaki biyokütle potansiyeli	38
Çizelge 3.8. Dünya biyokütle potansiyeli	39
Çizelge 3.9. Dünyada biyokütle enerjisi kullanımı	40
Çizelge 3.10. Bazı biyokütle yakıtlarının elementer analizi	43
Çizelge 3.11. Termokimyasal dönüşüm ürünleri ve teknolojileri	45
Çizelge 3.12. Gazlaştırma sürecindeki temel tepkimeler.....	48
Çizelge 3.13. Biyokütlenin katalizörsüz buhar gazlaştırılmasından elde edilen gaz ürünler	49
Çizelge 3.14. Biyokütlenin katalitik buhar gazlaştırılmasından elde edilen gaz ürünler (Ni katalizör)	49
Çizelge 3.15. Değişik rejimlerde çalışan akışkan yatakların özellikleri.....	62
Çizelge 4.1. Baca gazında analiz edilen gazlar ve analiz yöntemleri	81
Çizelge 4.2. Deney programı.....	83
Çizelge 4.3. Çam talaşı, gürgen talaşı ve gürgen ağaç kabuğu elementer,kaba ve ısıl değer analizi	88
Çizelge 4.4. Gaz ürünü ısıl değer hesabı.....	91
Çizelge 4.5. Gürgen ağaç talaşı ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları	93

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.6. Çam ağaç talaşı ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları.....	94
Çizelge 4.7. Gürgen ağaç kabuğu ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları	95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı	22
Şekil 3.2. Enerji kaynaklarının kalan ömürleri.....	26
Şekil 3.3. Güneş ışıma enerjisinin fotosentez süreci üzerinden biyokütle olarak depolanması ve dünya karbon/oksijen döngüsü	37
Şekil 3.4. Termokimyasal süreçlerden elde edilen birincil ve ikincil ürünler	44
Şekil 3.5. Akışkanın yukarı akışında, akışkanlaşma kalitesi ve evreleri	51
Şekil 3.6. Yatak basınç düşüşünün gaz hızı ile değişimi, akışkanlaşma rejim Bölgeleri.....	52
Şekil 3.7. Akışkanlaşmış yatağın özellikleri	54
Şekil 3.8. Çevre koşullarındaki hava ile akışkanlaştırılmış partiküllerin Sınıflandırılması	55
Şekil 3.9. Kabarcıklı akışkan yatak sistemi şematik görünümü.....	58
Şekil 3.10. Dolaşımli akışkan yatak sistemi.....	59
Şekil 3.11. Akışkanlaşma tipleri; (I) sabit yatak, (II) min. akışkanlaşma, (III) homojen akışkanlaşma, (IV) kabarcıklı akışkanlaşma, (V) akışkan yataktan pnömatik taşınma, (VI) sluglaşma.....	66
Şekil 4.1. DAY deney düzeneği	76
Şekil 4.2. Baca gazı ölçme ve veri değerlendirme sistemlerinin şematik görünümü	80
Şekil 4.3. Mobil emisyon test laboratuvarı genel akış şeması	80
Şekil 4.4. Deney programı	83
Şekil 4.5. Fan hava debisinin (M_H) invertör frekansına (F) bağlı değişimi	84
Şekil 4.6. Ortalama yatak basıncının yatak kütle miktarı (M_Y) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (Çam ağaç talaşı ve silis kumu karışımı)	85
Şekil 4.7. Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) CO, O ₂ ve CH ₄ ; (b) Gürgen ağaç talaşı (150 gr), $T_{yatak} = 200$ °C	92

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) CO, O ₂ ve CH ₄ ; (b) Çam ağaç talaşı (150 gr), T _{yatak} = 210 °C	93
Şekil 4.9. Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) CO, O ₂ ve CH ₄ ; (b) Gürgen ağaç kabuğu (150 gr), T _{yatak} = 250 °C	94
Şekil 4.10. Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Gürgen ağaç talaşı (100 gr), (b) Silis kumu (1200gr).	96
Şekil 4.11. Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Çam ağaç talaşı (100 gr), (b) Silis kumu (1200gr).	97
Şekil 4.12. Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Gürgen ağaç kabuğu (150 gr), (b) Silis kumu (1200gr).	97
Şekil 4.13. Farklı sıcaklık artışı ile CO (hac. %) ‘in zamana göre değişimi.....	100
Şekil 4.14. Farklı sıcaklık artışı ile O ₂ (hac. %) ‘in zamana göre değişimi	100
Şekil 4.15. Farklı sıcaklık artışı ile CH ₄ (hac. %) ‘in zamana göre değişimi.....	101
Şekil 4.16. İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri	103
Şekil 4.17. İşletme sıcaklığı ile çam ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri	103
Şekil 4.18. İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç kabuğu gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri	104

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Dolaşımli akışkan yatak deney sistemi	76
Resim 4.2. Akışkanlaşma havasını sağlayan fan (a) ve inventör (b)	77
Resim 4.3. Varyak (10kVA'lık) (a) ve kelepçeli elektrikli ısıtıcı (b)	77
Resim 4.4. ASTM Normu elek serisi (a) ve data logger (b)	78
Resim 4.5. Yatak sıcaklığını (a) ve duvar sıcaklığını (b) ölçümünde kullanılan ısı çiftler	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
d_p	Partikül çapı (μm)
ρ_p	Partikül yoğunluğu(kg/m^3)
ρ_g	Gaz yoğunluğu(kg/m^3)
μ_g	Gaz viskozitesi (N.s/m^2)
C_d	Sürüklenme katsayısı
H_{mf}	Yatak Yüksekliği
U_t	Ortalama terminal hız(m/s)
U_{mf}	Ortalama minumum akışkanlaşma hızı (m/s)
U_o	Gaz hızı(m/s)
ε_{mf}	Minumum boşluk kesri
A_b	Kanal geçiş kesiti
L_{mf}	Minumum yatak yüksekliği
ΔP	Yatak basınç düşümü (N / m^2)
G_s	Katı dolaşım oranı ($\text{g/m}^2 \text{ s}$)
Re	Partikül Reynold sayısı
W	Yatak yüzücü ağırlığı
H_s	Statik yatak yüksekliği
Ar	Argon sayısı
Φ_S	Şekil Faktörü

Kısaltmalar	Açıklama
DAY	Dolaşımli Akışkan Yatak
IEA	International Energy Agency
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol

Kısaltmalar**Açıklama****TSBY**

Taşınım serbest bırakma yüksekliği

ETKB

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişmenin kaynağı olan enerji giderek yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle kullanılabilir enerji kaynaklarının en verimli biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir. Enerji gereksiniminin karşılanmasında en büyük payı fosil yakıtlar almaktadır. Ancak fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle insanlar yeni enerji kaynakları aramaya başlamışlardır. Yeni enerji kaynakları ve bunları kullanılabilir enerjiye dönüştürme yollarının araştırılması çabaları, devlet kuruluşları ve özel sektör olarak dünya devletlerini çok büyük harcamalar yapmaya zorlamaktadır.

Uzun vadeli çalışmalarla birlikte özellikle son 15 yıldır büyük ölçüde artış gösteren petrol, doğalgaz fiyatlarıyla petrol ve doğalgazı olmayan ülkelerde dışarıdan sağlamak yerine kendi kaynaklarıyla daha düşük kalorili yakıtlardan enerji üretimini zorunlu kılmıştır.

Enerji üretimine yönelik yeni kaynaklar arayan ve diğer yandan mevcut yakıtlardan en iyi biçimde yararlanmayı amaçlayan ülkeler, bir yandan düşük nitelikli yakıtları, enerji ekonomisi ve hava kirliliğinin denetimi yönünden uygun biçimde yakmaya veya gazlaştırmaya çalışırken, diğer yönden de çeşitli atıkları (evsel, endüstriyel v.b. atıklar) enerji girdisi olarak kullanma yönüne gitmektedir.

Dünyamızda enerji gereksinimi her yıl yaklaşık % 4-5 oranında artmaktadır. Buna karşılık bu gereksinimi karşılayan fosil-yakıt rezervi ise, çok daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. En iyimser öngörüler bile, en geç 2030 - 2050 yılları arasında petrol ve doğalgaz rezervlerinin büyük ölçüde azalacağı ve hızlı artan gereksinimi karşılayamayacağı duruma gelmesi beklenmektedir. Kömür rezervlerini 200-250 yıl içerisinde tükeneceği tahmin edilmekte, ancak biyokütlenin sonsuza kadar devam edeceği bilinmektedir.

Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların iklim değişikliğine yol açmasının nedeniyse, yanma sırasında ortaya çıkan CO₂ ve metan gibi sera gazlarının

bünyelerinde ısı tutma özelliğine sahip olmalarıdır. Güneş, gün doğumundan batımına kadar atmosferin içine ısı ve ışığını verir. Doğal döngünün devamı için, bu ısının tekrar uzaya aktarımı gerekmektedir. Oysa fosil yakıtların neden olduğu sera gazları, ısının bir kısmının atmosferde tutulmasına yol açar. Böylece dünya, ısınmaya ve iklim değişmeye başlamaktadır.

Aslında günümüzdeki tüm fosil ve yenilenebilir enerji kaynakları güneş kökenlidir. Güneşte oluşan hidrojen fizyon reaksiyonları ile açığa çıkan ısı enerjisi radyasyon biçiminde uzaya yayılmakta, bunlardan bir bölümü de milyonlarca yıl fotosentez ve metabolizma süreçlerinin yoğun olduğu dünyamıza ulaşmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtlar tekrar oluşum döngüsü yüzbinlerce yıl süren bir bakıma yenilenemeyen bir enerjidir. Yeniden oluşum döngüsü, yüzyılın altında olan fotosentez ve metabolik hidrokarbonlardan oluşan enerjiler yenilenebilir enerji olarak isimlendirilebilir.

Ayrıca fosil ve nükleer yakıtlara alternatif doğal enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalar sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kavramlarını da gündeme getirmektedir. Yaşamın sürdürülebilirliği için kaynakların sürdürülebilir olması yeterli değildir. Ekolojik denge için kaynakların yenilenebilir olması gerekmektedir. Bir şeyin sürekliliği sürdürülebilir olduğunu göstermez, sürdürülebilirlik bütün açısından ancak yenilenebilir olursa mümkündür. Bu nedenle enerji sistemlerinin sürdürülebilir, enerji kaynaklarının yenilenebilir olması gerekir.

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanır. Bugün yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar, yakılınca biten ve yenilenmeyen enerji kaynaklarıdır. Oysa güneş kaynaklı hidrolik (su), güneş ısı, rüzgar, biyokütle ve jeotermal gibi doğal kaynaklar yenilenebilir olmalarının yanı sıra temiz enerji kaynakları olarak karşımıza çıkar.

Yenilenebilir biyokütle ve biyokütleden elde edilen yakıtlar çevresel yarar sağlaması nedeniyle günümüz enerji kullanımında kolaylıkla fosil yakıtların yerine geçecektir. Biyokütle yenilenebilir bir kaynak olmasıyla tükenmekte olan fosil yakıtların

yanında sürdürülebilir küresel enerjinin önemli bir unsurudur. Buna ek olarak emisyonlar azaltılıp, kırsal ekonominin gelişimi ile yeşil endüstriyi desteklemektedir.

Bu amaçla, tasarımılanan bir laboratuvar ölçekli dolaşımli akışkan yatak deney düzeneğinde yapılan deneysel çalışmada, farklı orman ürünleri kullanılarak gazlaştırma süreci incelenmiş ve brüt gazlaşma verimi hesaplanmıştır. Yakıt olarak kullanılan orman ürünleri farklı parçacık boyutlarında hazırlanarak deneyler yapılmış, farklı sıcaklık ve hava hızlarında yapılan analizlerle ortaya çıkan yapay gaz içeriği analiz edilmiştir. Başlangıçta gazlaşma da buhar kullanımı düşünülmüş, ancak gerekli kaynak sağlanamadığı için, buhar kullanmadan gazlaştırma araştırmaları yapılmıştır. İlgili laboratuvar da biyokütle gazlaştırma çalışmaların da bir başlangıç olan bu çalışma ileride mali kaynak sağlandığında önemli bir kaynak sağlamış olacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Fosil kökenli enerji kaynaklarının çevre üzerinde yarattığı olumsuz koşullar nedeni ile doğamız kirlenmekte, pek çok bitki türü yok olmakta, ormanlar çöl olmakta ve büyük miktarda sera gazı atmosfere atılmaktadır. Ulusal ve uluslararası enerji problemleri yaşamın parçası haline gelmektedir.

Fosil ve nükleer yakıtlara alternatif doğal enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalar sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kavramlarını da gündeme getirmektedir. Bugün yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar, yakılınca biten ve yenilenmeyen enerji kaynaklarıdır. Oysa yenilenebilir enerji kaynakları, temiz enerji kaynakları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bitkiler gelişirken, fotosentez sırasında atmosferden aldıkları karbondioksitin (CO_2) karbonunu bünyelerinde biriktirip biyokütleyi oluştururken oksijeni dışarıya vermektedirler. Bu bitkiler yakıldığında ise CO_2 yeniden atmosfere verilmektedir. Bu nedenle biyokütle yakılmasına "sürdürülebilir biyokütle enerjisi kullanımı" adı verilmektedir. Hızlı büyüyen bitkilerle enerji ormanları oluşturup, bir yandan yetiştirip diğer yandan gazlaştırılarak sentetik gaz elde edilmektedir.

Türkiye’de enerji ormancılığı hızla geliştirilmesi gereken konulardır. Enerji ormancılığı için uygun alanın yaklaşık %15 kadarı değerlendirilmiş durumdadır ama %85’i beklemektedir. Bu konuda gerçekleştirilebilecek büyük bir potansiyel bulunmaktadır. Türkiye’nin enerji ormanları konusunda başlattığı pilot çalışmalar vardır.

Li ve ark.’a göre çevresel seçeneklerle ekonomik ve teknik açıdan en iyi şekilde oluşturulan sistem ile testere talaşı kullanılarak analizler yapılmıştır. Biyokütle gazlaştırılması, pilot ölçekli dolaşımli akışkan yatak gazlaştırıcıda incelemeler yapılmakta ve 700-850 °C sıcaklık ile 16-45 kg/h debide çalışmaktadır. Süspansiyon yoğunluğu göz önünde bulundurarak uygun teknoloji ile kimyasal ve enerji analizleri yaparak farklı sıcaklık, hava/oksijen oranlarında inceleme yapılmıştır. Pilot ölçekli

sistemde yapılan ölçümler, süspansiyon sıcaklık ve O/C oranında bağlı olarak üretilen gaz karışımı incelenmiştir [1].

Katı artıklar için küçük boyutlarda gazlaştırma sistemi geliştirilerek testler uygulayan Min ve ark., STAR-MEET adını verdikleri yeni bir gazlaştırma sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem ile yüksek sıcaklıktaki buhar/hava iyileştirilmesi yoluna gidilmiş ve sabit yataklı sıvılaştırıcı ile kombine bir sistem oluşturulmuştur. Deneysel sonuçların kullanımı ile odun parçaları ve kabukları yakıt olarak kullanılmış olup elde edilen sıvılaşmış gaz (CO_2 , H_2) içindeki katranın ayrışımı yapılmıştır [2].

Bir diğeri ise, kullanılan biyokütle ile sabit ve akışkan yatak gazlaştırıcı da gazlaştırma işleminin karşılaştırmasını Warnwcke ve ark. yapmış olduğu çalışmadır. Bu çalışmanın amacı, reaktör tasarımları için bilgi vermek, ekonomik ve çevresel açıdan sistemler arasında karşılaştırma yapmaktır. Bunun yanı sıra kullanılan enerji ve materyalde göz önünde tutulmuştur. Yapılan çalışma ile reaktör çeşitlerinin üstünlükleri belirlenmekte ve yararlı analizler önerilmektedir. Sınıflandırma yapmak için en çok üzerinde durulması gereken ölçütler; kullanılan materyal, kullanılan enerji, çevre ve ekonomi olarak belirlenmiştir [3].

Jennen ve ark. araştırması, dolaşimli akışkan yatakta odun parçacıklarının gazlaştırma işleminin modellenmesi üzerine yapılmıştır. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan atmosferdeki CO_2 miktarının çoğalmasından ve enerji kaynaklarının gün geçtikçe gereksiniminin artmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına gerek duyulmaktadır. Bu nedenle dolaşimli akışkan yatak sistemi seçilerek odun parçacıklarının gazlaştırılması üzerine çalışılmıştır. Üretilen gazla ısı ve güç fabrikalarında kullanımı sağlanmaktadır. Pek çok ölçüm ve test yapılarak gazlaştırma süreci matematiksel olarak tanımlanmıştır [4].

Matematiksel modelleme, bir boyutlu akış ele alınarak katı ve gaz akışlarının kütle ve enerji denklemi belirlenmiştir. Tüm akışkan parametreleri, gazlaşma tepkimelerinin kinetiği ve sıcaklıklar hesaplanarak matematiksel modelleme yapılmıştır [4].

Akışkan yatak reaktörde çalışan Sadaka ve ark., hava/buhar ile biyokütle (saman sapı) gazlaştırma performansı iki fazda incelenmiştir. Kütle ve enerji denklemleri elde edip Gibbs serbest enerjisini minimize ederek gaz mol kesri hesaplanmıştır. Bununla beraber kütle – ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Modelleme yapılırken akışkan yatak 3 bölüme ayrılır. Modelde hidrodinamik, termodinamik ve transfer özellikler incelenmiş ve çeşitli girdiler (akışkanlaşma hızı, buhar debisi, biyokütle/buhar oranı...) bilgisayar programında belirlenmiştir [5].

Dolaşımli Akışkan yatak gazlaştırıcı modellemesi üzerine Corella, ve Sanz ve ark. çalışmışlardır. Kütle – ısı denklemi ve hidrodinamik göz önünde bulundurularak model, kinetik denklem üzerine kurulmuş ve yirmi farklı tepkime oluşmuştur. Katran oluşumu ve giderimi üzerine çalışılan model, kuramsal bir yapıya sahiptir. Ancak bazı bölgeler için veri alınamamasından dolayı birkaç varsayımla çalışılmıştır. Sistemdeki hidrodinamik özellikler pilot ve ticari boyutlardaki dolaşımli akışkan yataklarda incelenmiş ve yatak sıcaklığı 750–980 °C aralığında çalışılmıştır [6].

Bir diğeri ise Liu ve ark. dolaşımli akışkan yataktan çıkan NH_3 ve HCN salınımlarının belirlenmesi üzerine yaptığı çalışmadır. Sistemde kırk kimyasal tepkime belirlenmiş ve bunun yirmi sekiz tepkimesi yakıt-azot tepkimesidir. Uçucu azotun NH_3 , HCN ve N_2 'den oluştuğu varsayılmıştır. Tepkime oranları literatürden alınarak biyokütlenin gazlaştırılması üzerine çalışılmıştır. Literatürde bu deneye benzer deney sonuçları ile karşılaştırma yapılmıştır [7].

Hızlı akışkanlaşma rejimindeki sistemlerde hız profillerini inceleyen Haris ve ark., izokinetik örnekleme ile serbest bölgede yukarı doğru gaz ve katı hızlarını, duvara yakın bölgede ise aşağı doğru katı hızlarını belirlemiştir. Bu çalışmanın amacı, kolondaki akışı etkileyen deneysel parametreleri belirlemektir. Birçok araştırmacı kolondaki katı derişimlerinin eş dağılımlı olarak genişlemediğini ve duvar – merkez bölgeleri arasında güçlü bir iç karışım mekanizması olduğunu belirlemiştir [8].

İspanya'da zeytinyağı üretimi dünyanın dörtte birini karşılaması nedeniyle çıkan atığın kullanımı üzerine García – Ibañez ve ark. yaptığı çalışma da, pilot ölçekli

300kW_{th} dolaşımli akışkan yatak kurulmuş, zeytinyağı atığının gazlaştırılması üzerine incelemeler yapılmıştır, İspanya’da yaklaşık 2 milyon ton/yıl zeytinyağı üretilmektedir [9].

Enerji üretimi için termokimyasal dönüşümünün en avantajlı süreci dolaşımli akışkan yatak olarak düşünülmüştür. Yakıt olarak zeytinyağı atıkları kullanılarak gaz üretiminde gaz bileşimlerinin analizleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde 3,8 MJ/Nm³ gaz ısı değeri elde edilmiş ve en düşük sıcaklık 780 °C olarak belirlenmiştir. Karşılaşılan en önemli sorun külün düşük sıcaklıkta ergimesi olmuştur [9].

Lv ve ark. yaptığı çalışma, biyokütlenin hava – buhar kullanarak dolaşımli akışkan yatakta gazlaştırılması işlemidir. Yapılan deneylerde reaktör sıcaklığının etkisi, buhar – biyokütle oranı (S/B), denklik oranı (ER), ve biyokütle boyutuna bağlı olarak gaz bileşimleri, gaz ürün, buhar ayrışımı, alt ısı değeri, karbon dönüşüm verimi incelenmiştir. Yatak malzemesi olarak silis kumu (0,2-0,3 mm) ve yakıt olarak da çam ağaç talaşı (0,6-0,9 – 0,45-0,6 – 0,3-0,45 – 0,2-0,3 mm) kullanılmıştır. Biyokütlenin 1,43 ile 2,57 Nm³/kg aralığında ve alt ısı değerin 6741 – 9143 kJ/Nm³ aralığında incelemeler yapılmış ve yapay gazda farklılıklar belirlenmiştir. Bunun yanı sıra biyokütleyi hava veya buhar ile gazlaştırma işlemleri karşılaştırılmıştır [10].

Biyokütlenin gazlaştırma tipine bağlı olarak ürün içeriğinin incelenmesinin atmosferik ve kabarcıklı akışkan yatakta çalışmalar yapılmıştır. Javier Gil ve ark. gaz özelliğini ve ürün dağılımını dikkate alarak deneyler yapmışlardır. Biyokütle, odun (çam ağacı) parçacıklarının küçültülmesi ile oluşturulmuştur. Hava, saf buhar ve buhar – O₂ karışımını gazlaştırma parametreleri olarak belirlenmiş ve bu parametreleri dikkate alarak incelemeler yapılmıştır. Gazlaştırma parametrenin tipine ve miktarına bağlı olarak gaz ürün içerisindeki H₂, CO, katran vb. içerikleri belirlenmiştir. Önceden yapılan deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [11].

Biyokütlenin akışkan yatakta gazlaştırma işlemi ile elde edilen külün kimyasının incelenmesi üzerine çalışılan bu raporda kül – yatak etkileşimi ve ergimiş kül kimyası öngörülleri yapılmıştır. Maria Zevenhoven – Onderwater ve ark. yaptığı

Çalışma ile 4 çeşit biyokütle kullanılarak külün kimyası modellenmeye çalışılmış, bunun için basınçlı akışkan yatak gazlaştırıcı kullanılmıştır. Yakıt olarak, okalıptus, İşkandinavya'daki odun artıkları, kamış gibi biyokütleler belirlenmiştir. 600 – 900  C sıcaklık aralığında ve 10 bar basınçta çalışılmış, termodinamikten yararlanılarak çok fazlı ve çok bileşenli denklik hesaplamaları yapılmıştır [12].

Sistemdeki yığışmayı denetleyebilmek için öncelikle yığışmaya izin verilmiştir. Gerçekte düşük sıcaklık ve iyi karışım nedeniyle akışkan yatak tercih edilmiştir. Ancak bu sorunun tamamen ortadan kalktığı söylenemez [12].

Aynı zamanda ilgili süreçlerde denklemler kurularak deneysel olarak SEM/EDX analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. TPS ve KTH teknolojilerinde basınç, sıcaklık ve diğer değişkenlerle birlikte iki analiz sonuçları belirlenmiştir [12].

Elde edilen verilerle kl kimyası ortaya koyulmuştur. Diğer verilerle karşılaştırıldığında basınçlı dolaşımlı akışkan yataktan elde edilen kül miktarı daha fazla olduğu belirlenmiştir [12].

Bir nceki yapılan çalışmaya ek olarak yapılan çalışma olup aynı düzenek üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneyde, Zevenhoven – Onderwater ve ark. alışmıştır. Bu çalışmada, 4 farklı biyokütle kullanılmış ve önce yapılan (Part I) deneylerle karşılaştırılmıştır. Analizler için SEM/EDX analizörü kullanılarak incelemeler yapılmıştır [13].

Franco ve ark. deneysel çalışması, biyokütlenin buharla gazlaştırma işlemi etkileri incelemişlerdir. Bu işlem atmosferik akışkan yatakta gerçekleştirilmiş, 3 tip orman ürünü kullanılmıştır: am ağacı, Okalıptus, Pırnal [14].

Deneylerde enerji dönüşümü, gaz bileşimleri, ısıl değer ve gaz ürünler belirlenmekte sıcaklık, buhar/biyokütle oranı, biyokütle özellikleri arasında ilişki kurulmaktadır. Sonuçlardan elde edilen verilere göre en uygun işletme koşulları, sıcaklığın 830  C dolaylarında ve buhar/biyokütle oranının 0,6 – 0,7 olduğu anlaşılmıştır. Çünkü

hidrojen içinde daha zengin, hidrokarbon içerisinde daha fakir gaz olduğu ve katran ürettiği görülmüştür [14].

Glicksman ve ark. bir çalışmalarında DAY'lar için boyutsal ilişkileri araştırmışlardır. Mevcut olan sıcak model DAY'ın soğuk ölçekli modeli yapılmıştır. Eksenel boşluk profili ve basınç dalgalanmaları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar iki kolon arasında oldukça iyi dinamik benzerlik göstermekle beraber çıkış bölgesinde bir takım sapmalar olduğunu göstermektedir. Geometrik çıkış etkilerini, gaz hızının etkisini incelemişlerdir [15].

Dowaki ve ark. yaptığı çalışma, biyokütle enerjisinin bıçkıhanede kullanımı üzerinedir. Biyokütle enerji sistemlerinin ortama yayılan CO₂'nin azaltılması ve kaynakların etkili kullanımı açısından bakıldığında geleneksel sistemlere göre daha üstün oldukları düşünülebilir. Bununla birlikte, bu sistemlerin enerji maliyeti, fosil yakıtlı sistemlerine göre daha fazladır. Ayrıca, yakın gelecekte daha çevresel iş modelleri kurulması beklenmektedir. Bu çalışmada bir bıçkıhane içerisindeki biyokütle enerji sisteminin çevresel ıslahı ve ekonomisi, gazlaştırma ile üretim sistemi, yakıt hammaddesi olarak kırıntı odun kullanan doğrudan yakma sistemi ile karşılaştırılarak analiz edilmektedir. Özellikle üretilen elektriğin zarar edilmeksizin satılabileceği en düşük fiyat hesaplanmaktadır (Bu enerjinin alıcısı olduğu varsayımı ile). Bu konuda, enerjinin kullanılabilirliği açısından Japonya'da yürütülmekte olan çalışmalar (Renewable portfolio Standard) bulunmaktadır. Sonuç olarak, biyokütle enerji sistemleri konusunda yatırımlar yapıldığında gazlaştırma ile üretimden elde edilen elektriğin maliyeti 7,7 – 35,7 yen/kWh olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, yatırım maliyeti %10 azalırsa bu fiyat 7,4 yen/kWh'a kadar düşürülebilmektedir [16].

Gazlaştırma süreciyle İspanya'nın biyokütle artıkları kullanılarak enerji üretimi üzerine yapılan bir diğer çalışma ise, Ganan ve ark. enerji potansiyeli analizidir. Pirinç kabuğu, sert kabuklu yemişlerin kabukları, çam ve okaliptus gibi belirli maddelerin gazlaştırma sürecinde elde edilen sonuçlar hesaplanırken kaba analiz,

elementer analiz ve ısıl değerin hesaplanması, maddelerin karakterize edilmesinde önem taşımaktadır [17].

Hesaplama süreci her grup için biyokütle gazlaştırma sürecini içine alarak birkaç deneysel işlemden oluşmaktadır. Her faz için elde edilen ürünler dört artık madde için hesaplanmıştır. Bu çalışma katı ve gaz fazları merkezinde toplanmıştır. Ürün aralığı kullanılan artığa göre katı faz için %9 – 16, sıvı faz için %5 – 13 ve gaz fazı için % 75 – 83 aralığında değişmektedir. Standart koşullarda yapılan ölçümlere göre üretilen gaz yoğunluğu 1,6 – 1,9 m³/kg arasında değişmektedir [17].

Artıkların enerji potansiyeline dengi olan verileri elde etmek için gaz fazın nicelik ve nitelendirme deneyleri gaz kromatografi yardımıyla yapılmış ve elde edilen sonuçlarda artığın cinsine bağlı olarak 3 ve 4,5 MW arasında bir ısıl güç elde edilebileceği belirlenmiştir [17].

Branca ve ark. yaptığı çalışmada, silindirik odunların sabit yataklı ters akışlı gazlaştırıcıda uygun koşullar için kurutma karakteristiği üzerinedir. Çam ağacı silindirlerinin (40 mm çapında) kuruması, sabit yataklı, yukarı çekişli gazlaştırıcının kuruma bölgesi içerisinde tekrarlama koşulları için deneysel olarak araştırılmıştır (nominal hızlar 0,4 – 1,2 m/s ve en yüksek hava sıcaklığı 435 – 600 K). Sıcaklık profilleri, ısınan yüzeylerden içeriye doğru yavaşça yayılan bir kuruma bölgesi göstermektedir. Halbuki küresel kuruma oranları, nemin ince yüzey tabakası boyunca buharlaşması ve örnek ısıtmasına karşılık gelen iki en yüksek değer vermektedir. Tekrarlama eğilimleri kuruma zamanları dış ısıtma koşulları ve başlangıç nem kapsamına bağlı olarak bilinmektedir. Niceliksel bakış açısıyla, % 50 nem miktarı gözlenmesi parçacık ısıtma süresini 3 – 5 kat artırmaktadır. Bu ölçümler sonucunda, gazlaştırıcı davranışının daha karmaşık matematiksel anlatımları içerisinde tek parçacık etkisini araştırmak için kullanılabilecek öngörüler ve ağaç içerisindeki nemin buharlaşmasının basitleştirilmiş modeli elde edilmiştir [18].

Karbondioksit ve buhar ile gazlaştırılan biyokütle kokunun öz tepkime oranı üzerine Klose ve ark. yaptığı çalışmada kullanılan yakıt kayın ağacı ve palmye kabuğudur.

Gazlaştırma sırasında ısı ve kütle taşınımı sınırlamalarından kaçınmak için, kok miktarı, partikül büyüklüğü ve debisi eş sıcaklıklı deneyler içerisinde değiştirilmiştir. İçsel rejimde farklı kısmi basınçlar ve tepkime sıcaklıklarında elde edilen deneysel bilgileri karşılaştırmak için Langmuir – Hinshelwood tipi oran ifadesi uygulanmıştır. Bundan başka sıcaklık programlı desorpsiyon tekniği ile biyokütle koklarının etkin yüzey alanları, dönüşüm derecesinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre tepkime oranı, etkin yüzey alanı ile orantılıdır. Benzer tepkime sıcaklıklarında, biyokütle kokunun ve kömür kokunun yüzeye bağlı tepkime oranları karşılaştırılabilmektedir [19].

Wander ve ark. yaptığı çalışma, odun talaşının gazlaştırma sürecinde üzerine olup en iyi teknik, ekonomik ve çevresel seçenekleri sunabilmek için bıçkıhane artıklarının kullanımı dikkatli bir şekilde analiz edilmelidir. Hangi teknolojinin daha uygun olduğunun belirlenebilmesi için, bıçkıhanenin enerji gereksinimlerine ek olarak, üretim artıklarının karakterize edilmesi (nicelik, çeşit, kimyasal ve enerjik analiz) önem taşımaktadır. Bu çalışma, odun gazlaştırma teknolojisinin uygun bir şekilde arıtım yapıldığında, içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek bir gaz üretebileceğini göstermektedir. Odun artıkları gazlaştırma sürecinin performansını değerlendirmek için, küçük, sabit yataklı, aşağı çekişli, tabakalı ve üstü açık bir gazlaştırıcı kurulmuştur. Kapasitesi 12 kg/h olan bu gazlaştırıcı, kendisine has bir özellik olan iç gaz döngüsüne sahiptir. Gazlaştırma tepkime sıcaklığını artırmak için üretilen gazın bir kısmını yakabilmektedir. Deneylerde ölçülen parametreler kullanılarak, gazlaştırıcının kütle ve enerji dengesi araştırılmış, elde edilmiş ve kütle değişim verimleri hesaplanmıştır [20].

Ağaç yüzeylerindeki bozulma ve kuruma yayılmasının modellenmesi üzerine A. Galgano ve ark. bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, tepkimeye girmeyen nüve kuruması yaklaşımı kullanılarak sınırlı tepkime oranı ve sabit sıcaklıkta, son derece ince odun yüzeyi boyunca nemin buharlaşmasının ısı olarak denetlendiği kabulüyle, nemli odunun bozunması modellenmiştir. Tek boyutlu, yarı sürekli (kömür tabakası boyunca) eşitlikler, aynı zamanda taşınım, dolanım ve ışınlama ısı aktarımını ve kömür, kuru odun ve nemli odunun farklı fiziksel özelliklerini de hesaba

katmaktadır. Giriş parametreleri için gerçekçi değerlerin kullanımı, 0,04m kalınlığındaki kayın ağacı odunu için ön görülen ve ölçülen değerlerin, kabul edilebilir uygunlukta olmasıyla sonuçlanmıştır. Bu model aynı zamanda gazlaştırma/yanma modellerinde sıkça yapıldığı gibi, odunun bozunması ve nemin buharlaşmasının birbirine eş yüzeylerde olduğu, yüksek nem içeriğine sahip ve şiddetli ısı etki altındaki kalın örnekler için yeterli kesinlikle uygulanabilir [21].

Rao ve ark. yaptığı çalışma, şehirden toplanan artıklardan elde edilmiş yakıtın, ters akışlı, sabit yataklı gazlaştırıcı ile hava üfleli gazlaştırma çalışmaları yapılmış ve gazlaştırıcının diğer biyokütle artıklardan türetilmiş yakıtlarla kullanımı sonucu elde edilen kütle ve enerji performans özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Gazlaştırıcının kütle dönüşüm verimliliği ve soğuk gaz verimliliği gözlenmiş ve sırasıyla % 83 ve % 73 olduğu bulunmuştur (toplanan artıklardan türetilmiş yakıt topakları için). Üretilen gazın katran içeriğinin ~ % 45 olduğu gözlenmiştir (bu değer odun talaşından oluşmuş gazın katran içeriğinden daha azdır). Farklı yakıtların gazlaştırılması sürecini tanımlamak için, deneysel stokiyometrik eşitlikler geliştirilmiştir. Süreç içerisindeki çeşitli verimsizlik ve tersinmezliklerin büyüklüklerini hesaplamak için, termodinamik analiz yapılmıştır. Gazlaştırma süreci içerisinde yer alan çeşitli tersinmezliklere bağlı olarak, artıklardan türetilmiş yakıt için, ekserji veya kullanılabilir enerji girdisinin % 27'sinin sistem içerisinde dağıldığı hesaplanmıştır. Soğuk gaz veriminin artıklardan türetilmiş yakıtlar için en yüksek değerde olduğu (% 56) ve onu soya bitkisi sapı ve odun talaşının izlediği gözlemlenmiştir. Süreç, sonucu açığa çıkan enerjinin % 2-3'ünün kullanılabilir enerji olduğu ve duyulur ısı enerjisi formunda olan ısı enerjinin toplam enerjinin % 6-7'sini oluşturduğu hesaplanmıştır [22].

Asadullah ve ark. yaptığı bu araştırmada, alışılagelmişin dışında katalizörlerle birlikte kullanılan bir çift yataklı gazlaştırıcı sistem ile hint keneviri, pirinç samanı ve bıçkı artıkları gibi çeşitli biyokütlelerin gazlaştırılmasından yapay gaz üretimi çalışılmıştır. Gazlaştırıcıya 150 mg/dk'lık debide besleme yapılmış ve 823-923 K sıcaklık aralığında 3 g katalizör kullanılmıştır. Karbonun gaza dönüşümü ve CO, H₂, CH₄ gibi yararlı gaz ürünlerin oluşumu, biyokütle özelliklerine bağlıdır. Biyokütleler

yararlı gaz oluşturma miktarlarına göre büyükten küçüğe doğru sedir ağacı, hint keneviri ağacı, şeker kamışı küspesi, pirinç sapının şeklinde sıralanabilir. Yüksek kül kapsamına (%22,6) bağlı olarak pirinç sapının gazlaştırılmasının tek yataklı sistemlerde görece olarak zor olmasına rağmen, bu işlem çift yataklı reaktör sistem içerisinde mümkün olmaktadır. Rh/CeO₂/SiO₂ katalizörün çift yataklı sistemde kullanılmasıyla daha yüksek gaz dönüşümü sağlanmış ve CO+H₂+CH₄ oluşumu artmıştır. Sedir ağacı gazlaştırılmasında katalizör yüzeyi üzerinde az miktarda kok oluşmasına rağmen, 823 K'de katran oluşmamıştır. Bununla birlikte diğer biyokütlelerin kullanımında (özellikle pirinç sapı kullanımında) katalizör yüzeyi üzerinde önemli miktarda kok ve katran oluşmuştur (923 K) [23].

Rh/CeO₂/SiO₂ katalizör ve akışkanlaştırılmış yatak reaktör kullanarak, biyokütle gazlaştırılmasından yapay gaz üretimi üzerine Tomishige ve ark. araştırma yapmıştır. Bu çalışmada, biyokütlenin geleneksel yöntemlerden (katalizörsüz, dolamitli, piyasa tipi buharı ıslah eden Nikel katalizörlü) daha yüksek enerji verimliliğinde gazlaştırılması için yeni katalizörler geliştirilmiştir. Selülozlu biyokütlenin Rh/CeO₂/SiO₂ katalizörler ile gazlaştırılmasından elde edilen sonuçlardan, katran oluşumunun ve katı karbon yanmasının ıslah edildiği bulunmuştur. Rh/CeO₂/SiO₂ katalizör aynı zamanda, sedir ağacının hava ile gazlaştırılması ve sıcaklıkla buhar ıslahı için denenmiştir. Sonuç olarak; Rh/CeO₂/SiO₂'nin kullanımıyla Nikel katalizöre göre daha fazla yapay gaz oluşmuştur. Bundan başka tek ve çift yataklı reaktörlerin performansı karşılaştırılmıştır. Tek yataklı reaktör sedir ağacının gazlaştırılmasında etkilidir [24]. Ancak pirinç sapı gazlaştırılmasında gözlenen deaktivasyon nedeniyle uygun değildir. Aynı zamanda akışkanlaştırılmış çift yataklı reaktör ve Rh/CeO₂/SiO₂ katalizör kullanılarak, pirinç sapı, hint keneviri ağacı, şeker kamışı gazlaştırılması araştırılmıştır. Özellikle pirinç sapı gazlaştırılmasında, katalizör stabilitesi akışkanlaştırılmış çift yataklı reaktör kullanımıyla net bir şekilde artmıştır [24].

Heller ve ark. yaptığı çalışma, söğüt ağacı biyokütlesinden elektrik üretiminin çevresel yararları ve yaşam enerji döngüsü üzerinedir. Biyokütle, sıkı emisyon düzenlemeleri ve yenilenebilir Portfolio Standardı ile birlikte ABD'deki elektrik

üretiminde önemli bir rol oynaması beklenen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Kuzey Amerika’da artan biyokütle enerjisi ve yakıt kaynağı olarak söğüt ağacı biyokütlesi enerji ürünleri geliştirilmiştir. Söğüt ağacı biyokütlesinin elektrik enerjisine dönüşümü açısından, söğütün bütün ömrü içerisindeki enerji ve çevresel performansının karakterize eden bir hayat döngüsü envanteri sunulmuştur. New York’ta yapılan deneyin tezahürü olan cetvel kullanarak söğüt biyokütlesi üretim modeli geliştirilmiştir. Mevcut kömür yakan üretim tesislerinde odun artıklarının bütünleyici kullanımını içeren birlikte yanma operasyonlarına benzemesi beklenen senaryolar sunulmuştur. Biyokütlenin % 10’luk birlikte yanma oranında, sistemin net enerji oranı (üretilen enerji/tüketilen toplam fosil yakıt ısı değeri) % 8,9 artar ve net global ısınma potansiyeli % 7-10 arasında azalır. Net SO₂ emisyonları % 9,5 indirgenir ve NO_x emisyonlarında önemli derecede bir indirgenme olması beklenir. Ek olarak, bu çalışmada tahsis edilen biyokütle gazlaştırma ve doğrudan yanmalı üretim tesislerinde söğüt ağacı biyokütlesi kullanılarak sistem performansı hesaplanmış ve önlenen kirliliğin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (rüzgar vb.) karşılaştırılabilir olduğu gösterilmiştir [25].

Düşük iş üretim yeteneğine sahip akışkanlaştırılmış yataklı gazlaştırma sisteminde Rh/CeO₂/SiO₂ katalizörlerin, buhar ıslah eden katalizörler, dolamit ve iç malzemelerle karşılaştırılmıştır [25].

Asadullah ve ark. yaptığı araştırma, katalizörler ile kombine edilmiş bir çift yataklı gazlaştırıcı sistemde sedir ağacının düşük sıcaklıklardaki (823 – 973 K) katalitik gazlaştırması değerlendirilmiştir. Çift yataklı gazlaştırıcı; biyokütlenin pirolizi, piroliz gazları ve katranın katı ürünlerden ayrılması için birincil yatak kısmı ve ikincil katran yenileyiciden meydana gelmektedir. Katalizör geliştirilmesi, karbonun gaza çevrilmesi ve CO + H₂ + CH₄ ürünlerin artması için geliştirilen Rh/CeO₂/SiO₂ katalizörü üzerinde çalışılmıştır. Özellikle dakikada maksimum 250 mg biyokütle kullanımı sonucu oluşan katran, sistem içerisinde 3 g katalizör kullanılarak bütünüyle gaza dönüştürülebilmektedir (biyokütle içerisindeki toplam karbon miktarı hata oranı % 25). Bu performans, geleneksel katran yenileyici katalizörlerin performansından daha yüksektir. Ek olarak Rh/CeO₂/SiO₂ üzerinde biriken kok miktarı çok daha küçüktür.

Mükemmel katalizörlerle birlikte kullanılan çift yataklı sistemlerde, geleneksel metotlarda gerek duyulandan daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek enerji verimliliğiyle, hemen hemen bütün katranın sentez gazlara dönüşümü gerçekleştirilmiştir [26].

Baron ve ark. yaptığı çalışmada ise, odun talaşının gazlaştırma sonucunda elde edilen gazların ortalama sıcaklıktaki katı oksit yakıt hücrelerinin performansı üzerine etkileri belirlenmiştir. Çeşitli atmosfer basıncında yapılan testlerde anot malzemesi, madeni seramiktir (%60 : 40 (ağırlık) Ni: C60 – 10 ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$)). CH_4 ile karşılaştırıldığında CO'nin hücre performansını azalttığı bulunmuştur. Karbon birikmesine bağlı olarak düşük güç çıkışıyla sonuçlanan çalışmada (CH_4 yüzdesi: % 5-10), yakıt içerisinde %10 civarında CO_2 bulunması hücre performansını önemli bir derecede etkilemektedir [27].

Asadullah ve ark. yaptığı araştırma, gaz türbiniyle güç üretimi için kullanılmak üzere yüksek kaliteli gaz yakıtların üretimi için, havayla gazlaştırılma işlemi, düşük sıcaklıklarda (823 – 973 K) akışkanlaştırılmış yatak reaktör ve $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$ katalizör kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma işlemi sedir ağcının yakıt olarak kullanımı ile laboratuvar ortamında sağlanmıştır. Soğuk gaz verimliliği, katran konsantrasyonu, karbonun gaza dönüşümü ve gaz bileşimleri ölçülerek $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$ katalizörlerin performansı, buhar iyileştirilmesi için G-91 katalizör, dolomit ve katalizörsüz sistemlerle karşılaştırılmıştır. $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$ katalizör kullanılarak elde edilen ürün gazlarında katran konsantrasyonu tamamen ihmal edilmiştir. Halbuki bu değer G-91, dolomit ve katalizörsüz gaz üretiminde sırasıyla 30, 113, 139 g/m^3 'tür. $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$ katalizörler kullanıldığında karbonun CO, H_2 ve CH_4 gibi yararlı gazlara dönüşümü daha yüksektir (873K'de). Bu durumda soğuk gaz verimi yanma hali için üretilen gazın hidrojen içeriği (> % 24 hacim) belirlenmiş değerden (> % 10 hacim) çok daha büyüktür. $\text{Rh/CeO}_2/\text{SiO}_2$ katalizör kullanıldığında diğer katalizörlere göre kok ve kömür oluşumu daha düşüktür. Aynı katalizörün en az 20 deneyin için de kullanılmasından sonra katalizör yüzey alanının az bir miktarda azalmasına rağmen ciddi bir deaktivasyon problemi gözlenmemiştir [28].

Çay kurutması için aşağı çekişli bir odun gazlaştırıcısının simülasyonu üzerine Jayah ve ark. bir araştırma yapmıştır. Çay endüstrisi için Srilanka’da bir gazlaştırıcı imal edilmiştir. Ancak belirli çalışma parametreleri ve tasarım özelliklerinin bu gazlaştırıcı üzerindeki etkileri konusunda bir eksiklik bulunmaktadır. Çeşitli durumlar için deneysel tasarım testleri yapılarak elde edilen bilgiler, bu parametre ve özelliklerin çevrim verimliliği üzerine etkilerini araştırmak için geliştirilmiş olan bir bilgisayar programını kalibre etmek için kullanılmıştır. Program piroliz ve gazlaştırma bölgeleri için iki adet alt modelden meydana gelmektedir. Piroliz alt modeli, maksimum sıcaklığı ve gazlaştırma bölgesine giren gazın bileşimlerini belirlemek için kullanılmıştır. Gazlaştırma bölgesi alt modeli, deneylerde elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu gazlaştırıcı da 3-5cm büyüklüğünde ve nem içeriği % 15’den daha az olan odun talaşının kullanılması gerektiği bulunmuştur [29].

Sabit karbon içeriği % 30’dan büyük ve nem içeriği % 15’ten daha az olan besleme malzemesinden sakınılmalıdır. Yukarıdaki parametreler için gazlaştırma bölgesi, kabul edilebilir bir çevrim verimine ulaşabilmek için 33 cm uzunluğunda olmalıdır [29].

Altafini ve ark. çalışması, Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonuna dayandırılan bir denge modeli kullanılarak bir odun artığı gazlaştırıcısının simülasyonuna değinilmiştir. Gazlaştırıcı, geniş ölçüde Güney Brezilya’da yetiştirilen Pinus Elliotis talaşı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan biyokütle yaklaşık % 10’luk neme sahiptir. Ürün gazın ortalama bileşimi (katransız) kullanılan denge modeli ile karşılaştırılmıştır. Bıçkı artıklarının nem içeriğinin yakıt gaz bileşimine ve onun ısıtma değerine etkisini göstermek için duyarlılık çalışmaları yapılmıştır. Çalışmaların daha iyi bir kesinlikle yenilenmesi için daha kompleks modeller hazırlanmıştır. Denge modellerinin nispi olarak daha yüksek sıcaklıklarda (800 °C) meydana gelen tepkimeleri çok iyi temsil etmemesine rağmen bu modeller, bir gazlaştırıcının çalışma parametreleri varyasyonları hakkındaki bazı eğilimlerini gösterme konusunda yararlı olabilir [30].

Jong ve ark. araştırması, 1,5 MWth'lık (max.) basınçlı akışkanlaştırılmış yataklı gazlaştırıcı tesisatı kullanılarak biyokütle (odun ve Miscantus ağaç kırıntıları) ve Ren bölgesinden çıkarılan linyitin gazlaştırılması çalışması yapılmıştır. Yakıt çeşidi, basınç, sıcaklık ve hava faktörü gibi çeşitli süreç parametreleri kullanılarak NO_x ve katran emisyonu hesabı çalışmaları yapılmıştır. Karbon çevriminin % 80'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Yakıt – azotun HCN'ye çevrimi önemli derecede düşüktür. Sonuçlar, dipten beslemeli sistemler üzerinde yapılan çalışma sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Miscantus ağacın gazlaştırılması, temel tepkime kimyasına dayandırılan değişmez durumda azot türlerinin emisyonuyla ilişkili heterojen gaz – kor tepkimeleri ile karşılaştırılmıştır. Başlangıç ürünlerini hesaplamak için piroliz modeli (FG – DVC biyokütle versiyonu) uygulanmıştır. Ölçümler ve model simülasyon sonuçlarının birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür [31].

Zainal ve ark. odun veya odun talaşı kullanılarak aşağı çekişli bir biyokütle gazlaştırıcının oluşturulan bir deney düzeneğinde araştırma yapmıştır. Gaz bileşimi üzerine denklik oranı etkisi, kalorifik değer ve gaz üretim oranı belirlenmiştir. Ürün gazın kalorifik değeri başlangıçta denklik oranıyla birlikte artar, bir zirve noktasına ulaştıktan sonra denklik oranı artarken azalmaya başlar. Birim yakıt ağırlığı başına gaz akışı, denklik oranıyla lineer olarak artar. Aynı zamanda optimum denklik oranı için bile karbonun gaz yakıtı çevriminin tam olarak gerçekleşmediği görülmüştür [32].

Odun yakan biyokütle sistemlerinin dikkate alınan ısı ve güç üretim için enerji verimliliği ve ekonomisini Dornburg ve ark. incelemiştir. Endüstrileşmiş ülkelerde üretilen enerjiye biyokütlenin yardımını artırmak için oldukça istekli politikalar yürütülmektedir. Ancak biyokütle kaynakları oldukça sınırlı ve bir çok yerde pahalıdır. Bu nedenle kaynaklardan optimum yararlanma (minimum maliyetle maksimum enerjinin üretilmesi) arzu edilir. Farklı performans karakteristiklerine sahip, geniş çeşitlilikle biyokütle çevrim metodu mevcuttur. Ekonomik performansı, aynı zamanda lojistik etkisi, ısıdan yararlanabilirlik gibi pek çok sebebe bağlıdır. Bu sebeple optimum sistemi belirlemek için sistem tanımlanmasına gerek duyulur. Bu çalışmada biyokütle enerjisinin ne kadarının kazanıldığıyla (birincil enerji tutma)

ilişkili olarak ve enerji – ekonomik performanslar dikkate alınarak farklı biyokütle enerji sistemleri araştırılmıştır. Çalışılan sistemler artık ağaç biyokütlesi, lojistik, ısı ve güç veya kombine ısı ve güç üreten yanma ve gazlaştırma üniteleri ile ısı dağıtımını kapsamaktadır. Sistemin performansı, ölçüsünün fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Bu ise sistem verimliliğini ve spesifik yatırım maliyetini anlatmak için türe ait fonksiyonlar kullanılarak lojistiğin enerji kullanımı ile ısı dağıtımını birim çevrim kapasitesinin fonksiyonu olarak ifade ederek yapılmıştır. Biyokütle enerji sistemleri içerisinde ölçü etkisi önemlidir. Dikkate alınan $0 - 300 \text{ MW}_{\text{th-input}}$ ölçü aralığında yukarı ölçümlendirme ile sistemlerin birincil enerji tutma birim maliyetleri azalır veya ortalama ölçülerde optimum değerini alır. Birincil enerji tutma değeri $0,53 - 1,13 \text{ GJ}_{\text{FOSİL}}$ arasında yer alır. Ekonomik ve enerji üretim açısından uygun olan BIG – CC sistemleridir [33].

Yakıt ve kimyasallar için biyokütle çevrim süreçlerini ve biyokütle kaynak imkanlarını araştıran Demirbaş ve ark. biyokütle kaynakları olarak odun, odun artıkları, zirai ürünler ve onların üretim artıkları, şehir artıkları, yemek artıkları ve suda yaşayan bitkiler ile yosunları içerir. Biyokütle, elektrik üretimi, ev ısıtması, taşıt yakıtı olarak kullanımı ve endüstriyel faaliyetlerde proses ısısı sağlama gibi çeşitli aralıktaki enerji gereksinimlerini karşılamakta kullanılır. Biyokütlelerden yararlanmak için kullanılan çevrim teknolojileri, direkt yanma süreci, termokimyasal süreçler, biyokimyasal süreçler ve agrokimyasal süreçler olmak üzere 4 temel kategoriye ayrılabilir. Termokimyasal çevrim süreçleri; gazlaştırma, piroliz, süperkritik sıvı çıkarma ve sıvılaştırmadan meydana gelir. Piroliz; biyokütlenin sıvı, odun kömürü, gazlar, asetik asit, aseton ve metanole havasız ortamda ve 750 K 'e kadar ısıtmayla dönüşüm sürecidir. Eğer amaç biyokütle pirolizinden meydana gelen sıvı üretim ürünlerini maksimize etmekse düşük sıcaklığa, yüksek ısıtma oranına ve kısa rezidans zamanına gerek duyulacaktır [34].

Raskin ve ark. yaptığı çalışmada, biyokütle yakan atmosferik dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırıcı ile güç kazanı yakıt artırımı üzerindedir. Gelişmiş Foster Wheeler atmosferik dolaşimli akışkan yatak yakma sisteminin gelişim süreci içerisinde yapılan başarılı deneyler sonradan 1980'li yılların başında dolaşimli akışkan yatak

gazlaştırma teknolojisinin gelişimine öncülük etmiştir. Bu zaman periyodu esnasında petrol (sıvı yakıt (fuel oil)) fiyatlarındaki dramatik artış bu iş üzerinde çalışılmasının itici kuvvetidir. Dolaşımli akışkan yatak teknolojisinin kullanılmasının birinci avantajı onun pahalı yakıtlar (sıvı veya gaz yakıtlar) yerine ucuz yakıtların kullanımına imkan vermesidir. Lahti projesinden evvel Foster Wheeler, kağıt hamuru ve kağıt endüstrisi için kapasiteleri 17'den 35 MWth'e kadar değişen 4 adet odun artığı yakan pisayadaki dolaşımli akışkan yatak gazlaştırıcı sağlamıştır. Bu üniteler bugün hala başarıyla çalışmaktadır. Lahden Lampovoima Oy (LLOy), Lahti şehri bölgesi için güç üreten bir Finlandiya şirkettir. Şirket, Finlandiya'daki en büyük kamu şirketi olan Fortum Oy ile Lahti şehri için ortaklaşa çalışmaktadır. LLOy, Güney Finlandiya'daki Lahti şehri yakınında kurulmuş olan Kymijarvi Güç Santralini işletmektedir. Santral personeli enerjin üretim maliyetini mümkün olduğu kadar düşük tutmak için sürekli olarak en ekonomik yakıt kaynaklarını araştırmakta ve eş zamanlı olarak enerji üretimini artırmaya çalışılmıştır. Şu anda Lahti bölgesinde, kullanılabilecek durumda olan farklı çeşitlerde biyoyakıtlar ve yakıt olarak kullanılan yakıtlar mevcuttur. Mevcut biyoyakıt ve atık yakıt miktarı kazanlarda yılda yakılan yakıtın %15'ini karşılayabilmektedir. Bu da yaklaşık olarak kullanılan kömürün % 30'una denktir. LLOy Kymijarvi güç santrali gazlaştırma projesinin amacı, mevcut kömür yakan kazanlar içerisinde ıslak biyoyakıtların direkt gazlaştırılmasının ve sıcak, ham ve çok düşük kalorifik değere sahip gazların direkt olarak kullanılmasının tatbikidir. Biyoyakıtların gazlaştırılması ve gazların kömür yakan kazanlar içinde birlikte yanma sürecinin birçok avantajı vardır. Bunlar CO₂'in geri dönüşümü, SO₂ ve NO_x emisyonlarını azalması, biyoyakıtlar ve artık yakıtlardan yararlanılması için etkili bir yol olması, düşük yatırım ve işletme maliyeti ile mevcut güç santrali kapasitesinden yararlanabilmesidir. Bundan başka, kazan içerisinde sadece küçük modifikasyonlara gerek duyulur ve gazlaştırıcı içerisindeki sürecin bozulması santralin işleyişini engellemez. İlk iki yıllık çalışma süreci (1998 – 1999) gazlaştırıcının ve onun ilgili elemanlarının işe elverişliliği bakımından mükemmeldir. Birkaç ölçüm ve farklı yakıt kombinasyonları ile testler yapılmıştır. Bu araştırmada bu ölçüm sonuçlarının en önemli sonuçlarıyla birlikte proje, detaylarıyla birlikte sunulmaktadır. Bu proje EU Thermie programı tarafından desteklenmiştir [35].

Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği bünyesinde yürütülen “Orman ürünleri atıkları ve SEKA kağıt fabrikası atık çamurlarının gazlaştırma davranışının akışkan yatakta deneysel incelenmesi ve enerji potansiyeli” adlı araştırma fonu projesi ile odun ve atık çamur gazlaştıran biyokütle sistemlerinin dikkate alınan ısı ve güç üretim için enerji verimliliği ve ekonomisini incelemiştir [36].

3. ENERJİ, BİYOKÜTLE, BİYOKÜTLEDEN ENERJİ ÜRETİM SÜREÇLERİ VE AKIŞKAN YATAKLI GAZLAŞTIRICILAR

3.1. Enerji

Günümüz gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin en önemli gereksinimi enerjidir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri, üretip tükettikleri enerjiye büyük ölçüde bağlıdır. Dünya nüfusunun artışı ile beraber enerjiye olan istek de günden güne artmakta olup bu gereksinim dünya başlangıcında biyokütlenin milyonlarca yıl süren yer altı gazlaşma süreci ile oluşan kömür, petrol, doğalgaz gibi birincil enerji kaynakları ile karşılanmaktadır. Bu enerji kaynaklarının sürekli azalması ve ayrıca enerji üretimi için kullanımı sırasında yarattıkları çevre sorunları enerji sorununu sürekli olarak gündemde tutmaktadır. Milyonlarca yıl süren doğal yer altı biyokütle gazlaşma sürecinin, kısa süreli teknik biyokütle gazlaşma süreçleri ile yapay birincil enerjiler (gaz, sıvı, katı) elde edilmektedir.

Bu bölümde birincil enerji kaynakları ve yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları iki bölümde halinde incelenecektir.

3.1.1. Dünyada ve Türkiye’de enerji alanında eğilimler

Uluslararası Enerji Ajansının (UEA/IEA) öngörülerine göre, Dünya’da enerji sektöründe hakim olan eğilimlerin sürmesi durumunda, geleceğe ilişkin olarak aşağıdaki öngörüler yapılmaktadır:

- Dünyada 2030 yılına yönelik öngörülerde, enerji gereksiniminin önemli ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmasının sürdürülmesi beklenmektedir.

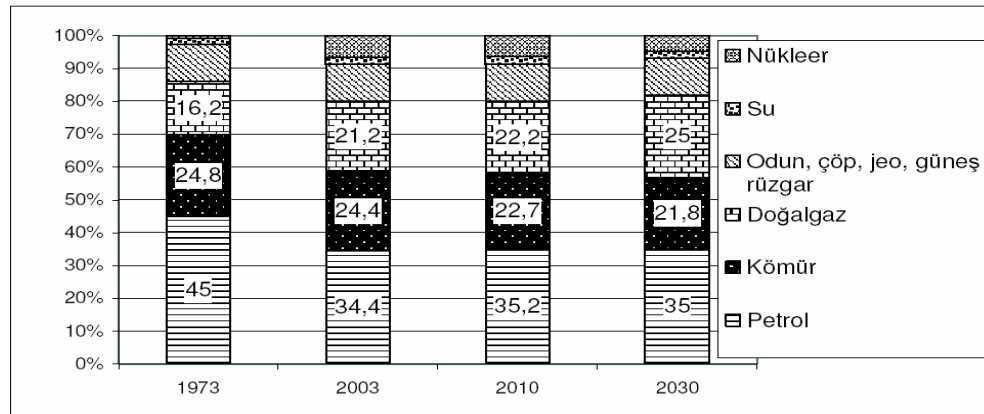
Varolan politikaların sürmesi durumunda, 2030 yılındaki enerji gereksiniminin bugünkünün %50’sinden daha fazla artış göstermesi, fosil yakıtların enerji gereksiniminin karşılanmasında etkin durumunu sürdürmesi, buna karşılık

yenilenebilir enerji kaynaklarıyla nükleer enerjinin payının sınırlı kalması beklenmektedir.

Dünya toplam birincil enerji arzı, 2003 yılında 10.579 milyon ton petrol eşdeğeri olmuştur. Söz konusu arzın kaynaklara dağılımında %34,4 ile petrol ilk sırada yer almaktadır. Daha sonra, %24,4 ile kömür ve %21,2 ile doğalgaz sıralanmaktadır [37].

1973 yılından 2003 yılına kadar geçen 30 yıllık dönemde, dünya birincil enerji arzında petrolün payı %10,6 düşerken doğalgazın payı %5 ve nükleer enerjinin payı ise %5,6 artmıştır. Kömürün payında ise kayda değer bir farklılık bulunmamaktadır. Toplam arz içerisinde 1973 yılında %24,8 olan kömürün payı 2003 yılında %24,4 olmuştur [37].

İleriye yönelik yapılan öngörülerde, dünya birincil enerji arzının 2030 yılında 16.500 milyon ton petrol eşdeğeri (MTEP) olacağı ve bu miktarın kaynaklara dağılımında önemli farklılıkların olmayacağı öngörülmektedir. Buna göre, 2030 yılında en büyük pay %35 ile yine petrolün olacaktır. Petrolü %25 ile doğalgaz, %21,8 ile kömür, %11,3 ile odun, çöp, jeo, güneş rüzgar vb. kaynakların, %4,6 ile nükleer ve %2,2 ile hidrolik kaynakların izleyeceği tahmin edilmektedir [37]. Dünya birincil enerji arzının kaynaklara dağılımı Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Dünya birincil enerji arzının kaynaklara göre dağılımı [37]

- Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan karbondioksit ve sera etkisi yaratan diğer kirleticiler varolan enerji sisteminin sürdürülebilirliğini riske sokmaktadır.

Varolan politikaların sürmesi durumunda enerjiden kaynaklanan karbondioksit emisyonları hızlı biçimde artacaktır. UEA'nın "World Energy Outlook 2004" adlı yayınına göre 2030 yılına kadar CO₂ emisyonunun 2004 yılı değerinin % 60'ından daha fazla olması beklenmektedir. Beklenen emisyon artışının üçte ikisinden fazlasının, genellikle karbon yoğunluğu en yüksek yakıt olan kömürü tüketen gelişmekte olan ülkelerden kaynaklanacağı öngörülmektedir. Emisyonların temel kaynakları termik santraller ve taşıtlar olacaktır [37].

Varolan eğilimler sürdüğünde atmosferik karbondioksit derişiminin bu yüzyılda sanayi öncesi dönemlerin iki katına çıkacağı öngörülmektedir. Bu durumun küresel sıcaklığın 2-5 derece yükselmesi anlamına geldiği, iklim düzeninde öngörülemez değişikliklere neden olacağı, doğanın taşıyabilme sınırlarının sonuna geldiği yönünde görüşler vardır [37].

- Sürdürülebilir bir enerji sistemi oluşturabilmek için enerjinin üretimi ve kullanımında teknolojik değişimin gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Seçenek Senaryo'da CO₂ emisyonlarının artış hızının düşürülmesi öngörülmekle birlikte, bunun varolan teknolojilerin kullanımıyla önemli ölçüde sağlanamayacağı açıktır. Karbon tutma ve depolama teknolojilerinde gelişmeler olduğunda bu durumun fosil yakıtların kullanımını etkileyeceği düşünülmektedir. Diğer yandan ileri nükleer reaktörler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltılabileceği beklenmekte, ancak UEA'ya göre inceleme döneminde bu gelişmelerin gerçekleşme olasılığı zayıf görünmektedir. Bununla birlikte küresel enerji sisteminin ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan sürdürülebilir olmasında, teknolojik gelişmelerin ve bu gelişmelerin uygulamaya koyulmasında anahtar rol oynayacağı kabul edilmektedir [37].

UEA varolan enerji politikalarının sürdürülebilirliği konusunda da kaygılıdır. Yapılan çalışmalarda petrol piyasalarındaki yatırım eksikliğine dikkat çekilmekte, gelecekteki küresel enerji isteğinin karşılanmasında Orta Doğu ve Kuzey Afrika (ODKA) bölgelerinin önemli bir rol oynayacağı belirtilmektedir [37].

UEA ülkelerinin ve özellikle Çin ve Hindistan gibi büyük ithalatçıların Orta Doğu ve Kuzey Afrika'dan (ODKA) petrol ve doğalgaz ithalatının artacağı vurgulanmaktadır. Enerji kaynaklı karbondioksit emisyonlarının da yükseleceği göz önünde tutulduğunda UEA, enerji arz güvenliği ve çevre açısından varolan politikalarının sürdürülebilir olmadığını belirtmektedir. 2030 yılına kadar bölgenin dünya petrol üretimindeki payının % 35'ten % 44'e çıkması beklenmektedir. Bölgenin 2030 yılına kadar petrol üretimi % 75, doğalgaz üretimi ise yaklaşık üç kat artacaktır. Ancak bunun için bölgedeki ülkelerin enerji altyapısı için yılda yaklaşık 53 milyar dolar yatırım yapmaları gerekmektedir [37].

ETKB'nin rakamlarına göre Türkiye'de 2004 yılında birincil enerji kaynakları üretimi 24,33 milyon tep, tüketimi ise 87,81 milyon tep olmuştur. Bu rakamlara göre enerji tüketiminin %72'si ithalatla karşılanmaktadır. Birincil enerji kaynakları tüketiminin % 36'sı petrole dayalıdır. Tüketilen petrolün yaklaşık % 7'si yerli üretimle karşılanmaktadır [37].

3.1.2. Dünyada fosil yakıt kullanımı

Dünya enerji tüketimi nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak baş döndürücü bir hızla artmaktadır. Toplam enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin (jeotermal, güneş, rüzgar, odun vb.) payı, eğer ticari ve ticari olmayan tüm enerji kaynakları birlikte değerlendirilirse, yaklaşık %10 olarak tahmin edilmektedir. Petrol ve doğalgaz dünya enerji tüketiminin %60'ını, petrol, doğalgaz ve kömürden oluşan fosil kaynaklar ise %85'ini karşılamaktadır. Son 30 yıldaki tüketim eğilimi incelendiğinde, tüketimi en hızlı artan enerji kaynağının doğalgaz olduğu görülmektedir. Bu eğilimin süreceği ve doğal gazın toplam enerji tüketiminde %23

olan payının 2025- 2030 civarında %25'e çıkacağı düşünülmektedir [38]. Dünya fosil yakıt rezervleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Dünya fosil yakıt rezervleri [39]

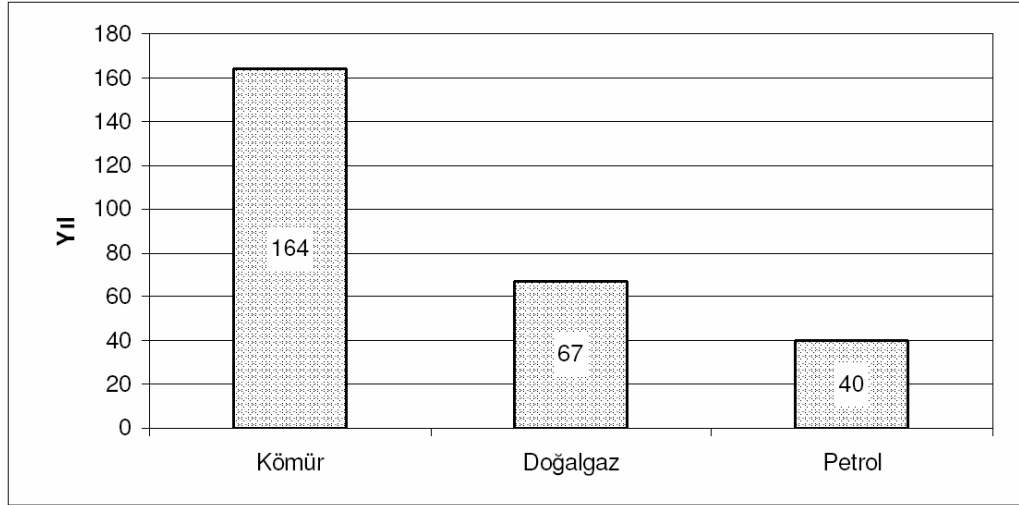
Bölge	Petrol Milyar Ton	D. Gaz Trilyon m ³	Kömür (Milyar Ton)	
			Taşkömürü	Linyit
Kuzey Amerika	11,5	8,4	116,7	139,8
Orta ve Güney Amerika	13,0	6,2	7,8	13,7
Avrupa	2,7	5,2	41,7	80,4
Eski SSCB Ülkeleri	9,1	56,7	97,5	132,7
Ortadoğu	91,2	49,5	0,2	-
Afrika	10,1	10,2	61,2	0,2
Asya ve Okyanusya	5,8	10,2	184,4	107,9
TOPLAM DÜNYA	143,4	146,4	509,5	474,7

Dünya petrol rezervleri 1998 yılında çok az bir artışla 143,4 milyar tona yükselmiştir. Bölgeler itibariyle dünya petrol rezervlerinde %64 ile Ortadoğu ülkeleri en büyük payı, ikinci sırayı ise %9 pay ile Orta ve Güney Amerika almaktadır. Ülke bazında bakıldığında ise Suudi Arabistan %25 ile birinci sırada yer almakta olup, bunu Irak (%11), Birleşik Arap Emirlikleri (%9), Kuveyt (%9), İran (%9) ve Venezuela (%7) izlemektedirler [39].

Dünya doğalgaz rezervlerinde Rusya Federasyonu %33'lük pay ile birinci sıradaki yerini korumaktadır. Rusya Federasyonunun toplam gaz rezervi 48,14 trilyon m³ olup bunu 22,94 trilyon m³ ve %16 pay ile İran izlemektedir. Dünya doğalgaz rezervlerinin kullanılabilme süresi 63,4 yıl olarak belirlenmiştir [39].

Ülkemizin önemli enerji kaynaklarından biri olan kömürün dünya toplam enerji arzı içerisindeki payı 2030 yılına kadar önemli bir değişim göstermeyecektir. Bu öngöründe, kömür rezervlerinin petrol ve doğalgaz gibi diğer enerji kaynaklarına göre dünya üzerinde daha geniş bir yayılım gösteriyor olması rol oynamaktadır. Söz konusu enerji kaynaklarının kalan ömürleri dikkate alındığında, kömürün, özellikle 2030 yılından sonra çok daha büyük önem kazanacağı anlaşılmaktadır. 2004 yılı

sonu itibariyle dünya toplam kanıtlanmış kömür rezervi 909 milyar ton olup, dünya kömür üretim büyüklüğü dikkate alındığında kömür rezervlerinin 164 yıl ömrü bulunmaktadır [40]. Bu süre, yeni rezervlerin bulunması halinde petrol için yaklaşık 40 yıl ve doğalgaz için ise 67 yıl olarak öngörülmektedir [37].



Şekil 3.2. Enerji kaynaklarının kalan ömürleri [37]

Gelecekte yıllarda da enerji, insan gereksinimlerinin karşılanması ve ekonomik gelişmenin sağlanması amaçları ile artan miktarlarda kullanılmaya devam edecektir. Varolan ve planlanan piyasa durumlarına göre gerek duyulacak bu enerjinin büyük bir kısmı fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanacaktır.

Pek çok kuruluşun yaptığı öngörülere göre 21. yüzyılın büyük bir bölümünde petrol, doğalgaz ve kömür global enerji gereksinimlerinin karşılanmasında ağırlıklı olarak kullanılmaya devam edecektir.

3.1.3. Türkiye’de fosil yakıt rezervleri ve kullanımı

Türkiye enerji kaynakları açısından zengin ülkeler grubuna girmemektedir. Ülkemizde alışlagelmiş enerji kaynaklarının çeşidinin zengin olmasına karşın bu kaynaklar nitelik ve nicelik yönünden belli başlı dünya rezervleri ile

karşılaştırıldığında oldukça fakir bir görünümündedir. Özellikle petrol ve doğalgaz rezervlerimizin kalorifik değerleri göz önüne alındığında enerji değerinin pek yüksek olmadığı literatür çalışmaları göstermiştir. Çizelge 3.2’de ülkemizin birinci enerji kaynakları rezervi görülmektedir.

Çizelge 3.2. Türkiye birincil enerji kaynakları rezervi [41]

Kaynaklar	Toplam
Taş Kömürü (MTon)	1126
Linyit (MTon)	8075
Asfaltit (MTon)	82
Bitümlüler(MTon)	1641
Ham Petrol (MTon)	41,8
Doğal Gaz (Milyar m ³)	8,7

Rezervlerimizin dünya rezervleri içerisindeki yeri incelendiğinde, kömür rezervi ile jeotermal ve hidrolik enerji rezervi dünya kaynak varlığının %1’i civarındadır. Petrol ve doğalgaz rezervi ise son derece kısıtlıdır. Çizelge 3.3’de ülkemizin birinci enerji kaynakları üretiminin yıllara göre değişimi verilmiştir.

Çizelge 3.3. Türkiye birincil enerji kaynakları üretiminin yıllara göre değişimi [42]

Yıllar	Taş kömürü	Linyit	Asfaltit	Petrol	Doğal gaz	Hidrolik	Jeotermal		Güneş	Odu n	Hay. Ve Bit.Art.	Toplam
							Elektrik	Isı				
1985	2199	8212	225	2216	62	1036	5	-	-	5210	2539	21703
1990	2080	9524	119	3903	193	1991	69	16	21	5361	1847	25123
1991	1827	9117	60	4674	185	1951	70	16	27	5391	1821	25138
1992	1727	10299	92	4495	180	2285	60	30	32	5421	1788	26408
1993	1722	9790	37	4087	182	2920	67	30	38	5451	1697	26021
1994	1636	10471	-	3871	182	2630	68	47	45	5482	1627	26059
1995	1319	10735	29	3692	166	3057	74	64	52	5512	1556	26255
1996	1382	10876	15	3675	187	3481	72	90	80	5512	1533	26887
1997	1347	11759	12	3630	230	3424	71	108	80	5512	1512	27687
1998	1143	12792	10	3385	514	3632	73	153	100	5512	1550	28863

Birincil enerji üretimi 1998 yılına göre %4,3 artışla 28,9 Mtep'e ulaşmıştır. Petrol ve doğal gaz üretim miktarları oldukça düşük olup ülkemizin ana enerji kaynağı başta linyit olmak üzere kömürdür.

Kömür birincil enerji kaynak üretiminin %48,3'ünü, petrol ise %13,5'ini oluşturmuştur [39].

Dünyada olduğu gibi Türkiye'de enerji gereksiniminin büyük bir kısmı fosil yakıtlardan kömür, petrol, linyit vs.'den sağlanmakta ve bunun sonucu olarak da fosil yakıt kaynakları giderek tükenmektedir. Bu durumu göz önünde bulundurarak ileride doğabilecek bir enerji krizini önlemek için şimdiden seçenek enerji kaynaklarını bulma, kullanımını yaygınlaştırma ve gerekli teknolojilerin kurulması yoluna gidilmelidir. Ülkemizde birinci enerji kaynakları tüketiminin yıllara göre değişimi Çizelge 3.4'de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Türkiye birincil enerji kaynakları tüketiminin yıllara göre değişimi [42]

Yıllar	Taş kömürü	Linyit	Asfaltit	Petrol	Doğal gaz	Hidrolik	Jeotermal		Güneş	Odu n	Hay. Ve Bit.Art.	Toplam
							Elektrik	Isı				
1985	3775	7933	225	18134	62	5	5	-	-	5210	2539	39167
1990	6150	9765	123	23901	3110	69	69	16	21	5361	1847	52632
1991	6501	10572	60	23315	3827	70	70	16	27	5391	1821	53915
1992	6243	10746	85	24865	4197	60	60	30	32	5421	1788	56298
1993	5834	9918	44	28412	4630	67	67	30	38	5451	1697	59845
1994	5512	10331	0	27142	4921	68	68	47	45	5482	1627	58675
1995	5905	10570	28	29324	6313	74	74	64	52	5512	1556	63180
1996	5560	12351	15	30939	7186	72	72	90	64	5512	1533	68035
1997	8452	12317	13	30515	9165	71	71	108	80	5512	1512	73257
1998	8921	12631	10	30349	9690	73	73	153	100	5512	1550	74248

Genel enerji tüketimi içerisinde petrol %40,9 ile en büyük paya sahiptir. Bunu %17 ile linyit ve %13,1 ile doğalgaz takip etmektedir [39].

Enerji üretiminin yavaş, istegin ise hızlı artması sonucunda Türkiye'de enerji ithalatı hızla artmıştır. Bugünkü öngörülere göre gelecekte de enerji ithalatında hızlı bir artış

beklenmektedir. Türkiye toplam enerji arzının 1990 yılında %54 ve 1998 yılında %61 net ithalatla karşılanırken bu değer 2020 yılında %76'ya ulaşacaktır. Toplam enerji ithalatında petrol %62 ile en fazla paya sahip olup bunu %9 ile doğalgaz ve %15 ile taş kömürü izler. Bu oranların 2020 yılında sırası ile %29, %33, %38 olması beklenmektedir [39].

Uzun dönem enerji üretim gelişimi çalışmalarının sonuçlarından elde edilen en önemli konulardan biri üretimin giderek ithal kaynaklara dayalı olacağı gerçeğidir. Ayrıca enerji isteminin verimli ve ekonomik bir şekilde karşılanabilmesi için çeşitli enerji kaynakları kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Buna göre fosil yakıt kaynaklarının verimli kullanımı temel sorunu oluşturmaktadır.

3.1.4. Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan çevre sorunları

Enerji insanoğlunun günlük yaşamını sürdürmesi için gerekmektedir. Nüfusun artışına paralel olarak enerji tüketimi de artmaktadır. Kişi başına düşen enerji tüketimi refah düzeyinin bir göstergesi olmaktadır. Ancak enerjinin günümüzde sayılamayacak kadar çok yararının yanı sıra, enerjinin üretimi, taşınımı sırasında doğal çevre bozulmakta ve kirlenmektedir.

Günümüzde dünya enerji gereksiniminin %80'i kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlarla karşılanmaktadır [39]. Enerji gereksinimini karşılamak için çok uzun zamandan beri kullanılan fosil yakıtlar sınırlı rezervleri ve çevreye verdiği önemli zararlar sonucunda dünyamızda her geçen gün yeni bir sorun gündeme getirmektedir.

Fosil yakıtlardan enerji üretilmesi sırasında oluşan salınımlar su buharı (H_2O), karbondioksit (CO_2), kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksitler (NO_x) içermektedir. Az miktarda bulunan diğer gazlar ise HCl , NO_2 , CO ve SO_3 olmaktadır.

Yaklaşık olarak fosil yakıtlar yılda 25 milyar ton CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , O_2 , is ve kül çıkarmaktadır.

Dünyadaki sera gazlarının (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , su buharı) yaklaşık olarak %57'si enerji kaynaklıdır. Atmosferde normal olarak bulunan sera gazları güneş enerjisinin tutulmasını sağlar. Bu durum atmosferin ortalama sıcaklığını dengede tutar. Kömür, petrol, doğalgaz gibi karbonlu yakıtların yanması sonucu açığa çıkan aşırı CO_2 atmosferde sera etkisine ve küresel ısınmaya, bu da iklim değişikliği, buzul erimesi, kıyı ovalarının su altında kalması, yağış rejimlerinin değişmesi, kurak ve yarı kurak alanların oluşması, orman ve bitki çeşitliliğinin azalması gibi sorunlara neden olmaktadır [43].

Bugün için dünyanın en önemli çevre sorunu sera etkisinden kaynaklanan küresel ısınmadır. GJ başına CO_2 emisyonu kömürde 85,5 kg, petrolde 69,4 kg ve doğalgazda 52 kg düzeylerindedir. Başlangıçta kömür, daha sonra petrol ve doğalgaza dayalı fosil kökenli enerji kullanımı atmosferdeki CO_2 derişimini son 150 yıl içinde %116 artırarak dünyayı küresel ısınma süreci ile karşı karşıya bırakmıştır [39].

Kömür ve petrol yakıldığında açığa çıkan kükürt, kükürt dioksit (SO_2) şeklinde yayılır. Atmosferde birikip, SO_3 şeklinde oksitlenir, yağmur suyuyla birleşip sülfürik asidi (H_2SO_4) oluşturur [43].

Enerji merkezleri, karayolları, fabrikalar, karayolu ulaşım araçları teknolojik etkinliklerin çıkardıkları kirlilik unsurları ile oluşan asit yağmurları değişik etkilerle oluşum kaynağından uzaklara yayılmaktadır. Su geçirmez granitler üzerinde bulunan göller ve tatlı su kaynakları ile etkileşen asit yağmurları, nitelikli suyun pH'ını düşürür. Sudaki canlılık etkinliği kaybolur ve su içilebilirlik özelliğini kaybeder. Asit yağmurları toprağa karıştığı zaman normalde çözilemeyen bileşikler oluşturmaktadır. Çözünen tuzlar, özellikle alüminyum tuzları ağaçların taze kökleri için zehirlidir. Bunun dışında asit yağmurları modern bina ve yapılara olduğu kadar tarihi binalara da zarar vermektedir [43].

Karbonlu yakıtların yanmasıyla oluşan NO_x , kirli hava solunduğunda akciğerlerde aside dönüşerek tahriş yapar, bronş tüplerini doldurur, akciğer havadan oksijen alma

yeteneğini yitirir ve kana daha az oksijen geçer. Hasta kronik nefes darlığı ve emfizema gibi hastalıklara yakalanır ve sonuç genellikle ölüm olur [43].

Geleneksel enerjilerinin üretiminde ve iletiminde arazi, su, hava kısacası çevre kirlenmekte ve iklim dengesi de bozulabilmektedir. Üretim sahasına yakın çevrede bulunan insanlar da dolaylı veya dolaysız olarak etkilenmektedir.

Kömür üretimi ve taşınması sırasında, ayrıca kullanıldığı yerlerde çevreyi kirletici özelliğe sahiptir. Kuyulardan çıkarılan ham petrole, hava kirletici ve aşındırıcı özelliklerini azaltmak amacıyla kükürt bileşiklerini uzaklaştırarak damıtma ve arıtma işlemleri uygulanır. Arıtma sırasında, çevrede su ve hava kirlenmesi ortaya çıkmaktadır. Petrolün yol açtığı kirlenmelerden bir diğeri de taşınması sırasında oluşmaktadır. Tankerler taşınırken deniz suyuyla yıkanan tanklardan çıkan yağlı suyun denize verilmesi ya da deniz kazaları sonucunda petrol denize dökülmektedir. Bu durum yalnız denizde yaşayan canlıları etkilemekle kalmayıp önemli bir yanma tehlikesi oluşturmaktadır.

3.1.5. Güneş ışıma enerjisinin kısa erimde depolanan biçimini oluşturan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları

Kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtların çevreyi giderek kirletmesi nedeniyle önemini arttıran yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlileri su (hidrolik), biyokütle, rüzgar, güneş ve jeotermal kaynaklardır.

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının geliştirilmek istenmesinin bir nedeni de dünyada sınırlı olan fosil yakıt rezervlerini tükenmekten olabildiğince korumaktır. Kanıtlanmış üretilebilir petrol ve doğalgaz rezervlerine insan ömrüne sığacak kadar ömür biçilmesi insanlığın geleceği açısından düşündürücüdür.

Sürdürülebilir ekonomik büyüme için ekonomik sınırlar kapsamında uygun teknolojilerle yeni ve yenilenebilir enerji açığının açılması gerekmektedir [39].

Araştırmacıların yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgisini en önemli nedenlerinden birisi de bunların çevre kirliliği yaratmamasıdır. Çevreyi kirliletmeyen yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji ve biyokütle enerjisidir.

Güneş enerjisi; bilinen en eski enerji kaynaklarından olup kütlenin enerjiye çevrildiği, dünyamıza ve diğer gezegenlere sonsuz enerji kaynağı veren yenilenebilir ve çevre kirliliği yaratmayan enerji kaynağıdır. Her yıl dünya atmosferinden yaklaşık 7×10^{14} MWh'lık güneş enerjisi bulunmaktadır. Güneş enerjisinin çok az bölümü dünyaya ulaşır ve bu değer dünyanın yıllık enerji üretiminin 2000 katından fazla olmasına karşılık kullanım alanı kısıtlıdır [44].

Rüzgar enerjisi; enerji tüketimini karşılamak amacıyla kullanılabilecek seçenek enerji kaynaklarından biridir. Rüzgar, serbestçe kullanılabilmesi, sınırsız olması ve diğer ülkelere bağımlılık yaratmaması itibarıyla göz ardı edilmemesi gereken bir kaynaktır. Çevresel etkileri göz önüne alındığında ise bacagazı emisyonları, kül, asit yağmurları, küresel ısınma ve tehlikeli atık gibi sorunların bulunmadığı görülmektedir.

Dünya oldukça büyük bir rüzgar enerjisine sahiptir. Avrupa rüzgar enerjisi endüstrisi halen büyük bir gelişme içerisinde. 1992'de 860 MW'lık kurulu kapasite ile 1995 sonunda 2500 MW artmıştır. Avrupa Topluluğu'nun 2030 yılına kadar elektrik enerji gereksiniminin en az %10'unun rüzgardan karşılanabileceği bulunmuştur [44].

Jeotermal enerji; yer kabuğunun derinliklerinden kaynaklanan yenilenebilir ve temiz bir ısı enerji kaynağıdır. Jeotermal enerji günümüzde ekonomik olarak enerji-dönüşüm teknolojileri ile elektrik üretiminde veya doğrudan ısıtmacılıkta, kağıt, dokuma, kerestecilik ve ağaç kaplama endüstrilerinde kullanılır.

Hidrolik enerji; su gücünden elde edilen bir enerji kaynağı olup, dünya enerji üretiminde yaklaşık %21 karşılamaktadır. Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları içinde yer alan ve ticari anlamda en az maliyetle değerlendirme olanağına sahip olan

hidrolik enerji için dünya genelinde 14000TWh'lik hidrolik kapasitesi olduğu Avrupa ve Kuzey Amerika'da bu kapasitenin %60 civarında bir bölümünü kullanmaktadır.

Bir de yeni ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütle enerjisi vardır. Aşağıda biyokütle enerjisi açıklanacaktır.

Çizelge 3.5. Dünya’da biyokütle enerji kullanımı [45]

Ülkeler	Nüfus	Yüzölçümü (Mha)	Toplam Enerji Kullanımı (MTEP)	Biyokütle Enerji Kullanımı (MTEP)			
				Dünya Enerji Konseyi Verileri		Birleşmiş Milletler Verileri	Biyokütle Enerji Kullanıcıları Birliği Verileri
				Klasik	Modern		
Endüstrileşmiş Ülkeler							
Kuzey Amerika	276	1833	2277	38	19	96	--
Batı Avrupa	454	355	1379	20	10	32	--
Doğu Avrupa	389	2342	1637	20	10	44	--
Japonya ve Avusturya	144	827	503	4	10	1	--
TOPLAM	1263	5357	5796	92	7	173	132
Gelişmekte olan Ülkeler							
Latin Amerika	448	2016	417	125	46	88	--
Ortadoğu ve Kuzey Afrika	271	1190	294	21	0	15	--
Orta Afrika	501	2363	291	141	5	180	--
Pasifik ve Güneydoğu Asya	1663	1281	1091	347	16	331	--
Güney Asya	1146	752	498	207	8	296	--
TOPLAM	4029	7602	2591	838	75	910	--
TOPLAM DÜNYA	5292	12959	8387	1051		1083	880

Biyokütle kaynakları arasında yer alan odun, hayvan ve bitki artıkları uzun yıllardan beri ülkemizde ısıtma, yemek pişirme alanlarında etkin bir şekilde tüketilmektedir.

Ülkemizde ormanlarımız resmi üretimin yanı sıra hemen hemen resmi üretime yakın miktarda kaçak kesim yapılması nedeniyle büyük oranda tahrip edilmektedir. Odunun yakıt olarak tüketilmesi yalnızca çevresel bozulmalara neden olmamakta aynı zamanda önemli bir sanayi maddesi yakılarak tüketilmektedir. Bu durumun önlenmesi için üzerinde önemle durulan çözümlerden birisi enerji ormanlarıdır.

Sonuç olarak ülkemizde yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça şanslı ülkeler arasındadır. Çizelge 3.6'da Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli verilmiştir [46].

Çizelge 3.6. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli (MTEP)

Kaynak	Öngörülen Potansiyeli (MTEP)	Teorik olarak teknik-ekonomik açıdan mümkün olan miktar (MTEP)	Kullanılan miktar (MTEP)	Toplam enerji kullanımı içindeki payı(%)
Biyokütle	135	65	7,9	13
Güneş	1300	260	0,038	0,06
Rüzgar	200	20	--	--
Hidroelektrik	40	11	2,92	5
Jeotermal	26	6	0,037	0,06
Deniz Dalga	21	--	--	--
Enerji Tasarrufu	30	18	--	--
TOPLAM	1752	380	10,89	18,12

3.2. Biyokütle

Dünya ülkeleri genel olarak sanayileşmelerini ucuz ve bol enerji kaynağı olan kömür ve petrole dayamışlardır. Ancak fosil yakıtların çevreye büyük zarar vermesi, özellikle 1973 yılından sonra yaşanmaya başlayan petrol krizinden sonra bilim adamlarını alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmiştir.

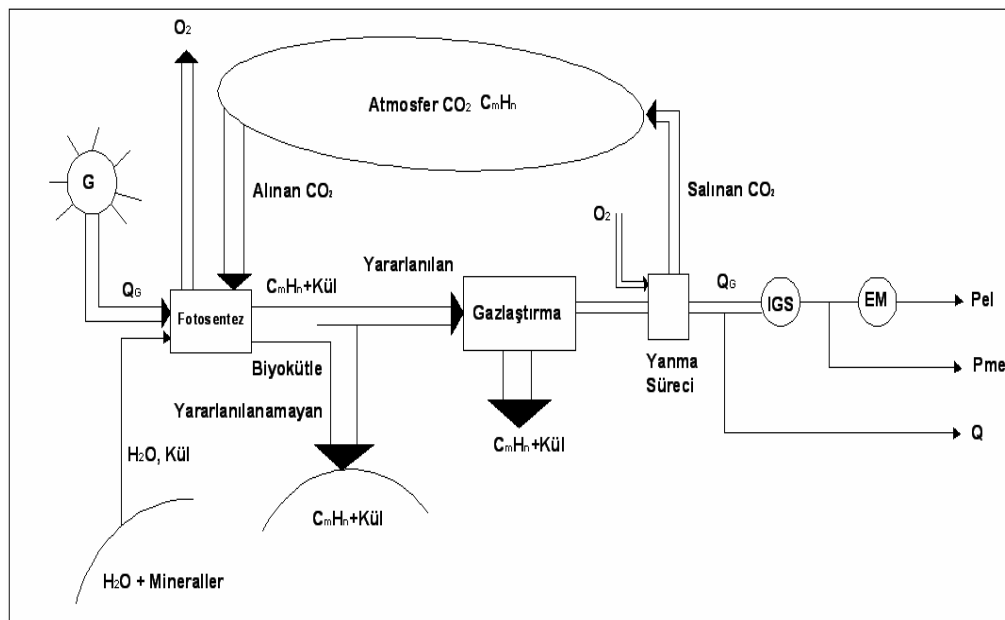
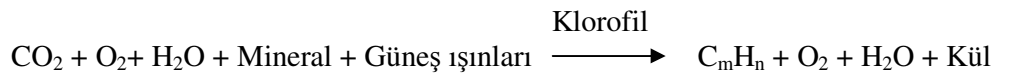
Yenilenebilir enerji kaynakları, kısa erimli, güneş ışıma enerjisinin depolanmış ve işlenmiş biçimleridir (biyokütle, hidrolik, rüzgar, dalga vb.). Fosil enerji kaynakları ise, çok uzun erimli de gerçekleşmiş güneş ışıma enerjisinin depolanmış ve işlenmiş biçimidir (ikincil biyokütle).

Çevreyi kirliletmeyen yenilenebilir enerji kaynakları arasında, özellikle gelişmekte olan ülkeler için uygulama alanı en geniş olan enerji kaynaklarından birisi de biyokütledir. Biyokütle yalnız yenilenebilir olması ile değil, her yerde yetiştirilebilmesi, sosyo-ekonomik gelişme sağlaması, çevre korumasına katkısı, elektrik üretimi, kimyasal madde ve özellikle taşıt araçları için yakıt elde edilmesi nedeni ile stratejik bir enerji kaynağı sayılmaktadır. Dünya’da petrol, kömür gibi fosil enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve çevre kirliliği sorunu dolayısıyla, biyokütle, enerji sorununun çözümünde giderek önem kazanmaktadır. Bilindiği gibi enerji sektöründe en büyük problem depolamadır. Bütün bu problemler göz önüne alındığında biyokütle çok büyük üstünlük sağlamaktadır [47].

3.2.1. Biyokütlenin tanımı

Biyokütle biyolojik kökenli, kısa erimli organik madde kütesidir. Ana bileşenleri karbonhidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm doğal maddeler biyokütle enerjisi kaynağı, bu kaynaklardan elde edilen ise biyokütle enerjisi olarak tanımlanır. Biyokütle, 100 yıllık periyottan daha kısa sürede yenilebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan atıkları ve gübre, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik madde olarak tanımlanmıştır [46].

Biyokütle, güneş ışıma enerjisinin fotosentez üzerinden depolanmış bir biçimdir ve fosil yakıtların hammaddesidir (Şekil 3.3). Biyokütle enerjisi yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürerek toplanması sonucu oluşan biyolojik kütle ve buna bağlı organik madde kaynaklarından üretilen enerji olarak tanımlanır [48].



Şekil 3.3. Güneş ışıma enerjisinin fotosentez süreci üzerinden biyokütle olarak depolanması ve dünya karbon/oksijen döngüsü

Enerji kaynağı olarak kullanılan biyokütle, bol bulunabilmesi, çevre kirliliğine neden olmaması, elde edilen enerjinin az masrafla üretilmesi, biyokütle de yüksek nem içeriğinin, düşük yoğunluklu olmasının sakıncalı olmasına rağmen, son yıllarda önem taşımaktadır. Aynı zamanda az miktardaki kükürt oranına bağlı olarak çevre kirliliğine neden olan SO₂ oluşumunun önlenmesi ve atmosferdeki CO₂'in kullanılması ile oluşan sürekli yenilenebilir kaynaklara dayalı olması bu önemi artırmaktadır.

3.2.2. Biyokütle kaynakları

Birincil enerji kaynaklarının sınırlı olması çevre bilincinin giderek artması, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırma ve bu kaynakları en uygun koşullarda kullanma çalışmalarını hızlandırmıştır.

Yenilenebilir ve yerli imkanlarla elde edilen enerji kaynaklarından olan biyokütle, biyolojik kaynaklardan gelen tüm enerji kaynaklarını içerir

Enerji hammaddesi olarak yenilenebilir bir kaynak olduğu kabul edilen biyokütle tarım ve orman ürünlerinin atıkları, evlerden atılan çöpler, özel olarak yetiştirilen nişastalı, şekerli ve yağlı bitkiler, ağaçlar, yonga, yosunlar, algler, hayvansal atıklar, lağım suları, gübre ve gıda sanayi atıkları gibi maddeler oluşturmaktadır. 2000 yılındaki dünya biyokütle potansiyeli aşağıdaki Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Dünyanın 2000 yılındaki biyokütle potansiyeli [49]

Biyokütle Kaynağı	Potansiyel ($\times 10^{11} \text{m}^3/\text{yıl}$)
Odun ve Odun Artıkları	7,25
Belediye Katı Atıkları	1,19
Bitkisel ve Tarımsal Atıklar	4,35
Su Bitkileri	2,23
Endüstriyel Katı atıklar	0,61
Diğer Atıklar	0,29
Toplam	15,93

3.2.3. Dünyada’da biyokütle potansiyeli ve kullanılabilirliği

Biyokütle kökenli yakıtların (odun ve diğer çeşitler) tüketim miktarı bir çok ülkede ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde kesin olarak tespit edilmemektedir. Ancak, endüstrileşme ile birlikte doğal kaynakların azalmaya başlaması biyokütlenin değerlendirilmesinin gündeme getirerek bu kaynağı öne çıkarmaya başlamıştır.

Biyokütlenin sanayileşmiş ülkelerdeki birinci enerji tüketimindeki payı genel olarak %3'ün altında ise de bazı ülkeler biyoenerji kaynağını önemli ölçüde kullanmaya başlamışlardır. Örneğin, Finlandiya %15, İsveç %9, Amerika %4, Eski SSCB Devletleri %3-4 oranında biyokütle enerji kullanmaktadırlar. Ekonomik ve sosyal problemlerin olduğu gelişmekte olan bazı ülkelerde biyokütle önemli ölçüde kullanılmaktadır. Gelecek yüzyılın ortalarında dünya nüfusunun %90'nın gelişmekte olan ülkelerde yaşamaya başlayacağı varsayımı ile biyokütle enerjisi büyük bir olasılıkla önemli bir enerji kaynağı olarak yerini koruyacaktır. Bunun yanı sıra biyokütle yakıtlarının atmosferik karbondioksit kirlenmesine etkisinin az olmasından dolayı, birçok sanayileşmiş ülke, biyokütle enerji üretimini artırabilmek için planlar yapmaktadır [42]. Çizelge 3.8'de Dünya biyokütle potansiyeli verilmiştir.

Çizelge 3.8. Dünya biyokütle potansiyeli [46]

Alanlar	Biyokütle (%)	Üretim (%)
Ormanlar	11	44
Koruluklar	5	1
Otlak çayır	5	9
Tarıma uygun alanlar	3	5
Çöl	5	0
Göl ve nehirler	1	3
Okyanuslar	70	38

Avrupa ülkeleri 2000 yılına kadar yıllık yaklaşık $3,78 \times 10^2$ Gj'lük kullanılabilir enerjiye dönüşebilecek biyokütle potansiyeline sahiptir. Bu değer 1985 tahmini enerji tüketiminin yaklaşık %7'sine eşittir. ABD'de ise 2000'li yıllarda enerji üretiminde toplam biyokütle potansiyelinin yaklaşık olarak 700 milyon ton olacağı öngörülmektedir [50].

10 Güney Afrika ülkesinde 82,2 milyon olan toplam nüfusun 79 milyonu enerji gereksinimini biyokütleden karşılamaktadır. Bölgede küçük ya da orta büyüklükteki sanayiler için de biyokütle önemli bir kaynaktır. Büyük ölçekli elektrik üretiminde de alkol kullanımı yaygındır.

Biyokütle enerjisinin yaygın olarak kullanan ülkelerden birisi olan Hindistan'da köylerde elle çalıştırılan küçük biyogaz üretim tesisleri kullanılmaktadır. Bu ülkede biyogaz üretiminde temel kaynak odun, odun atıkları ve tarımsal atıklardır. Bu yolla yemek pişirme, ısıtma ve elektrik elde etmek gibi gereksinimler karşılanabilmektedir. Çizelge 3.9'da ülkeler bazında dünyadaki biyokütle enerjisi kullanımı verilmektedir [50].

Çizelge 3.9. Dünyada biyokütle enerjisi kullanımı

Ülke	1990 Nüfusu (milyon)	Yüzölçümü (Mha)	Toplam Enerji kullanımı (MTEP)	Biyokütle kullanımı			
				BUN	WEC		UN
					Klasik	Modern	
Kuzey Amerika	276	1833	227	96	38	19	
Batı Avrupa Ülkeleri	454	355	1379	32	20	10	
Doğu Avrupa Ülkeleri	389	2342	1637	44	30	10	
Japonya + Avustralya	149	827	503	1	4	7	
Sanayileşmiş Ülkeler toplamı	1263	5357	5796	173	92	46	132
Latin Amerika Ülkeleri	448	2016	417	88	125	46	
G.Doğu+ K.Afrika ülkeleri	271	1190	294	15	21	0	
G. Afrika Ülkeleri	501	2363	291	180	141	5	
Pasifik+ G.D.Asya Ülkeleri	1663	1281	1091	331	347	16	
Güney Asya Ülkeleri	1146	752	498	296	204	8	
Gelişmekte olan ülkeler	4029	7602	2591	910	538	75	165
TOPLAM DÜNYA	5292	12959	8387	1083	1051	880	

Biyokütle kaynakları içerisinde yer alan odun hayvan ve bitki artıkları, ülkemizde uzun yıllardan beri özellikle ısıtma, yemek pişirme alanlarında etkin bir şekilde tüketilmektedir.

Birincil enerji kaynakları açısından Türkiye'nin enerji potansiyeline bakıldığında, son on yıldır hemen hemen sabitleşmiş verilerle yılda 18 milyon ton odunun üretilip tüketildiği görülmektedir.

Önceki verilerine göre yerli enerji üretiminin %25,5'i odun ve tezek ile sağlanmakta, toplam birincil enerji tüketiminin ise %9,8'i odun ve tezekten karşılanmaktadır [42].

Ülkemizde ormanlarımız, resmi üretimin yanı sıra hemen hemen resmi üretime yakın miktarda kaçak kesim yapılması nedeniyle büyük oranda tahrip edilmektedir. Odunun yakıt olarak tüketilmesi yalnızca çevresel bozulmalara neden olmamakta aynı zamanda önemli bir sanayi maddesi yakılarak tüketilmektedir. Bu durumun önlenmesinin son yıllarda üzerinde önemle durulan çözümlerden birisi 'Enerji Ormanları'dır.

3.2.4. Biyokütle enerjisi

Ana bileşenleri karbon-hidrat bileşikleri olan bitkisel veya hayvansal kökenli tüm doğal maddeler biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan üretilen enerji biyokütle enerjisi olarak tanımlanmaktadır [46].

Biyokütle yüzyıllık zaman aralığında daha kısa sürede yenilenebilen karada ve suda yetişen bitkiler, hayvan artıkları, besin endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren tüm organik maddeler olarak da tanımlanabilir.

Yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütlenin toplam enerji eşdeğeri 2880 EJ olup (65376 MTEP) olup bu değer dünya enerji tüketiminin yaklaşık 8 katına eşittir. Günümüzde ise ancak, %7'si kullanılabilmektedir [46].

Biyokütle enerji kaynakları klasik ve modern olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Klasik biyokütle kaynakları, normal ormanlardan elde olunan yakacak odun ile bitki ve hayvan artıklarından oluşur. Modern biyokütle kaynakları ise enerji ormanlarından

elde edilen odun, enerji hammaddesi üretimi amacıyla yetiştirilecek enerji bitkileri olarak adlandırılır.

Biyokütle kökenli yakıtların tüketim miktarı birçok ülkede ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde kesin olarak belirlenememektedir. Ancak endüstrileşme ile birlikte doğal kaynakların azalmaya başlaması biyokütleyi değerlendirilmesini gündeme getirerek bu kaynağı öne çıkartmaktadır [39].

Ülkeleri %3-4 oranında biyokütle enerjisi kullanmaktadır. Ekonomik ve sosyal problemlerin olduğu gelişmekte olan bazı ülkelerde biyokütle önemli ölçüde kullanılmaktadır. Dünyanın birincil enerji tüketiminin %12'si bu enerjiden karşılanmaktadır. Tek tek ülkelere bakıldığında bu oran daha da büyümektedir. Çizelge 3.5'de biyokütle enerji kullanımının Dünya'daki son durumunu karşılamaktadır.

Türkiye biyokütle enerjisinin üretimi açısından güneşlenme, alan, su ve iklim koşulları yönüyle en uygun ülkelerden birisidir. Türkiye'nin enerji bütçesinde ticari sayılmaması gereken odun ve bitki artıkları olarak klasik biyokütle önemli bir yer tutmaktadır.

3.2.5. Türkiye'nin biyokütle enerjisi potansiyeli

Ülkemizin halen 858 TWh/yıl (77,31 MTEP/yıl) civarında olan temiz enerji gereksinimi ile 2000 yılında 91,030 MTEP (4,01 EJ) ve 2010 yılında 175,074 MTEP (7,38 EJ) olacağı öngörülen enerji isteğinin, yenilenebilir enerji potansiyelinden küçük olduğu görülmektedir. Bu durumda, yeterli gelişmeler yapılırsa ve tesisler kurulsaydı, isteğin tümünün yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması söz konusu olabilecektir. Bu büyük potansiyelin önemli payını da biyokütle enerjisi oluşturmaktadır. Türkiye'nin yenilenebilir biyokütle potansiyeli Çizelge 3.6'da verilmiştir [46].

Biyokütlenin fiziksel özellikleri bir üründen diğerine farklılık göstermektedir. Karbon, hidrojen ve oksijen oranları sırasıyla %41,78 - %47,80, %0,63 – 6,40, %40,77 – 45,46 arasında değişmektedir. Biyokütlede kükürt oranının düşük olması bir üstünlük oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra kül oranı (%1,61 – 16,24) ve ısı değeri (16,50 – 18,40 MJ/kg) bakımından biyokütlenin özellikle linyit kömürlerine (%18,59 – 55,51 ve 5,50 – 14,50 MJ/kg) göre belirgin bir üstünlüğü vardır. Biyokütle linyite göre daha iyi ısı yakıt karakteristiğinin yanında, önemli sayılabilecek düzeyde düşük kükürt ve kül içeriğine sahiptir.

3.2.6. Tarım ve orman biyokütlesi

Tarımsal kalıntılar, hasatlardan sonra tarlada kalan bitki parçaları, paketleme işlemlerinden sonra üretilen kalıntılar ve işleme süreçlerinden atılan maddeler olarak tanımlanmaktadır. Tarımsal ürün atıklarının büyük çoğunluğunu her yıl üretilen kalıntıların % 85’den fazlasını oluşturan mısır koçanı, buğday samanı ve soya fasulyesi tarla atıkları ile pirinç samanı, pirinç kabukları, yer fıstığı kabukları, pamuk atıkları, arpa, buğday, yulaf, çeltik sapları gibi atıklar oluşturmaktadır.

Ormanlar, dünya biyokütle potansiyelinin yaklaşık %70’inin oluştururlar. Bu nedenle ağaç ve türevleri biyoyakıt endüstrisinde önemli bir potansiyeldir. Günümüzde ABD, enerji gereksiniminin %3,7’sinin ağaçtan karşılanmaktadır. Çizelge 3.10’da bazı biyokütle yakıtlarının elementer analizi verilmiştir [51].

Çizelge 3.10. Bazı biyokütle yakıtlarının elementer analizi

	Karbon (%)	Hidrojen (%)	Azot ve kükürt (%)	Oksijen (%)
Susam	49,4	6,0	0,4	44,2
Küspe	48,0	6,0	-	46,0
Hindistan cevizi kabuğu	43,0	5,8	0,2	41,0
Odun				
Meşe	49,4	6,3	-	44,5
Çam	49,9	6,3	-	43,8
Turba	60,0	6,0	2,0	32,0

Odunun biyokütle kaynağı olarak üretiminin yanı sıra enerji ormanları şeklinde üretim çalışmaları yapılmaktadır. Son yapılan çalışmalara göre ülkemizde 4 milyon hektar bozuk, 1 milyon hektar verimli olmak üzere toplam 5 milyon hektar enerji orman alanı mevcuttur. Biyokütle kaynağı odun diğer yakıtlara göre daha kısa zamanda dayanma ve çabuk ısı verme özellikleri yanında kolay sağlanabilmesi ve fiyatının ucuz olması nedeniyle geniş bir şekilde kullanılmaktadır [51].

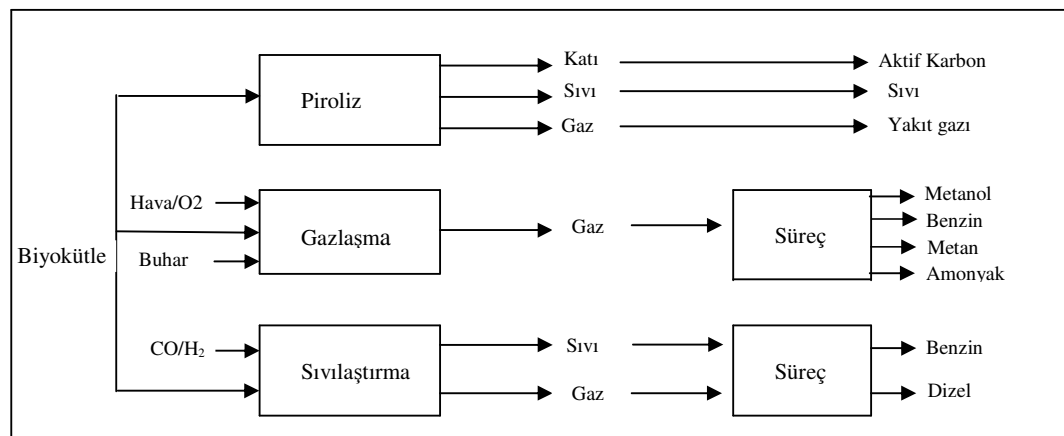
3.3. Biyokütle Uygulanan Dönüşüm Süreçleri

Biyokütle ile yanma sürecinde kullanılabileceği gibi bunun yanı sıra çeşitli dönüşüm süreçlerinde de istenen değerde katı, sıvı ve gaz yakıt elde edilebilmektedir. Uygulanan bu dönüşüm süreçleri ve kullanılan biyokütlenin özelliğine bağlı olarak yakıt çeşitliliği değişmektedir. Biyokütleye uygulanan dönüşüm süreçleri, fiziksel, termokimyasal (ısıl) ve biyolojik-kimyasal süreçlerden oluşmaktadır.

3.3.1. Termokimyasal süreçler

Termokimyasal süreçler; doğrudan yanma, gazlaştırma, sıvılaştırma ve pirolizdir. Isıl süreçlerin hepsinde değişik reaktörler kullanılmakta, değişik koşullarda çalışılmakta ve değişik ürünler elde edilmektedir.

Bu ürünlerin ve elde ediliş yolları Şekil 3.4’de görülmektedir [44].



Şekil 3.4. Termokimyasal süreçlerden elde edilen birincil ve ikincil ürünler

Termokimyasal dönüşüm sonucunda oluşan ürünler doğrudan kullanılabilceği gibi, daha kimyasal bileşiklere ya da yakıtlara çevrilerek de kullanılmaktadır. Çizelge 3.11’de termokimyasal dönüşüm ürünleri ve teknolojileri verilmiştir.

Çizelge 3.11. Termokimyasal dönüşüm ürünleri ve teknolojileri [52]

Ürün	Oluşum	Bileşenler	Dönüşüm Yöntemi
Yakıt Gazı	DİD gazlar OID gazlar	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , N ₂ CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , Yüksek Hidrokarbonlar	Piroliz, Hava Gazlaştırma Piroliz, O ₂ Gazlaştırma
Sıvı	Yapay sıvı yakıt Katı sıvı bulamaç Katı-su bulamaç	Suda çözünmeyen Yüksek kaynama Noktalı O ₂ ’li bileşikler Aktif karbon ve sıvı ürün Aktif karbon, su ve Dengeleyici (Stabilizer)	Piroliz, Sıvılaştırma Piroliz Piroliz
Sulu Çözelti	Atık su	Suda çözünebilen düşük Kaynama noktalı O ₂ ’li Bileşikler	Piroliz, Sıvılaştırma, Gazlaştırma
Katı	Aktif Karbon		Piroliz
Isı	Sıcak Su		Yanma

Sıvı ürün, elementer bileşimi biyokütleyle benzeyen ve oksijenli hidrokarbonların çok karmaşık bir karışımdan oluşmaktadır. Sıvı ürün genellikle oil ya da bio-oil, daha yaygın olarak da “tar” olarak isimlendirilmiştir.

Piroliz sürecinden elde edilen katı ürün, gelişmiş ülkelerde metalurji endüstrisinde uygulamaları sınırlı olan char’dır.

Gaz, işletme içinde veya dışında güç üretimi için kullanılan orta ısı değerli yakıt gazlarıdır. Bu gaz CO, CO₂, H₂, CH₄ ve doymuş miktarlarını içerir. Gaz, metanol ve benzin gibi daha yüksek değerli ürünlere fiziksel ve kimyasal olarak yükseltgenebilir.

Su besleme olarak kullanılan biyokütledeki nemden ve aynı zamanda piroliz sırasında bir tepkime ürünü olarak oluşmaktadır [52].

Biyokütlenin yüksek nem içeriği yanma sürecine engel oluşturur ve önemli miktarda enerji kaybına neden olur. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında daha düşük ısı içeriğine sahiptir. Genellikle düşük yığın yoğunluğuna sahip olduğundan depolamada ve yakma işlemlerinde daha büyük hacimde malzemelere gereksinim duyulur. Fiziksel halleri homojen olmadığından, taşınması, depolanması gibi işlemlerde sorunlar ortaya çıkmaktadır. Biyokütle düşük miktarda kül ve kükürt içeriğine sahiptir. Oluşan külün bileşimi genelde SiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 'den oluşmaktadır.

Yanma

Doğrudan yanma, biyokütlenin kendisi yakıt olarak kullanıldığından, tam bir dönüşüm süreci değildir. Biyokütleden yanma ile elde edilen enerjinin geleneksel şeklidir ve dünya nüfusunun yarısından fazlasına enerji kaynağı sağlamaktadır.

Yanma, biyokütlenin partikül boyutuna, şekline, yoğunluğuna, nem içeriğine ve kalorifik değerine bağlıdır. Yanma için hammadde kuru olmalıdır. Nemli maddelerde enerjinin bir kısmı biyokütledeki nemi buharlaştırmak için kullanılacağından yanma verimi düşer.

Gazlaştırma

Termokimyasal olarak gazlaştırma, biyokütle ve kömür gibi karbonlu maddelerin yüksek sıcaklıkta kısmi oksidasyon ile gaz ürünlere dönüştürülmesidir. Gazlaşma genellikle yoğunlaşmayan gazların (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 ve çok az C_2H_6) üretiminde kullanılır [53]. Gazlaşma işlemi bir reaktörde ve hava, oksijen, kısmi oksidasyon, buhar veya bunların karışımlarının kullanıldığı reaktif atmosferinde gerçekleştirilir. Sürecin temel basamakları yine bu reaktörde gerçekleşir. Gazlaştırıcılar her ne kadar atmosfer basıncı altında çalıştırılırsa da süreç verimliliğini arttırmak için yüksek basınç uygulamaları da vardır [54]. Gazlaşma sıcaklığı $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'den daha da yüksek olabilir. Gaz ürünler, yoğunlaşmış tarların atıksı fraksiyonlarını, aerosolları ve partikülleşmiş külleri içerir.

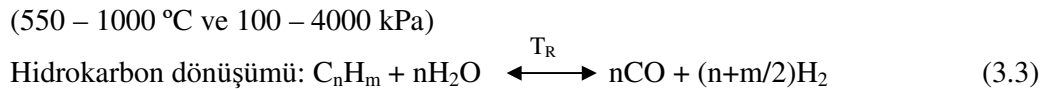
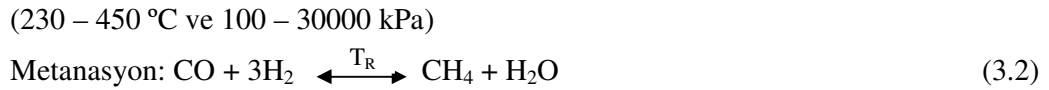
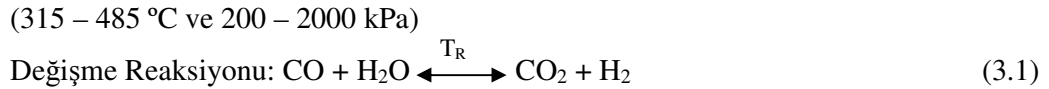
Gazlaştırmadaki gazların bileşimleri, besleme stoğunun nem içeriğine, besleme gazların özelliklerine, tepkime sıcaklığına ve piroliz ürünlerinin yükseltgenme özelliklerine bağlı olarak değişir [55]. Gazlaştırma kullanılan ortama göre, havada gazlaştırma, oksijenli ortamda gazlaştırma, buhar ortamında gazlaştırma ve karbondioksit ortamında gazlaştırma olarak sınıflandırılmaktadır.

Hava ortamında gazlaştırma, çok basit ve iyi bilinen bir süreç türüdür [56]. Ürünler yüksek oranlarda azot içerirler. Ürün gazlar seyreltik haldedir ve enerji olarak düşük değere sahiptirler (4-600 kJ/Nm³). Bu süreçte elde edilen ürünlerin mol olarak yüzdesi; %15-30 CO, %11-20 H₂, %4-15 CO₂, %0,5'ten az CH₄ ve %45-60 N₂'tur.

Oksijen ortamında gazlaştırmada ise ürünler daha yüksek enerjili (12000 kJ/Nm³) ve CO ve H₂ gibi daha değerli gazlardan oluşurlar. Fakat kullanılan oksijen ünitesinin maliyeti oldukça yüksektir [57].

Oksijen veya havanın farklı miktarlarda karışımı olan buhar ortamında gazlaştırmada H₂/CO oranı daha yüksektir ve metan, metanol, hidrojen gazı, nafta, basit aromatik bileşikler (C₁-C₅) gibi çok değerli ürünler yüksek oranda elde edilirler [58].

Biyokütlenin buhar ortamında gazlaştırılmasının gaz fazı reaksiyonları şu şekilde verilmiştir.

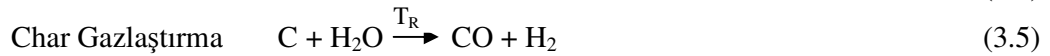


Karbondioksit ortamında gazlaştırılmasında ise süreç yavaştır ve karbon – karbondioksit reaksiyonu endotermiktir [59].

Çizelge 3.12. Gazlaştırma sürecindeki temel tepkimeler [60]

	Tepkime Sıcaklığı	Basıncın Etkisi	ΔH (kJ)
<u>Heterojen gaz/katı tepkimesi</u>			
1. Su Gazı Tepkimesi: $C + H_2O \xrightarrow{T_R} CO + H_2$	Yüksek	-(CO+H ₂)	+119
2. Boudouard Tepkimesi: $C + CO_2 \xrightarrow{T_R} 2 CO$	Yüksek	-CO	+162
3. Hidrojenle Gazlaştırma: $C + 2H_2 \xrightarrow{T_R} CH_4$	Yüksek/Orta	+CH ₄	-87
4. Kısmi Yanma: $C + 1/2O_2 \xrightarrow{T_R} CO$	Yüksek	+CO	-123
Tam Yanma: $C + O_2 \xrightarrow{T_R} CO_2$	Yüksek	+CO ₂	-406
<u>Homojen gaz/gaz tepkimesi</u>			
6.Su Gazı Tepkimesi: $CO + H_2O \xrightarrow{T_R} H_2 + CO_2$	Yüksek/Orta	0	-42
7.Metanlaştırma: $CO + 3H_2 \xrightarrow{T_R} CH_4 + H_2O$	Orta/Düşük	+CH ₄	-206

Gazlaştırmada CO₂, H₂O ve O₂ kullanılarak biyokütleden temiz CO ve H₂ üretimi basit bir yöntem olarak bilinir. Piroliz sonucu oluşan katı atık veya yarı kokların gazlaştırılmasında ise oluşan kimyasal değişimler şu şekilde verilmiştir.



Biyokütlenin katalizörsüz gazlaştırılmasından elde edilen gaz ve özgül gaz ürünlerin bileşimi Çizelge 3.13’de, katalitik buhar gazlaştırılmasından elde edilen gaz ve özgül gaz ürünlerin bileşimi ise Çizelge 3.14’de verilmiştir [61].

Çizelge 3.13. Biyokütlenin katalizörsüz buhar gazlaştırılmasından elde edilen gaz ürünler

Gazlaşma Sıcaklığı (°C)	Buhar/Biyokütle (g/g)	Gaza Dönüşüm (%)	Gaz Bileşimi (%)			
			H ₂	CO ₂	CO	CH ₄
750	0,86	65	43	32	6	16
780	1,50	80	54	23	7	15
800	1,50	80	54	21	6	18
840	0,84	68	50	24	7	17

Çizelge 3.14. Biyokütlenin katalizörlü buhar gazlaştırılmasından elde edilen gaz ürünler (Ni katalizör)

Gazlaşma Sıcaklığı (°C)	Buhar/Biyokütle (g/g)	Gaza Dönüşüm (%)	Gaz Bileşimi (%)			
			H ₂	CO ₂	CO	CH ₄
540	0,3	68	29,5	34,3	10,8	25,4
560	0,3	68	29,5	34,3	10,8	25,4
740	0,7	90	53,1	15,5	28,3	3,1
770	0,7	90	53,1	15,5	28,3	3,1

Gazlaştırma sonucu elde edilen gazlar toplama veya dağıtma şebekelerindeki koşullara bağlı olarak endüstriyel ısı süreçleri, kurutma, pişirme ve kentsel ısıtma işlemlerinde kullanılabilir. Biyokütle gazlaştırma ürünlerinin potansiyel kullanım alanlarından biri de elektrik jeneratörleridir. Ayrıca hidrojen ve sentez gazı (H₂ + CO) hazırlanmasında da önemli ölçüde kullanılmakta olup son yıllarda sentetik sıvı yakıtta üretilmektedir.

Dolaşımli akışkan yatakta biyokütle gazlaştırma işleminde elde edilen gaz ürünler incelendiğinde gaz üründen katranın tamamen ayrıldığı, farklı partikül boyutlarında çalışıldığı, ilk yatırım maliyetinin düşük olduğu ve proste kullanılan cihazların oldukça basit olduğu yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

Sıvılaştırma

Sıvılaştırma, düşük sıcaklıkta, yüksek basınçta ve katalizör varlığında gerçekleştirilen bir ısıl süreç olup maksimum miktarda sıvı ürün verir. Sıvılaştırma

da hammaddenin kurutulmasına gerek yoktur. Elde edilen ürün, fiziksel ve kimyasal olarak piroliz sıvı ürününden daha kararlıdır ve hidrokarbon üretimi için saflaştırma işlemlerine gerek yoktur. Yöntemin olumlu yönü kullanılan katalizörlerin hidrojenasyonu artırıcı rol oynamasıdır. Sıvılaştırma yüksek basınç altında hidrojen ortamında yapıldığından yüksek basınç maliyeti artırmaktadır. Yöntemin olumsuz yönlerinden birisi de kullanılan çözücü ve katı ürünün sıvı üründen ayrılmasının zorluğudur [44].

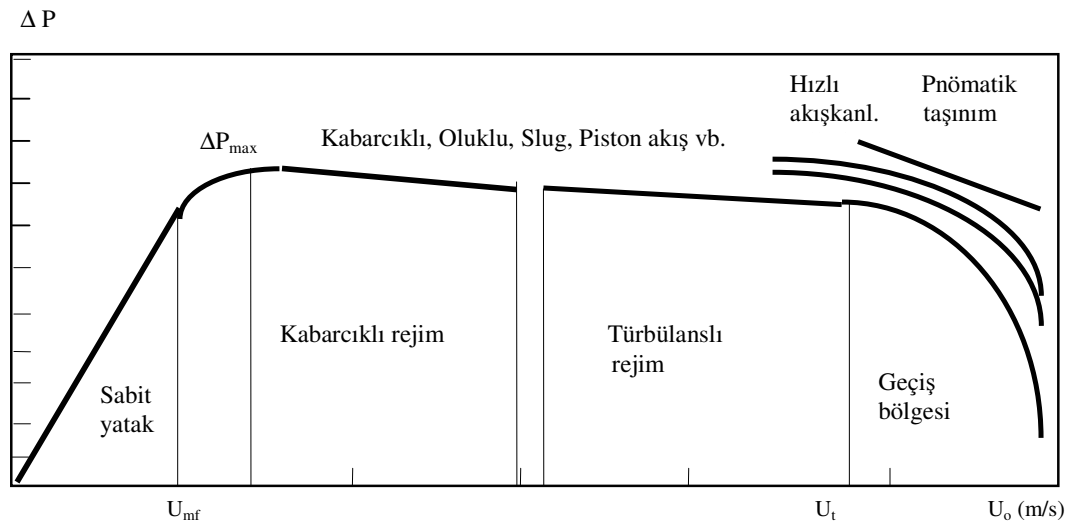
Piroliz

Piroliz, organik maddelerin oksijensiz ortamda ısıtılarak gaz, sıvı ve katı ürünlere bozundurulmasıdır. Bu bozundurma işlemi, katı yakıt açısından değerlendirildiğinde karbonizasyon, sıvı ve gaz açısından değerlendirildiğinde ise piroliz olarak adlandırılır.

Karbonizasyon işleminde ulaşılan son sıcaklık ürünün yapısını etkilemektedir. Piroliz genelde düşük sıcaklıkta 500–800 °C’de gerçekleşir. Sıvı ürün çıkışı 300 °C dolaylarında başlamakta ve 550–600 °C’ye kadar devam etmektedir. Gaz ürün çıkışı ise 900–1000 °C’ye kadar devam etmektedir [44].

Hava debisi arttıkça yatak boyunca olacak basınç düşüşü de Şekil 3.6'de görüldüğü üzere doğrusal artış göstermektedir. Basınç düşümü, gaz (hava) akışkanının, partiküllerle oluşturduğu sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Gaz akışı biraz arttırılırsa, partiküller birbirinden ayrılmaya bazıları titreşmeye başlayacaktır. Bu tip yatağa genleşmiş yatak adı verilir.

Akışkan ile katı partiküller arasındaki sürtünme kuvveti, parçacıkların ağırlığına eşitlenmekte ve yatağın herhangi bir noktasındaki basınç düşümü, yaklaşık olarak o bölümdeki katı partiküller ile akışkanın ağırlığına denk olmalıdır. Bir başka deyişle, alttaki partiküller üsttekilerin ağırlığını hissetmemektedir. Bu nokta, akışkanlaşmanın başlangıç noktasıdır. Böylece, yataktaki partiküller gaz akışı ile kaldırılmakta ve sistem akışkan özelliği kazanmaktadır. Bu noktadan itibaren yatak basınç düşümü sabit kalmaktadır. Böylece, yatak basınç düşümü, kaldırma kuvveti yatak ağırlığına eşit olmalıdır. Bu noktaya, minimum akışkanlaşma noktası, hava hızına minimum akışkanlaşma hızı denilmektedir. Yatak minimum akışkanlaşma durumundadır. Akışkan yataklı sistemlerin en önemli tasarım ve işletme parametresi minimum akışkanlaşmadır. Minimum akışkanlaşma hızı noktasından itibaren yatak basınç düşümü sabit değere ulaşmaktadır. Akışkan yatak uygulama tipine göre gaz hızına bağlı olarak, basınç düşümü eğrisi Şekil 3.6'daki gibi değişim gösterir [62].



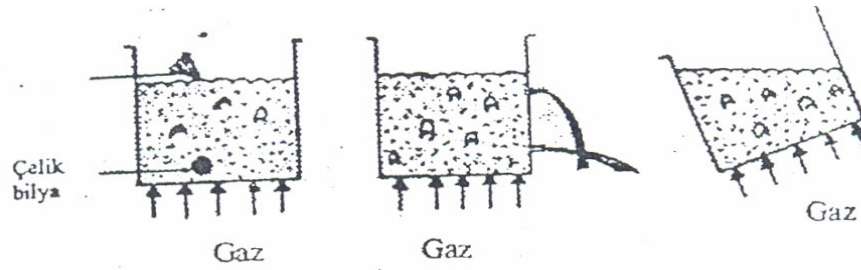
Şekil 3.6. Yatak basınç düşüşünün gaz hızı ile değişimi, akışkanlaşma rejim bölgeleri

Minimum akışkanlaşma hızının üzerindeki hızlarda yatak düzgün olarak genişmekte ve kabarcıklar ya da kararsızlık görülmez, yatakta düzgün akışkanlaşma sağlanmaktadır. Yatak basınç düşümü akışkan hızı artsa da sabit kalmaktadır. Şekil 3.6'da akışkan hızının artması ile birlikte kabarcık oluşumu başlamakta, yatak yüksekliği fazla değişmemektedir. Bu tip yataklara kabarcıklı akışkan yataklar ya da 'heterojen akışkanlaşmış yatak' denilmektedir.

Kabarcık oluşumu genellikle, partikül ve akışkanın yoğunlukları arasındaki fark yükseldikçe görülür. Ayrıca, düşük viskoziteli akışkanlarda, yüksek gözenekli, büyük partiküllerle çalışıldığında kabarcıklaşma olasılığı büyüktür. Partiküller arası kuvvetler arttıkça kabarcıklaşma azalır. Dolayısıyla bu karmaşık dinamik sistemin davranışını teorik olarak belirlemek çok zordur. Yatak yüksekliğinin yatak çapına göre büyük olduğu durumlarda Şekil 3.5'de 'yığılma' (slugging) denilen olay meydana gelmektedir. Dağıtıcı elekte, akışkanın deliklerden geçmesi ile oluşan kabarcıklar yatak yüzeyine erişmeden birleşirler ve üzerilerinde kalan malzemenin alt taraftaki malzemedan ayrılmasına neden olmaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur, verimin ve ısı transferinin kötüleşmesine sebebiyet vermektedir. Akışkan hızı daha da artarsa bazı küçük partiküller terminal hızlarına erişmekte ve sistemi terk etmektedir. Bu duruma da 'taşınım evresi' denilmektedir. Malzeme miktarı azalmakta ve yerine yenisinin konulması gerekmektedir. Yatak malzemesi azaldığı için de basınç düşümü, yeni malzeme eklenmez ise düşmeye başlamaktadır (Şekil 3.6). Akışkanlaşma tekniği genellikle, 10 μ m ve 3mm arasındaki partiküllere uygulanmaktadır. Toz halindeki materyaller, ultra küçük (0,1 – 1,0 μ m), süper küçük (1,0 – 10 μ m) veya parçacıklı (10 – 100 μ m) olmak üzere 100 μ m'ye kadar alt sınıflara bölünmektedir. Parçacıklı katılar 100 μ m'den 300 μ m'ye kadar materyalleri, kırılmış katılar ise 3 mm'den büyük şekilsiz partikülleri içermektedir [62].

Akışkanlaşmanın düzgün veya kabarcıklı olması, katı parçacıklarının ve akışkanın özelliklerine bağlıdır. Yatak geometrisi, gaz akışkan hızı, dağıtıcı elek, yatak içi bölme, engel ve ısı değiştiriciler, parçacıkların karışma hızına, kabarcıkların büyüklüğüne ve heterojenliğin derecesine etki ederler. Akışkanlaşmış bir yatak kaynayan bir sıvının özelliklerini gösterir. Yatak içine atılan bir cisim, yoğunluğuna

göre ya yüzecek ya da batacaktır. Yatak bir yana eğildiği zaman yatağın üst yüzeyi yatayda kalmaktadır. İki yatak birleştirildiği zaman serbest yüzeyleri eşitlenmektedir. Akışkan yatağı içeren kabın bir noktasında bir delik açılırsa, katı taneler Şekil 3.7’de görüldüğü üzere akışkanla birlikte o noktadaki statik basınçla orantılı olarak şiddetle fışkırır. Kısacası bir akışkan yatak newtonian olmayan bir akışkanın özelliklerini göstermektedir [62].



Şekil 3.7. Akışkanlaşmış yatağın özellikleri

Yerçekiminden etkilenmeyen, akışkanlaşmış yatak, sıvı özelliklerine benzer nitelikte özellikler göstermektedir. Yani, herhangi bir seviyede, statik basınç o bulunan seviyenin daha üzerindeki parçacıkların ağırlığına yaklaşık eşit alınmaktadır. Yatak yüzeyi düzdür, içindeki kabın şeklini almaktadır. Kabın etrafında herhangi bir yerde delik açılırsa, partiküller üzerindeki basınca bağlı olarak fışkırır. Yatağın yoğunluğundan daha yoğun bir cisim ya batacaktır, ya da hafif ise yüzecektir. Parçacıklar yatak içerisinde çok iyi karıştırıldığı takdirde, yatak ısındığı zaman homojen bir sıcaklık dağılımı gösterecektir. Gaz hızındaki artış, yatak türbülans enerjisindeki artış, dolayısıyla yatak hidrodinamik davranışında bir çok değişmelere sebebiyet verebilecektir. Örneğin gaz hızındaki artış, yatağın bir akışkanlaşma rejiminden diğerine geçmesine neden olmaktadır.

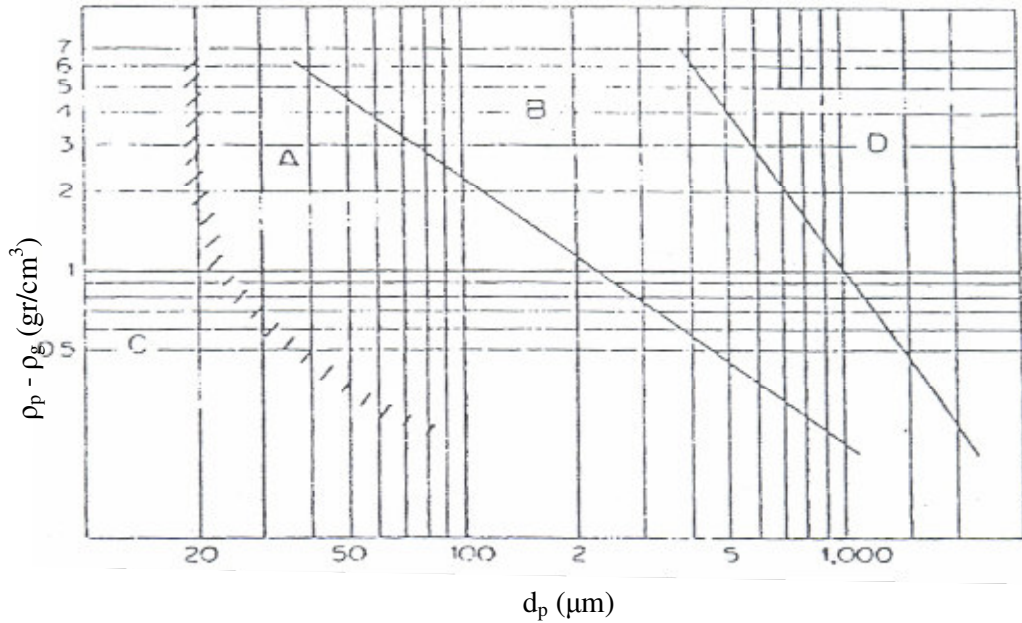
Minimum akışkanlaşma noktasında, Şekil 3.6’da bir kambur görülmektedir. Basınç düşümü eğrisi geriden gelerek, yani hız yavaş yavaş azaltılarak izlenirse bu kambur görülmemektedir. İlk akışkanlaşma sırasında parçacıklar arasındaki sürtünme kuvvetlerinin yenilmesi gerekliliğidir. Akışkan hızı yavaş yavaş azaltıldığında yatak

oturana kadar sürtünme kuvvetleri olmadığı için kambur meydana gelmeyecektir. İyi bir akışkanlaşma için şu özellik aranmaktadır: düşük partikül yoğunluğu, küçük partikül büyüklüğü, homojen partikül büyüklüğü dağılımı, küreye yakın partiküller, büyük akışkan yoğunluğu [62].

3.4.2. Tane gruplarının tanımı

Akışkan yataklarda partiküllerin boyutlarına göre sınıflandırılması, akışkanlaşma karakteristiklerine bağlı olarak Şekil 3.8’de görüldüğü üzere dört genel tipe ayrılarak yapılabilir [62].

Grup A; düşük yoğunluklu ($< 1400 \text{ kg/m}^3$) ve ortalama çapı 20 ile $100 \mu\text{m}$ arasındaki partiküller, bu gruba girer. Bu gruba giren partikülleri içeren yataklarda kabarcıklaşmanın başlayacağı U_{mb} hızı ve akışkanlaşmanın başladığı U_{mf} hızları arasında genleşme çok önemlidir. Yanmamış kömür parçacıkları ve grafit gibi partiküller bu gruba dahil edilebilecek örneklerdir [62].



Şekil 3.8. Çevre koşullarındaki hava ile akışkanlaştırılmış partiküllerin sınıflandırılması [62]

Grup B; yoğunluğu 1400 ile 4000 kg/m³ ve ortalama çapı 40 ile 500 µm arasındaki partiküller, bu gruba girer. Bu gruba giren partiküllerin kullanıldığı yatağın genişlemesi küçüktür ve hava beslemesinin aniden kesilmesi durumunda, yatak çok hızlı şekilde çöker. Partiküller arası kuvvetler grup A'ya nazaran daha az olacağı için ihmal edilebilir. Minimum akışkanlaşma hızında veya biraz üzerinde kabarcıklaşma başlar. Bu grubun tipik partikülleri arasında silis kumu, tuz sayılabilir [62].

Grup C; çapı 30 µm'den daha küçük olan partiküller bu gruba girer. Bu gruba giren tanelerin akışkanlaşması son derece zordur. Çünkü partiküller arası bağ kuvvetleri, akışkanın partiküllere uygulayacağından daha büyüktür. Kabarcıklaşma görülmez, daha çok kanallaşma görülür. Kanallaşma yüksektir. Partikül karışmasının zorluğu nedeniyle yatak ve yüzeyler arasındaki ısı transferi, A veya B grubuna nazaran daha fakirdir. Bu grubun tipik partikülleri arasında un, çimento sayılabilir.

Grup D; çapı 600 µm'den büyük ve/veya yoğun partiküller bu gruba girer. Minimum akışkanlaşma hızının kabarcık yükseliş hızına eşitlenmesiyle, D grubu partikül için aşağıdaki kriter geçerlidir.

$$(\rho_p - \rho_g)d_p^2 > 10^3 \quad (3.7)$$

Partiküllerin çoğunda $(\rho_p - \rho_g)$, 10³ kg/m³'ten büyüktür. Yukarıdaki kriter çapı 1mm'den büyük çaptaki partiküller için geçerlidir. D grubuna giren partiküllerin fazlar arası gaz akışı hızı, kabarcık yükseliş hızından büyüktür ve akış türbülanslıdır, yatak genişlemesi çok düşüktür. Bu grubun tipik partikülleri arasında ezilmiş kireç taşı, kahve çekirdeği sayılabilir.

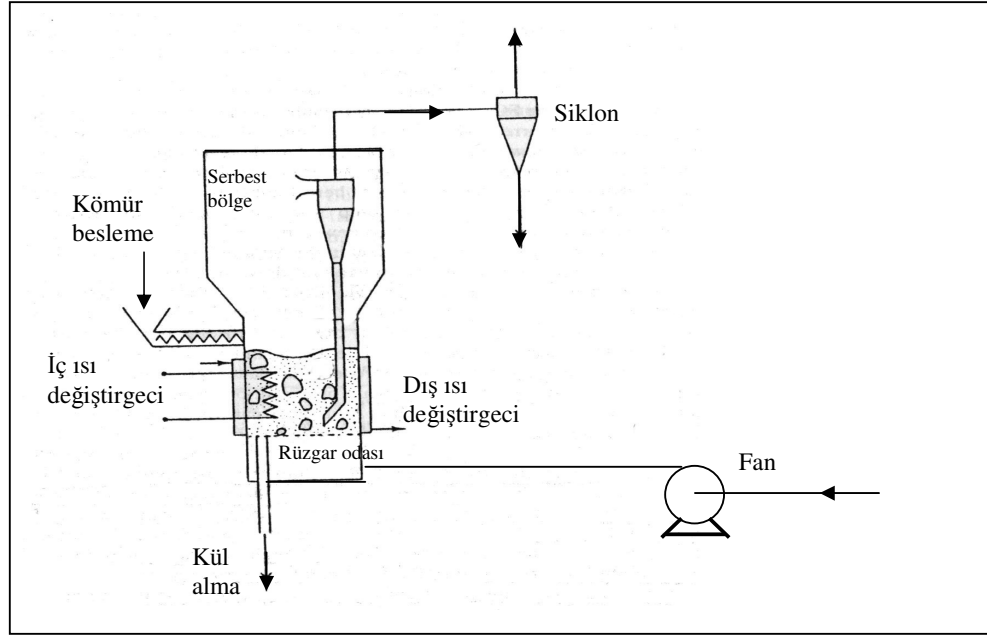
3.4.3. Akışkan yatak sisteminin sınıflandırılması

Günümüzde gelişmenin kaynağı olan ısı ve elektrik enerjisinin yetersiz kalmaya başlaması ve çevre bilincinin önem kazanmasıyla akışkan yatak teknolojisinin önemi artmıştır. Minimum akışkanlaşma koşullarından başlayarak gaz hızının arttırılmasıyla farklı rejimlere geçirilir ve her rejime karşılık gelen akışkan yatak,

benzer isimlerle adlandırılır. Akışkan yatakların en genel sınıflandırılması buna dayanarak yapılır. Bu bölümde belli başlı akışkan yatak sistemleri üzerinde durulacaktır [62].

Kabarcıklı akışkan yatak sistemleri

Akışkan yatak teknolojisi son yıllarda kazan endüstrisinde yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. İlk başlangıçta kabarcıklı ve türbülanslı tipte olan akışkan yataklar, biyokütleleri verimli ve temiz enerji elde edilebilmesinden dolayı giderek artan bir ilgi görmektedir. Kazan endüstrisinde kullanılan sistemlere kıyasla çok daha iyi bir gaz-katı karışım ve temasının bulunmasından dolayı geleceğin kazan teknolojisi olarak görülmektedir. Düşük hız rejiminde çalışan klasik akışkan yataklar başlangıçta daha çok Batı Avrupa ülkeleri ve Amerika'da endüstriyel enerji ve elektrik santrallerinde yaygın olarak kullanılmıştır. Minimum akışkanlaşma koşullarını sağlayan gaz debisinin artırılmasıyla yatak içerisinde kabarcıklar ortaya çıkmaya başlar. Kabarcıkların en önemli özelliği yatak içerisinde dolaşımı sağlamasıdır. Böylece katı parçacıkların yatak içerisinde karışması mümkün olur. Kabarcıklı akışkan yataklı sistemlerde boş kolon gaz hızı minimum akışkanlaşma gaz hızının 3-6 katıdır. Kabarcıklı akışkan sistemi genel olarak gazlaştırma havasını sağlayan fan, bu havayı uniform olarak dağıtan dağıtıcı elek, biyokütle besleme ve kül boşaltma sistemleri, yatak ön ısıtma sistemi, ısı transferi boruları, bacagazı aspiratörü ve sistemden kaçacak tozları tutacak siklon ve filtrelerden oluşur. Akışkan yataklarda ısı çekme hem aktif bölgeden hem de serbest bölgeden yapılabilir. Aktif yatak ve serbest bölgeden ısı çekme oranları yatak tasarımını ve kullanılan biyokütle cinsine bağlı olarak değişir. Şekil 3.9'da kabarcıklı akışkan yatak sistemi şematik olarak verilmiştir [62].



Şekil 3.9. Kabarcıklı akışkan yatak sistemi şematik görünümü

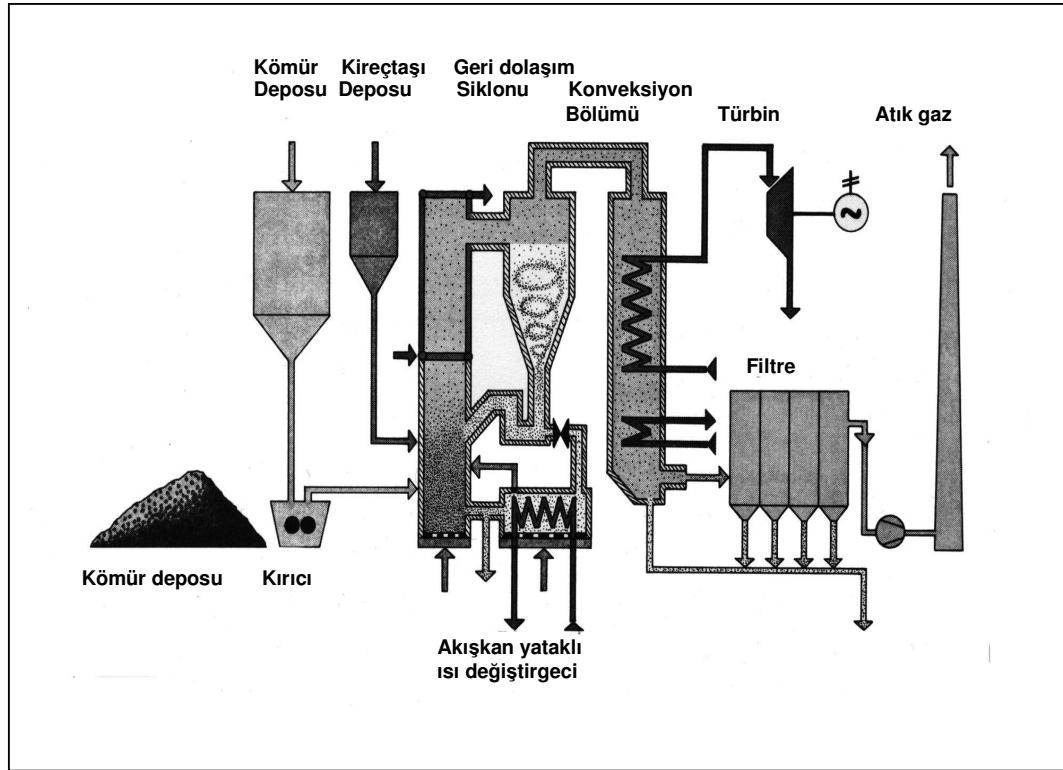
Kabarcıklı akışkan yataklar endüstriyel boyutta yaygın olarak kullanılmaktadır. Yatay, düşey ve kompozit olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Yatay tip akışkan yataklar, mevcut kazanların kullanılabilmesi amacıyla ortaya çıkmıştır. Düşey tip akışkan yataklar, akışkan yatak operasyonuna çok uygundur, yük kontrolü ve yatağın devreye alınması daha kolaydır. Kompozit akışkan yatak, düşey akışkan yatak çıkışına duman borulu bir sistem eklenmiştir. Kullanılan yakıtın uçucu madde içeriği çok artsa bile, uçucu madde ve taşınan parçacıklar gazlaşması ya da yanmasını duman borulu kazanda da sürdürmektedir. Duman borulu sistem aynı zamanda siklon görevini görmektedir [62].

Dolaşımli akışkan yatak sistemleri

Düşük hız rejimli akışkan yatak sistemlerine alternatif olarak geliştirilmiş bir sistemdir. Bu sistemde boş kolon gaz hızı 7-10 m/s dolayındadır. Dolaşımli akışkan yataklarda, yüksek akışkanlaşma hızları nedeniyle, serbest yataktan taşınan yanmamış katılar, siklonlar vasıtasıyla geri beslenmektedir. Partiküller, sistem içinde taşınmaktadırlar. Bu nedenle, yatak içinde, aktif ve serbest bölge ayrımı

yapılamamaktadır. Yatak içinde parçacıkların çok yoğun ve çok seyrek olduğu bölgeleri birbirinden ayıran belirgin bir yüzey yoktur. Kolon gaz hızı, parçacıkları rahatlıkla sürükleyebilmektedir. Yani işletme hızı, terminal hızdan yüksektir. Yatak içi parçacık yoğunluğunun sifıra düşmemesi için sürekli yüksek kapasiteli bir siklonla geri besleme yapılması gerekmektedir. Gaz hızı çok yüksek olduğu için yatay geçişle ısı aktarım boruları kullanılmamaktadır [62].

Ancak, gaz ve partikül hızları arasındaki farkın fazla oluşu ısı aktarım katsayısını pozitif yönde etkilemektedir. Şekil 3.10'da dolaşimli akışkan yatak tasarımı görülmektedir. Dolaşimli kavramı çeşitli firmalar tarafından, akışkan yataklara değişik şekillerde uygulanmaktadır. Bu konudaki ilk uygulama 1980'li yıllarda Almanya'da Lurgi Firması tarafından yapılmıştır. Özellikle çok büyük kapasiteli tesislerde enerji üretiminde, emisyon kontrolünde büyük üstünlükleri olan bu teknoloji uygulanması son 20 yıldır dünyada da yaygın olarak kullanılmaktadır [62] .



Şekil 3.10. Dolaşimli akışkan yatak sistemi [62]

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, dolaşımli bir sistemde ana kolon, siklon, siklon altında kabarcıklı akışkan yatak, siklonu takiben konvektif geçiş kolonu mevcuttur.

Kabarcıklı akışkan yatak, hem ısı değişimini gerçekleştirmekte, hem de geri dolaşım miktarını ayarlamaktadır. Isı geçiş yüzeyleri konvektif kolonla, siklon ve ana kolonun üst bölgesinde yer almaktadır. Yüksek hız nedeniyle ana kolon boyutları küçülmesine rağmen, sistem büyüklüğü, kabarcıklı akışkan yatak sistemine nazaran çok az fark edecektir [62].

Ancak, dolaşımli akışkan yatakta kullanılan kireç taşı partiküllerinin küçük olması, bir başka deyişle birim ağırlık başına kireç taşı yüzey alanının çok artması, kükürtdioksit - kireç taşı reaksiyonunu önemli ölçüde olumlu yönde etkiler. Böylece, Ca/S molar oranı teorik limite, yani 1'e yaklaşır ki, bu değere en çok yaklaşan akışkan yatak tipi, dolaşımli sistemdir [62].

Dolaşımli akışkan yatak sistemlerinin üstünlükleri

Dolaşımli akışkan yatak sistemlerinin üstünlükleri aşağıda açıklanmıştır.

1. Biyokütle ve havanın dinamik bir ortamda iyi karışmasını sağlar. Biyokütle partikülleri gerekli oksijenle çok iyi temas ederek yüksek verimlerine ulaşır.
2. Kireç taşı ve dolomit gibi adsorbent eklenerek SO₂ emisyonu azaltılır. Ca/S oranı 2-4 arasında ise SO₂ emisyonu sıfıra yakındır.
3. Düşük sıcaklıkta kül ergimesi olmadığından ısı transfer yüzeylerindeki korozyon önemli ölçüde azalır.
4. Baca gazlarıyla taşınan gazlaşmamış partikülleri siklonlarda tutulup tekrar yatağa beslendiği için verim %99'a kadar çıkarılabilir.
5. Yatak içinde homojen sıcaklık elde edilir. Yatağın ısı kapasitesi oldukça yüksektir. Sistemin ısı girdisine olan tepkisi yavaştır.
6. Yüksek akışkanlaşma hızının (5-10 m/s) neden olduğu erozyon dolayısıyla yatak içinde ısı transfer boruları kullanılmaz.
7. Büyük miktarda sirkülasyonun sürekliliğinden dolayı gazlaşmamış karbon parçacıklarının sistemden kaçması çok daha düşük seviyelerde tutulur [62].

Dolaşımli akışkan yatak sakıncaları

Dolaşımli akışkan yatakların sakıncaları aşağıda verilmektedir:

1. Kolay ufalanabilen katılar toz haline gelirler. Baş taraftan sürüklendiğinde sistemden kaybı mümkün olur.
2. Katının çok çabuk karışması nedeniyle gazın bundan etkilenecek geri karışma olayı büyük mertebelerde olabilir.
3. Parçacıkların boruları ve kolonu aşındırması mümkündür.
4. Yüksek sıcaklıklarda ince parçacıkların topaklanması ve sinterleşme olabilir. Optimum işletme sıcaklığında çalışılmalıdır.
5. Bakım ve işletme masrafları yüksektir.

Basınçlı akışkan yatak sistemleri

Yüksek basınçta çalışan akışkan yataklara basınçlı akışkan yatak sistemi denilmektedir. Basınçlı yataklarda, reaksiyonlar daha küçük bir hacimde gerçekleştiği için, sistem fiziksel olarak oldukça küçülmektedir. Basınçlı akışkan yataklar, 5 atm ile 20 atm basınç arasında çalışmaktadır. Böylece, yüksek basınçlı gazın enerjisi de gaz türbinleri vasıtasıyla sistemin verimini arttırmakta kullanılmaktadır. Bu sistemin en önemli elemanı, siklonlardır. Siklonların katı parçacıkları etkin biçimde tutması gerekmektedir. Sıcak gazla ana kolonu terk eden gazlar içerisindeki partiküller, gaz türbini kanatlarında zararlı etki yapmamalıdır. Örneğin, sıcak gazların içerisindeki bileşenler korozyona neden olmamalıdır. Birim alan başına üretilen ısı enerjisi, basınca bağlı olarak yükselmekte, kükürdioksitin tutulması daha etkin biçimde sağlanabilmektedir. Azot oksit oluşumu da kabarcıklı yataklara göre azdır. Bu sistemler, henüz pilot tesisi ölçeğinde gerçekleştirilmiş olup, sistem elemanlarının hepsinin yüksek basınç altında çalışma zorunluluğu nedeniyle diğer akışkan yatak tiplerine nazaran yaygınlık kazanmamıştır [62].

3.4.4. Akışkan yatakları birbirinden ayıran özellikler

Değişik rejimlerde çalışan akışkan yatakların özellikleri Çizelge 3.15’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.15. Değişik rejimlerde çalışan akışkan yatakların özellikleri

ÖZELLİKLER	DÜŞÜK HIZLI AY	DAY	YOĞUN OLMAYAN FAZLI TAŞIMALI AY
Parçacık	Parçacık uzun süre yatakta kalır	Sirkülasyonlu sistem boyunca yatakta dolaşır	Bir seferde yatağı terk eder
Hidrodinamik Rejim	Kabarcıklı, slugging, türbülant akışkanlaşma	Yatağın alt kısmı türbülant veya kabarcıklı akışkanlaşma üstte Hızlı akışkanlaşma görülür	Yoğun olmayan taşınma şartları
Boş Kolon Hızı U_0 (m/s)	$U_0 < 2$	$3 < U_0 < 16$	$15 < U_0 < 20$
Parçacık Çapı D_p (mm)	$0,03 < d_p < 1$	$0,05 < d_p < 0,5$	$0,02 < d_p < 0,08$
Katıların net sirkülasyon akısı G_s (kg/m ² -s)	$0,1 < G_s < 5$	$15 < G_s < 1000$	Kolonun yukarısına doğru $G_s \sim 20$ pnömatik taşıma
Boşluk Kesri, ε	$0,6 < \varepsilon < 0,80$	$0,8 < \varepsilon < 0,98$	$> 0,99$
Gaz Karışımı	Yeterli dikey yönde dağılım 2 fazlı davranış gösterir	Bir miktar gaz duvar boyunca aşağıya akar	Çok az dikey yönde dağılım

3.4.5. Akışkan yatak sisteminin temel elemanları

Bir akışkan yatak sistemi, (üfleme) hava dağılımı düzeneği, ön ısıtıcı, dağıtıcı elek, biyokütle ve kireç taşı besleme düzeneği, kül boşaltma düzeneği, ısı çekişi için ısı transfer boruları, siklon ve filtreden oluşmaktadır. Sisteme hava üfleyici vasıtasıyla girmektedir. İlk işletim esnasında yatağın belli sıcaklığa kadar ısıtılması gerekir. Bu ısıtma havanın yatağa girmeden bir ön ısıtıcıyla ısıtılması ile sağlanabilir. Hava dağıtıcı elekten geçerek yatağa girmekte ve akışkanlaşma başlamaktadır. Dağıtıcı elek düzgün bir akışkanlaşmayı sağladığı gibi yatak malzemesini de taşımaktadır.

Biyokütle, kireç taşı karıştırılıp, hava ile taşınarak yatağın içine verilmektedir. Besleme noktalarının yerleri, işletme parametreleri ve biyokütle özelliklerine uygun olarak seçilmelidir. Sistemden ısı, yatakta veya serbest bölgede çekilmektedir. Isının bu iki bölge arasında hangi oranlarda çekileceği de çok önem taşımaktadır. Düşük ısı değere sahip yakıtlar ya da yüksek uçucu madde içeriği olan yakıtlar kullanılması durumunda yatak sıcaklığını kararlı tutabilmek için ısı daha çok serbest bölgeden çekilmektedir. Sistemden biriken kül yatak yüksekliğini sabit tutabilmek için sürekli boşaltılmalıdır. Külün boşaltılması sırasında içinde gazlaşmamış halde bulunan biyokütle parçalarının gazlaşmaya devam etmeleri sonucunda sıcaklık yükselmektedir. Külün ısı transfer katsayısı çok düşük olduğu için bu ısı alınmazsa kül sinterleşerek boşaltma sisteminin tıkanmasına neden olabilir [62].

Bunu önlemek için, kül, özel ısı değiştirgeçlerle soğutularak, ısı transferini hızlandırmak için külün arasından hava püskürtülebilir. Daha küçük parçalar halinde oluşan kül ise hava tarafından taşınarak dışarı kaçacaktır, bu parçacıklar bir siklon yardımıyla tutulabilir ve gazlaşmamış olanlar ayrılarak tekrar yatağa besleme yapılabilir. Kükürt oksit yatak içinde kireç taşı tarafından tutulduğu için bacagazlarının ayrıca temizlenmesine gerek yoktur. Bazı uygulamalarda özel filtreler kullanılmaktadır.

Akışkan yatak kazanların, alışılmış kazanlardan bir diğer farkı da ısı aktarım borularının yerleştirilmesidir. Yatak içindeki borular, ısı aktarım katsayısının

yüksekliğinden yararlanmak veya erozyondan kaçınmak amacıyla, hava akış yönüne göre değişik açılarda dizilmektedir. Serbest bölgedeki ısı aktarım boruları, ya hava akışına dik, yatay geçiş yapılacak şekilde, ya da duvar boyunca düşey olarak, serbest bölgenin tepesinden daldırılmalı olarak da kullanılmaktadır. Hava hızının yüksek olması nedeniyle, verimi artırmak ve filtredeki katı parçacık konsantrasyonunu azaltmak için siklon kullanılmaktadır. Ekonomizör, torba ve elektro filtreler, alışılmış kazan teknolojilerindeki elemanlara benzemektedir. Akışkan yatak sisteminin kısıtlamaları nedeniyle, kontrol sisteminin farklı olması gerekmektedir [62].

3.4.6. Akışkan yatak performansını etkileyen faktörler

Akışkan yatak performansını etkileyen faktörler şunlardır:

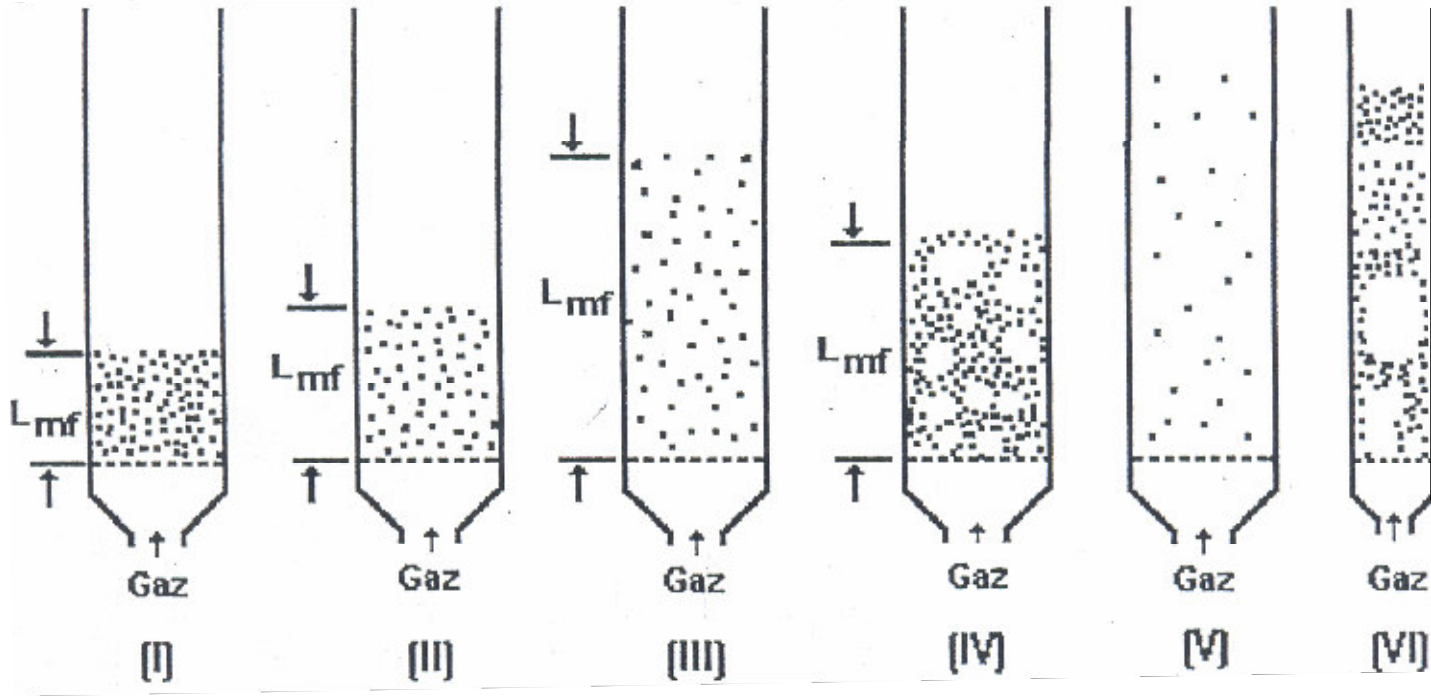
- Akışkan yatak geometrisi
- Distribütör tasarımı (distribütör tipi)
- Akışkan yatak yüksekliği
- Katının niteliği
- Akışkan hızı
- Tane boyut dağılımı

$D_p < 1-2$ mm akışkan yatak partikül boylarıdır. $0,05 \text{ mm} < d_p < 0,6 \text{ mm}$ dolaşımli akışkan yatak parçacık boylarıdır. $D_p < 2-2,5$ mm taşkın yatak parçacık boylarıdır.

3.5. Akışkan Yataklar ile İlgili Temel Kavramlar

3.5.1. Akış rejimi

Katı partiküllere, gaz veya sıvı haldeki bir akışkan yardımıyla akışkan özellik kazandırılması olayına “akışkanlaşma” dendiğini daha önce belirtilmiştir. Tabanında geçirgen bir levha (distribütör) bulunan ve katı partiküller içeren bir yatağın alt kısmından düşük hızlı bir akışkan gönderildiğinde katı partikülleri üç kuvvetin etkisi altında kalır. Bunlardan ikisi katı partiküle yukarı yönde hareket sağlayan, akışkanın yatak içinde oluşturduğu sürüklenme kuvveti F_D ile kaldırma kuvveti F_B ’dir. Üçüncü kuvvet ise partikülü aşağı doğru harekete zorlayan F_G yerçekimi kuvvetidir. $F_G > F_D + F_B$ olduğu sürece akışkan, katı partiküllerin arasından yukarı doğru hareket eder, bu duruma sabit yatak denir (Şekil 3.11-I). $F_G = F_D + F_B$ olduğu durumda katı partiküller akışkan içinde askıda kalır ve yatak genişlemeye başlar. Bu şartlara minimum akışkanlaşma şartları ve o andaki hıza da minimum akışkanlaşma hızı U_{mf} denir (Şekil 3.11-II). Akışkanın hızı $F_G < F_D + F_B$ olacak şekilde daha da arttırılacak olursa, katı partikül boyunun 20 – 30 μm gibi çok küçük veya akışkanlaştırıcının sıvı olması durumunda kabarcıklanma görülmez ve yatak homojen bir şekilde yukarı doğru genişler. Bu duruma homojen veya particulate akışkanlaşma denir (Şekil 3.11-III). Akışkanın gaz olması veya partikül boyunun 30 μm ’den büyük olması durumunda ise yatak yüksekliği fazla artmamakla birlikte gaz kabarcıkları birleşip büyüyerek yukarı doğru yükselirler, kabarcıklı akışkanlaşma diye tanımlanan bu şartlar en çok kullanılan rejimlerden biridir (Şekil 3.11-IV). Akışkanın hızı aşırı miktarda arttırılacak olursa katı partiküller yatak boyunca yukarı doğru taşınırlar. Bu durum pnömatik akış diye adlandırılır (Şekil 3.11-V). Yatak yüksekliğinin yatak çapına oranının 1,5’den büyük olduğu durumlarda ise kabarcıklar aşırı oranda büyürler, “slug” oluşumu denilen bu durum arzu edilmeyen bir olaydır Şekil (3.11-VI). Yukarıda anlatılan rejimlerin şematik gösterimi sırasıyla Şekil 3.11’de verilmiştir [63] .



Şekil 3.11. Akışkanlaşma tipleri; (I) sabit yatak, (II) min. akışkanlaşma, (III) homojen akışkanlaşma, (IV) kabarcıklı akışkanlaşma, (V) akışkan yataktan pnömatik taşınma, (VI) sluglaşma

3.5.2. Akışkan yatakta basınç düşüşü

Yukarıda açıklandığı üzere katı partiküle etki eden kuvvetlerden yola çıkarak akışkan yataklardaki basınç düşüşünü şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Akışkan tarafından partikül} \\ \text{yüzeyine uygulanan} \\ \text{sürüklenme kuvveti} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Katı partiküle} \\ \text{uygulanan} \\ \text{yerçekimi kuvveti} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Akışkan tarafından} \\ \text{partiküle uygulanan} \\ \text{kaldırma kuvveti} \end{array} \right)$$

$$(\Delta P)_{AY} S_C = S_C L_{mf} (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) g \quad (3.8)$$

$$(\Delta P)_{AY} = L_{mf} (1 - \epsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g) g \quad (3.9)$$

Bu denklem yardımıyla akışkan yataktaki basınç düşüşü bulunabilir. Belirtilen şartların geçerli olduğu akışkan yatağın normal çalışma alanı Şekil 3.11'de gösterilmiştir [64].

3.5.3. Minimum akışkanlaşma hızı

Dolgulu kolonlardaki basınç düşüşü ifadesini, viskoz kayıplar ile kinetik kayıpların toplamı şeklinde veren Ergun denkleminde yola çıkarak, akışkan yataklardaki minimum akışkanlaşma hızı hesaplanabilir [64].

Akışkanlaşmanın başlangıcı için yukarı doğru akan akışkanın katı partiküllere uyguladığı toplam kuvvetin, yatağın birim kesitindeki katıların ağırlığına eşitlenmesiyle elde edilen eşitlikle (Eş. 3.10) Ergun eşitliği birleştirilerek minimum yatak boşlu kesri (ϵ_{mf}) ve şekil faktörü (Φ_S) değerlerinin bilindiği durumda aşağıdaki Kunii ve Levenspiel (Eş. 3.8) tarafından verilen eşitlik ile minimum akışkanlaşma hızı hesaplanabilir.

$$\frac{1,75}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_m \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p u_m \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (3.10)$$

Yukarıda yer alan ϵ_{mf} ve Φ_s değerleri bilinmediğinden aralarındaki ilişki için Eş. 3.9’da verilen eşitliklerde aşağıdaki eşitlikler kullanılır.

$$\frac{1}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} = 14 \quad \text{ve} \quad \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\Phi_s \epsilon_{mf}^3} = 11 \quad (3.11)$$

Bu eşitliklerin yardımıyla akışkanlaşma hızı hesaplanabilir.

$$U_{mf} = \frac{(\Phi_s d_p)^2}{150} \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} g \left(\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right) \quad \text{Re} < 20 \quad (3.12)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s d_p}{1.75} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} g \epsilon_{mf}^3 \quad \text{Re} > 1000 \quad (3.13)$$

Bir başka araştırmacı tarafından verilen eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$U_{mf} = 1,1 \times 10^{-3} \left(\frac{(d_p)^{1,82} (\rho_p - \rho_g)^{0,94} (g)^{0,94}}{(\mu)^{0,88} (\rho g)^{0,06}} \right) \quad (3.14)$$

Daha sonra bu ifadenin büyük partiküller için yeteri derecede minimum akışkanlaşma hızını tanımlamada başarılı olmadığı gerekçesiyle yeni eşitlik türetilmiştir [64].

$$U_{mf} = 8,1 \times 10^{-4} \frac{g d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{\mu} \quad (3.15)$$

Bu ifade de çok basit olmasına rağmen yapılan uygulamaları tam anlamıyla temsil etmediği gerekçesiyle bir denklem daha geliştirilmiştir. Bu denklem 100 μm 'den büyük partiküller için daha doğru sonuçlar vermektedir ve son yıllarda yapılan çalışmalarda bu denklem tercih edilmektedir [64].

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_p} \left[\left(1135,7 + 0,0408 \underbrace{\left(\frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \right)}_{Ar} \right)^{1/2} - 33,7 \right] \quad (3.16)$$

Ayrıca bu eşitliklere ek olarak $d_p < 100 \mu\text{m}$ olduğu durumlar için geliştirilen modifiye edilmiş şekli aşağıdaki denklem de kullanılabilir.

$$U_{mf} = \left(\frac{(d_p)^{1,8} (\rho_p - \rho_g)^{0,934} (g)^{0,934}}{1111(\mu)^{0,87} (\rho_g)^{0,066}} \right) \quad (3.17)$$

3.5.4. Terminal hız

Bir akışkan yatakta, akışkan hızı arttırılarak katı partiküllerin tamamının taşınmaya başladığı andaki hız veya Şekil 3.11'de görüldüğü gibi basınç düşüşünün sıfıra yaklaştığı andaki akışkanlaşma hızı terminal hız olarak adlandırılır. Daha önce de belirtildiği gibi Şekil 3.11'deki her bir bölge değişik hidrodinamik şartlara ve dolayısıyla da farklı akış rejimlerine karşılık gelmektedir. Her bir akış rejimi farklı akışkan yatak tiplerinde kullanılmaktadır. Bu yüzden minimum akışkanlaşma hızı gibi terminal hız hesabının da önemi büyüktür. Bugüne kadar en çok kullanım alanı bulmuş olan, kabarcıklı akışkan yataklardaki akışkan hızı minimum akışkanlaşma hızı ile terminal hız arasında tutulmalıdır. Belli bir büyüklükteki katı partiküllerin sistem içinde sirküle ettirilmesi esasına dayanan dolaşımli akışkan yataklarda ise akışkanlaşma hızının en küçük değeri ortalama partikül boyu için hesaplanmış olan terminal hızdan daha yüksek olmalıdır [64].

Tek bir katı partikül etrafında yapılan kuvvet denkliği ile katı partiküllerin terminal hızı için aşağıda verilen eşitlikler geliştirilmiştir.

$$U_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_d} \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

Denklemden verilen sürüklenme katsayısı C_d için bir çok korelasyonlar vardır. Terminal hız hesabının diğer bir yolu ise Re değerinin aldığı duruma göre, bulunulan çalışma aralığı için verilen eşitliklerden yararlanmaktadır. Buna göre;

1. Küçük Re değeri için (Stoke rejimi)

$Re < 0,4$ ve $C_d = 24 / Re$ ise;

$$U_t = \frac{g(\rho_p - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad (3.19)$$

2. Ara rejim

$0,4 < Re < 500$ ve $C_d = 10 / (Re)^{1/2}$ ise;

$$U_t = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad (3.20)$$

3. Yüksek miktardaki akış (Newton rejimi)

$500 < Re < 200000$ ve $C_d = 0,44$ ise;

$$U_t = \left[\frac{3,1g(\rho_p - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

3.5.5. Minimum akışkanlaşma boşluk kesri

Bir akışkan yatağın temel özelliklerinden biri de yatak içindeki taneciklerin hareket halinde olmasıdır. Tanecik hareketinden önce akışkanlaştırma akışı tarafından temin edilmek üzere genişlemiş olması gereken yatakta, karakteristik bir boşluk vardır. Pratik olarak, fan ile havayı sisteme verince, parçacıklar harekete geçmeden önce bir hava artışı ile yatak genişler ve boşluk oluşur. Bu boşluk, akışkanlaşmanın başlangıcı ya da minimum akışkanlaşma için gerekli olan “minimum akışkan boşluğu” olarak ifade edilmiştir [64].

Minimum akışkan boşluğu ε_{mf} ile gösterilmektedir. ε_{mf} 'nin akışkanlaşma öncesinde bilinmesi gerekir.

Taneli bir katının minimum akışkan boşluğu, henüz başlayan parçacık hareketi ile uyuşan H_{mf} yatak yüksekliği ve yükselen gaz akımına maruz kalan yatak tarafından kolaylıkla tayin edilmektedir. Katılar ve akışkan yoğunlukları, kanal geçiş kesiti A_b ve yatak yüzücü ağırlığı W bilinmek üzere, minimum akışkan boşluğu şu ifadeden hesaplanabilir [64].

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{W}{H_{mf} A_b (\rho_p - \rho_g) g} \quad (3.22)$$

Burada H_{mf} 'nin katıların harekete başladığı noktadaki yatak yüksekliği önemli bir noktadır. Yatağın ağırlığı ise;

$$W = \Delta P_B A_b \quad (3.23)$$

olarak tanımlanmaktadır. Minimum akışkan boşluğu gözlemleri katı – gaz sistemlerde en iyi şekilde yapılabilir. ε_{mf} literatürde 0,40 – 0,94 civarında verilmektedir [49].

3.5.6. Dağıtıcı Tasarımı

Akışkanlaşmayı etkileyen en önemli unsurlardan biri olan dağıtıcıdan başlıca akışkanlaştırıcının kesilmesi halinde, yatak materyalini taşıyabilecek mukavemette olması ve katı partiküllerin aşağıya düşmesini önlemesi, akışkanın yatak içerisinde homojen olarak dağılımını sağlayarak kanallaşmaya meydan vermemesi ve bütün bu şartlar sağlandıktan sonra, oluşturduğu basınç düşüşünün mümkün olduğunca küçük olması gibi özellikler beklenir [64].

Akışkan yataklarda çeşitli tipte dağıtıcılara rastlanmakla birlikte genellikle delikli plaka tipinde dağıtıcılar kullanılmaktadır. Önemli parametrelerden birisi olan basınç düşüşü için literatürde çeşitli yaklaşımlar bulunmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanlardan olan Agarwal'un, dağıtıcının basınç düşüşünün yataktaki basınç düşüşünün % 10'u olacak şekilde kabul edilebileceği yönündeki çalışması ile dağıtıcının basınç düşüşünün en azından 35 cm su sütununa eşit olması görüşüdür. Diğer bir görüş de dağıtıcıdaki basınç düşüşünün dağıtıcı altındaki rüzgar odasındaki basınç düşüşünün 100 katı olarak alınmasıdır [49].

Delikli plaka tipinde bir dağıtıcı yapılırken aşağıdaki prosedür izlenir.

1. Yukarıdaki kriterlere göre sisteme uygun basınç düşüşü belirlenir.
2. Reynolds sayısı hesaplanır ve orifis katsayısı seçilir.
3. Dağıtıcı üzerindeki orifislerdeki hız aşağıdaki denklemden bulunur.

$$U_{or} = C_d \left(\frac{2g_c \Delta p_d}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

4. Dağıtıcı üzerindeki delik sayısını seçip aşağıdaki denklemden orifis çapı hesaplanır.

$$U_o = \frac{\Pi}{4} d_{or}^2 U_{or} N_{or} \quad (3.25)$$

3.5.7. Taşınım serbest bırakma yüksekliği

Akışkanlaştırılmış bir yatakta dağıtıcı orifisinden itibaren yükselen gaz jeti önce parçalanarak kabarcıkları oluşturur. Sonra bu kabarcıklar yatak boyunca yükseldikçe, birleşerek daha büyük gaz kabarcıklarını oluştururlar. Oluşan bu kabarcıklar yatak boyunca yükselirken beraberinde katı partikülleri de yukarı kısımlara taşırlar ve yatağın üst kısmında gaz kabarcıklarının patlaması sonucunda katı partiküller gaz hızının sürüklenme etkisi ile yukarı yönde hareket ederler. Bu hareket esnasında partiküllerin yataktan taşınıp taşınamayacağını partiküllerin terminal hızları, dolayısıyla da partikül boyları belirler. Küçük olan partiküllerin terminal hızları da küçük olacağı için sürüklenme eğilimleri daha fazladır. Akışkanlaştırıcı gaz yardımıyla yukarı doğru taşınan partiküllerden dolayı genişlemiş olan yatak yüzeyinden itibaren katı konsantrasyonu azalarak belli bir noktada ihmal edilebilecek bir düzeye düşer, bu mesafeye taşınım serbest bırakma yüksekliği (TSBY) denir. Pratikte bu yüksekliğin azaltılması için genişlemiş olan yatağın belli bir miktar üstünden yatak çapı yaklaşık iki katına çıkartılır. Böylece partiküllerin terminal hızlarına göre, çizgisel gaz hızı azaltılarak katı partiküllerin yukarı kesimlere sürüklenmesi azaltılır. Doğal olarak, terminal hızdan büyük hızlarda çalışan akışkan yatak tipleri için belli bir yatak yüksekliği söz konusu olamayacağı gibi, TSBY'den de söz edilemez. Literatürde TSBY'nin hesabı için çeşitli eşitlikler mevcut olup bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir [64].

Soroko tarafından, statik yatak yüksekliği $H_S < 0,5m$ ve partikül boyunun $0,7-2,5mm$ arasında olduğu durumlar için geliştirilen denklem ($15 < Re_p < 300, 19,5 < Ar < 650000$);

$$TSBY_C = 1200 H_S Re_p^{1,55} Ar^{-1,1} \quad (3.26)$$

şeklindedir. Fournol TSBY'ni gaz hızına bağlı olarak şu şekilde ifade etmiştir.

$$TSBY_F = 1000 U_o^2 / g \quad (3.27)$$

Amitin'de TSBY'ni gaz hızına bağlamış ve aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

$$TSBY_F = 0,85 (U_o)^{1/2} (7,33 - 1,2 \log U_o) \quad (3.28)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu çalışmada, İç Anadolu Bölgesinde geniş yayılış alanına sahip olan ve mobilya sektöründe kullanılan çam ve gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu nedenle termokimyasal dönüşüm yöntemi olan gazlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan bu örneklerin alternatif enerji kaynağı olarak incelenmede, öncelikle örneklerin elementer analizi belirlenmiş ve ısı değerleri yapılmıştır. Ayrıca örneklerin nem, kül ve uçucu madde miktarları belirlenerek örnek özellikleri saptanmıştır.

Daha sonrasında ise, kullanılan örneklerle gazlaştırma işlemi yapılmış ve yatak sıcaklığına, kullanılan malzemeye, hava debisine, partikül çapına, yakıt miktarına ve ısıtma hızı gibi özelliklere bağlı olarak en uygun gazlaştırma işlemi belirlenmeye çalışılmıştır. Gaz ürün elde etme süreci boyunca, biyokütle yapısı, reaksiyon sıcaklığı, basıncı, sistem yapısı, yakıt ısı değerleri gibi parametreler göz önünde bulundurulmuştur.

Gazlaştırma işleminde elde edilen sentez gazın analizinde Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isıl Güç laboratuvarında bulunan Mobil Emisyon Test Sistemi ile ölçme ve veri değerlendirme de kullanılmıştır [65].

Gazlaştırma işlemi için son günlerde yaygınca kullanılan Dolaşım Akışkan yatak deney düzeneğinde kullanılarak farklı sıcaklıklardaki sistem verimi belirlenmeye çalışılmıştır.

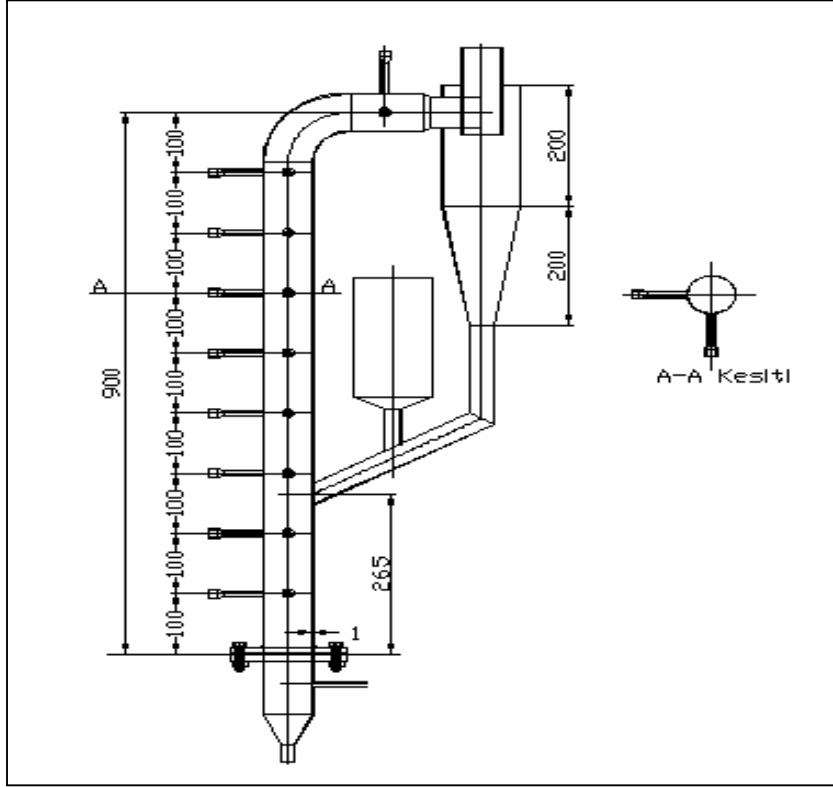
Gazi Üniversitesinin Isıl Güç laboratuvarında yapılan gazlaştırma deney düzeneği, mobil test sistemi ve örnek özelliklerinin saptanması ile ilgili çalışmalar aşağıda sırasıyla verilmiştir [65].

4.1. Dolaşım Akışkan Yatak Test Sistemi

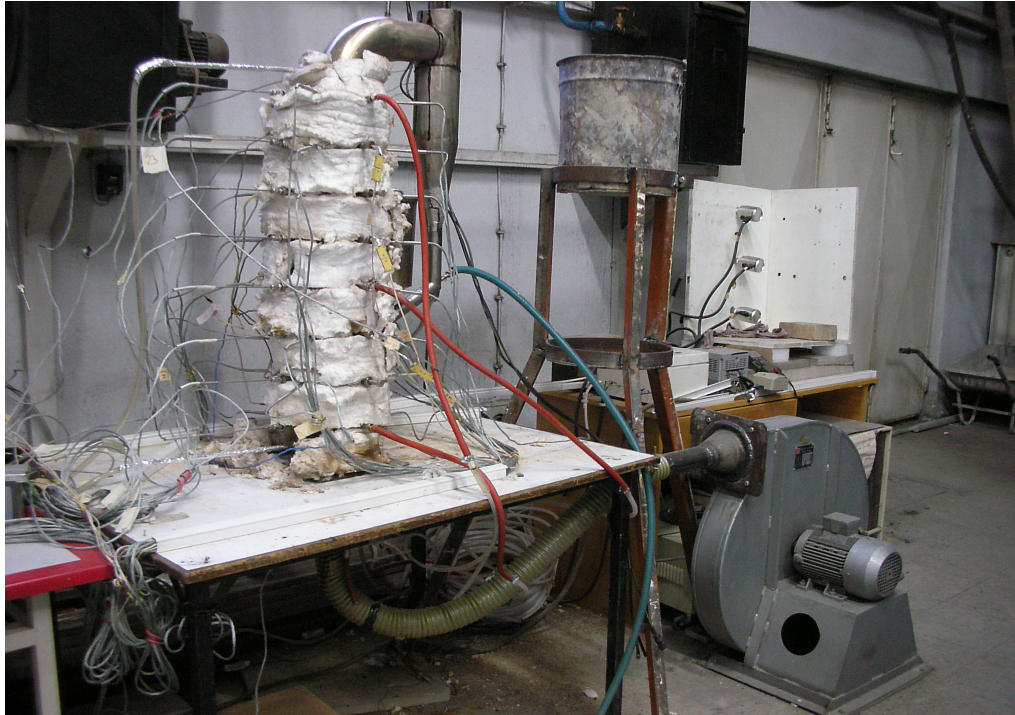
Kolon malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılan, dağıtıcı elekten itibaren 0,9 m yüksekliğinde, 10 cm çapında ana kolona sahip deney sistemi ile, orman ürünlerinin gazlaştırması gerçekleştirilmekte ve elde edilen sentetik gaz analiz edilmektedir (Şekil 4.1) [66].

Deney düzeneği bir panel üzerine monte edilmiş, yatak hücresi altında (silindirik formda, ısıya dayanıklı camdan üretilmiş), silindir altlığı, dağıtıcı elek, dağıtıcı hücresi, hava giriş bağlantısı, fazla basınç boşaltma sistemi bağlantısı, (üstünde) hava filtresi, (içinde) ısıtıcı eleman, ısıtıcı elemanın içinde gömülü olarak ısıtıcı sıcaklığını ölçen prob, yatak sıcaklığını ölçen prob, yatak hücresi basıncını ölçen prob, panel üzerine monte edilmiş halde bulunan hava akış metresi (rotometre), akış kontrol vanası ve hava giriş bağlantısı üzerinde filtre basınç regülatörü, değişken transformatör (ısıtıcı kontrolü), basınç transmitteri (3 adet), yatak hücresindeki farklı yüksekliklerde basınç değerini ölçmek için kullanılmakta, sıcaklık indikatörü (ısıtıcı eleman, yatağa hava giriş sıcaklığını gösterir), on/off anahtarı, sigorta, voltmetre, ampermetre, yüksek sıcaklık kontrol devresi, elektriği ve mekanik bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Düşey silindirik hücrenin içinde, seçilecek malzemenin dağıtıcı eleğın üzerine yerleştirilmesiyle yatak oluşturulur. Dağıtıcı elek, yatak malzemesinin, yatak hücresinin dışına akmasına engel olur, yatağa homojen hava akışını, fazla basınç düşümüne neden olmadan sağlar. Yatak hücresi, dağıtıcı elek, filtre, panel üzerine monte edilmiş dirsek ile panele asılı durumdadır (Şekil 4.2).

Ana kolon boyunca hava dağıtıcısından itibaren her 10 cm’de bir, doksan derece açı ile bir adet sıcaklık ölçmek için, bir adet de basınç ölçmek için ½ " çapında 8’er adet örnek alma (manşon) yeri bırakılmıştır. Egzos çıkışı ve dönüş kolonunda da yine sıcaklık-basınç ölçümleri için 1’er adet ölçüm noktaları bulunmaktadır.

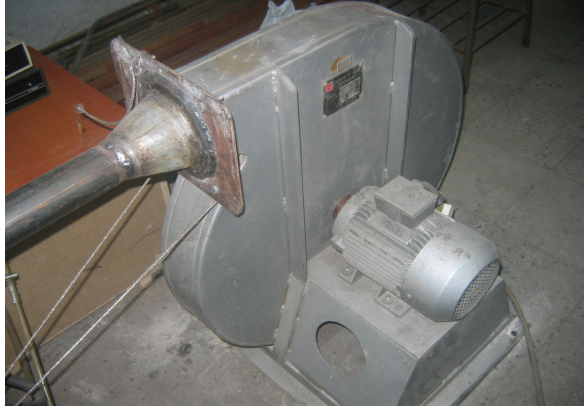


Şekil 4.1. DAY deney düzeneği



Resim 4.1. Dolaşımli akışkan yatak deney sistemi

Yatak malzemesini akışkanlaştırmak amacı ile Resim 4.2’de gösterilen fan (700 m³/h, 350mmSS) ile sağlanan hava dağıtıcı elekten geçerek akışkan yatağın ana kolonuna ulaşır. Fan devri ve frekans kontrolü için Hyundai İnventör (3,5kW) kullanılmıştır. Siklondaki partiküllerin ana kolona geri dönüşümünü yapmak için kompresör yardımıyla sisteme az miktarda ikincil bir hava beslenmektedir [66].



(a)



(b)

Resim 4.2. Akışkanlaşma havasını sağlayan fan (a) ve inventör (b).

Sistemde gazlaşmayı sağlamak için üzerinde kelepçeli elektrikli ısıtıcı (7x740 + 2000W) kullanılarak çevresine seramik yünü ile kapatılmıştır. Isıtıcı gücünü değişken bir transformatör (varyak 10kVA’lık) ile ayarlanabilmektedir (Resim 4.3). Ayrıca çekilen voltaj değeri voltmetre ile gözlenebilmektedir.



(a)



(b)

Resim 4.3. Varyak (10kVA’lık) (a) ve kelepçeli elektrikli ısıtıcı (b)

Yatak ve duvar sıcaklığını ve basınç değerlerini okumak için Resim 4.3 (b)'deki 64 kanallı data logger kullanılmış, yakıt ve yatak malzemesinin ortalama çap değerini belirleme de kullandığımız ASTM Normu (8inç) elek serisi de Resim 4.3 (a)'da görülmektedir.



(a)



(b)

Resim 4.4. ASTM Normu elek serisi (a) ve data logger (b).

Sistemdeki yatak sıcaklığını ölçme de kullanılan NiCr-Ni-K tipi, 25 cm uzunluğundaki ısı çiftleri ve duvar sıcaklığını ölçme de kullandığımız 10 cm uzunluğunda NiCr-Ni-K tipi ısı çifti Resim 4.4 (a), (b)'de gösterilmiştir [66].



(a)



(b)

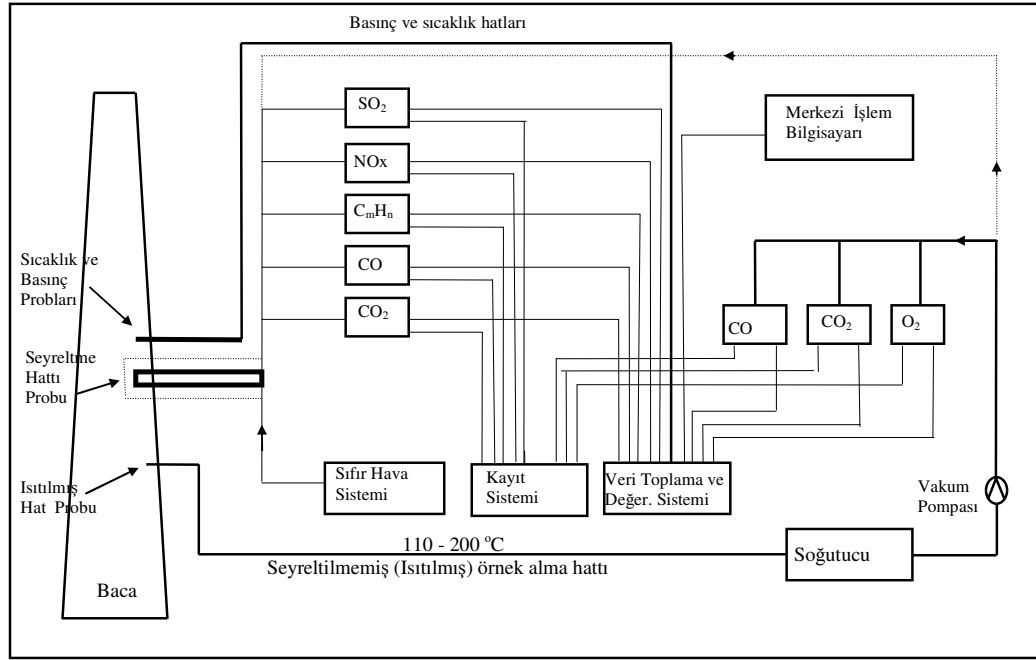
Resim 4.5. Yatak sıcaklığını (a) ve duvar sıcaklığını (b) ölçümünde kullanılan ısı çiftleri

4.2. Ölçme ve Veri Değerlendirme Sistemi

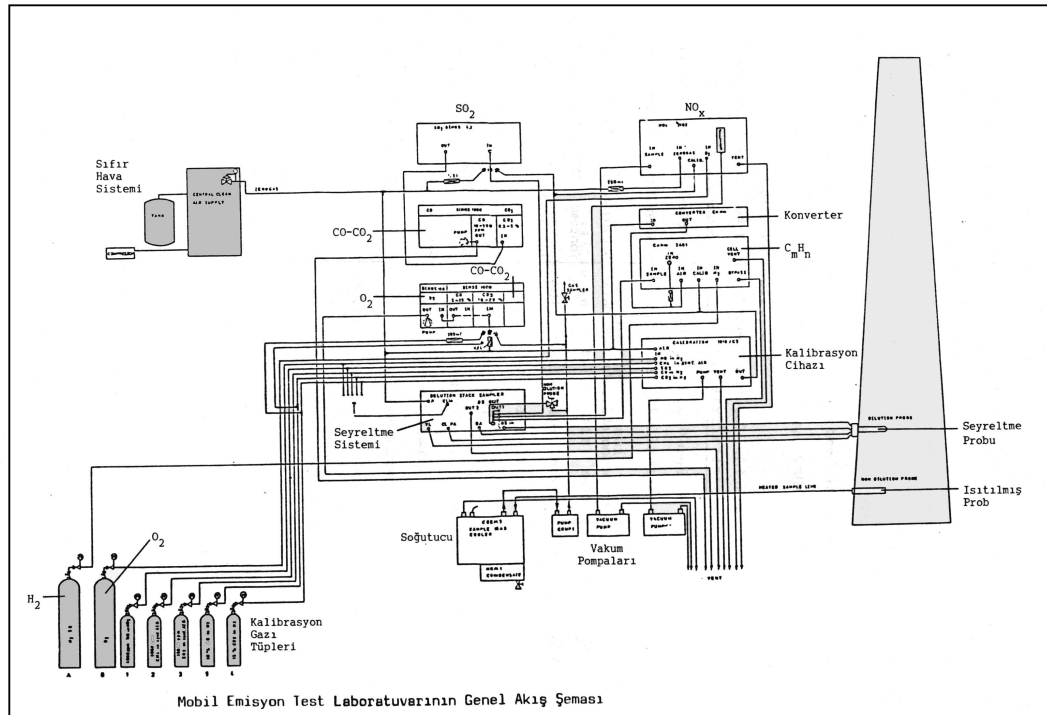
Ölçme ve veri değerlendirme için Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isıl Güç laboratuvarında bulunan Mobil Emisyon Test Laboratuvarında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, NATO-TU Air Pollut projesi kapsamında alınan cihazlar, Gazi Üniversitesi Rektörlüğü tarafından desteklenen çeşitli Araştırma Fonu Projeleri kapsamında oluşturulan ölçme sistemleri kullanılmıştır [62].

Gaz derişiminin doğru olarak analizinde izokinetik koşullarda yani örnekleme gaz hızının baca gazına eşit olması gerekmektedir. Aksi takdirde gerçek gaz derişiminin üstünde değer elde edilir ki bu da hatalı bir ölçüm olmaktadır. Aşağıda Mobil Emisyon Test Laboratuvarı (METL) ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

METL sistem yapısı ve bağlantı biçimi aşağıdaki Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. METL örnek gaz alma ve hazırlama sistemi, ölçüm cihazları, veri toplama ve değerlendirme sistemi, merkezi işlem bilgisayarı ve diğer yardımcı teçhizattan oluşmaktadır. METL’de analiz edilecek örnek gazın seyreltilerek ve seyreltilmeden alınabilme imkanı bulunmaktadır [62].



Şekil 4.2. Baca gazı ölçme ve veri değerlendirme sistemlerinin şematik görünümü



Şekil 4.3. Mobil Emisyon Test Laboratuvarı genel akış şeması

Örnek Alma Sistemi : Gaz emisyon ölçümlerinde seyreltilmiş ve seyreltilmemiş olarak iki örnekleme hattı kullanılmaktadır. Gaz analizleri yapılacak olan örnek sürekli olarak aynı anda iki hat ile beraber alınabilmektedir. Örnekleme yapılan gaz derişimleri gaz analiz sistemlerinin ölçme sınırlarının üzerinde olması durumunda, seyreltilmiş hat ile gaz örneği aynı zamanda METL’nda hazırlanan temiz hava ile seyreltilerek alınır. Seyreltme oranına bağlı olarak, su buharının kısmi basıncı düştüğünden, yoğunlaşma sıcaklıkları ortam sıcaklıklarının çok altına düşürülerek yoğunlaşma önlenabilmektedir. Seyreltme uygulanmayan örnek gaz alma işlemlerinde, örnekleme hattında yoğunlaşmanın önlenbilmesi için kesinlikle ısıtılmış hat kullanılmalıdır. Kontrol altında elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan örnek gaz alma hatlarında, ısıtma sıcaklığı 170 – 200 °C aralığında ayarlanabilmektedir. METL’na kadar yoğunlaşmadan getirilen gaz örneğinin nemi bir yoğunlaştırucuda alındıktan sonra kuru olarak gaz analiz sistemlerine verilmektedir.

Gaz Analiz Sistemleri : Kazan ısı performans ve emisyon özelliklerinin incelenmesi amacıyla, gazların içerdiği gaz derişimlerinin zamana bağlı olarak derişimlerinin analizi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda ilgili test programının gerçekleştirilmesinde her bir gaz analizi Çizelge 4.1’de verilen analiz yöntemlerine sahip analiz sistemlerinin kullanılmasının uygun olacağı saptanmıştır.

Çizelge 4.1. Baca gazında analiz edilen gazlar ve analiz yöntemleri [62]

Ölçülen Gaz	Ölçüm Yöntemi	Ölçüm Sınırı	Hassasiyeti
O ₂	O ₂ Molekülünün Paramanyetik Özelliklerinin Kullanılması	0 – 100 %	+/- % 1’den az
CO ₂	Saçınımsız Kızılötesi Işıma Yöntemi (NDIR-Non Dispersive Infrared)	0 – 5 % ¹ 0 -25 % ²	+/- % 1
CO	Saçınımsız Kızılötesi Işıma Yöntemi (NDIR-Non Dispersive Infrared)	0 – 500 ppm ¹ 0 – 25 % ²	+/- % 1
SO ₂	Saçınımsız Morötesi Işıma Yöntemi (NDUV-Non Dispersive Ultraviolet)	0 – 4000 ppm	< 2 ppm
NO-NO ₂ NO _x	Kimyasal Işıma Yöntemi (Chemilumineszens)	0 – 5000 ppm	1 ppm
C _m H _n	Alev İyonizasyon Yöntemi (FID – 0-10000 ppm Flame Ionization Detector)	0 – 10000 ppm	+/- % 2

¹ Seyreltilmiş Hat ² Direk Hat

4.3. Deney Prosedürü

Yapılan deneysel çalışmadaki her bir deney öncesi ve sonrası yapılan işlemler aşağıda sırasıyla verilmiştir:

Deneyin Başlatılması

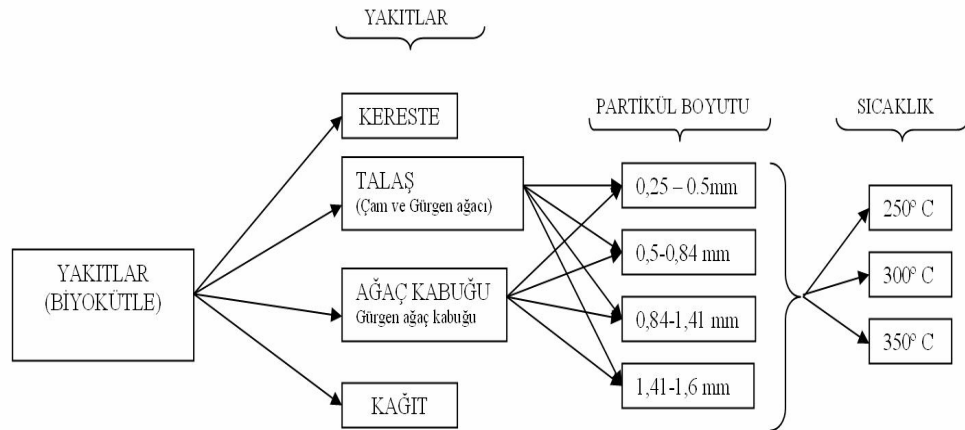
- 1) Fan ve bilgisayar elektrik besleme bağlantısının kontrol edilmesi ve açılması
- 2) Sistem üzerinde olabilecek elektrik kaçaklarının kontrol edilmesi
- 3) Bilgisayarı veri toplama programının açılması
- 4) Data logger ekranından ölçüm doğruluğunun kontrolü
- 5) Sistem yatak basıncını ölçen transmitterlere ait bağlantı hortumlarının kontrol edilmesi ve kompresör yardımıyla temizlenmesi
- 6) Sistem üzerinde gaz ve partikül çıkışı olabilecek noktaların kontrol edilmesi
- 7) İkincil havayı sağlayan kompresörün açılması
- 8) Deney sistem yapısına uygun olarak hazırlanan yakıt ve silis kumu karışımını besleme haznesine dökülmesi
- 9) Kompresör vasıtasıyla dönüş kolonunun tıkanmayacak şekilde karışımın ana kolona gönderilmesi
- 10) Fan frekans değişimini sağlayan inventörün açılması
- 11) Gerekli hava debisini uygun frekansın (Hz) yavaş yavaş artırarak istenen değere getirilmesi
- 12) Sistem için gerekli ısıtıcı gücünün varyak ile ayarlanması
- 13) Sigorta kutusundan ısıtıcılara gerekli elektrik beslemesinin kontrolü
- 14) Sistem kararlı hal koşullarında ($T_{yatak}=sbt$) çalışmasını sağlayan termostatin açılması
- 15) İstenilen sabit yatak sıcaklığına göre dijital termostat ayarının yapılması

Deneyin Sonlandırılması

- 1) Sisteme elektrik besleyen transformatörün kapatılması

- 2) Sistemde ısıtılmış yüzeylerin (duvarların) soğutulması için kompresör hava debisi ve fan frekansının artırılması
- 3) Sistem yatak sıcaklığının 100 °C'ye düşürüldüğünde kompresör ve fandan sağlanan hava beslemesi durdurulması
- 4) Sistemin ana kolon alt bölgesinde bulunan boşaltma ağzından ilgili yatak malzemesinin alınması
- 5) İlgili yatak malzemesinden gerekli miktarda petri kabına numune alınması
- 6) Bilgisayar, sigorta vb. ilgili elektrik bağlantılarının kapatılması

4.4. Deney Programı



Şekil 4.4. Deney programı

Çizelge 4.2.Deney programı

YAKITLAR	PARTİKÜL BOYUTU	SICAĞLIK
Yakıt olarak çam ağaç talaşı, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağac kabuğu kullanılmıştır.	Sistem tasarımına göre belirlenen elek aralığına göre partikül boyutunun 0,25 - 1,6 mm aralığında çalışılması gerekmektedir.	Laboratuvar ölçekli dolaşımli akışkan ısıtıcı gücüne bağlı olarak 250-350°C sıcaklığı aralığında çalışılmıştır.

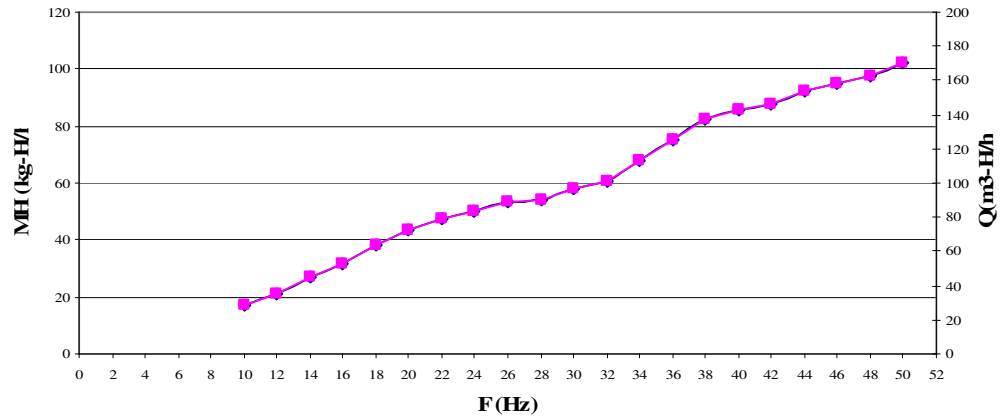
4.5. Deney Çalışmaları İle İlgili Ön Deneyler

Deneyisel çalışmalara başlarken sistemden kesin sonuç alınabilmesi için sistemin kararlı olması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan ön testler boyunca deney düzeneğindeki aksaklıklar belirlenmiş, gerekli ölçümler yapılarak önlemler alınmaya çalışılmıştır.

Ön deneyler boyunca, yatak sıcaklığının max. 260 °C'ye çıkılabildiği görülmüş, daha yüksek sıcaklıklarda ise deney düzeneğinde kullanılan kelepçe tip elektrikli ısıtıcıların yanacağı belirlenmiştir. Bu sebepten deney düzeneğindeki kısıtlamalardan dolayı sistem max. sıcaklığa kadar deney programı uygulanmıştır.

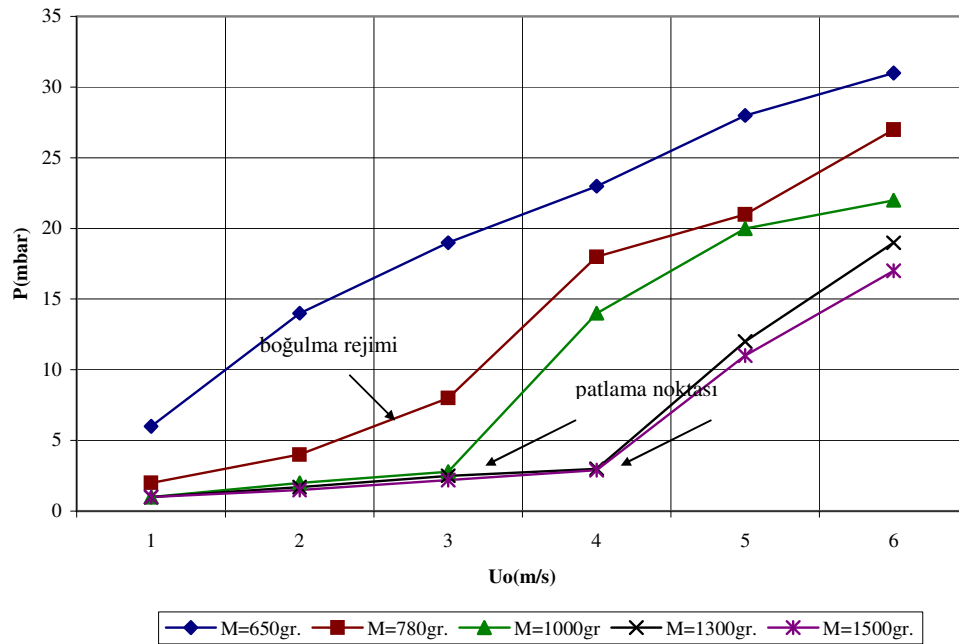
Bir diğer alınan önlemlerden biri de, sistemdeki hava sirkülasyonu boyunca yüksek hava debisi sebebiyle yakıt ve yatak malzemesi karışımının sistemi terk etmesi önlemesi için baca çıkışına filtre takılmıştır. Ayrıca siklondaki partiküllerin ana kolona dönüşümünü sağlamak için kompresör yardımıyla az miktarda bir ek hava beslemesi yapılmaktadır.

Aşağıda deney düzeneğinde mevcut fan ile beslenen hava debisinin (M_H) inventör frekansına (F) bağlı değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Fan hava debisinin (M_H) inventör frekansına (F) bağlı değişimi [66]

Yakıt ve yatak malzemesi karışım miktarı ile yatak davranışının belirlenmesi amacıyla 650, 780, 1000, 1300 ve 1500 g kütleler için ön deneyler yapılmış ve yatağın davranışı incelenmiştir (Şekil 4.6). Yatak malzemesi her deney için 500 g olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 4.6. Ortalama yatak basıncının yatak kütle miktarı (M_Y) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (Çam ağaç talaşı ve silis kumu karışımı)

Çam ağaç talaşı ve silis kumu karışımı ile yapılan ön deneyde değişen gaz hızına karşılık, basınç değeri önce yaklaşık olarak sabit kalmış (boğulma rejimi) ve daha sonra yatak birden patlayarak, akışkanlaşmaya çalışmıştır (Şekil 4.6). Buna bağlı olarak yakıt ve yatak malzemesi karışım miktarını 1000g'dan fazla olmamasına karar verilmiştir.

4.6. Kullanılan Numunenin Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda örneğin çalışma koşullarına uygun olması gerekmektedir. Bu koşullara uygun hale getirilmesi, yakıt olarak kullanılan örneğin boyut analizi, nem, kül miktarı, üst ısı değeri ve uçucu madde tayini yapılarak sağlanır.

4.6.1. Boyut küçültme ve elek analizi

Kullanılan 3 numune, ASTM elek setinde parçacık boyutu $0.250 < D_p < 0,500$ mm; $0,500 < D_p < 0,590$ mm; $0,590 < D_p < 0,840$ mm; $0,840 < D_p < 1,00$ mm; $1,00 < D_p < 1,41$ mm; $1,41 < D_p < 1,60$ mm olacak şekilde elenmiştir. Ek-4, 5’de yakıt ve yatak malzemesinin boyut ve ortalama çap analizi sonuçları yer almaktadır.

4.6.2. Nem tayini

Analiz için hazırlanan örneklerden %0,2 duyarlıkta bir miktar alınarak 103 ± 2 °C’ye ayarlanmış etüvde bekletilir. İki tartım arasındaki fark eşitleninceye kadar 2 saat daha bu sıcaklıkta tutulup işlem tekrarlanır. Nem miktarı, örneklerin ağırlık yüzdesi olarak aşağıdaki eşitlikten hesaplanır (ASTM D 2016-74).

$$\text{Nem (\%)} = [(A-B) / A] * 100 \quad (4.1)$$

Burada,

A: Örneğin başlangıç ağırlığı, (g)

B: Örneğin fırında kurutulduktan sonraki ağırlığı, (g)

ile temsil etmektedir.

4.6.3. Kül miktarı tayini

Boş bir porselen kroze ve kapağı 600 °C’deki fırına konulur. Fırından çıkarıldıktan sonra desikatörde soğutulur ve iki tartım arasındaki fark $0,1$ mg oluncaya kadar bu işlem tekrarlanır. Daha önceden hazırlanan hammaddelerden ~ 2 g tartılır ve sabit tartıma getirilmiş krozeye koyulur, üzeri örtülerek tartılır. Daha sonraki örnek, sıcaklığı $100-105$ °C’ye ayarlanmış bir etüvde kurutulur. Bir saat sonra etüvden çıkarılan krozenin kapağı kapatılarak, desikatörde soğutulur ve tartılır. Bu işlem iki tartı arasındaki fark $0,1$ mg oluncaya kadar devam edilir. Soğutma ve tartım işlemi sırasında, krozenin ve hammaddenin, havanın nemini absorplamamasına dikkat

edilmelidir. Kroze ve kapağı ile hammaddelerin beraber tartımdan çıkarılırsa etüvdeki kuru örnek ağırlığı bulunur.

Kroze içindeki hammadde, krozenin kapağı açık olarak tüm karbon giderilinceye kadar fırında yakılır. Isıtma işlemi yavaş olmalı ve yakılan örneğin alev almaması, çıkarılan krozenin kapağı kapatıldıktan sonra desikatörde soğuması sağlanır. Bu işlem, yarım saat ara ile iki tartım arasındaki fark 0,2 mg oluncaya kadar tekrarlanır. Kül ağırlık yüzdesi olarak aşağıdaki gibi hesaplanır (ASTM D 1102-84).

$$KÜL (\%) = (A/B) * 100 \quad (4.2)$$

Bu eşitlikte,

A: Kül ağırlığı, (g)

B: Fırındaki kuru örneğin ağırlığı, (g)

ile temsil etmektedir.

4.6.4. Uçucu madde miktarı tayini

Sabi tartıma getirilmiş kroze içine, havada kurutulmuş her bir örnekten ayrı ayrı 0,1 mg duyarlıkta ~ 1g tartılır. Kroze kapağı örtülerek 950 °C ± 20 °C'deki fırına konulur. Örneğin yanmamasına dikkat edilmelidir. Kroze fırında tam olarak 7 dk bekletildikten sonra, fırından çıkarılarak desikatörde soğutulur ve tartılır. Örneğin uçucu madde miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır (ASTM D 1762X-84) [52].

$$Uçucu\ madde\ miktarı\ (\%) = [(A-B) / A] * 100] -M \quad (4.3)$$

Burada;

A: Kullanılan örneğin ağırlığı, (g)

B: Örneğin ısıtmadan sonraki ağırlığı, (g)

M: Kullanılan örneğin nem (%)

ile temsil etmektedir.

4.6.5. Üst ısı değer tayini

Üst ısı değerleri (ÜİD) ASTM D2015 standart metoduna göre kalorimetre bombası kullanılarak, daha önce yapılan çalışmalarda verildiği üzere tayin edilmiştir. ÜİD'yi hesaplamak için aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmuştur.

$$\text{ÜİD} = 0,3181(C) + 0,1423 (H) + 0,1540 (O) \quad (4.4)$$

$$\text{ÜİD} = 0,196 (FC) + 13,585 \quad (4.5)$$

4.7. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Sonuçlar

4.7.1. Kullanılan hammaddenin özellikleri

Kullanılan çam, gürgen talaşı ve gürgen kabuğu elementer analizi aşağıdaki Çizelge 4.3'de verilmiştir. Kullanılan biyokütleler laboratuvar ortamına gelmeden ve deneylerde kullanılmadan önce kaba neminin büyük bölümünü bırakmıştır.

Çizelge 4.3. Çam talaşı, gürgen talaşı ve gürgen ağaç kabuğu elementer, kaba ve ısı değer analizi

Bileşenler	Çam Ağacı Talaşı	Gürgen Ağaç Talaşı	Gürgen Ağaç Kabuğu
Kuru ve Külsüz Temelde Elementer Analiz			
C	49,8	53,08	57,00
H	5,8	8,11	4,85
N	0,17	0,26	1,43
O	44,23	38,55	36,72
Kaba Analiz			
Nem	6,45	7,42	8,20
Uçucu Madde	77,77	81,63	76,74
Kül	3,50	1,70	2,01
C _{fix}	12,28	9,25	13,05
Üst Isıl Değeri kJ/kg, (kcal/kg)	23478, (5616,75)	23976, (5735,885)	24477, (5855,742)
Alt Isıl Değeri kJ/kg, (kcal/kg)	22007,073, (5264,85)	21961,574, (5253,965)	23176,604, (5544,642)

4.7.2. Gaz ürünü ısı değeri hesabı

Alt ve üst kalorifik değeri olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki tür kalorifik değeri vardır. Laboratuvarlarda birim yakıtın yakılarak açığa çıkan ısı belirlenmesi için yapılan testlerde cihazlar genellikle 20 °C ortam sıcaklığı için ayarlanır. Birçok yakıt, yanma sırasında su buharı haline dönüşen hidrojen ihtiva eder. Eğer yanma gazı 20 °C'ye soğutulursa su buharı sıvı hale geçer ve bu esnada buharlaşma gizli ısı açığa çıkar. Bu şekilde yapılan bir laboratuvar testi üst kalorifik değeri verir. Uygulamada ise yanma gazları yüksek sıcaklıktadır. Bu durumda gazın gizli ısı açığa çıkmaz. Bu şekildeki bir yanmada elde edilen ısı, alt kalorifik değerini ifade eder. Alt ve üst kalorifik değeri arasındaki fark yakıt içinde bulunan hidrojen miktarının bir fonksiyonudur.

Gaz ürün kalorifik değerini hesaplamak için toplam gaz debisi, ölçülen hacimsel oran ve CO, CH₄'ün alt ısı değeri kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde çam, gürgen ağaç talaşları ve gürgen ağaç kabuğunun sırasıyla kütle debileri 6,28kg/h, 6,73 kg/h, 5,99 kg/h ile verilen enerji değerleri elde edilmiştir.

$$M \left(\frac{kg - biyokütle}{h} \right) \times V_G \left(\frac{Nm^3 - G}{kg - biyokütle} \right) \times H_{ut} \left(\frac{kcal}{Nm^3 - G} \right) = Q \left(\frac{kcal}{h} \right)$$

Denklemdaki H_{ut} değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$H_{ut} = \sum_{i=1}^3 \left(H_u \left(\frac{kcal}{Nm^3} \right) X_{G_i} \left(\frac{Nm^3 - (CO/CH_4)}{Nm^3 - G} \right) \right) (kcal/Nm^3)$$

H_{ut} = H_{CO}.X_{CO} + H_{CH₄}.X_{CH₄} (kcal/Nm³) olarak elde edilir.

V_G değeri ise,

$$V_G = V_{Gth} + (n-1) V_{Hth}$$

Teorik olarak özgül hava gereksinimi:

$$V_{Hth} = (1/0,21) O_{2min} \quad O_{2min} = 1,87C + 5,6(H - O/8) + 0,7S \left(\frac{Nm^3 - O_2}{kg - biyokütle} \right)$$

Hava fazlalık katsayısı:

$$n = \frac{21}{21 - O_2}$$

Teorik olarak özgül yanma gazı miktarı:

$$V_{Gth} = V_{CO2} + V_{SO2} + V_N + V_{NH} \left(\frac{Nm^3 - G}{kg - biyokütle} \right)$$

$$V_{CO2}=1,87C, \quad V_{SO2} = 0,7S, \quad V_N= 0,8N, \quad V_{NH}=3,76O_{2min}$$

Biyokütlelerin alt ısı değerleri (ısıtma ısısı) biyokütlenin net kullanılabilen ısını veriri. Biyokütlenin tersinir biçimde gazlaştığı varsayılırsa, oluşan max. (teorik) yanıcı gaz miktarının yakılması sonucu oluşan net ısı da biyokütlenin ısı değerine eşit varsayılabilir. Bu nedenle, gazlaşma verimi aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır.

$$\eta_{gazlaşma} = \frac{\text{Yanıcı gaz gazlaşma potansiyeli} \times \text{Gazın ısı değeri}}{\text{Biyokütlenin alt ısı değeri}} \times 100$$

$$\eta_{gazlaşma} = \frac{q_G \left(\frac{kcal - G}{kg} \right)}{H_{u-biyokütle} \left(\frac{kcal - biyokütle}{kg} \right)} \times 100 (\%)$$

$$\eta_{gazlaşma} = \frac{\sum_1^2 (V_G H_u)_i}{H_{u-biyokütle}} \times 100 = \frac{V_{CO} H_{CO} + V_{CH_4} H_{CH_4}}{H_{u-biyokütle}} \times 100 (\%)$$

Çizelge 4.4. Gaz ürünü ısıl değer hesabı

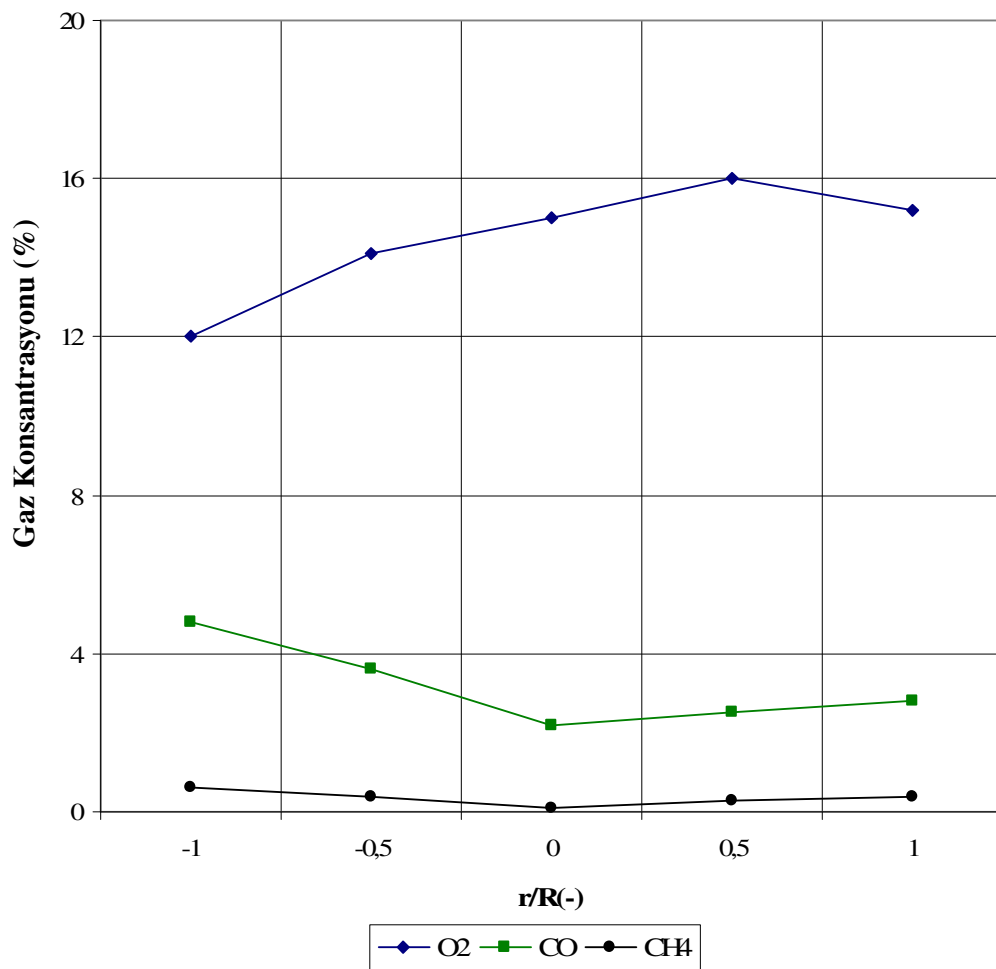
	Çam ağaç talaşı	Gürgen ağaç talaşı	Gürgen ağaç kabuğu
$V_{Gth}(\frac{Nm^3 - G}{kg - biyokütle})$	4,491272	5,4198	5,1399
$V_{Hth}(\frac{Nm^3 - H}{kg - biyokütle})$	4,506905	5,6043	5,14505
n (-)	2,625	2,1	2,756
$V_{CO}(\frac{Nm^3 - CO}{kg - biyokütle})$	0,4135	0,3939	0,156
$V_{CH4}(\frac{Nm^3 - CH4}{kg - biyokütle})$	0,0237	0,0348	0,0128
$V_G(\frac{Nm^3 - G}{kg - biyokütle})$	11,815	11,5845	14,175
q _G (kcal/kg)	1373,032	1407,076	548,92
η _G (%)	26,1	26,8	9,9
H _{ut} (kcal/Nm ³)	116,211	121,462	38,724
M(kg-biyokütle/h)	6,28	6,73	5,99
Q (kcal/h)	8622,647	9469,625	3288,031
Q (kW)	10,026	11,011	3,823

4.7.3. Eksenel ve radyal yönde gaz bileşen profili

Dolaşımli akışkan yatak deney düzeneğimizde deneysel çalışma boyunca 3 yakıt türü kullanılmış, ana kolona belli bir miktarda besleme yapılarak sıcaklık, yakıt türü, O₂ oranı vb. parametrelerle deney süresince verilen değerler kayıt edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan biri de yakıtların tutuşma sıcaklığında eksenel ve radyal yönde gaz bileşenlerinin belirlenmesi olmuştur.

Dolaşımli akışkan yatakta belli bir sıcaklıkta ana kolondaki eksenel ve radyal gaz bileşenleri uniform olmadığı düşünülmüş, eksenel ve radyal yönde dolaşımli akışkan yatağın ana kolonunda ölçümler yapılmıştır.

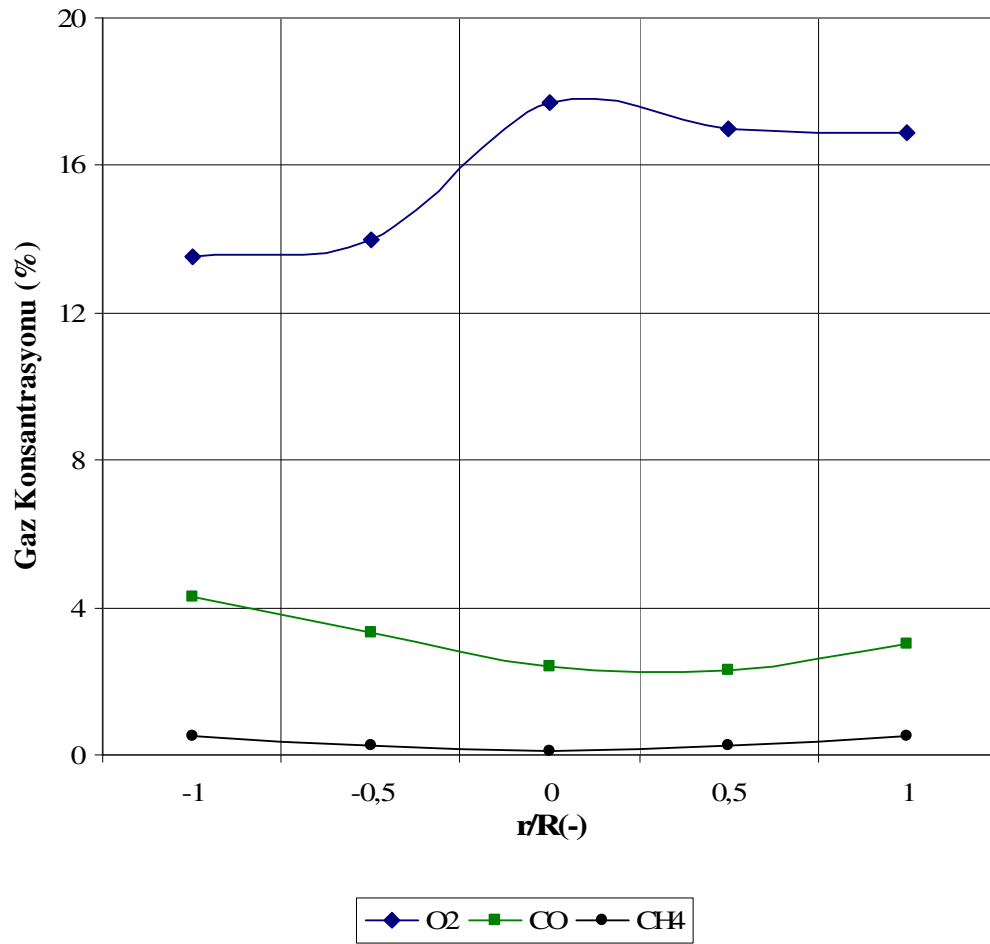
Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9’da radyal yönde ana kolonda O_2 , CO ve CH_4 hacimsel yüzdeleri elde edilmiş, ana kolonda belli bir yükseklikte (100cm) sonuçlar elde edilmiştir. Yatak malzemesi olarak düşünülen silis kumu 1200g ana kolona beslemesi yapılmıştır. Ayrıca hava debisi $79,3m^3/h$, ısıtıcı verimi %40 ayarlanarak sıcaklık artışının $\sim 3^\circ C/dk$ olarak ayarlanmış ve ölçümler hemen baca girişinde yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) O_2 , CO ve CH_4 ; (b)Gürgen ağaç talaşı(150 gr), $T_{yatak}=200^\circ C$

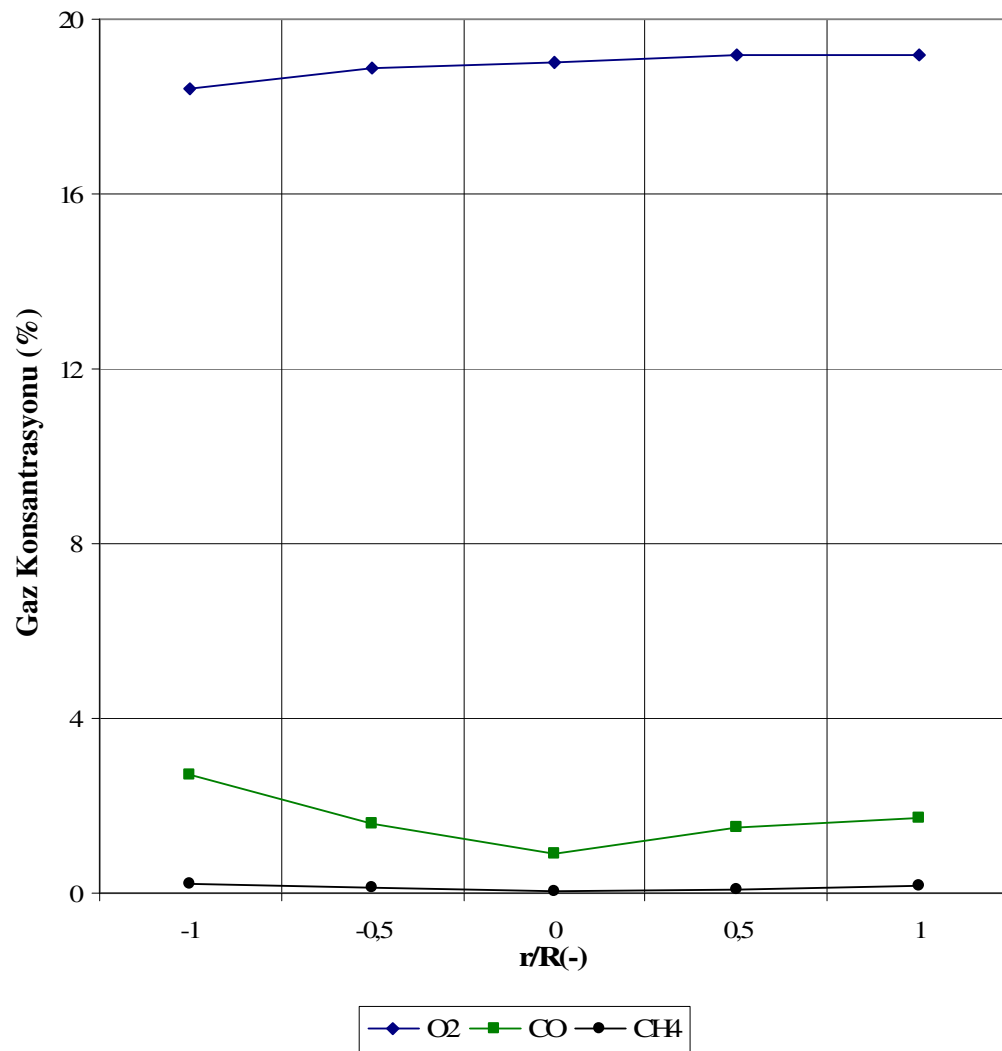
Çizelge 4.5. Gürge ağaç talaşı ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları

$r/R(-)$ Gaz(%)	-1	-0,5	0	0,5	1
O₂	12	14,1	15	16	15,2
CO	4,8	3,6	2,2	2,5	2,8
CH₄	0,6	0,38	0,1	0,4	0,6

Şekil 4.8.Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) O₂, CO ve CH₄; (b) Çam ağaç talaşı (150 gr), T_{yatak}= 210 °C

Çizelge 4.6. Çam ağaç talaşı ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları

$r/R(-)$ Gaz(%)	-1	-0,5	0	0,5	1
O₂	13,5	14	17,7	17	16,9
CO	4,3	3,3	2,4	2,3	3
CH₄	0,52	0,27	0,1	0,26	0,52

Şekil 4.9. Radyal yönde gaz bileşen profili: (a) O₂, CO ve CH₄; (b) Gürgen ağaç kabuğu (150 gr), T_{yatak}= 250 °C

Çizelge 4.7. Gürgen ağaç kabuğu ile radyal yönde yapılan ölçüm sonuçları

r/R (-) Gaz(%)	-1	-0,5	0	0,5	1
O₂	18,4	18,9	19	19,2	19,2
CO	2,7	1,6	0,9	1,5	1,7
CH₄	0,2	0,12	0,06	0,09	0,19

Radyal yönde yapılan deneysel çalışmalarda, ele alınan üç çeşit yakıt ile belli şartlar altında sonuçlar elde edilmiş ve sonuçlara bakıldığında DAY’da gaz bileşenlerin radyal ve eksenel yönde uniform olmadığı elde edilen sonuçlarla belirlenmiştir.

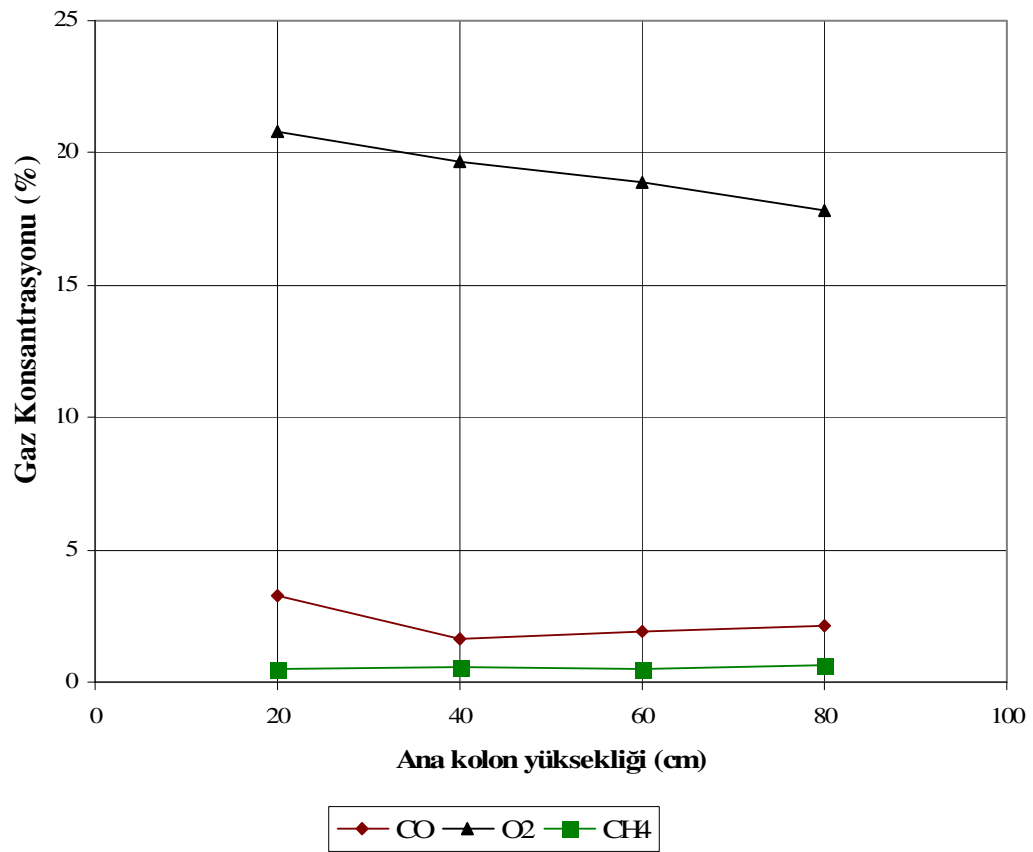
Akış boyunca partiküller duvara doğru eğilim göstermekte ve duvara yakın bölgelerde partiküller aşağıya doğru akışı gerçekleşmektedir. Bu esnada partiküllerin büyük kısmın yukarı doğru akışı devam etmektedir. Sonuç olarak, duvara eğilimli partiküllerin oluşturduğu reaksiyonlar ince duvar alanı boyunca meydana gelmektedir.

Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9’da partiküllerin duvara doğru akış eğilimi elde edilen gaz bileşenleri göstermiştir. Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9’da görüldüğü üzere duvara yakın bölgelerdeki O₂ değerinin azalması ve bu bölgelerdeki CO miktarının artması geriye dönen partiküllerin kısmi yanması ve tane partiküllerin neminin çok az miktarda buharlaşması olarak açıklanabilmektedir.

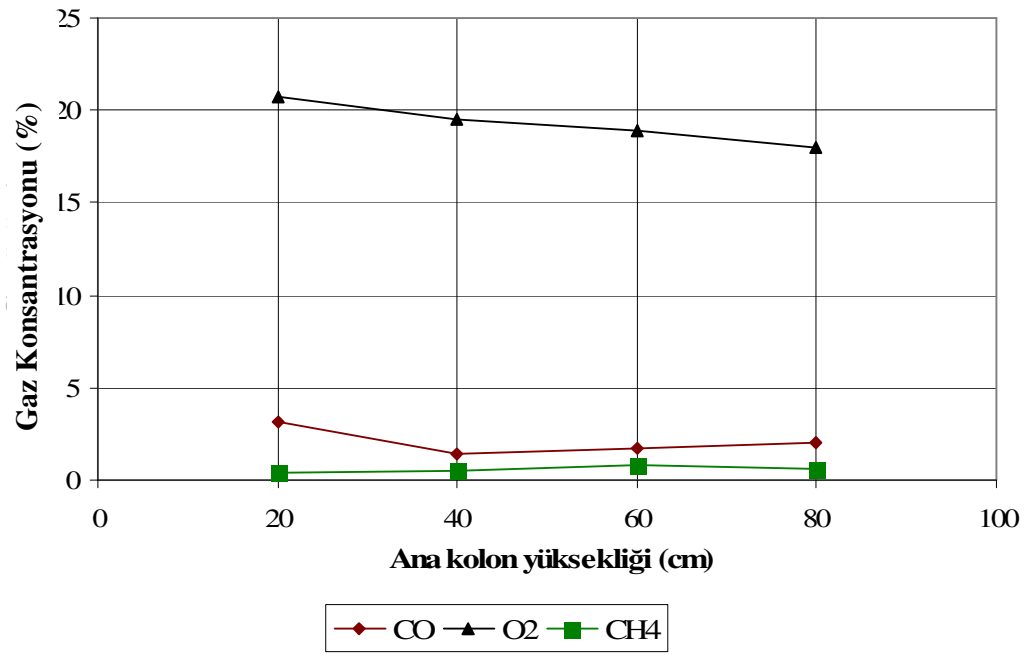
Üç değişik yakıt malzemesi ile elde edilen şekillerde genel itibariyle “-1” konumunun “1” konumuna göre O₂ miktarının daha düşük ve CO miktarının daha yüksek olması, dolaşımli akışkan yatak sistemindeki bazı kısıtlamalar sebebiyle belli bir hata miktarı oluşmuştur. Ayrıca bu seviyedeki ölçümlerde daha yüksek sıcaklıklara çıkılamaması sebebiyle kısmi mertebelerde yanmanın gerçekleştiği belirlenmiştir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de kullanılan çam ve gürgen ağaç talaşlarından elde edilen gaz bileşenlerinin elementer analiz, yatak sıcaklığının, hava hızının ve yakıt miktarının birbirlerine yakın veriler olması sebebiyle sonuçlarda birbirlerine yakınsamaktadır. Ancak Şekil 4.9’da kullanılan gürgen ağaç kabuğunun belli bir düzeyde ölçülen değer sonuçlarında görülmektedir ki kısmi reaksiyon gerçekleştiği görülmektedir. Bu sebeple O_2 miktarındaki toplam değişiminin az olması ve diğer gaz ürünlerin çok düşük oranlarda elde edilmesi bunun bir kanıtı olarak gösterilebilir.

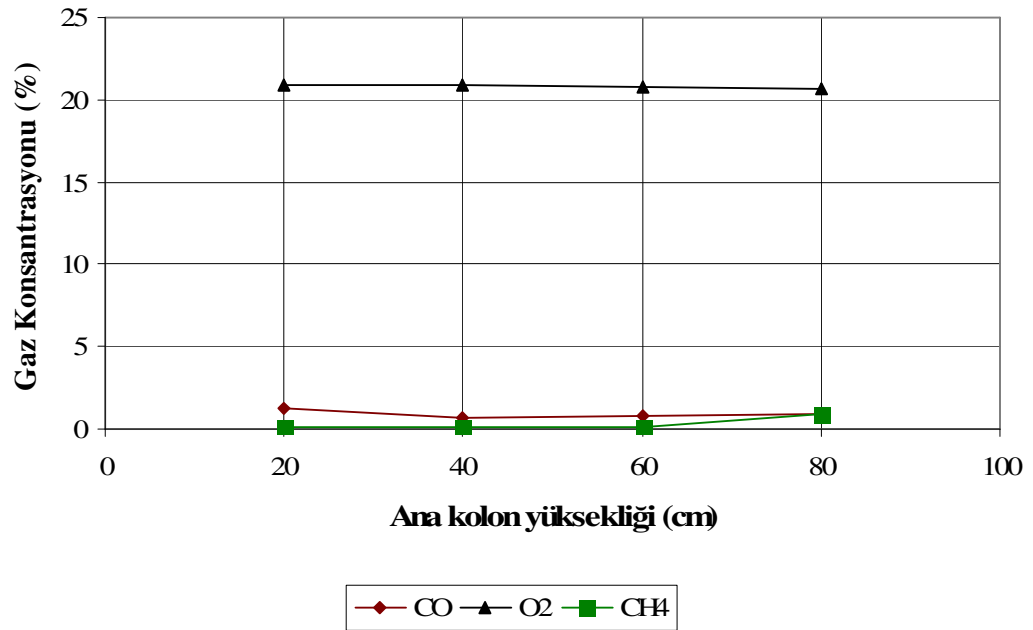
Eksenel yönde gazlaştırma sonucu elde edilen gaz bileşenleri Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de yer almaktadır. Radyal yönde yapılan deneysel çalışma şartları eksenel yönde yapılan deneysel çalışma ile aynı tutulmuştur.



Şekil 4.10.Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Gürgen ağaç talaşı (100 gr), (b) Silis kumu (1000gr).



Şekil 4.11. Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Çam ağaç talaşı (100 gr), (b) Silis kumu (1000gr).



Şekil 4.12. Eksenel yönde gaz bileşen profili : (a) Gürgen ağaç kabuğu (150 gr), (b) Silis kumu (1000gr).

Eksenel ve radyal yönde yapılan deneysel çalışma, en uygun şartlar belirlenerek gaz bileşenler elde edilmiş, uygun şartın belirlenmesi yapılan ön deneyler boyunca min. akışkanlaşma hızına, yakıt ve yatak malzemesi miktarına, ısıtıcı gücüne, sıcaklık artış hızına bağlı olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de farklı üç yakıt malzemesi ile eksenel yönde gaz bileşenleri incelenmiştir. Bu incelemelerde genel olarak görülmüştür ki ana kolonun alt bölgelerinde akış halindeki partiküllerin duvara doğru eğilimli olması sebebiyle duvara yakın bölgelerdeki geri dönen partiküllerin kısmi yanması ve tane partiküllerdeki nemin çok az miktarda buharlaşması gerçekleşmektedir. Ana kolonun üst kısımlarında ise kömürleşen partiküllerin gazlaşması söz konusudur. Elde edilen Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de ana kolonda üst kısımlarda CO reaksiyonu ve kısmi yanma ürünlerinin oksidasyonu ve CO konsantrasyonunun azalması ile neticelendiği bölgede CO₂ giderek arttığı öngörülmüştür. Bu esnada geriye kalan kömürleşen partiküllerin CO₂ ile gazlaşması devam etmekte ve bu reaksiyon sonucunda CO seviyesi yeniden artmaktadır. Ayrıca C – H₂O reaksiyonu ile da CO ve H₂ içeriğini arttırmaktadır.

Deneysel çalışma boyunca gazlaştırma ürünü olarak CO ve H₂ gaz bileşenlerinin oluşumu beklenir ve yukarıda bahsi geçen C - H₂O reaksiyonu ve CO₂ ile gazlaşma ile gazlaştırma prosesi sağlanmaktadır. Bu amaçla yaptığım deneysel çalışma boyunca hava kullanılarak reaksiyonun gerçekleştiği görülür. Ancak gazlaşma prosesinde hava yerine H₂O_(g) kullanılması bu reaksiyonu hızlandırır, CO ve H₂ gaz içeriğini artırır. İleri de yapılabilecek deneylerde H₂O_(g) kullanımı avantaj sağlayacağı görülmektedir.

Şekil 4.10’da gürgen ağaç talaşı ile yapılan deneysel çalışma da ana kolonun üst kısımlarında O₂ miktarının azalması, sıcaklık artışı ile reaksiyon hızının arttığı belirlenmiş ve bu sebeple CO₂ miktarındaki artış ortaya çıkmıştır. Bunun aksine CO miktarında azalma görülmüştür. Bu azalma, yukarıda bahsedilen ana kolonun alt kısmında geri dönen partiküllerin pirolizi olabilir. Ana kolonun üst kısımlarında CO miktarında çok az bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artış ise, C–H₂O reaksiyonu

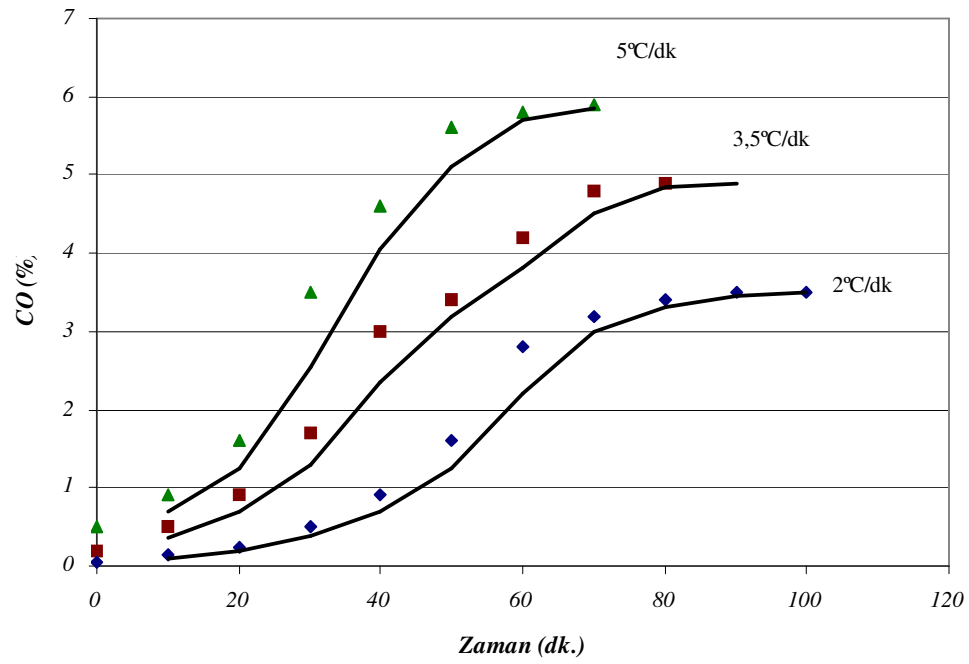
sonucu oluşan gaz içeriğidir. Bu, yapısı ile Xuantian Li tarafından yapılan “Biomass gasification in a circulating fluidized bed” tezindeki eksenel yöndeki gaz profili ile benzer olmakla birlikte, yaptığı deneylerin çalışma şartları (sıcaklık, hava oranı vb.) farklıdır. Xuantian Li’nin deneysel çalışmalarında yaptığı teze göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışmış ve CO miktarının %20’ye kadar ulaştığı sonuçlar elde edilmiştir. Sistemimizdeki bazı kısıtlamalar sebebiyle bu sıcaklıklara çıkmanın mümkün olmadığı görülmüştür.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de çam ve gürgen ağaç talaşının kullanımı ile aynı şartlarda birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.12’de ise ağaç kabuğu kullanılması ile yapılan deneysel çalışmada bazı nedenler (düşük sıcaklık vb.) sebebiyle çok az reaksiyonun gerçekleştiği elde edilen gaz bileşenlerinden belirlenmiştir.

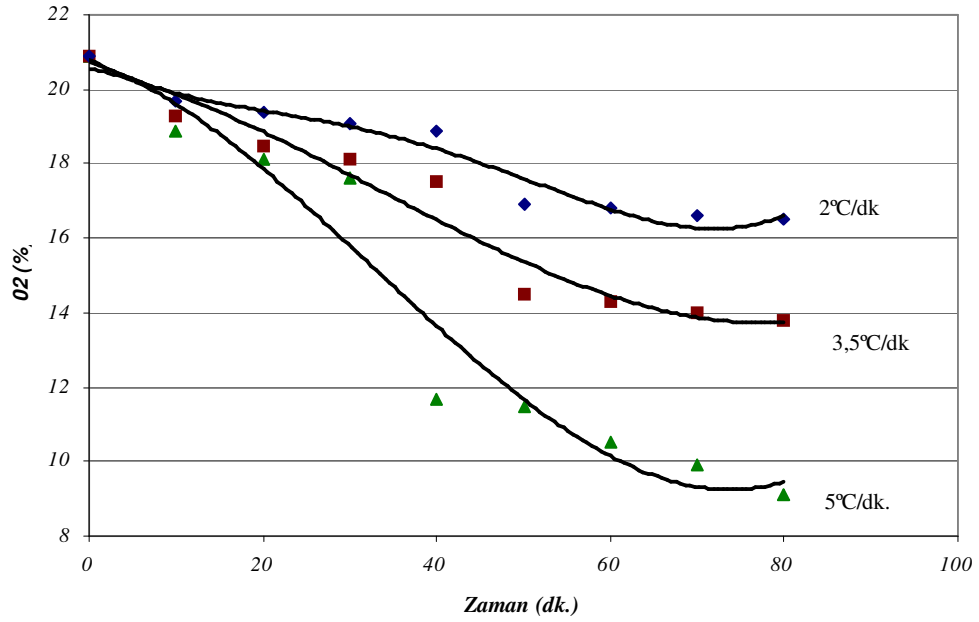
4.7.4. Sıcaklık artış hızı ile gazlaştırma karakteristiğinin değişimi

Dolaşımli akışkan yatak sisteminde farklı sıcaklık artışı ele alınan belli bir yakıtla deneysel veriler elde edilerek sistem performansı incelenmiştir.

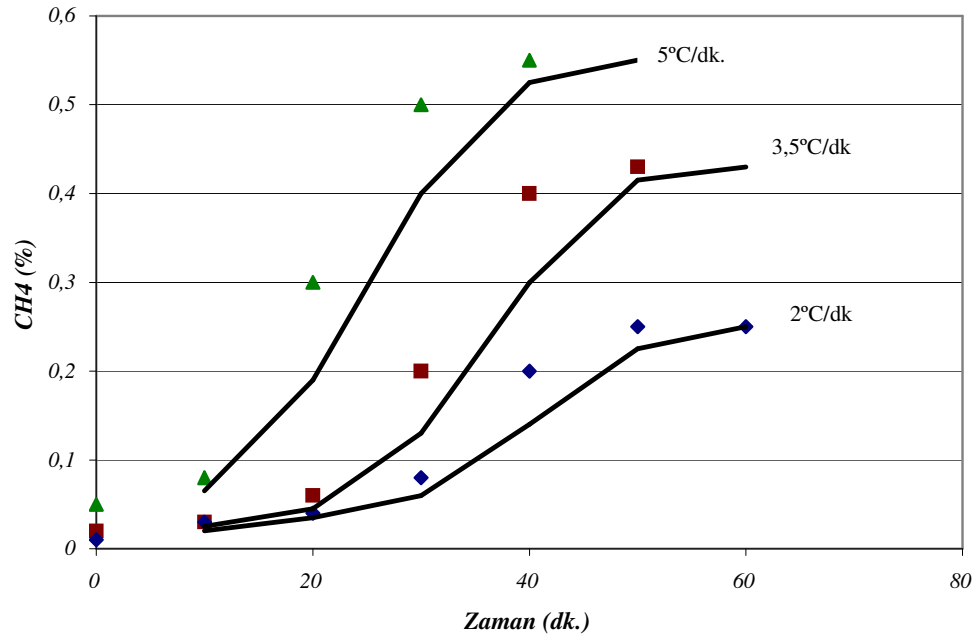
Deneysel çalışma boyunca yapılan ön deneyler sonucunda uygun görülen (2 - 3,5 ve 5°C/dk.) sıcaklık artışı belirlenerek deneyler yapılmıştır. Yakıt olarak gürgen ağaç talaşı seçilmiş, 500 – 1000 µm çapındaki partiküller kullanılmıştır. Yakıt malzemesi 200 g alınmış, sistem içinde ısının dışarı çıkması engellemek amacıyla kullanılan yatak malzemesi (silis kumu) 850 g olarak ön deneyler sonucunda belirlenmiştir.



Şekil 4.13. Farklı sıcaklık artışı ile CO (%)'nin zamana göre değişimi : (a) Gürge ağaç talaşı (200 gr), (b) Silis kumu (850gr).



Şekil 4.14. Farklı sıcaklık artışı ile O₂ (%)'nin zamana göre değişimi : (a) Gürge ağaç talaşı (200 gr), (b) Silis kumu (850gr).



Şekil 4.15. Farklı sıcaklık artışı ile CH₄ (%)’in zamana göre değişimi : (a) Gürgeç ağaç talaşı (200 gr), (b) Silis kumu (850gr).

Gazlaştırma ürünlerini (O₂, CO, CH₄) belirlediğimiz bir yakıt üzerinde farklı sıcaklık artışıdaki değişimi Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15’de görülmektedir.

Şekil 4.13’de farklı sıcaklık artışlarında CO’nin zamana göre değişimi verilmiş ve sıcaklık artışları (2–3,5 ve 5°C/dk) yapılan ön deneysel çalışma sonucu ile belirlenmiştir. Şekilde sıcaklık artış hızının yüksek olması kısa sürede CO miktarındaki artış kaydedilmiş ve aynı zamanda CO (%) miktarının fazla olduğu saptanmıştır. Yine Şekil 4.14’de da yüksek sıcaklık artışlarında benzer durumlarla karşılaşmıştır. Şekil 4.15’de sıcaklık artış hızının yüksek olması O₂ (%) miktarını düşürür. Bunun neticesi olarak düşük sıcaklık artış hızlarına göre O₂’nin daha fazla reaksiyona girdiği O₂ içeriğinin daha az olması ile açıklanabilir.

Deneyler süresince yakıt miktarının diğer eksenel ve radyal yönde yapılan deneysel çalışmalara göre fazla olması ve eksenel ve radyal yöndeki deneylerde sıcaklık

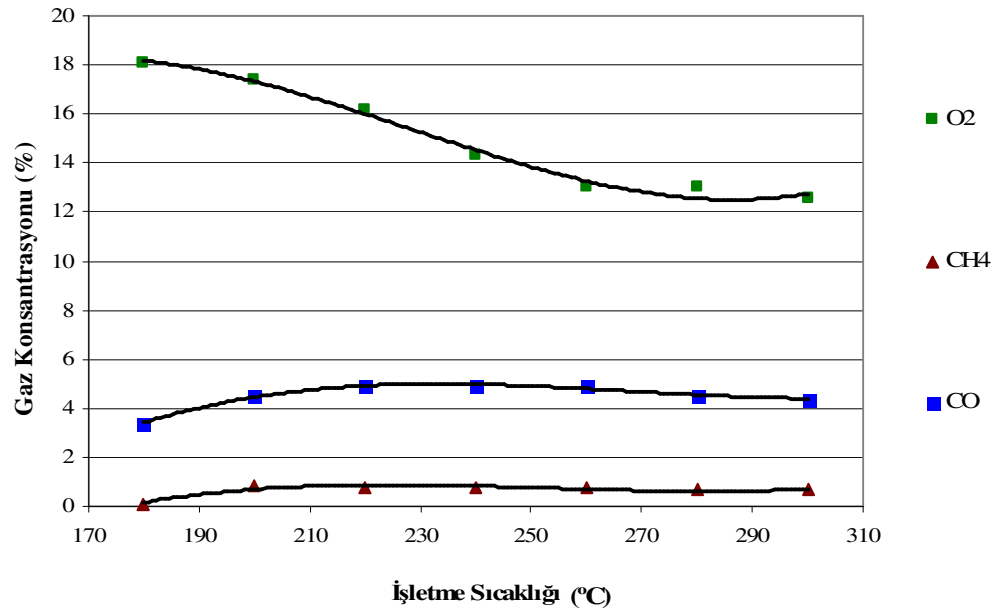
artışının $\sim 3^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olması sebebiyle CO miktarı daha yüksek çıkması doğal sonucudur. Diğer deneysel sonuçlarda da benzer durumlar görülmüştür.

Sonuç olarak, literatür çalışmalarım da Ramin Radmanesin'nin yaptığı "Fluidized Bed Biomass Gasification" tezde yakıt olarak akgürgen kullanılmış ve deney düzeneğimizde yapılan deneylerle kıyaslandığında birbirine benzer olduğu görülmüştür. Ancak Ramin Radmanesin'nin yaptığı deneylerde 10, 20 ve $30^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ sıcaklık artış hızı ile deneyler yaparak daha fazla oranlarda gazlaştırma ürünü elde etmiştir. Yani daha fazla sıcaklık artış hızı ile gazlaştırma ürünlerinin artışı sağlanabilmektedir. İleride yapılabilecek tezlerde daha yüksek sıcaklık artışı ile daha verimli sonuçlar elde edilebilir.

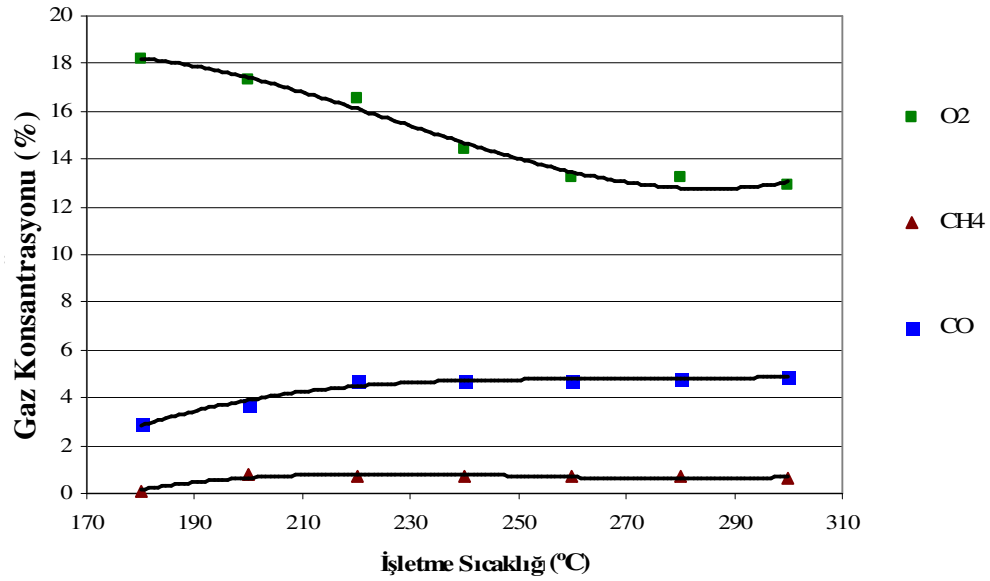
4.7.5. Gaz bileşenleri ile işletme sıcaklığı arasındaki ilişki

Deneysel çalışma boyunca ele alınan 3 numune (çam ağaç talaşı, gürgen ağaç talaşı, gürgen ağaç kabuğu) ile işletme sıcaklığı boyunca gaz ürün içerisindeki bileşenler incelenmiştir.

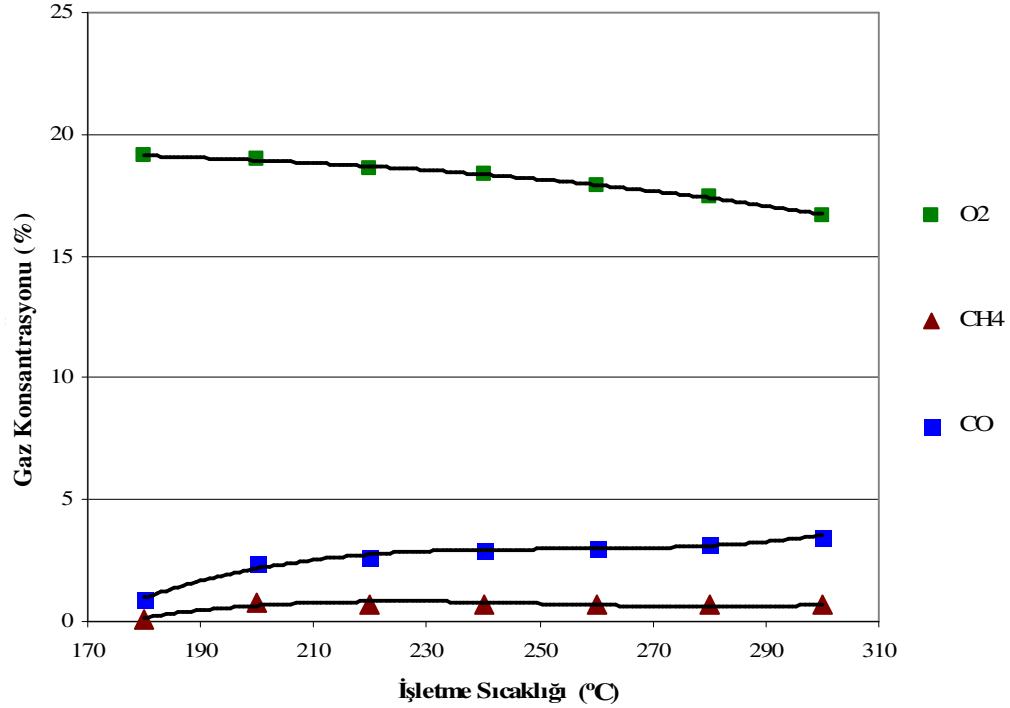
Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18'de işletme sıcaklığı boyunca ana kolonda O_2 , CO ve CH_4 hacimsel yüzdeleri elde edilmiş, ana kolonda belli bir yükseklikte (100cm) sonuçlar elde edilmiştir. Yatak malzemesi olarak düşünülen silis kumu 1200g ana kolona beslemesi yapılmıştır. Ayrıca hava debisi $61 \text{ m}^3/\text{h}$, ısıtıcı verimi %38 ayarlanarak sıcaklık artışının $\sim 4^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.16. İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri

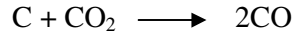


Şekil 4.17. İşletme sıcaklığı ile çam ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri



Şekil 4.18.İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç kabuğu gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenleri

İşletme sıcaklığına bağlı olarak gaz ürün yüzdeleri üç farklı yakıt malzemesi ile belirlenmiş ve bu belirlemeler sonucunda sıcaklık artışının reaksiyon hızını artırması sebebiyle O₂ değerinde belli miktarda azalma görülmüştür. CO miktarında 180-200°C’lerde bir miktar ve 300°C’de de tekrar çok az bir artış gözlenmiştir. Elde edilen bu artışlardan ilki, düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi sebebiyle partiküllerin pirolizi ve tane partiküllerin neminin buharlaşması ile açıklanabilmektedir. İkinci artış ise kömürleşen partiküllerin CO₂ ortamında gazlaşmaya başlaması ve C-H₂O reaksiyonu gerçekleşmesi ile CO ve H₂ miktarındaki artış olarak yorumlanabilir. Bu aynı zamanda 290 – 310 °C’lerde CO₂ miktarında da küçük bir azalma görülür. Bunun sebebi, CO₂ ile gazlaşma sonucu aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmiştir. CH₄ miktarı belli bir seviyede ve az miktarda ürün elde edildiği deneysel sonuçlarda görülmüştür.



Yapılan deneylerde çam ağacı kullanımı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada (Şekil 4.17) yüksek sıcaklıklarda CO miktarındaki artış diğer yakıtlarla yapılan deneylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Buradan çam ağaç talaşının diğer yakıtlara göre daha hızlı gazlaşabildiği sonucu çıkarılmıştır. Diğer deneysel çalışmalarda da ortak sonuç olarak varılan nokta ise gürgen ağaç kabuğu ile yapılan deneylerde kimyasal reaksiyonların tam olarak gerçekleşmediği O₂, CO ve CH₄ değerlerinden belirlenmiştir.

Literatürde, John A. Fallavollita tarafından yapılan “Kraft Chemical Recovery in a fluidized bed” tezinde işletme sıcaklığı 500-700°C ve H₂O_(g) varlığında yapılan deneylerde, deneylerimde elde edilen sonuçlara yapısal olarak benzer olmasına rağmen, miktar olarak veriler birbirinden ayrılmaktadır [67]. İşletme sıcaklığının ve H₂O_(g) katkısı ile yapılan deney sonuçlarında elde edilen gaz bileşenleri daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca sistemde bir katalizör kullanımı da CO₂ gazlaştırmayı daha iyi sağlaması yönüyle de avantaj sağlamaktadır. John A. Fallavollita’nın piroliz deneyleri de aynı işletme sıcaklığında (500 - 700°C) N₂ ortamında ve H₂O_(g) katkısıyla gerçekleştirilmiş ve bu deneysel çalışma ile gaz ürün verimini artırır.

Diğer bir çalışma ise Hongming Jiang tarafından yapılan “A Numerical Simulation of a Fluidized Bed Gasifier” tezidir. Yatak sıcaklığının yüksek değerlerinde (900-1050°C) N₂, CO, CO₂, H₂ ve CH₄ değerlerinin N₂ ortamında mol yüzdeleri incelenmiş, CO değerinin de önemli bir artış olduğu görülmüştür. Bunun aksine CO₂ değerinde düşük olduğu gözlenmiştir.

5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Biyokütle kaynakları açısından oldukça zengin bir potansiyele sahip olan ülkemizde, biyokütlenin cinsine ve yapısına bağlı olmaksızın, termal dönüşüm prosesi ile özellikle yüksek verimde gaz ürün elde edilmesini sağlayan gazlaştırma yöntemi, enerji üretimi ve geri kazanımından önemli bir yöntem olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, biyokütlenin gazlaştırma yoluyla daha temiz ve daha verimli gaz yakıt elde edilmeye çalışılmıştır. Laboratuvar ölçekli dolaşimli akışkan yatak sistemiyle üç çeşit odun talaşı için yapılan gazlaştırma işleminden elde edilen gaz ürünler karşılaştırılmıştır.

Çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde belirlenen biyokütlelerin elementer, nem analizi yapılarak kül ve uçucu madde miktarı belirlenmiştir. İkinci bölümde ise, dolaşimli akışkan yatakta biyokütlelerin gazlaştırma işlemidir.

Deneylerde çam ağacı talaşı, gürgen ağacı talaşı ve gürgen ağaç kabuğu kullanılarak gazlaştırma prosesinde dolaşimli akışkan yataktaki ısıtıcı özelliğine bağlı olarak 250 – 350 °C sıcaklıklarda gazlaştırma işlemi gerçekleştirilmeye çalışılmış ve elde edilen gaz ürün bileşenleri incelenmiştir.

Değişik sıcaklık artışlarında (1,5°C/dk - 10°C/dk aralığında) denenen gazlaştırma işlemi sonucunda sıcaklık artışına bağlı olarak gaz bileşenlerinin farklı olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra yakıt miktarı, yakıt boyutu, yatak malzemesinin miktarına, hava debisine bağlı olarak farklı deneyler yapılmıştır. Sistemin boyutuna ve gönderilen hava debisine göre dolaşimli akışkan yatağın ana kolonuna yakıt miktarı yüklenmiş ve yakıt miktarı 100-300g aralığında belirlenmiştir. Ayrıca gönderilen yakıt miktarına bağlı olarak sistemin işletme şartlarında belirlenen hava debisi genellikle 58,5 ile 86,1 m³/h aralığında deneyler yapılmıştır.

Farklı odun talaşı ve kabuğunun kullanılmasıyla yapılan deneylerde, gürgen ağaç talaşının çam ağaç talaşına göre düşük sıcaklıklarda ($T_{yatak} = 200^{\circ}\text{C}$) gazlaşmanın

başladığı ve ayrıca daha yoğun gaz ürün elde edildiği görülmüştür. Buna rağmen, gürgen ağaç kabuğuyla yapılan gazlaştırma deneyinde gazlaşmanın gerçekleşmediği ortaya açıkça konmuştur.

Radyal yönde yapılan deneysel çalışmalarda, ele alınan üç çeşit yakıt ile belli şartlar altında sonuçlar elde edilmiş ve sonuçlara bakıldığında DAY’da gaz bileşenlerin radyal ve eksenel yönde uniform olmadığı elde edilen sonuçlarla belirlenmiştir.

Akış boyunca partiküller duvara doğru eğilim göstermekte ve duvara yakın bölgelerde partiküller aşağıya doğru akışı gerçekleşmektedir. Bu esnada partiküllerin büyük kısmının yukarı yönlü akışı devam etmektedir. Sonuç olarak, duvara eğilimli partiküllerin oluşturduğu reaksiyonlar ince duvar alanı boyunca meydana gelmektedir.

Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12’de ise farklı üç yakıt malzemesi ile eksenel yönde gaz bileşenleri incelenmiştir. Bu incelemelerde genel olarak görülmüştür ki ana kolonun alt bölgelerinde akış halindeki partiküllerin duvara doğru eğilimli olması sebebiyle duvara yakın bölgelerdeki geri dönen partiküllerin eksik yanması gerçekleşmektedir. Ana kolonun üst kısımlarında ise kömürleşen partiküllerin gazlaşması söz konusudur.

Bu amaçla yaptığım deneysel çalışma boyunca hava kullanılarak eksik yanma reaksiyonlarının gerçekleştiği görülür. Ancak gazlaşma prosesinde hava yerine $H_2O_{(g)}$ kullanılması bu reaksiyonu hızlandırır, CO ve H_2 gaz içeriğini artırır. İleri de yapılabilecek deneylerde $H_2O_{(g)}$ kullanımı avantaj sağlayacağı görülmektedir.

Şekil 4.13’de de farklı sıcaklık artışlarında CO’nin zamana göre değişimi verilmiş ve sıcaklık artışları (2–3,5 ve $5^{\circ}C/dk$) yapılan ön deneysel çalışma sonucu ile belirlenmiştir. Şekilde sıcaklık artış hızının yüksek olması kısa sürede CO miktarındaki artış kaydedilmiş ve aynı zamanda CO (%) miktarının fazla olduğu saptanmıştır. Yine Şekil 4.14’de da yüksek sıcaklık artışlarında benzer durumlarla karşılaşılmıştır. Şekil 4.15’de sıcaklık artış hızının yüksek olması O_2 (%) miktarını

düşürür ve bunun neticesi olarak düşük sıcaklık artış hızlarına göre O_2 'nin daha fazla reaksiyona girdiği O_2 içeriğinin daha az olması ile açıklanabilir.

Bu araştırmanın yapıldığı Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Isıl - Güç laboratuvarı uzun yıllardan beri fosil yakıtların hazırlanması, yakılması, ilgili yakma sistemleri ve enerji dönüşüm sistemlerine yönelik olarak çalışmaktadır. Çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu gibi biyokütle atıklarının gazlaştırılması amacıyla bir dolaşımli akışkan yataklı biyokütle gazlaştırma sistemi tasarlanmıştır ve imal edilmiştir. Başlangıçta gazlaşma işleminde buhar kullanımı öngörülmüş, ancak gerekli kaynak sağlanamadığı için, buhar kullanmaksızın gazlaştırma araştırmaları yapılmıştır. Gazlaştırma ısı kaynağı olarak, yatak dış yüzeylerine konumlanan elektrik ısıtıcılar ve biyokütle eksik yanma ısıları kullanılmıştır.

Deneyisel çalışma süresince, biyokütle gazlaşma potansiyeli ısı değerlerinin hesabı, biyokütlenin tersinir biçimde gazlaştığı varsayılarak ve oluşan max. (teorik) yanıcı gaz miktarının yakılması sonucu oluşan net ısı da biyokütlenin ısı değerine eşit olduğu düşünülerek hesaplanmıştır. Buna göre brüt gazlaşma verimi $\eta_{\text{gazlaşma}}$ belirlenmiştir. ARGE çalışmaları, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu üzerine yapılmış, yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğunun gazlaşma verimleri sırasıyla %26,1, %26,7, %9,9 bulunmuştur. Buradan da görüldüğü gibi biyokütle gazlaşma potansiyelinin en az yararlanılan gürgen ağaç kabuğu, en fazla yararlanılan gürgen ağaç talaşıdır. Bunun nedenleri incelenmiş, bu biyokütlelerde gazlaşma verimlerini artırılması ile ilgili yapılması gerekenler irdelenmiştir.

Üç farklı biyokütle ile yapılan deneylerde çam, gürgen ağaç talaşları ve gürgen ağaç kabuğu ile farklı değerlerde enerji üretilmiş ve sırasıyla 10,026 kW, 11,011 kW, 3,823 kW enerji elde edilmiştir. Bu enerjiler ile yaklaşık olarak bir dairenin ısıtılması mümkün olacaktır. Ayrıca deneyisel çalışma boyunca yanma veriminin % 90 olduğu varsayılmıştır. Deneylerde çam, gürgen ağaç talaşları ve gürgen ağaç kabuğunun sırasıyla kütle debileri 6,28kg/h, 6,73 kg/h, 5,99 kg/h orman ürünü besleme ile bir

dairenin ısı ihtiyacı karşılanabilmektedir. Endüstriyel bir uygulama da yüksek verimli bir gaz yakma sisteminde çam ve gürgen ağaçları kullanımı ile sırasıyla saatte 6280, 6730 ton talaş kullanılarak 1000 adet dairenin ısı ihtiyacı karşılanabilecektir.

Sonuç olarak, Gazi Üniversitesi Mühendislik - Mimarlık Fakültesi Isıl - Güç laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışma boyunca sisteme bağlı olarak yeterli sıcaklığa çıkılamaması sebebiyle istenen gazlaşma süreci gerçekleştirilememiştir. Ayrıca hava ile gazlaşma sürecinin gerçekleştirilmesi yerine buhar ile gazlaşması daha iyi sonuç verecektir. İlgili laboratuvar da biyokütle gazlaştırma çalışmaların da bir başlangıç olan bu çalışma ileride mali kaynak sağlandığında önemli bir kaynak sağlamış olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Li, X. T., Grace J. R., Lim C. J., Watkinson A. P., Chen H. P., Kim J. R., “Biomass gasification in a circulating fluidized bed”, *Biomass and Bioenergy*, 26: 171–193 (2004).
2. Min, T. J., Yoshikawa, K., Murakami, K., “Distributed Gasification and Power Generation From Solid Wastes”, *Energy*, 30: 2219-2228 (2005).
3. Warnwcke, R., “Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier”, *Biomass and Bioenergy*, 18: 489-497 (2000).
4. Jennen, T., Hiller, R., Köneke, D., Weinspach, P. M., “Modeling of gasification of wood in a circulating fluidized bed”, *Chem. Eng. Technol.*, 22: 10 (1999).
5. Sadaka, S. S., Ghaly, A. E., Sabbah, M. A., “Two phase biomass air-steam gasification model for fluidized bed reactors: Part I – Model development”, *Biomass and Bioenergy*, 22: 439–462 (2002).
6. Corella, J., Sanz, A., “Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo – rigorous model for stationary state”, *Fuel Processing Technology*, 86: 1021-1053 (2005).
7. Liu, H., Gibbs, B., M., “Modeling NH₃ and HCN emissions from biomass circulating fluidized bed gasifiers.”, *Fuel*, 82: 1591–1604 (2003).
8. Haris, B.J., Davidson, J.F., “Velocity Profiles, Gas and Solids, in Fast Fluidized Beds”, Fluidization VII, *Proc.of the Int. Conf. On Fluidization*: 219-226. (1992).
9. García – Ibañez, P., Cabanillas, A., Sánchez, J. M., “Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidised bed reactor. Preliminary results.”, *Biomass and Bioenergy*, 27: 183–194 (2004).
10. Lv, P.M., Xiong, Z. H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y , Zhu, J. X., “An experimental study on biomass air – steam gasification in a fluidised bed”, *Bioresource Technology*, 95: 95–101 (2004).
11. Gil, Javier, Corella, José, Azner, María P., Caballero, Migel A., “Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidised bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution”, *Biomass and Bioenergy*, 17: 389–403 (1999).

12. Zevenhoven – Onderwater, Maria, Backman, Rainer, Skrifvars, Bengt – Johan, Hupa, Mikko, "The ash chemistry in fluidised bed gasification biomass fuels. Part I: Predicting the chemistry of melting ashes and ash – bed material interaction", *Fuel*, 80: 1489–1502 (2001).
13. Zevenhoven – Onderwater, M., Backman, R., Skrifvars, B. – J., Hupa, M., Liliendahl, T., Rosen, C., Sjöström, K., Engvall, K., Hallgren, A., "The ash chemistry in fluidised bed gasification biomass fuels. Part II: Ash behaviour prediction versus bench scale agglomeration tests." *Fuel*, 80: 1503–1512 (2001).
14. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., "The study of reactions influencing the biomass steam gasification process", *Fuel*, 82: 835–842 (2003).
15. Glicksman L.R., Westphalen D., Brereton C., Grace J., "Verification of the Scaling Laws for Circulating Fluidized Beds" *Circulating Fluidized Bed Technology III Proc.of the Third Int.Conf.on CFB Nagoya*, Japan, 119–124 (1990).
16. Dowaki, K., Mori, S., "Biomass Energy Used in a Sawmill", *Applied Energy*, 80: 327-339 (2005).
17. Ganan, J., Al-Kassir Abdulla, A., Miranda, A.B., Turegano, J., Carreira, J., Cuerda, E.M., "Energy Production By Means of Gasification Process of Residuals Sourced in Extramadura (Spain)", *Renewable Energy*, 30: 1759-1769 (2005).
18. Di Blasi, C., Branca, C., Sparano, S., Lamantia, B., "Drying Characteristics of Wood Cylinders for Conditions Pertinent to Fixed-Bed Countercurrent Gasification", *Biomass and Bioenergy*, 25: 45-58 (2003).
19. Klose, W., Wölki, M., "On the Intrinsic Reaction Rate of Biomass Char Gasification With Carbondioxide and Steam" *Fuel*, 84: 885-892 (2005).
20. Wander, P.R., Altafini, C.R., Barreto, R.M., "Assessment of a Small Sawdust Gasification Unit" *Biomass and Bioenergy*, 27: 467-476 (2004).
21. Galgano, A., Di Blasi, C., "Modeling The Propagation of Drying and Decompositon Fronts in Wood" *Combustion And Flame*, 139: 16-27 (2004).
22. Rao, M.S., Singh, S.P., Sodha, M.S., "Stoichiometric, Mass Energy and Exergy Balance Analysis of Countercurrent Fixed-Bed Gasification of Post-Consumer Residues" *Biomass and Bioenergy*, 27: 155-171 (2004).

23. Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S., Kunimori, K., Yamada, M., Tomishige, K., "Gasification of Different Biomasses in a Dual-Bed Gasifier System Combined With Novel Catalysts With High Energy Efficiency" *Applied Catalysis A: General*, 267: 95-102 (2004).
24. Tomishige, K., Asadullah, M., Kunimori, K., "Syngas Production by Biomass Gasification Using Rh/CeO₂/SiO₂ Catalysts and Fluidized Bed Reactor" *Catalysis Today*, 89: 389-403 (2004).
25. Heler, M.C., Keoleian, G.A., Mann, M.K., Volk, T.A., "Life Cycle Energy and Environmental Benefits of Generating Electricity From Willow Biomass" *Renewable Energy*, 29: 1023-1042 (2004).
26. Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S., Kunimori, K., Yamada, M., Tomishige, K., "Catalyst Development for the Gasification of Biomass in the Dual-Bed Gasifier" *Applied Catalysis A: General*, 255: 169-180 (2004).
27. Baron, S., Brandon, N., Atkinson, A., Steele, B., Tudkin, T., "The Impact of Wood-Derived Gasification Gases on Ni-C60 Anodes in Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells", *Journal of Power Sources*, 12: 58-66 (2004).
28. Asadullah, M., Miyazawa, T., Ito, S., Kunimori, K., Yamada, M., Tomishige, K., "A Comparison of Rh/CeO₂/SiO₂ Catalysts With Steam Reforming Catalysts, Dolomite and Inert Materials as Bed Materials in Low Throughput Fluidized Bed Gasification Systems" *Biomass and Bioenergy*, 26: 269-279 (2004).
29. Jayah, T.H., Aye, L., Fuller, R.J., Stewart, D.F., "Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying" *Biomass and Bioenergy*, 25: 459-469 (2003).
30. Altafini, C.R., Wander, P.R., Barreto, R.M., "Prediction of the Working Parameters of a Wood Waste Gasifier Through an Equilibrium Model" *Energy Conversion and Management*, 44: 763-777 (2003).
31. Jong, W., Ünal, Ö., Andries, J., Hein, K.R.G., "Thermochemical Conversion of Brown Coal and Biomass in A Pressurised Fluidized Bed Gasifier With Hot Gas Filtration Using Ceramic Channel Filters: Measurements and Gasifier Modelling" *Applied Energy*, 74: 425-437 (2003).
32. Zainal, Z.A., Rifau, A., Quadir, G.A., Seetharamu, K.N., "Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier, *Biomass and Bioenergy*, 23: 283-289 (2002).

33. Dornburg, V., Faaji, A.P.C., “Efficiency and Economy of Wood-Fired Biomass Energy Systems in Relation to Scale Regarding Heat and Power Generation Using Combustion and Gasification Technologies” *Biomass and Bioenergy*, 21: 91-108 (2001).
34. Demirbaş, A., “Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals” *Energy Conversion and Management*, 42: 1357-1378 (2001).
35. Raskin, N., Palonen, K., Nieminen, J., “Power Boiler Fuel Augmentation With a Biomass Fired Atmospheric Circulating Fluid-Bed Gasifier” *Biomass and Bioenergy*, 20:471-481 (2001).
36. Topal, H., “Orman ürünleri atıkları ve SEKA kağıt fabrikası atık çamurlarının gazlaştırma davranışının akışkan yatakta deneysel incelenmesi ve enerji potansiyeli”, *Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi*, MMF 06/2002-47, Ankara (2004)
37. Türk Mühendisleri ve Mimar Odaları Birliği, “TMMOB Enerji Raporu, 2006”, Ankara, 17-19 (2006).
38. İnternet : İstanbul Teknik Üniversitesi “Türkiye’de Enerji ve Geleceği, İTÜ Görüşü” <http://www.energy.itu.edu.tr/iTUOnerileri.pdf> (2007)
39. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “1998 Enerji Raporu”, *Ankara*, 1-49 (2000).
40. British Petroleum (BP) (2005a), “Statistical Review of World Energy 2005”, London, 1-41 (June2005).
41. İnternet : Pamir, A. Necdet “ Dünya’da ve Türkiye’de Enerji, Türkiye’nin Enerji Kaynakları ve Enerji Politikaları http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_73100.pdf (2003)
42. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “1998 Enerji İstatistikleri”, WEC, *Türkiye 8. Enerji Kongresi*, Ankara, 273-284 (2000).
43. Noyan, Ö.F., “Türkiye’de Enerji-Çevre Sorunun ve Nükleer Alternatifin Enerji Ekonomisindeki Yeri”, *Türkiye 8. Enerji Kongresi*, Cilt II, 197-207, Ankara (2000).
44. Özbay, N., “ Pamuk Çiğidi Pres Küspesinin Pirolizi ve Sıvı Ürünlerinin Karakterizasyonu”, Doktora tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 25-29 (1998).
45. Tetik, E., “Kolza Sap-Samanının Pirolizi”, Yüksek Lisans tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 7-8 (1997).

46. Acaroğlu, M., Ültanır, M. Ö., “Türkiye’de biyokütle enerji potansiyeli ve değerlendirilmesi”, *Türkiye’de 8. Enerji Kongresi*, Cilt II, 161-172, Ankara (2000).
47. Türe, S., Özdoğan, S., Saygın, Ö., “Biyokütlenin Enerji Üretimi”, *Türkiye 6. Enerji Kongresi*, Teknik Oturum Tebligleri(1), İzmir, 486-493 (1994).
48. Sharma, R. K., Bakhshi, N. N., “Catalytic Upgrading of Biomass Derived Oils to Transportation Fuels and Chemicals”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69: 1071-1081 (1991).
49. Klass, D.L., “Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals”, *Biomass as an Energy Resource: Concept and Markets*, 29-50 (1998).
50. Özer, Z., “Bitkilerdeki Gizli Güç Biyokütle Enerjisi”, *Bilim ve Teknik*, 342, 56-61 (1996).
51. Wereko-Brobby, C.Y., Hagan, E.B., “Biomass Conversion and Technology”, John Wiley and Sons, *Sussex*, 203 (1996).
52. Can, M., “Orman Biyokütlesinin Pirolizi ve Ürünlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2-25 (2001).
53. Diebold, J.P., Bridgwater, A.W., “Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for the Production of Liquid Fuels”, *In Development in Thermochemical Biomass Conversion*, London, 5-25 (1997).
54. Backman, R., Frederick, W.J., Hupa, M., “Basic Studies on Black Liquor Pyrolysis and Char Gasification”, *Biosource Technology*, 46:153-158 (1993).
55. Bridgwater, A.W., “The Technical and Thermochemical Conversion of Biomass : Gasification by Flash Pyrolysis Study”, *Solar Energy*, 29, 6 (1982).
56. Devi, G.T., Kannan, M.P., “Calcium Catalysis Air Gasification of Cellulosic Chars”, *Fuels*, 77: 1825-1830 (1998).
57. Wang, Y., Kinoshita, C.M., Experimental Analysis of Biomass Gasification With Steam and Oxygen”, *Solar Energy*, 49: 3-4 (1992).
58. Demirbaş, A., Çağlar, A., “Catalytic Steam Reforming of Biomass and Heavy Oil Residues to Hydrogen”, *Energy, Education Science and Technology*, 11: 45-52 (1998).

59. Kannan, M.P., Richards, G.N., “Gasification of Biomass Chars in Carbondioxide: Dependence of Gasification Rate on the İndigenous Metal Content”, *Fuels*, 69: 747 – 753 (1990).
60. Canel, Muammer, “Kömürlerin Gazlaştırılması” *Madencilik*, 25(2): 35 (1986).
61. Suda, S.,” Metal Hydrides”, *Int. J. Hydrogen Energy*, 12: 323 – 331(1998).
62. Topal H., “Dolaşımli Akışkan Yatağın Hidrodinamik, Yanma ve Emisyon Özelliklerinin Deneyisel İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara,45-71(1999).
63. Bucak, O., “Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Kazan”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-18 (1996).
64. Kunii D., Levenspiel O., “Fluidization Engineering”, *Wiley*, New York 30-94 (1983).
65. Topal H., “İzgaralı kazanlarda yanma odasındaki yapısal değışikliklerin kazan ısı performans ve emisyon davranışına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 75 (1992).
66. Erbaş, O., “Dolaşımli akışkan yatakta ısı transferi mekanizması ve bu mekanizmanın kuramsal ve deneysel analizi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-44 (2007).
67. Fallavollita, J.A., “Kraft Chemical Recovery in a Fluidized Bed”, Doktora tezi, *Department of Chemical Engineering McGill University*, Canada, 181(1992).

EKLER

EK-1 Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler

ÇAM AĞACI TALAŞI İLE YAPILAN ÖN DENEYLERDE ELDE EDİLEN VERİLER

Yapılan bu ön deneyler çam ağacı parametreleri ve gürgen ağacı ile yapılan deneylerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Gürgen ağacı ile yapılan deneylerle karşılaştırıldığında çam ağacı talaşının yatak sıcaklığı daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer parametrelerinde çok büyük fark belirlenmemiştir.

Ayrıca deneyler süresince yakıt boyutlarının azaltılması yakıtın yüzey alanını artırdığından dolayı gazlaşma süresi değiştirmektedir. Aynı zamanda gazlaşma süresi deney düzeneğindeki inventör ve ısıtıcı gününü ayarlama da kullandığımız varyağa bağlı olarak da değiştirilebilmektedir. Genel olarak bu süre sabit tutulmaya çalışılmış ve diğer parametreler arasındaki fark belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 1.1. Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 1		
YAKIT	Çam Ağacı Talaşı	Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	100	Yapılan bu ilk deneyde max. yatak sıcaklığı olarak 380°C 'ye çıkılmış ve çok yoğun olmamakla birlikte gazlaşma görülmüştür. Bu deneyde hız ve varyak sabit tutulmuştur.
Yakıt Boyutu (µm)	250 - 1600	
Yatak Sıcaklığı (°C)	208	
Çalışma Aralığı	15 - 300°C	
Fan Frekansı (Hz)	20	
Hava Hızı (m3/h)	72,7	
Varyak	45%	
Gazlaşma Süresi (dk)	114	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	2,5	

EK-1 (Devam) Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler

Çizelge 1.2. Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 2			
YAKIT	Çam Ağacı Talaşı		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	200		Bir önceki deneye göre daha yoğun bir gaz çıkışı elde edebilmek için yakıt miktarı artırılmış ve buartsıyla birlikte belli bir sıcaklıktan sonra varyak % 50' ye getirilmiştir. Bu işlemler gaz miktarını artırmıştır.
Yakıt Boyutu (µm)	590 - 1600		
Yatak Sıcaklığı (°C)	210		
Çalışma Aralığı(°C)	15 - 150°C	150 - 310°C	
Fan Frekansı (Hz)	22	20	
Hava Hızı (m3/h)	79,3	72,7	
Varyak	45%		
Gazlaşma Süresi (dk)	75	66.7	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	1,8	2,4	

Çizelge 1.3. Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 3			
YAKIT	Çam Ağacı Talaşı		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	100		Belli yakıt boyutunda yapılan deneyde gazlaşma sıcaklığı biraz düşmektedir.
Yakıt Boyutu (µm)	500 - 850		
Yatak Sıcaklığı (°C)	209		
Çalışma Aralığı(°C)	22-195	195-300	
Fan Frekansı (Hz)	25		
Hava Hızı (m3/h)	86,1		
Varyak	40%	45%	
Oksijen Oranı (%)	min. 17,18		
Gazlaşma Süresi (dk)	86,5	35	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	2	3	

EK-1 (Devam) Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler
Çizelge 1.4. Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 4			
YAKIT	Çam Ağacı Talaşı		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	150		Bu yakıt türüyle yaptığım Deneylerde yakıtın ağırlığına göre gaz miktarında artış görülerek bunu oksijen değeriyle de anlaşılmıştır. Gazlaşma 200 °C' de başlamış ve 370°C 'ye kadar devam etmiştir.
Yakıt Boyutu (µm)	250 - 590		
Yatak Sıcaklığı (°C)	200		
Çalışma Aralığı(°C)	20 - 190	190 - 320	
Fan Frekansı (Hz)	22	25	
Hava Hızı (m3/h)	79,3	86,1	
Varyak	40%		
Oksijen Oranı (%)	min. 16,34		
Gazlaşma Süresi (dk)	100		
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	3		

Çizelge 1.5. Çam ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 5		
YAKIT	Çam Ağacı Talaşı	Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	150	Yatak sıcaklığının 200°C 'ye geldiğinde gazlaşmanın başladığı görülerek 300°C'ye kadar devam etmiştir. 250°C 'ye kadar yoğun bir gaz çıkışı görülmüştür. Eğer 350 °C'nin üstüne çıkabilmiş olabilseydik gazlaşmanın devam edeceği O2(%) değerinden anlaşılmıştır.
Yakıt Boyutu (µm)	“	
Yatak Sıcaklığı (°C)	215	
Çalışma Aralığı (°C)	20 - 310	
Fan Frekansı (Hz)	25	
Hava Hızı (m3/h)	86,1	
Varyak	40%	
Oksijen Oranı (%)	min. 18,32	
Gazlaşma Süresi (dk)	193,5	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	~1,5	

EK-2 Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan ön deneyler

GÜRGEN AĞAÇ KABUĞU İLE YAPILAN ÖN DENEYLERDE ELDE EDİLEN VERİLER

Bu yakıt türüyle yapılan deneylerde farklı parametrelerle çalışılmış, ancak kesin sonuç elde edilememiştir. Yakıt özelliğine bağlı olarak gazlaşma tam olarak gerçekleşmesi için yeterli sıcaklığa çıkılamamıştır. Yeterli sıcaklığa ulaşılamama, deney düzeneğindeki sınır şartlarından dolayı kaynaklandığı görülmektedir. Tam gazlaşma gerçekleştirilememiştir.

Çizelge 2.1. Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan ön deney verileri

DENEY 1			
YAKIT	Gürgen Ağaç Kabuğu		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	100		Yapılan bu deneyde farklı bir biyokütle kullanılarak sistem ürünleri incelenmiş ve gaz çıkışı görülmemiştir. Sıcaklık artışlarıyla oynanarak gazlaşma görülmeye çalışılmasına rağmen herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.
Yakıt Boyutu (µm)	250 - 1600		
Yatak Sıcaklığı (°C)	250		
Çalışma Aralığı(°C)	15 - 150°C	150 - 330°C	
Fan Frekansı (Hz)	22	15	
Hava Hızı (m3/h)	79,3	49	
Varyak	45%	50%	
Gazlaşma Süresi (dk)	48,2	51,5	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	2.8	3.5	

EK-2 (Devam) Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan ön deneyler

Çizelge 2.2. Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan ön deney verileri

DENEY 2			
YAKIT	Gürgen Ağaç Kabuğu		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	150		Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan deneyde yakıt miktarı artırılarak gaz ürün az miktarda görülmüştür. Ancak yatak sıcaklığı diğer yakıtlara göre daha yüksek olması ve sistemdeki sınırlamalar sebebiyle tam gazlaşma elde edilememiştir.
Yakıt Boyutu (µm)	250 - 1600		
Yatak Sıcaklığı (°C)	260		
Çalışma Aralığı(°C)	15 - 150°C	150 - 320°C	
Fan Frekansı (Hz)	20	15	
Hava Hızı (m3/h)	72,7	49	
Varyak	50%	55%	
Gazlaşma Süresi (dk)	45	42,5	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	3	4	

Çizelge 2.3. Gürgen ağaç kabuğu ile yapılan ön deney verileri

DENEY 3			
YAKIT	Gürgen Ağaç Kabuğu		Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	100		Yatak sıcaklığı değeri 300 °C'ye çıkarılmış, ancak gaz çıkışı görülmemiştir. O2 (%) miktarında çok az düşme olduğu belirlenmiştir.
Yakıt Boyutu (µm)	250- 1600		
Yatak Sıcaklığı (°C)	250		
Çalışma Aralığı(°C)	20 - 290	290 - 340	
Fan Frekansı (Hz)	25		
Hava Hızı (m3/h)	86,1		
Varyak	40%	50%	
Oksijen Oranı (%)	min. 20,66		
Gazlaşma Süresi (dk)	135	17	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	2	3	

EK-2 (Devam) Gürgeu ağaç kabuğu ile yapılan ön deneyler

Çizelge 2.4. Gürgeu ağaç kabuğu ile yapılan ön deney verileri

DENEY 4		
YAKIT	Gürgeu Ağaç Kabuğu	Açıklama
<i>Yakıt Ağırlığı (gr)</i>	200	Yapılan bu deneyde gaz görülmemiştir. Sistem soğutulduktan sonra arta kalan ürünlerin bir kısmının kömürleştiği diğer kalanların aynen kaldığı ve yandaki değerler sonucunda kısmi gazlaşma olduğu belirlenmiştir.
<i>Yakıt Boyutu (µm)</i>	850-1600	
<i>Yatak Sıcaklığı(°C)</i>	245	
<i>Çalışma Aralığı(°C)</i>	20 - 330	
<i>Fan Frekansı (Hz)</i>	25	
<i>Hava Hızı (m3/h)</i>	86,1	
<i>Varyak</i>	40%	
<i>Oksijen Oranı (%)</i>	min. 20,27	
<i>Gazlaşma Süresi (dk)</i>	103,5	
<i>Sıcaklık Artışı (°C / dk.)</i>	3	

EK-3 Gürgen ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler

GÜRGEN AĞACI TALAŞI İLE YAPILAN ÖN DENEYLERDE ELDE EDİLEN VERİLER

Deneyler boyunca üç çeşit orman ürünleri kullanılarak karşılaştırılma yapılmıştır. Deneylerde belli bir yakıt üzerindeki karşılaştırma yakıt ağırlığı, yakıt boyutu, fan frekansı, sıcaklık artışıdaki değişimlere verdiği tepki incelenmiş, farklı yakıtlarla yapılan deneylerde ise aynı yakıt kullanılarak yapılan karşılaştırma parametrelerin yanı sıra oksijen oranları, yatak sıcaklığı, gazlaşma süreleri de incelenmiştir.

Gürgen ağacı ile yapılan deneyler boyunca yatak ağırlığının yanı sıra farklı yakıt boyutlarında deneyler yapılmış ve deneyler arasındaki farklılıklar belirlenmiştir.

Çizelge 3.1. Gürgen ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 1		
YAKIT	Gürgen Ağacı Talaşı	Açıklama
Yakıt Ağırlığı (gr)	150	Gürgen ağacıyla yapılan deneylerde diğer yakıtlarla yapılan deneylere nazaran daha hızlı ve daha düşük sıcaklıkta gazlaşma olduğu belirlenmiştir. Yatak sıcaklığının 220 °C 'ye geldiğinde bacadan çıkan gaz miktarında artış olduğu belirlenmiş ve daha yüksek sıcaklıklarda gaz miktarında azalma görülmüştür.
Yakıt Boyutu (µm)	600 - 850	
Yatak Sıcaklığı (°C)	200	
Çalışma Aralığı(°C)	15 - 300°C	
Fan Frekansı (Hz)	23	
Hava Hızı (m3/h)	58,05	
Varyak	40%	
Oksijen Oranı (%)	min. 17,18	
Gazlaşma Süresi (dk)	114	
Sıcaklık Artışı (°C / dk.)	2,5	

EK-3 (Devam) Gürgen ağacı talaşı ile yapılan ön deneyler

Çizelge 3.2. Gürgen ağacı talaşı ile yapılan ön deney verileri

DENEY 2		
YAKIT	Gürgen Ağacı Talaşı	
Yakıt Ağırlığı (gr)	150	
Yakıt Boyutu (μm)	250 - 500	
Yatak Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	205	
Çalışma Aralığı($^{\circ}\text{C}$)	15 - 200 $^{\circ}\text{C}$	200 - 310 $^{\circ}\text{C}$
Fan Frekansı (Hz)	25	
Hava Hızı (m^3/h)	86,1	
Varyak	40%	45%
Oksijen Oranı (%)	min. 16,50	
Gazlaşma Süresi (dk)	61,7	27,5
Sıcaklık Artışı ($^{\circ}\text{C} / \text{dk.}$)	3	4

Bir önceki deneyden farklı olarak yakıt boyutu küçültülerek deneysel çalışma yapılmıştır. Sıcaklık aralığı aynı tutularak bir önceki deneyle karşılaştırılmıştır. Deneyde 205 $^{\circ}\text{C}$ 'de gazlaşma görülmüş, deney 1' e göre daha düşük sıcaklıkta ve daha hızlı gazlaşma görülmüştür.

EK-4 Yakıtların ve yatak malzemelerinin boyut analizi

NUMUNE HAZIRLAMA VE BOYUT ANALİZİ

Yapılan çalışma boyunca orman ürünü olarak gürgen ağacı talaşı, çam ağacı talaşı, gürgen ağaç kabuğu ve yatak malzemesi olarak silis kumu kullanılmış, deneysel sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Bu işlemde önce numunelerin dolaşım akışkan yataklı gazlaştırıcı da kullanılabilecek duruma getirilmesi için ilk önce boyutlarının uygun hale getirilmesi şarttır. Ayrıca gazlaştırma prosesi, tanecik boyutuna göre farklılık göstereceğinden dolayı boyut analizi yapmayı zorunlu hale getirir.

Deneysel incelemelerde çok küçük tanecikler reaksiyon hızını artırarak, iri tanecikler beslenen hava ile reaksiyona giren yakıt yüzey alanı küçük taneciklere göre az olması sebebiyle reaksiyon sonucunda CO yerine CO₂ üretimi artacaktır

Boyut analizi işleminde laboratuvarımızda mevcut olan ASTM elek seti kullanılarak 1,6, 1,41, 1,0, 0,84, 0,59, 0,50 ve 0,25 mm delik aralığına sahip eleklerle elenerek boyut analizi formülasyonu kullanılarak numunelerin ortalama çapları belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Çam ağacı talaşı boyut analizi

Kullanılan elek çapları (mm)	Elek ağırlıkları (gr)	Eleme sonrası ağırlıklar	Kaplarda kalan numune miktarı	Kümülatif toplam
1,6	476	481	5	100
1,41	524	533	9	95
1	507	517	10	86
0,84	531	555	24	76
0,59	509	531	22	52
0,5	410	425	15	30
0,25	536	545	9	15
0	455	461	6	0

EK-4 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemelerinin boyut analizi

Çizelge 4.2. Gürgen ağaç talaşı boyut analizi

Kullanılan elek çapları (mm)	Elek ağırlıkları (gr)	Eleme sonrası ağırlıklar	Kaplarda kalan numune miktarı	Kümülatif toplam
1,6	476	484	8	100
1,41	524	537	13	92
1	507	531	24	79
0,84	531	549	18	55
0,59	509	524	15	37
0,5	410	422	12	22
0,25	536	542	6	10
0	455	459	4	0

Çizelge 4.3. Gürgen ağaç kabuğu boyut analizi

Kullanılan elek çapları (mm)	Elek ağırlıkları (gr)	Eleme sonrası ağırlıklar	Kaplarda kalan numune miktarı	Kümülatif toplam
1,6	476	487	11	100
1,41	524	543	19	89
1	507	529	22	70
0,84	531	549	18	48
0,59	509	521	12	30
0,5	410	410	9	18
0,25	536	542	6	9
0	455	458	3	0

Çizelge 4.4. Silis kumu boyut analizi

Kullanılan elek çapları (mm)	Elek ağırlıkları (gr)	Eleme sonrası ağırlıklar	Kaplarda kalan numune miktarı	Kümülatif toplam
1,41	524	694	170	650
1	507	737	230	480
0,84	531	606	75	250
0,59	509	534	25	175
0,5	410	560	150	150
0,25	536	536	0	0

EK-5 Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı

Bu dört numunenin boyut analizinden elde edilen kümülatif toplam ile partikülün ortalama çapı oluşturulan formülasyonla aşağıda verilmiştir:

am Ağıacı Talaşının Ortalama ap Analizi

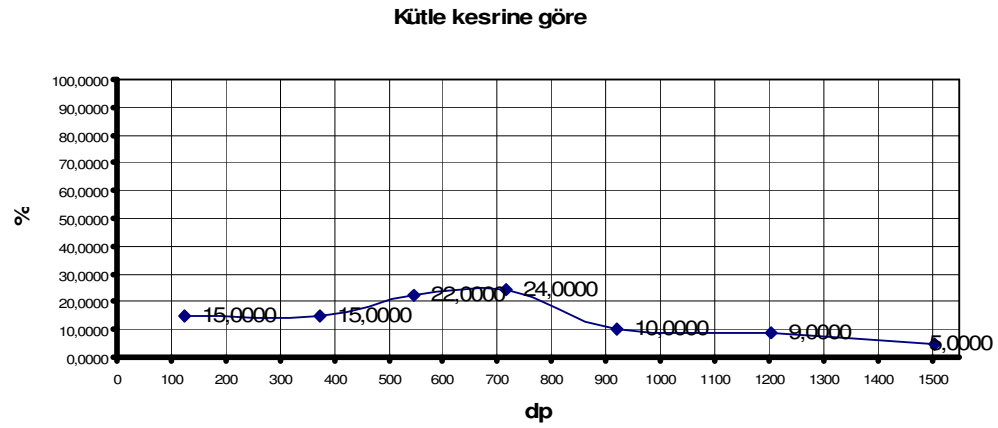
Çizelge 5.1. am ağıacı talaşı ortalama çap hesabı

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(μ m)
1	0	0
2	15	250
3	30	500
4	52	590
5	76	840
6	86	1000
7	95	1410
8	100	1600

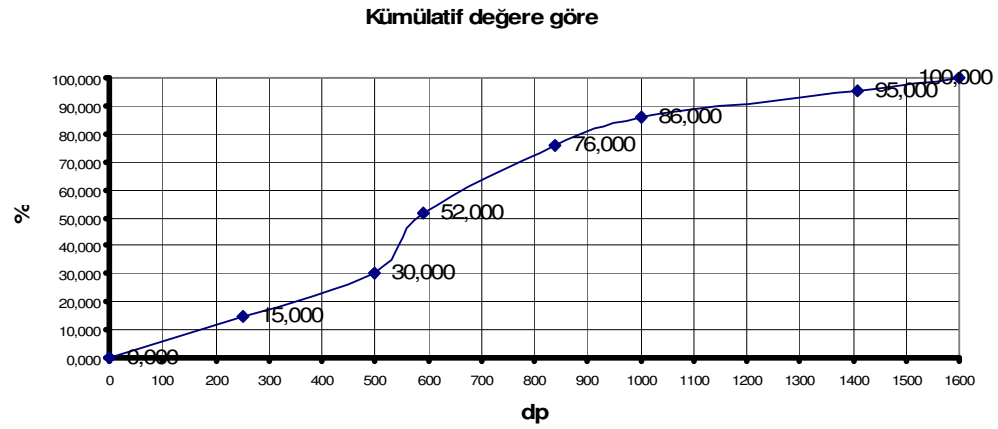
HESAPLANAN DEĞERLER			
dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
1 ve 2	125	15,0000	0,000
2 ve 3	375	15,0000	15,000
3 ve 4	545	22,0000	30,000
4 ve 5	715	24,0000	52,000
5 ve 6	920	10,0000	76,000
6 ve 7	1205	9,0000	86,000
7 ve 8	1505	5,0000	95,000
	TOPLAM=	100,0000	100,000

	x / dp	
	0,0012	
	0,0004	
	0,0004	
	0,0003	
	0,0001	
	0,0001	
TOPLAM	0,0026	ORTALAMA AP= 391 (μ m)

EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı



Şekil 5.1. Çam ağaç talaşının kütle kesrine göre dağılımı



Şekil 5.2. Çam ağaç talaşının kümülatif değere göre dağılımı

Gürgen Ağacı Talaşının Ortalama Çap Analizi

Çizelge 5.2. Gürgen ağacı talaşı ortalama çap hesabı

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(μm)
1	0	0
2	10	250
3	22	500
4	37	590
5	55	840
6	79	1000
7	92	1410
8	100	1600

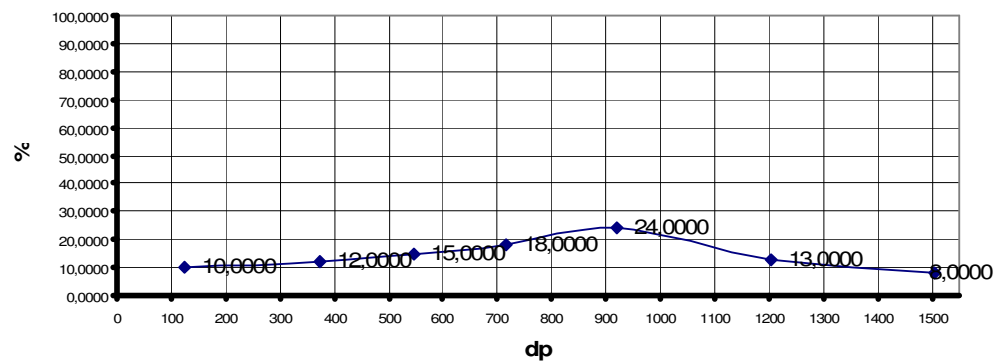
EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı

Çizelge 5.2. (Devam) Grge ağacı talaşı ortalama çap hesabı

HESAPLANAN DEĞERLER		Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
dp aralığı	dp		
1 ve 2	125	10,0000	0,000
2 ve 3	375	12,0000	10,000
3 ve 4	545	15,0000	22,000
4 ve 5	715	18,0000	37,000
5 ve 6	920	24,0000	55,000
6 ve 7	1205	13,0000	79,000
7 ve 8	1505	8,0000	92,000
TOPLAM=		100,0000	100,000

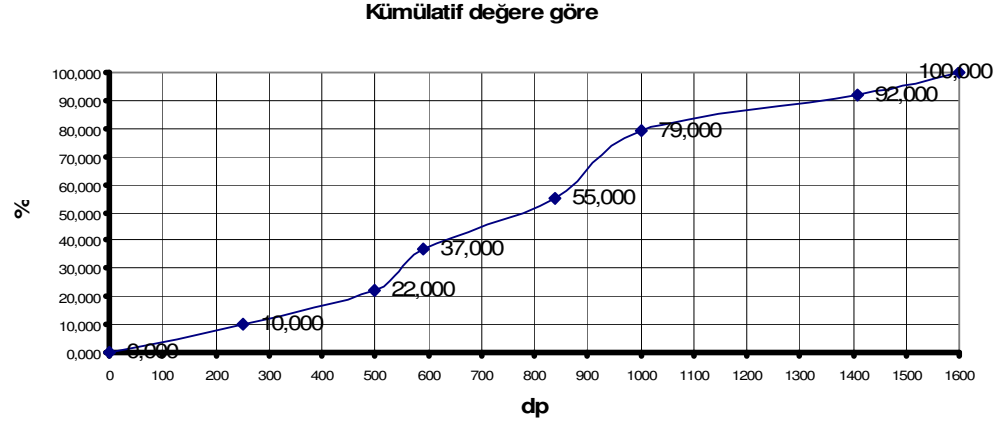
	x / dp	ORTALAMA AP= 483 (μm)
	0,0008	
	0,0003	
	0,0003	
	0,0003	
	0,0003	
	0,0001	
	0,0001	
TOPLAM	0,0021	

Kütle kesrine göre



Şekil 5.3. Grge ağaç talaşının kütle kesrine göre dağılımı

EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı



Şekil 5.4. Gürgen ağaç talaşının kümülatif değere göre dağılımı

Gürgen Ağaç Kabuğunun Ortalama Çap Analizi

Çizelge 5.3. Gürgen ağaç kabuğunun ortalama çap hesabı

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	0
2	9	250
3	18	500
4	30	590
5	48	840
6	70	1000
7	89	1410
8	100	1600

HESAPLANAN DEĞERLER		
dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %
1 ve 2	125	9,0000
2 ve 3	375	9,0000
3 ve 4	545	12,0000
4 ve 5	715	18,0000
5 ve 6	920	22,0000
6 ve 7	1205	19,0000
7 ve 8	1505	11,0000
TOPLAM=		100,0000

Kümülatif Yüzde %
0,000
9,000
18,000
30,000
48,000
70,000
89,000
100,000

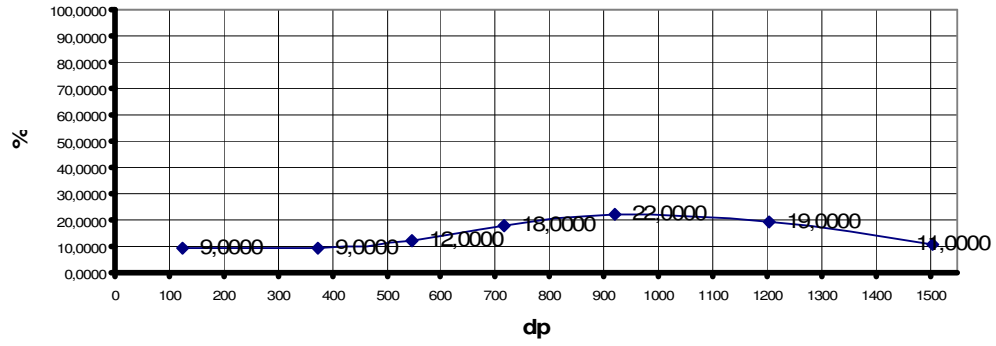
EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı

Çizelge 5.3. (Devam) Gürgen ağaç kabuğunun ortalama çap hesabı

x / dp	
0,0007	
0,0002	
0,0002	
0,0003	
0,0002	
0,0002	
0,0001	
TOPLAM	0,0019

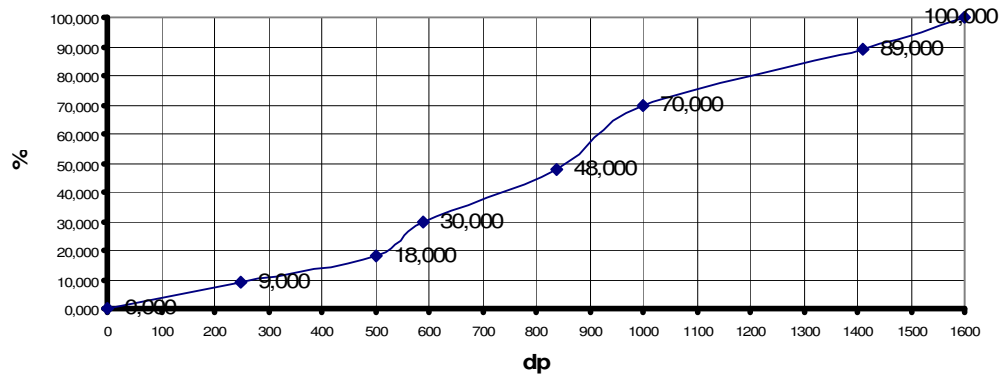
ORTALAMA ÇAP= 526 (μm)

Kütle kesrine göre



Şekil 5.5. Gürgen ağaç kabuğunun kütle kesrine göre dağılımı

Kümülatif değere göre



Şekil 5.6. Gürgen ağaç kabuğunun kümülatif değere göre dağılımı

EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı

Silis Kumunun Ortalama ap Analizi

Çizelge 5.4. Silis kumunun ortalama çap hesabı

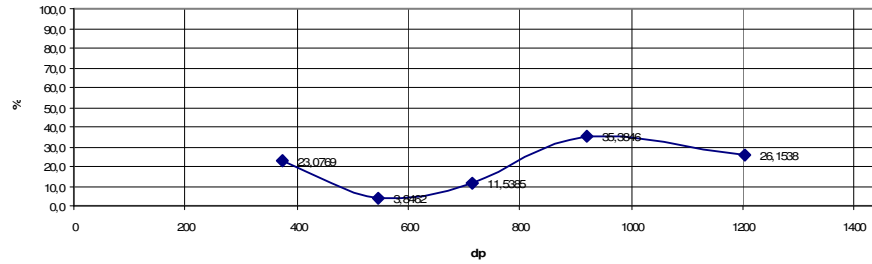
No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	250
2	150	500
3	175	590
4	250	840
5	480	1000
6	650	1410
HESAPLANAN DEĞERLER		
dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %
1 ve 2	375	23.0769
2 ve 3	545	3.8462
3 ve 4	715	11.5385
4 ve 5	920	35.3846
5 ve 6	1205	26.1538
	TOPLAM=	100.0000

Kümülatif Yüzde %
0.000
23.077
26.923
38.462
73.846
100.000

	x / dp
	0.0006
	0.0001
	0.0002
	0.0004
	0.0002
TOPLAM	0.0014

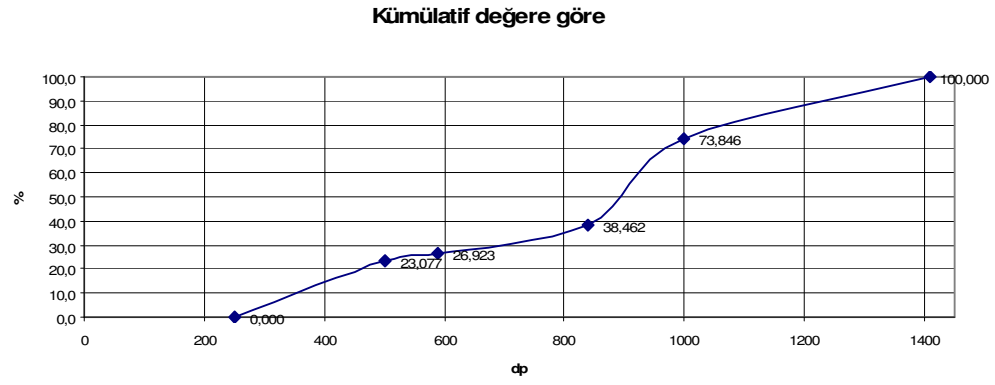
ORTALAMA AP= 690 (μm)

Kütle kesrine göre



Şekil 5.7. Silis kumunun kütle kesrine göre dağılımı

EK-5 (Devam) Yakıtların ve yatak malzemesinin ortalama çap hesabı



Şekil 5.8. Silis kumunun kümülatif değere göre dağılımı

EK-6 Sistem hata analizi

Deneysel bulguların hata analizi için Kline-McClintock'un denklemleri ile belirsizlik analizi (uncertainty analysis) yapılmıştır.

Bu yönetime göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük (R) ve bu büyüklüğe etki eden (i) adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, \dots, x_n$ ise,

$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ yazılabilir.

Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise,

$$w_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right)^2}$$

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

Gaz Ölçüm Bileşenleri

Parametre	Sembol	Hassasiyeti(%)	Sınır Değerler
Gaz Bileşenleri	CO	±1	0-25 (%)
	O ₂	±1' den az	0 -100 (%)
	CH ₄	±2	0 – 10000 ppm
	CO ₂	±1	0 – 25(%)

Gaz ölçümünde, belirsizliği tanımlayabilmek için gazın kalorifik değerine bakılarak gaz ürünlerin hata analizi belirlenmiştir.

Gaz ürün kalorifik değerini hesaplamak için toplam gaz debisi, ölçülen hacimsel oran ve CO, CH₄'ün alt ısı değerleri kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{Gazın ısı değeri (kcal/h)} = \text{Gazın hacimsel yüzdesi (\%)} \times \text{Bacagazı debisi (m}^3\text{/h)} \times \text{Alt ısı değeri (kcal/m}^3\text{)}$$

EK-6 (Devam) Sistem hata analizi

$$H_G(\text{kcal/h}) = \lambda (\%) \times V (\text{m}^3/\text{h}) \times H_u(\text{kcal/m}^3)$$

$$\lambda (\%) = \frac{H_G(\text{kcal/h})}{V(\text{m}^3/\text{h}) \times H_u(\text{kcal/m}^3)}$$

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial V} w_V \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial H_U} w_{H_U} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial H_G} w_{H_G} \right)^2 \right]^{1/2}$$

CO Gaz bileşeninin hata analizi:

$$T_R = 210 \text{ }^\circ\text{C iken } \lambda = \%3,5 \quad V = 79,3 \text{ m}^3/\text{h} \quad H_u = 2857 \text{ kcal/m}^3 \quad H_{CO} = 7929,6 \text{ kcal/h}$$

$$w_V = \%1 \quad w_{H_u} = \%2, \quad w_{H_{CO}} = \%1$$

$$w_\lambda = \left[\left(\frac{\partial \lambda}{\partial V} w_V \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H_U} w_{H_U} \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H_{CO}} w_{H_{CO}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_\lambda}{\lambda} = \left[\left(\frac{w_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{w_{H_U}}{H_U} \right)^2 + \left(\frac{w_{H_{CO}}}{H_{CO}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_\lambda}{\lambda} = \left[\left(\frac{0,793}{79,3} \right)^2 + \left(\frac{57,14}{2857} \right)^2 + \left(\frac{79,2960}{7929,60} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_\lambda}{3,5} = 0,0245 \quad w_\lambda = 0,086 = \%8,6$$

CH₄ Gaz bileşeninin hata analizi:

$$T_R = 210 \text{ }^\circ\text{C iken } CH_4 = \%0,2 \quad V = 79,3 \text{ m}^3/\text{h} \quad H_u = 8108 \text{ kcal/m}^3 \quad H_{CH_4} = 1285,9 \text{ kcal/h}$$

$$w_V = \%1 \quad w_{H_u} = \%2, \quad w_{H_{CO}} = \%1$$

$$w_\lambda = \left[\left(\frac{\partial \lambda}{\partial V} w_V \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H_U} w_{H_U} \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H_{CH_4}} w_{H_{CH_4}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_\lambda}{\lambda} = \left[\left(\frac{w_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{w_{H_U}}{H_U} \right)^2 + \left(\frac{w_{H_{CH_4}}}{H_{CH_4}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_\lambda}{0,2} = \left[\left(\frac{0,793}{79,3} \right)^2 + \left(\frac{162,16}{8108} \right)^2 + \left(\frac{12,8593}{1285,93} \right)^2 \right]^{1/2} \quad w_\lambda = 0,0049 = \%0,5$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : BOYACI, Burcu
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.06.1981 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 231 74 00/2401
 e-mail : bboyaci@gazi.edu.tr

Eğitim Derece

Yılı

Lisans

Lise

Eğitim Birimi

Kırıkkale Üniversitesi/Makine Müh.

İncirli Süper Lisesi

Mezuniyet

2004

1999

İş Deneyimi

Yıl

2004-2005

2005-Devam

Yer

Konfor Tesisat Ltd. Şti.

Gazi Üniversitesi

Görev

Makina Mühendisi

Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce