

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİFİKASYON TEKNİĞİYLE SENTEZ GAZI ÜRETİMİ VE GAZ YAKMA  
SİSTEMLERİNDE KULLANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**Merdin DANIŞMAZ**

**ARALIK 2017**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİFİKASYON TEKNİĞİYLE SENTEZ GAZI ÜRETİMİ VE GAZ YAKMA SİTEMLERİNDE  
KULLANIMI**

**Merdin DANIŞMAZ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 11 / 2017**

**Tezin Savunma Tarihi : 18 / 12 / 2017**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ**

**Trabzon 2017**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Merdin DANIŞMAZ Tarafından Hazırlanan**

**GAZİFİKASYON TEKNİĞİYLE SENTEZ GAZI ÜRETİMİ VE GAZ YAKMA  
SİSTEMLERİNDE KULLANIMI**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 /11 /2017 gün ve 1728 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Kadir BİLEN**

**Üye : Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI**

**Üye : Prof. Dr. Celal DURAN**

**Üye : Doç. Dr. Halit YAŞAR**

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacın giderek artması ile yeni bilimsel çalışmalar ve yeni teknolojiye sahip sistemler ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda, biyokütle kullanımı ve farklı alanlarda değerlendirmesine olan ilginin arttığı görülmektedir. Biyokütlenin, enerji üretimi için doğrudan yakılmasının yanı sıra biyokütle gazifikasyonunda kullanılması da oldukça yararlı neticeler doğurmuştur. Özellikle doğada atık halde bulunan bazı odun dışı orman ürünlerinin yararlı enerji üretimde geri dönüşümünün sağlanması çevresel olarak da dikkate değer görülmektedir.

Enerji krizlerinin yaşandığı son yüz yıl boyunca gazifikasyon teknolojisi sürekli gündemde kalmıştır. Petrol ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının sınırlı ve belirli bölgelere özgü olması nedeniyle çoğunlukla kömür gazifikasyonu ile enerji gereksinimleri karşılanmaya çalışılmıştır. Odun veya biyokütle hammaddelerinin fosil yakıtlara göre bol olduğu bölgelerde biyokütle gazifikasyonu, popüler çalışmaları beraberinde getirmiştir. Doğrudan alternatif bir enerji kaynağı olan güneş ile ilgi pek çok enerji üretim çalışmaları yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Ancak biyokütle gazifikasyonu için güneş enerjisinden yararlanılması sık karşılaşılabir durum değildir. Bu çalışmamız ile birlikte, her iki alternatif enerji üretimi birleştirilmiştir. Böylece, enerji üretiminde süreklilik ve ekonomi sağlayacak yeni ve ileri düzeyde çalışmalara kapı aralanmıştır.

Bu çalışmanın yapılmasında, en başından sonuna kadar maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ hocama ve jürimde bulunarak katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Celal DURAN hocama ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin ARICI hocama teşekkür ve minnettarlıklarımı sunarım.

Ayrıca, uzun ve yorucu bir süreyi kapsayan bu çalışma boyunca desteklerinin yanında, sabır ve tahammül ile ilgilenen eşime ve çalışma enerjimin kaynağı olan çocuklarıma teşekkür ederim.

Merdin DANIŞMAZ

Trabzon 2017

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Gazifikasyon Yöntemiyle Sentez Gazı Üretimi ve Gaz Yakma Sistemlerinde Kullanımı’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ ‘ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18 /12 /2017

Merdin DANIŞMAZ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Çalışması .....	2
1.3. Gazlaştırıcı Yakıtları .....	6
1.3.1. Yakıtın Fiziksel Özellikleri.....	9
1.3.2. Yakıtın Termo-Kimyasal Özellikleri.....	10
1.3.3. Gazlaştırıcı Performansına Hammadde Özelliklerinin Etkisi.....	12
1.3.4. Eşdeğerlik Oranı.....	13
1.4. Gazifikasyon .....	15
1.4.1. Gazifikasyonun Temel Prensipleri .....	15
1.4.2. Gazifikasyon Aşamaları .....	17
1.4.3. Gazlaştırıcı Tipleri.....	21
1.4.3.1. Hareketli veya Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar .....	21
1.4.3.2. Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar .....	22
1.4.3.3. Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırıcılar .....	23
1.4.3.4. Dolaylı Gazlaştırıcılar .....	24
1.4.3.5. Diğer Özel Gazlaştırıcı Türleri .....	25
1.4.4. Gaz Soğutma ve Temizleme .....	25
1.4.5. Ürün Gazının Özellikleri .....	27
1.4.5.1. Uçucu Gaz İçeriği.....	28
1.4.5.2. Gaz Verimi.....	29
1.4.5.3. Gaz Sıcaklığı.....	30

1.4.5.4. Gaz Ürün ve Sentez Gazı Arasındaki Fark.....	30
1.5. Gazifikasyon Prosesinin Termodinamik İncelemesi.....	32
1.5.1. Hidrojen ve Oksijenin Yanması.....	32
1.5.3. Ekserji Analizi.....	33
1.5.3.1. Fiziksel Ekserji .....	34
1.5.3.2. Kimyasal Ekserji .....	35
1.5.4. Kütle Dengesi.....	35
1.5.5. Enerji Dengesi.....	36
1.5.6. Karbon Dönüşüm Verimi .....	37
1.5.7. Termal Verim.....	37
1.5.8. Ekserji Verimi .....	37
1.6. Gaz Yakıcılar .....	37
1.7. Siklon.....	40
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1. Deneş Düzeneginin Tanıtımı.....	42
2.2. Güneş Enerjili Sistemin Tanıtımı.....	48
2.3. Deneş Düzenegın Çalıştırılması .....	50
2.4. Yapılan Ölçümler ve Gaz Numunesi Alma .....	51
2.5. Numunelerin Hazırlanması .....	52
2.6. Gaz Yakma Sistemlerinin Tanıtılması .....	55
3. BULGULAR.....	57
4. TARTIŞMA .....	74
4.1. Sonuçlar ve Değerlendirmeler .....	74
4.1.1. Standard Deneş Düzeneginde Hız ve Sıcaklık Değişimleri .....	75
4.1.2. Güneş Enerjili Sistem Hız ve Sıcaklık Değişimleri .....	79
4.2. Isıl Analizler ve Kütle Fraksiyonları .....	83
4.2.1. Standart Gazlaştırma Analizi .....	83
4.2.2. Güneş Çanaklı Gazlaştırma Analizi .....	91
5. SONUÇLAR.....	99
6. ÖNERİLER.....	100
7. KAYNAKLAR .....	101
8. EKLER .....	106

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

GAZİFİKASYON TEKNİĞİYLE SENTEZ GAZI ÜRETİMİ VE GAZ YAKMA  
SİSTEMLERİNDE KULLANIMI

Merdin DANIŞMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cevdet DEMİRTAŞ  
2017, 105 Sayfa, 20 Sayfa Ek

Biyokütle gazlaştırılmasında, özellikle alttan akışlı reaktörler ile yapılan çalışmalarda reaktör içerisinde yüksek sıcaklıklara ulaşılması ve gazlaştırma verimliliğinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ancak reaktörün oksidasyon bölgesinde dengeli ve kararlı termokimyasal dönüşümün sağlanması oldukça zordur. Ayrıca, çoğu gazlaştırma reaktörleri, tek türde ve boyutta yakıtın hammadde olarak kullanılmasıyla sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada, gaz yakma sistemlerinde doğrudan yakılabilmesi amacıyla, gazifikasyon teknolojisi kullanılarak çeşitli biyokütle yakıtlarından sentez gazı üretilmesi çalışıldı. Odun bloklar, fındikkabuğu, çam kozalağı ve pelet gibi biyoküteller hammadde olarak kullanılarak alttan akışlı reaktörde gazlaştırma performansları irdelendi. Reaktörün oksidasyon bölgesine yerleştirilen 8 adet hava kanalı sayesinde gazlaştırma sıcaklıklarının her bölgede dengeli dağılımı sağlandı. Düzenek, gaz temizleme, soğutma ve gaz yakma kısımlarını da kapsayan pilot ölçekli bir gazlaştırma ünitesi olarak kuruldu. Yapılan deneyler boyunca, oksidasyon bölgesinde tam yanma olmaksızın 700°C'nin üzerinde sıcaklık değerlerine ulaşıldı. Yüksek sıcaklıklarda üretilen gazın sistem çıkışında 35-45°C arası sıcaklık değerlerine düşürülmesi sağlandı. Kullanılan hammadde türü ve ulaşılan sıcaklıklara bağlı olarak, üretilen uçucuların sentez gazı içerisinde bulunma oranları %18-21 CO, %3-5 H<sub>2</sub>, %0,5-6 CH<sub>4</sub>, %0,1-3 CO<sub>2</sub> ve %67-74 N<sub>2</sub> arasında olduğu tespit edildi. Ayrıca, güneş enerjisinden faydalanmak amacıyla parabolik bir çanak kullanıldı. Oksidasyon bölgesine yerleştirilen pota vasıtasıyla bu bölgede 1500°C'nin üzerinde sıcaklık değerlerine ulaşıldı. Tasarlanan oksidasyon bölgesin için ısı analizler yapılarak deneysel bulgularla uygunluğu değerlendirildi.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle gazifikasyonu, Sentez gazı, Fındikkabuğu, Çam kozalağı, Pelet



PhD. Thesis

SUMMARY

SYNTHESIS GAS PRODUCTION WITH GASIFICATION TECHNIQUE AND USE IN  
GAS BURNING SYSTEMS

Merdiv DANIŞMAZ

Karadeniz Technical University  
Engineering Faculty  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assist. Prof. Cevdet DEMİRTAŞ  
2017, 105 Pages, 20 Pages Appendix

In biomass gasification, it is aimed at achieving high temperatures in the reactor and improving the gasification efficiency especially when working with downdraft reactors. However, it is difficult to achieve a stable and continuous thermochemical conversion in the oxidation zone of the reactor. In addition, most gasification reactors are limited to the use of single type and size fuel as feedstock. In this study, in order to be able to be directly burned in gas combustion systems, production of synthesis gas from various biomass fuels using gasification technology was studied. Biomass such as wood blocks, hazelnut shell, pinecone shell and pellet were used as feedstock to investigate the gasification performances in synthesis gas production. Thanks to the eight air channels placed in the oxidation zone of the reactor, the gasification temperatures were balanced throughout each region. All parts of the assembly that include cooling, filtering and gas burning were established as a pilot scale gasification unit. Throughout the experiments conducted, temperature values in excess of 700°C were achieved in the oxidation zone without complete combustion. The temperature of the gas produced at high temperatures is reduced to 35-45°C at the system outlet. Depending on the type of feedstock used and the temperatures reached, the rate of production of the volatiles in the synthesis gas varies between 18-21 percent CO, 3-5 percent H<sub>2</sub>, 0,5-6 percent CH<sub>4</sub>, 0,1-3 percent CO<sub>2</sub> and 67-74 percent N<sub>2</sub>. In addition, a parabolic dish was used to take advantage of solar energy. By means of the crucible placed in the oxidation zone, temperatures above 1500°C were reached in this region. Thermal analysis was performed for the designed oxidation zone and its suitability with experimental findings was evaluated.

**Key Words:** Biomass gasification, Synthesis gas, Hazelnut shell, Pinecone shell, Pelet

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Van Krevelen diyagramı.....	6
Şekil 2. Gazifikasyon hammaddesi ve özellikleri.....	7
Şekil 3. Biyokütle için eşdeğerlik oranı ve hava/yakıt değerleri.....	13
Şekil 4. Gazifikasyon işleminde fiziksel ve kimyasal değişimler .....	16
Şekil 5. Gazifikasyon reaksiyon aşamaları .....	18
Şekil 6. Gazlaştırma ürünü olarak gaz üretimi ve kullanımı akış şeması .....	20
Şekil 7. Sabit yataklı gazlaştırıcılar a) Yukarı akışlı b) Aşağı akışlı c) Karşıt akışlı .....	22
Şekil 8. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar a) Kabarcıklı b) Dolaşımli .....	23
Şekil 9. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar şematik gösterimleri a) Aşağı akışlı .....	24
b) Yukarı akışlı.....	24
Şekil 10. Dolaylı gazlaştırıcı şematik gösterimi .....	25
Şekil 11. Gaz üretme ve koşullandırma işlemleri şematik gösterimi .....	26
Şekil 12. Gaz ürün ve sentez gazı farkı ve tipik uygulamaları.....	31
Şekil 13. Gaz yakma brülörü temel yapısı .....	38
Şekil 14. Bazı gaz yakma brülörleri.....	39
Şekil 15. Siklon geometrisi .....	40
Şekil 16. Deney düzeneğinin şematik çizimi .....	43
Şekil 17. Gazlaştırma reaktörünün tasarım ve imalat resimleri.....	44
Şekil 18. Oksidasyon bölgesinin kesit görünüşü .....	45
Şekil 19. Gaz temizleme siklonunun kesit görünüşü ve imalat resmi .....	46
Şekil 20. Deney düzeneğinin genel görünümü.....	47
Şekil 21. Deney düzeneğinin şematik çizimi (Güneş enerjili sistem) .....	48
Şekil 22. Deney düzeneğinin (Güneş enerjili halde) .....	49
Şekil 23. Gazlaştırma için hazırlanan yakıt numuneleri a) çam kozalağı .....	53
b) fındıkkabuğu c) karışık pelet d) çam pelet e) ladin bloklar f) çam bloklar .....	53
Şekil 24. Toz haline getirilen yakıt numuneleri a) fındıkkabuğu b) fındık yaprağı .....	54
c) çam pelet d) karışık pelet e) çam bloklar f) çam kozalağı .....	54
Şekil 25. Gaz yakma düzeneği ve yakma brülörleri .....	56
Şekil 26. Eşdeğerlik oranının üretilen gazın içeriğine etkisi.....	60
Şekil 27. Eşdeğerlik oranının gaz kompozisyonu ve kalorifik değere etkisi .....	60
Şekil 28. Reaktör çıkışında üretilen gazın doğal yanması .....	62

Şekil 29. Katı bloklar gazlaştırma boyut değişimi.....	63
Şekil 30. Pelet gazlaştırma boyut değişimi .....	63
Şekil 31. Fındikkabuğu gazlaştırma boyut değişimi.....	64
Şekil 32. Çam kozalağı gazlaştırma boyut değişimi .....	64
Şekil 33. Üretilen gaz türlerinin numune torbalarına (Tedlar bags) doldurulması.....	65
Şekil 34. Deney numuneleri için deney ortamı sıcaklıklarının ortalama değişimi .....	75
Şekil 35. Deney numunelerine göre gaz çıkış hızı ortalama değişimi .....	76
Şekil 36. Gaz çıkış sıcaklığı ortalama değişimi.....	76
Şekil 37. Kurutma bölgesi ortalama sıcaklık değişimi .....	77
Şekil 38. Proliz bölgesi ortalama sıcaklık değişimi.....	77
Şekil 39. Oksidasyon bölgesi ortalama sıcaklık değişimi .....	78
Şekil 40. İndirgeme bölgesi ortalama sıcaklık değişimi .....	78
Şekil 41. Gaz çıkış hızı ortalama değişimi .....	79
Şekil 43. Kurutma bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri .....	80
Şekil 44. Proliz bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri.....	80
Şekil 45. Oksidasyon bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri.....	81
Şekil 46. İndirgeme bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri .....	81
Şekil 47. Pota üzerinde denge sıcaklığına ulaşmaya kadar geçen süre .....	82
Şekil 48. Pota, reaktör sıcaklık değişimi ve güneş radyasyonu değişimi.....	82
Şekil 49. Koşurma yakınsaması.....	83
Şekil 50. Oksidasyon bölgesi statik basınç kontürleri .....	84
Şekil 51. Oksidasyon bölgesi dinamik basınç kontörleri .....	84
Şekil 52. Oksidasyon bölgesi yoğunluk kontörleri.....	85
Şekil 53. Oksidasyon bölgesi hız kontörleri.....	85
Şekil 54. Oksidasyon bölgesi toplam sıcaklık kontörleri.....	86
Şekil 56. Oksidasyon bölgesi toplam enerji kontörleri .....	87
Şekil 57. Oksidasyon bölgesi duvar sıcaklığı kontürleri.....	87
Şekil 58. Oksidasyon bölgesi türbülans kinetik enerjisi kontürleri .....	88
Şekil 59. Oksidasyon bölgesi CO kütle fraksiyonu kontürleri .....	88
Şekil 60. Oksidasyon bölgesi H <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri .....	89
Şekil 61. Oksidasyon bölgesi CH <sub>4</sub> kütle fraksiyonu kontürleri.....	89
Şekil 62. Oksidasyon bölgesi CO <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri.....	90
Şekil 63. Oksidasyon bölgesi N <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri .....	90

Şekil 64. Koşturma yakınsaması (700°C’de) .....	91
Şekil 65. Oksidasyon bölgesi statik basınç kontürleri.....	92
Şekil 66. Oksidasyon bölgesi dinamik basınç kontürleri .....	92
Şekil 67. Oksidasyon bölgesi yoğunluk kontürleri.....	93
Şekil 68. Oksidasyon bölgesi hız kontürleri.....	93
Şekil 69. Oksidasyon bölgesi toplam sıcaklık kontürleri.....	94
Şekil 70. Oksidasyon bölgesi moleküler (Root-Mean-Square) sıcaklık kontürleri.....	94
Şekil 71. Oksidasyon bölgesi toplam enerji kontürleri.....	95
Şekil 72. Oksidasyon bölgesi duvar sıcaklığı kontürleri.....	95
Şekil 73. Oksidasyon bölgesi türbülans kinetik enerjisi kontürleri .....	96
Şekil 74. Oksidasyon bölgesi CO kütle fraksiyonu kontürleri .....	96
Şekil 75. Oksidasyon bölgesi H <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri .....	97
Şekil 76. Oksidasyon bölgesi CH <sub>4</sub> kütle fraksiyonu kontürleri.....	97
Şekil 77. Oksidasyon bölgesi CO <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri.....	98
Şekil 78. Oksidasyon bölgesi N <sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri .....	98

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Biyokütle ve kömür yakıtlarının fiziksel, kimyasal ve yakıt özellikleri .....	9
Tablo 3. Gazlaştırıcı türlerine göre yakıt gereksinimleri .....	13
Tablo 4. Bazı yakıtlara göre gaz ürün içerikleri ve kalorifik değerleri.....	28
Tablo 5. Stairmand tasarımında kullanılan siklon geometri için en uygun oranlar .....	40
Tablo 6. Hammadde yakıtları için nem analizi.....	55
Tablo 7. Hammadde yakıtlar için ölçülen yığın yoğunluk değerleri (kg/m <sup>3</sup> ) .....	55
Tablo 8. Hammadde yakıt türlerine göre gazlaştırma performansı değerleri.....	58
Tablo 9. Kullanılan hammadde yakıtlarını oluşturan elementler ve bulunma oranları .....	59
Tablo 10. Çam blok yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği.....	66
Tablo 11. Pelet yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği .....	67
Tablo 12. Fındıkkaşu yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği.....	68
Tablo 13. Çam kozalağı yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği.....	69
Tablo 14. Karışık yakıtın gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği.....	70
Tablo 15. Gaz analiz sonuçlarının yakıt türlerine göre karşılaştırılması .....	71
Tablo 16. Üretilen yanıcı gaz içeriği ve alt ısıl değerlerinin yakıt türlerine göre.....	72
karşılaştırılması .....	72
Tablo 17. Üretilen yanıcı gazın yakıt türlerine göre performans değerlendirmesi.....	73

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	: Oksijenin mol sayısı (denklem 9)
$C_p$ [kJ/kgK]	: Özgül ısı
$e$	: Ekserji
$ER$	: Eşdeğerlik oranı
$h$ [kJ/kmol]	: Özgül entalpi
$HHV$	: Üst ısı değer
$LHV$	: Alt ısı değer
$m$ [kg]	: Kütle
$m, n$	: Kimyasal oluşum katsayıları (denklem 9-10)
$P$ [Atm]	: Basınç
$PV$	: Fotovoltaik
$Q$	: Isı değişimi
$SNG$	: Sentetik doğalgaz
$T$ [°C, K]	: Sıcaklık
$u$ [m/s]	: Hız
$W$ [KW]	: Yapılan iş
$w$	: Yakıt içindeki nemin mol sayısı
$x_1, \dots, x_7$	: Reaksiyondaki mol sayıları
$Y_{Kül}^{(kh)}$	: Kuru haldeki biyokütlerde kül yüzdesi
$Y_{Nem}^{(yh)}$	: Yaş haldeki biyokütlerde nem yüzdesi
$Y_{Sabit karbon}^{(kh)}$	: Kuru haldeki biyokütlerde sabit karbon yüzdesi
$Y_{Uçucular}^{(kh)}$	: Kuru haldeki biyokütlerde uçucular yüzdesi
$\eta_{Gaz}$	: Gaz verimi
$\eta_C$	: Karbon dönüşüm verimi
$\eta_{tv}$	: Termal verim
$\eta_{Eks}$	: Ekserji verimi
$\Delta H$ [kJ/mol]	: Kimyasal reaksiyon ısısı
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	: Yoğunluk
$V_{gaz}$	: Gaz üretim verimliliği

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Küresel ısınma ve iklim değişikliği kaygıları, yenilenebilir enerjilerin kullanımının artırılması ve enerji verimliliğini iyileştirilmesi ve böylece CO<sub>2</sub> sera gazı emisyonlarını azaltma çabalarını doğurmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin yanı sıra biyokütle temel yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Güneş, rüzgâr ve biyokütle enerji karışımında, biyokütle enerjisi ayarlanabilir ve kontrol edilebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilir [1].

İnsanoğlunun nasıl ateş yakacağını keşfetmesinden beri biyokütle binlerce yıldır temel enerji kaynağı olmuş ve bugün hala dünya enerji ihtiyacının %10'undan fazlasını karşılamaktadır. Aynı zamanda biyokütle, dünyanın dördüncü temel enerji kaynağıdır. Kırsal tarım alanlarında biyokütle, hala ısıtma ve pişirme için temel enerji kaynağıdır ve genellikle bu bölgeler için tek enerji kaynağı olmaktadır [2]. Asya ve Afrika'daki gelişmekte olan ülkelerde toplam enerji tüketiminin üçte birinden fazlası biyokütleyle dayanmaktadır. Biokütlenin büyük bir avantajı, kömür ve doğalgazın aksine dünyanın her yerinde ulaşılabilir olmasıdır. Örneğin, Türkiye'de linyit rezervlerinin büyük kısmının ısı değeri düşük olduğundan termik santrallerde kullanımı ön plana çıkmıştır. Ayrıca Türkiye'de linyit rezervinin yaklaşık %46'sı Afşin-Elbistan havzasında ve en önemli taşkömürü rezervleri ise Zonguldak ve civarında bulunmaktadır. Bunun aksine biyokütle ülkenin her yerine dağılmış ve ulaşımı oldukça kolay olmaktadır [3].

Son yıllarda fosil yakıtların azalması ve dünyanın enerji ihtiyacındaki artış, enerji üretiminde biokütleyi de içine alan yenilenebilir enerji konusundaki ilgiyi artırmıştır. Endüstriyel uygulamalarda yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyokütle kullanımı son on yılda oldukça artmıştır ve günümüzde gelecek vadeden önemli enerji kaynaklarından biri olarak düşünülmektedir. Yüksek enerji potansiyeline sahip olmasına rağmen büyük bir oranda biyokütle çevresel problemlere neden olan atık olarak kalmaktadır. Bol miktarda mevcut olan biokütlenin öncelikle sahip olduğu enerjinin anlaşılması gerekmektedir. Bilindiği gibi biokütlenin termo-kimyasal olarak enerjiye dönüşümü farklı prosesler ile yapılabilir. Bu prosesler yanma, proliz ve gazifikasyon prosesleridir [4].

## 1.2. Literatür Çalışması

Türkiye’de ve tüm dünyada rüzgâr, güneş, su, biyokütle gibi geleneksel olmayan enerji kaynaklarının yeteri kadar değerlendirilmediği ve fosil yakıtlara bağıllığın ortadan kaldırılmadığı görülmektedir. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyokütle, çoğunlukla temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Ülkemizde ve tüm dünyada bol olması ile biyokütle, petrol ve kömürden sonra üçüncü önemli enerji kaynağı olmaktadır. Biyokütle kullanımına dayanan enerji dönüşüm sistemleri, büyük oranda çevresel konulardaki avantajları nedeniyle bilim insanlarının ilgisini çekmektedir. Tüm bunları hesaba kattığımızda biokütlenin enerjiye dönüşümünde gazifikasyon tekniği birçok açıdan öne çıkmakta ve gelecek vadetmektedir. Öncelikle diğer termo-kimyasal işlemlere göre daha verimli olan gazifikasyon yöntemi ile biyokütlenin yanıcı gazıya dönüştürülerek kullanımı oldukça avantajlı olmaktadır. Zira katı yakıt olarak kullanılacak biyokütlelerin yanma verimleri oldukça düşük olmaktadır. Katı yakıt olan biyokütlelerin yanma verimleri % 25 civarında iken, gazıya dönüştürüldüğünde %98'lere kadar çıkmaktadır. Bu yanıcı gaz karışımı literatürde ürün gazı veya sentez gazı olarak adlandırılmaktadır.

Gazifikasyon ile elde edilen enerjinin bir türü olan sentez gazı enerjisi, günümüz araştırmalarında önemli yer tutmaktadır ve popüler araştırma konuları arasındadır. Sentez gazı elde etmenin birçok uygulaması olmakla birlikte pek çok biyokütle türü de sentez gazı kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir. Biyokütle gazifikasyonu, verimli ve sürdürülebilir bir teknoloji olarak ısı üretimi, hidrojen ve etanol ürünleri üretimi ve elektriksel güç gibi güç üretim sistemlerinde kullanılmaktadır [5, 6].

Karbon ihtiva eden maddelerden yanıcı gaz üretmek kabul edilmiş bir teknolojidir. Gazifikasyon, piroliz ve sonraki reaksiyonlar ile diğer yakıtlara kıyasla daha temiz ve yanabilir gaz ürünü elde edilen termo-kimyasal bir işlemdir. Üretilen bu gaz karışımının yakılarak değerlendirilmesi mümkündür. Sentez gazı doğrudan yanma için kullanılabilirdiği gibi türbin ve motor uygulamalarında, sentetik doğalgaz (SNG) üretiminde ve taşımacılık yakıtı (Fisher-Tropsch Dizeli) olarak ta kullanılabilir. [7, 8].

Enerji üretiminde üretilen sentez gazının Üst Isıl Değeri (Higher Heating Value-HHV), kompozisyonu ve muhtemel atık miktarı ilgilenilen konulardır. Elde edilen ürün gazı genellikle CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ile birlikte bir miktar katran, kül ve tozdan oluşur. Gaz içeriğinde yanabilir gazlar CO, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> ile az miktarda bulunan C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> ve C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> olmaktadır [6, 7, 8]. Yanıcı gazlar ve içerdiği nem, gazın kalorifik değerini belirler. Sentez



gazının kompozisyonu, kullanılan biyokütlenin özelliklerine ve gazlaştırıcı uygulama koşullarına bağlıdır. Biyokütle gazifikasyon sistemlerinde uygulama koşullarının çok iyi belirlenmesi gerekir. Gazifikasyon işleminde sentez gazı kalitesi açısından en önemli faktörler; gazlaştırıcı (redüktör) boyutu, hammaddenin (biyokütle veya kömür) boyutu ve nem içeriği, hava besleme durumu, soğutma/temizleme yöntemleri şeklinde sıralanabilir. Karbon dönüşümü, gaz kompozisyonu, oksidasyon, katran ve is oluşumu çoğunlukla uygulama koşullarına bağlıdır [9, 10, 11].

Biyokütle enerjisi gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacının %35'ini teşkil etmektedir. Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarına göre daha ucuzdur ve önemli ölçüde yüksek verime sahiptir. Gazlaştırma reaktörleri içerisinde Aşağı akışlı (Downndraft) gazlaştırıcı, özellikle içten yanmalı motorlar için en kaliteli gaz üreten reaktörler olarak kabul edilir [11].

Z.A. Zainal ve arkadaşları [12], Aşağı akışlı gazlaştırıcı ile biyokütle olarak mobilya tahtası ve talaş kullanarak deneysel inceleme yapmıştır. Çalışma sonucunda maksimum 5,62 MJ/m<sup>3</sup> kalorifik değerde ve %80 yanma verimine sahip sentez gazı elde etmiştir. Gaz akış oranının, eşdeğerlik oranı (yakıt, hava besleme oranı ve çalışma süresini kapsayan) ile başlangıçta arttığı ve optimum bir hava/yakıt besleme oranı ile karbonun ideal şekilde gaz yakıtı dönüşümü gözlemlenmiştir. Karbonun tamamen gaz yakıtı dönüşümü pratikte mümkün değildir. Biyokütle gazlaştırma sistemlerinin performansı; üretilen gaz ve kütle dönüşüm verimleri, üretilen gazın akış oranı ve kalorifik değeri ile belirlenir. Üretilen gazın kalitesi ise; İçerdiği nem miktarı, gazlaştırıcı içerisindeki hava akış oranı, yakıt büyüklüğü hava besleme nozullarının pozisyonu ve indirgeme bölgesinin hacmi gibi faktörlerle belirlenir [13]

Mobilya atıklarının gazifikasyon ile değerlendirilmesini inceleyen bir başka çalışmada Milne T. A ve arkadaşlarının hazırladığı raporda [14], susam odunu ve gül ağacı ihtiva eden (*Dalbergia sissoo*) mobilya atığı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda hammaddenin nem içeriğinin artması biyokütle tüketim oranını ve dolayısıyla gaz miktarını azalttığı ve hava besleme oranının artmasıyla gaz miktarının arttığı belirtilmiştir. Hava, yakıt ve çalışma süresini kapsayan bir eşdeğerlik oranı ile çalışma için en iyi gaz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Gazlaştırıcı içerisindeki basınç düşüşlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. K. Jaojaruek K ve Kumar S, sonrakine [10] benzer bir çalışmada gazlaştırıcıda üretilen basınç 5 kPa olarak verilmiştir [15].

Bir başka çalışmada Sharma, A. Kr [1], 75 kW kapasiteli Aşağı Akışlı gazlaştırıcıda akasya ağacının gazlaştırılması yapılmıştır. Deneysel sonuçta elde edilen sıcaklık profilleri, kalorifik değer ve gaz kompozisyon oranlarına ek olarak yanma öncesi ve sonrası farklı bölgelerdeki basınç düşüşlerinin ürün gazı üretimine etkileri incelenmiştir. Daha yüksek hava akış oranı gazlaştırıcı yatağındaki sıcaklık profilini iyileştirir ve daha yüksek basınç düşüşlerine sebep olarak gaz kalitesinin artmasını sağlamaktadır.

Doğru, M ve arkadaşları [8], fındıkkabuklarının 5 kW elektriksel çıkış kapasiteli gazlaştırıcıda gazlaştırılması için yakıt-hava besleme oranları ve hammadde besleme oranlarının etkisini kapsayan deneysel bir çalışma yaparak 8-9 Nm<sup>3</sup>/h gaz akışlı ve yaklaşık 5 MJ/m<sup>3</sup> kalorifik değerde ürün gazı elde etmiştir. İlave soğutma/temizleme işlemleri ile %80-90 oranında katran, toz ve yoğunlaşmış içerikten kurtulmayı sağlamıştır. Yazar bir başka çalışmada aynı tipte gazlaştırıcıda atık çamurdan sentez gazı üretmiştir. Gazın %19-23 oranında yanıcı gaz içerdiği ve kalorifik değeri 2,52-3,2 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında olduğunu belirtmiştir [16].

Hava besleme işlemi, sözü edilen birçok uygulamada reaktörün oksidasyon bölgesinden yapılmaktadır. Ancak Devi L ve arkadaşlarının çalışmada piroliz bölgesinden bir miktar hava takviyesi ile ürün gazının kalitesinin artırılacağı görülmüştür [17]. Kitipong Jaojaruek ve arkadaşları [10, 15], farklı bir uygulama olarak Okaliptüs ağacını 2 cm<sup>3</sup> lük parçalar haline keserek, aşağı akışlı tipte bir gazlaştırıcıda gazlaştırmak için oksidasyon bölgesinden hava beslemesine ilave olarak piroliz bölgesine hava/sentez gazı karışımı göndermiştir. Elde edilen kalorifik değer 6,47 MJ/Nm<sup>3</sup> ve termal verim %73,5 olarak bulunmuştur. Tek aşamalı hava beslemesi ve iki aşamalı besleme arasında karşılaştırma yapılmış ve ürün gazında belirgin iyileştirme yapıldığı ölçülmüştür.

Kömürün gazlaştırma ile değerlendirilmesi amacıyla K. Jayarama ve I. Gökalp [18], Avrupa Birliği destekli bir proje ile yüksek oranda kül ihtiva eden Hindistan kok ve kömürünün gazlaştırılmasını çalışmışlardır. Bu çalışma ile hava, su buharı, oksijen ve gaz karışımı gibi farklı reaksiyon ortamlarında ve farklı boyutlarda, kok ve kömür için termogravimetrik analiz sonuçları sunulmuştur. Yüksek sıcaklıklar (1050°C ye kadar) ve bu sıcaklıklarda çok iyi gazlaştırma sonuçlarına ulaşılmıştır. Su buharı ortamında gazifikasyon 800°C de başlarken, karışık gaz atmosferi (su buharı, hava ve oksijen ortamı) için gazlaştırma 700°C sıcaklıktan itibaren olmaktadır. Karbon dönüşümü ve gazifikasyon verimliliği bakımından en iyi sıcaklığın 950 °C de başladığı belirlenmiştir.

Ayrıca Alexander Tremel ve arkadaşları [19], endüstriyel ölçekte bir akış reaktöründe Ren linyiti, zift kömürü ve Alman taş kömürünün gazifikasyonunu incelemişlerdir. Yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta gazifikasyon ile elde edilen uçucu gazların incelemesi yapılmıştır. Sözü edilen bu kömürler için reaktör içerisinde sırasıyla 1200, 1400, 1600 °C sıcaklıklara ulaşılarak uçucu içerik %67 oranına kadar artırılmıştır. Yakıt tipine ek olarak sıcaklık ve basıncın da gazifikasyonda önemli etkilerinin olduğu görülmüştür.

Gazlaştırmanın geliştirilmesine ilişkin çalışmalar birçok araştırmacı tarafından sistemin etkinliğini, çalışabilirliğini ve verimini artırmak için yürütülmüştür. Genel olarak, ürün verimleri ve gaz bileşimi, sıcaklık, gazlaştırıcı ajan (oksidan), biyokütle türleri, partikül boyutu, ısıtma oranı, çalışma basıncı, eşdeğerlik oranı, katalizör ilavesi ve reaktör konfigürasyonu gibi çeşitli parametrelere bağlıdır.

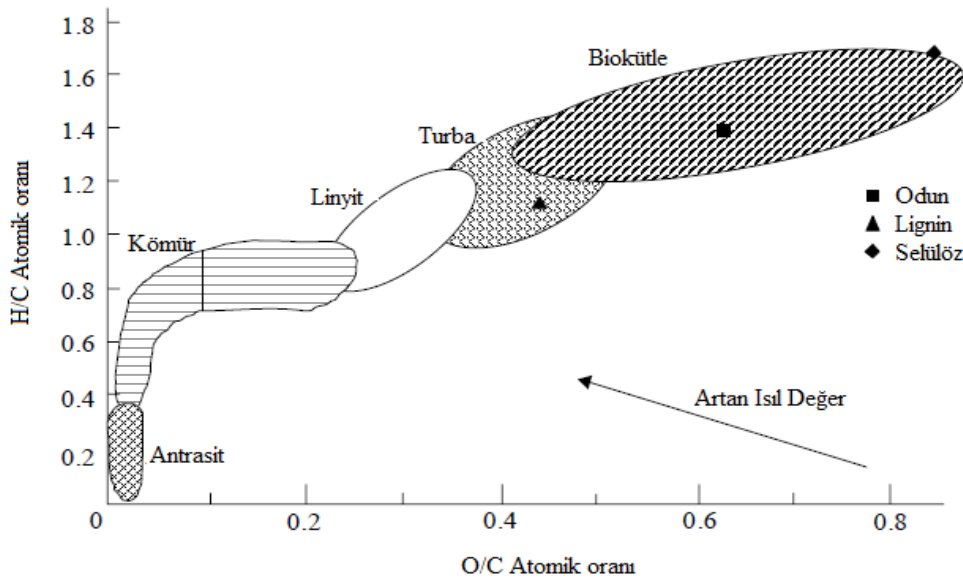
Yapılan çalışmalar incelendiğinde, tasarlanan gazlaştırma reaktörüne uygun olarak genellikle tek tipte hammaddenin kullanıldığı görülmektedir. Bunun nedeni, yakıt özelliklerinin gazifikasyon prosesini doğrudan ve önemli ölçüde etkiliyor olmasıdır. Özellikle reaktörün oksidasyon bölgesinde uğradığı termo-kimyasal dönüşümde, kontrollü yanmanın ve dengeli hava/gaz akışının sağlanamamasıyla tüm prosesin, yakıt türü ve boyutu ile kısıtlanması söz konusudur. Ancak reaktör kurutma bölgesinde oluşan su buharının sistemden atılması ve oksidasyon bölgesine tek noktadan hava beslemesi yerine farklı noktalardan besleme ile yakıt içerisine nüfuzun sağlanması bu kısıtlamaları azaltabilir. Özellikle morfolojisi birbirine yakın olan fındıkkabuğu, çam kozalağı kabuğu, pelet ve uygun ölçülerde kesilmiş odun bloklar gibi biyokütle yakıtları için tek tipte reaktör tasarlanması mümkündür. Böylece, gazlaştırıcı sistemin etkinliği artacak ve kullanım kapsamı genişleyecektir. Orman dışı atıkların bol olduğu bölgelerde gazlaştırma için yakıt çeşitliliğinin sağlanması, bu tür sistemlerin kullanımını yaygınlaştıracaktır. Bunun sonucu olarak, doğrudan yakılan petrol, kömür ve doğalgaz gibi yakıtlara alternatif olarak çevresel ve ekonomik anlamda daha avantajlı kullanım sağlanmış olacaktır.

Ayrıca, biyokütle içerisindeki katranın parçalanması için oksidasyon bölgesinde yüksek sıcaklıklara (>750) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölgede daha yüksek sıcaklıklara ulaşılması yakıtın kül ergime noktası ve zararlı gaz oluşum sıcaklıklarını geçmemek koşuluyla istenilen bir durumdur. Hava besleme miktarının artırılması ile sıcaklık artışı sağlanabilmesine rağmen üretilen gazın kalitesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Sisteme dışarıdan ısı verilmesiyle yüksek sıcaklıkta daha yüksek verimlilikte gaz üretmek mümkündür. Ancak bu amaçla kullanılacak elektriksel güç kaynağı, sistemin kullanımını

ekonomik olmaktan çıkarabilir. Bu nedenle, sıcaklık artışının yenilenebilir enerji olan güneş enerjisinden faydalanılarak sağlanması avantajlı olacaktır. Bu sayede, sisteme gönderilen hava kalitesinin artırılmasının yanında standart oluşuma göre daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Bunun sonucu olarak amaçlanan termo-kimyasal dönüşüm farklı yakıt türleri için çeşitlendirilebilir ve iyileştirilebilir.

### 1.3. Gazlaştırıcı Yakıtları

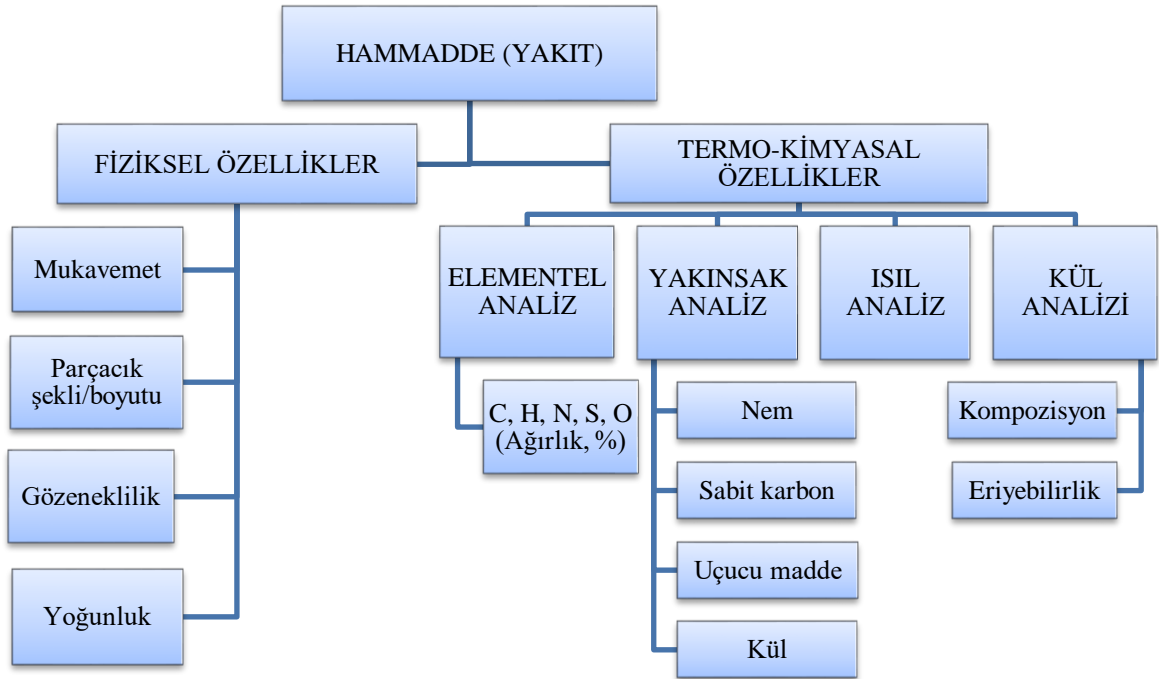
Gazlaştırıcı yakıtı olarak değerlendirilen biyokütle ve kömür fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından farklılıklar gösterir. Örneğin, biyokütlenin organik yapısı içeriğinde çok fazla uçucu madde bulundurur. Bu miktar biyokütle türüne göre ağırlıkça %70-80 arasında değişir. Kömürde ise bu miktar, ortalama %27 oranında uçucu içeren linyitten uçucu içeriği %5 civarında olan antrasite kadar farklılık gösterir. Alt bitümlü ve bitümlü kömürlerde uçucu içerik bu değerler arasındadır. Kömürden biyokütleyle doğru kompozisyonda meydana gelen değişim Van Krevelen tarafından geliştirilen bir diyagramdan görülebilmektedir. Şekil 1'deki bu diyagramdan biyokütleden başlayarak sırasıyla turba, linyit, kömür ve antrasite kadar yakıt içeriğindeki elementel oranlardaki O/C ve H/C değişimleri görülmektedir [20]. Lignoselüloz özellikteki odunsu kısım en çok bulunan biyoyakıt türüdür. Odun, çeşitli prosesleri ile doğadaki kömürleşmenin öncüsü olduğu için kömürle doğrudan ilişkilidir.



Şekil 1. Van Krevelen diyagramı

Gazifikasyon yöntemini belirlemede en önemli faktör, yakıt olarak kullanılacak hammaddenin belirlenmesidir. Termo-kimyasal dönüşüm işlemleri ile ilgili fiziksel ve kimyasal özellikler, yakıt ön işleme sisteminin tasarımı, dönüştürme işlemi ve gerekli gaz temizleme koşullarını etkileyecektir. Bu özellikler ve yapılan analizler Şekil 2’de gösterilmiştir [21]. Gazlaştırma öncesi bu analizlerin yapılması ya da yapılan başka çalışmalardan alınarak belirlenmesi gerekir. Odunsu biokütlenin nem içeriği, uçucu madde içeriği, H/C ve O/C oranları, genellikle kömüre göre yüksektir. Yığın yoğunluğu ise daha düşüktür. Bu nedenle daha düşük ısıl değere sahiptir. Otsu biyokütle (saman gibi) ise, odunsu biokütle ile karşılaştırıldığında daha düşük yoğunluk, daha yüksek Cl ve S içeriği ve daha düşük kül erime noktasına sahiptir. Bu nedenle otsu biokütlenin dönüşümü daha zordur. Gazlaştırma teknolojisi seçildiğinde, seçilen çalışma koşulları, hem gaz ürünün kalitesini (bileşim, katran içeriği/bileşimi, kirleticiler) ve proses performansını (soğuk gaz verimliliği, karbon dönüşümü) etkiler.

Gazlaştırma işlemi sonucu biyolojik kütle, kısmi oksidasyon yoluyla gaz halindeki bir karışıma, az miktarda kömür karbonuna (char) ve yoğunlaştırılabilir bileşiklere dönüşür. Bu prosesi gerçekleştirmede gazlaştırma, biyokütle içine gömülmüş enerjiyi dönüştürmenin en etkili yollarından biri olarak düşünülür ve atık katıların yeniden kullanımı için en iyi alternatiflerden biri haline gelmektedir.



Şekil 2. Gazifikasyon hammaddesi ve özellikleri

Gazlaştırma için mevcut olan biyokütle yakıtları arasında mangal kömürü, odun ve odun atığının yanı sıra çok sayıda tarımsal kalıntıları gazlaştırma yakıtı olarak sıralamak mümkündür. Odun atıkları olarak; dallar, kökler, talaşlar ve testere tozları, tarımsal kalıntılar olarak ise; mısır koçanı, fındikkabuğu, hindistancevizi kabuğu, tahıl çöpü, pirinç kabuğu ve çam kozalağını yakıt olarak kullanmak mümkündür. Ayrıca turba ve diğer kömür türleri gazifikasyon için kullanılan diğer yakıtlardır. Bu yakıtların kimyasal, fiziksel ve morfolojik özelliklerinde büyük farklılıklar gösterdikleri için gazlaştırma yöntemleri farklı olabilir ve bunun sonucu olarak farklı reaktör tasarımları veya gazlaştırma teknolojileri gerektirebilirler. Bu nedenle, bir asırlık gazlaştırma deneyimi sırasında, tipik bir yakıtın veya yakıt serisinin özgül özelliklerini ele almaya yönelik farklı türde gazlaştırıcılar geliştirilmiş ve piyasaya sürülmüştür. Yakıt için bir gazlaştırıcı seçmeden önce, gazlaştırıcının yakıtın gereksinimlerini karşılayabileceğinden veya bu gereksinimleri karşılamak için işleminden geçirilebileceğinden emin olunması önemlidir. Her biokütle türünün, gazlaştırma işlemlerinde bir yakıt olarak performansını belirleyen kendine özgü özellikleri vardır.

Kömür ile biokütle arasındaki en büyük fark, biokütlenin yüksek uçucu içermesi ve düşük sabit karbon içeriğine sahip olmasıdır. Gazlaştırma için yakıtta aranan en önemli özellikler; Nem içeriği, kül içeriği, uçucu madde içeriği, kül bileşimi ve elementel kompozisyonu, ısı değeri, kütle yoğunluğu, yakıt morfolojisi ve N, S, Cl, alkaliler, ağır metaller vb. gibi yakıtla ilgili diğer kirleticiler şeklinde sıralanabilir. Çeşitli biyokütle kaynaklarının bu özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle, orijinal biyokütle kaynağını belirli bir gazlaştırıcı tasarımında hammadde olarak kullanabilmek için kurutma, boyutlandırma, yoğunlaştırma gibi bazı ön işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır [22].

Hammadde yakıtlarının fiziksel, kimyasal ve yakıt özellikleri büyük oranda farklılıklar gösterebilmektedir. Bu farklılıklar gazlaştırma yöntem ve işleyişine önemli ölçüde etki etmektedir. Kömür ve biyokütle için özellik karşılaştırması Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu temel özelliklerle birlikte, biyokütle ve kömürlerin türlerine bağlı olarak birçok özelliklerinin gazifikasyon işleminden önce ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tablo 1. Biyokütle ve kömür yakıtlarının fiziksel, kimyasal ve yakıt özellikleri [23, 24]

Özellik	Biyokütle	Kömür
Yakıt yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	~500	~1300
Parçacık boyutu	~3 mm	~100 µm
C içeriği (kuru yakıttaki ağırlık %'si)	42-54	65-85
O içeriği (kuru yakıttaki ağırlık %'si)	35-45	2-15
S içeriği (kuru yakıttaki ağırlık %'si)	Maks. 0,5	0,5-7,5
SiO <sub>2</sub> içeriği (kuru küldeki ağırlık %'si)	23-49	40-60
K <sub>2</sub> O içeriği (kuru küldeki ağırlık %'si)	4-48	2-6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeriği (kuru küldeki ağırlık %'si)	2,4-9,5	15-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeriği (kuru küldeki ağırlık %'si)	1,5-8,5	8-18
Tutuşma sıcaklığı (K)	418-426	490-595
Kuru ısı değeri (MJ/kg)	14-21	23-28

### 1.3.1. Yakıtın Fiziksel Özellikleri

Gazlaştırma işleminde kullanılacak yakıtın *yığın yoğunluğu* ve *morfolojisi*, sürece önemli ölçüde etki etmektedir. Gazlaştırma metot ve sistematığının belirlenmesinde yakıta ait bu özellikler önceden bilinmeli veya istenilen fiziksel yapıya uygun hale getirilmelidir. Yakıtın yığın yoğunluğu, birim hacmi başına sahip olduğu ağırlığa karşılık gelir. Düşük yığın yoğunluğundaki biokütlenin işlem görmesi, taşınması ve depolanması pahalıdır. Buna karşılık çok yüksek yığın yoğunluğa sahip yakıtlarda gazlaştırma sürecini olumsuz yönde etkilemektedir.

Çoğu gazlaştırıcı tipleri için eşit veya yakın ölçülerde yakıt parçacıklarının gazlaştırmaya tabii tutulması beklenir. Farklı boyutlardaki parçacıkların reaktör içerisindeki hareketi ve süreç boyunca meydana gelen tepkimeler farklı olabileceğinden gazlaştırma aşamalarının birbirine karışması mümkündür. Böyle bir durumda beklenen gazlaştırma verimlerine ulaşılamaz. Hammadde malzemesinin parçacık boyutu, reaktörün oksidasyon bölgesi boyutlarına bağlıdır, ancak tipik olarak reaktör çapının % 10-20'si kadardır. Daha büyük parçacıklar, hammadde beslemesinin ilerlemesini önleyen köprüler oluşturabilirken, daha küçük parçacıklar hava ve gaz boşluğunu tıkayarak yüksek basınç düşüşüne ve daha sonra gazlaştırıcının kapanmasına neden olur.

### 1.3.2. Yakıtın Termo-Kimyasal Özellikleri

Yakıt için termo-kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için öncelikle bazı yakıt analizlerinin yapılması yararlıdır. Biyokütle, organik, inorganik ve enerji içeriği ve fiziksel özellikler de dâhil olmak üzere önemli özellikleri bakımından kömürden farklılık gösterir. Biyokütle, kömüre göre genellikle daha az karbon, daha fazla oksijen, daha fazla silis ve potasyum, daha az alüminyum ve demir, daha düşük ısıtma değeri, daha yüksek nem içeriği ve daha düşük yoğunluk ve ufalanabilme özelliklerine sahiptir. Tablo 2’de bazı bioküteller ve linyit için temel analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 2. Gazifikasyon yakıtı olarak kullanılan bazı maddeler ve analiz özetleri [25, 26, 27]

Hammadde	Yakınsak analiz [~Ağırlık %]			Elementel analiz [~Ağırlık %]					LHV MJ/kg
	SK	UM	KÜL	C	H	O	N	S	
Ham madde cinsi									
Alman-Anna kömürü	79,60	12,00	8,40	82,62	3,02	3,66	0,92	0,73	29,952
Braunkohle linyiti	46,03	49,47	4,50	63,89	4,97	24,54	0,57	0,48	23,953
Tunçbilek linyiti	59,68	40,32	-	78,30	5,65	11,32	3,03	1,37	29,878
Yatağan linyiti	55,60	44,40	-	63,65	4,87	22,92	1,59	5,11	25,125
Mangal kömürü	89,10	9,88	1,02	92,04	2,45	2,96	0,53	1	33,038
Kok	91,47	0,92	7,61	89,13	0,43	0,98	0,85	1	32,428
Çam blok	14,59	83,32	2,09	46,9	6,07	43,99	0,95	0	17,602
Şeftali çekirdeği	19,80	79,10	1,10	49,14	6,34	43,52	0,48	0,02	19,324
Fındıkkaşığı	28,30	69,30	1,40	52,9	5,6	42,7	1,4	-	18,360
Mısır koçanı	18,54	80,10	1,36	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	19,033
Odun talaşı	23,50	76,40	0,10	48,1	5,99	45,74	0,08	0	20,220
Okalıptüs	21,30	75,35	3,35	46,04	5,82	44,49	0,3	0	19,253
Ceviz kabuğu	20,80	78,50	0,70	48,2	6,25	43,24	1,61	-	19,588
Buğday samanı	23,50	63,00	13,50	45,5	5,1	34,1	1,8	-	18,026
Pamuk sapı	17,30	65,40	17,30	39,47	5,07	39,14	1,2	0,02	16,178
Dut çubuğu	22,80	75,10	2,10	44,23	6,61	46,25	0,51	-	19,754
Hindistan cevizi kabuğu	29,70	66,58	3,72	50,29	5,05	39,63	0,45	0,16	20,853
Şeker kamışı yaprağı	14,90	77,40	7,70	39,75	5,55	46,82	0,17	-	17,275
Çay çalısı	21,80	76,50	1,70	47,67	6,13	43,16	1,33	-	19,622
Testere tozu	25,00	72,40	2,60	-	-	-	-	-	20,107
Çay atığı	13,60	85,00	1,40	48,6	5,5	39,5	0,5	-	18,050
Çam kozalağı kabuğu	16,73	74,85	0,53	46,81	7,44	45,43	0,27	<0,1	19,100
Odun peleti	17,84	81,90	0,26	52,10	5,20	42,20	0,33	0,11	19,400

- Kuru haldeki değerlerdir.
- SK: Sabit karbon, UM: Uçucu madde



Biyokütle, kütleli olarak %40-80 selülozik, %25-25 lignin ve %15-30 yarı selülozik kompozisyona sahiptir. Gazlaştırma hammaddesi olarak kullanılacak yakıt için *nihai analiz* (*ultimate analiz*) kapsamında bir numunenin kimyasal bileşimi ve ısıtma değeri belirlenir. Kimyasal bileşimde genellikle *karbon (C)*, *hidrojen (H)*, *oksijen (O)*, *azot (N)*, *kükürt (S)* ve külün ağırlık yüzdeleri verilir. Bu bileşimden, incelenen numuneden elde edilebilecek olan enerji miktarı için bir ölçüt olan ısıtma değeri, deneysel olarak belirlenebilir ya da deneye dayalı olarak hesaplanabilir. Biyokütle içerisindeki kimyasal elementlerin miktarını ölçmek için yapılan analiz, elementel analizdir. Biokütlenin türüne göre elementel analiz önemli ölçüde farklı olabilir ve kül oranı dikkate değer biçimde değişiklik gösterebilir. Odun ve odun atıkları için ortalama değerler; karbon %40-50, hidrojen %6, Oksijen %40 ‘tan az, azot çoğu uygulama için %1 den az ve sülfür yaklaşık %0,5 şeklindedir.

Isıl analizde ise, numuneye ait alt ve üst ısıl değerler (LHV, HHV) tespit edilir. Isıl değer, biokütlenin yanması sonucunda elde edilen ısıdır ve üst ısıl değer önemli bir doğrulukta aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir.

$$HHV = [34,1C + 132,2H + 6,8S - 1,53A - 12,0(O + N)] \text{ [kJ/kg]} \quad (1)$$

$$HHV = [146,6C + 568,8H + 29,4S - 6,6A - 51,5(O + N)] \times 10^2 \left[ \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right] \quad (2)$$

Burada *C*, *H*, *S*, *A*, *O* ve *N* harfleri, yakıt içerisindeki sırasıyla karbon, hidrojen, kükürt, kül, oksijen ve azotun ağırlıkça yüzdelerini temsil etmektedir. Hesaplama sonucunda bulunan değerler, pek çok biyokütle malzemesi için %2,1 hata ile ölçülen değerler ile uygundur.

Kullanılmadan önce diğer katı yakıtlar gibi biyokütle de *yakınsak analize* (*proximate analiz*) tabi tutulur. Bu analiz; Nem (N), Uçucu Madde (UM), Sabit Karbon (SK) ve Kül içeriğini belirlemek için yapılır. Yakıt içerisindeki bu maddelerin belirlenmesi, yaş halde (yh) veya kuru halde (kh) yapılabilir. Bazı durumlarda bu analiz, kuru ve külsüz haldeki yakıt içerisindeki uçucu madde ve sabit karbonu belirlemek için de yapılmaktadır. Yakınsak analiz için yapılan değerlendirmeler aşağıdaki gibi açıklanabilir.

*Nem analizi*, her yakıt numunesi bir miktar nem içermektedir. Özellikle biyokütle (fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında) büyük ve değişken bir nem içeriğine sahip olabilir. Yüksek nem içeriği, suyun uzaklaştırılması için enerji kullanıldığından, termal verimliliği düşürür ve dolayısıyla bu enerji, indirgeme reaksiyonları için ve termal enerjiyi gazdaki

kimyasal bağı enerjiye dönüştürmek için kayıp enerji olarak değerlendirilir. Bu nedenle yüksek nem içeriği, üretilen gazın düşük ısı değerlerinde olmasına neden olur. Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda yüksek nem içeriği, sadece düşük gaz ısıtma değerlerine değil aynı zamanda oksidasyon bölgesinde düşük sıcaklıklara neden olur ve bu, zayıf katran dönüştürme yeteneğine neden olabilir. Nem analizinde yakıt numunesi nispeten düşük sıcaklıklara (~110 °C) ısıtılıp içeriğindeki nem buharlaşır. Nem buharlaştırma işlemi tamamlandığında, numunedeki tüm su uzaklaştırılmış ve numune kuru olarak adlandırılmış olur. Nem analizi için genellikle yaş haldeki ağırlık yüzdesi dikkate alınır.

$$Y_{Nem}^{(yh)} = (Yaş\ ağırlık - Kuru\ ağırlık) / Yaş\ ağırlık \quad (3)$$

*Uçucu madde analizi*, uçucu içeriğin belirlenmesinde numunenin havasız bir ortamda 900 °C'ye kadar ısıtıldığında ortaya çıkan uçucu bileşikler kapsar. Toplam uçucu madde için, kuru veya kabul edilen oranda kuru haldeki yakıtın ağırlık yüzdesi hesaba katılır.

$$Y_{Uçucular}^{(kh)} = Ağırlık\ kayıpları / Kuru\ ağırlık \quad (4)$$

*Kül analizi*, numunenin tam yanma sonunda ölçülen ağırlığıyla belirlenir. Kül analizi için, kuru veya kabul edilen oranda kuru biokütledeki ağırlık yüzdesi belirlenir.

$$Y_{Kül}^{(kh)} = Kül\ ağırlığı / Kuru\ ağırlık \quad (5)$$

*Sabit karbon* için ise, kalan oranda kütleli ağırlık olarak değerlendirilir.

$$Y_{Sabit\ karbon}^{(kh)} = 1 - Y_{Uçucular}^{(kh)} - Y_{Kül}^{(kh)} \quad (6)$$

Tablo 2'de bazı bioküteller ve kömürler için analiz sonuçları verilmiştir [26, 28, 29].

### 1.3.3. Gazlaştırıcı Performansına Hammadde Özelliklerinin Etkisi

Hammadde ön işleme/hazırlama, fiziksel, kimyasal ve morfolojik özelliklerin çeşitliliği nedeniyle neredeyse tüm biyokütle malzemeleri için gereklidir. Biyokütle

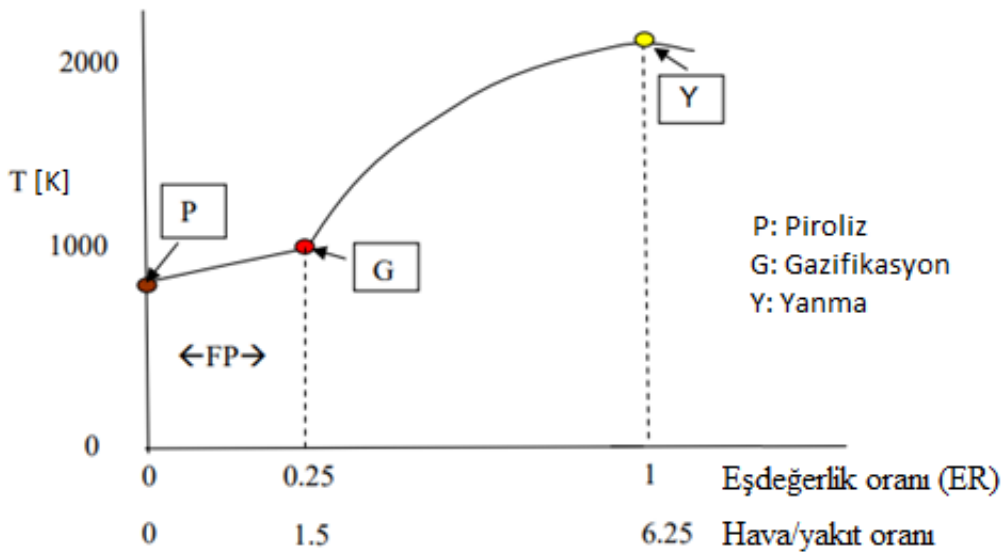
hammaddesinin ön muamele derecesi kullanılan gazlaştırma teknolojisine bağlıdır. Farklı gazlaştırıcı türleri için yakıt gereksinimleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Gazlaştırıcı türlerine göre yakıt gereksinimleri [30, 31]

Gazlaştırıcı Tipi	Alttan akışlı	Üstten akışlı	Akışkan yataklı	Sürüklemeli akışlı
Boyut (mm)	20-100	5-100	10-100	<1
Nem (% , yh)	<20	<50	<40	<15
Şekil	Tek tip	~Tek tip	Tek tip	Tek tip
Kül (% , kh)	<5	<15	<20	<20
Yığın yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	>500	>400	>100	>400
Kül erime sıcaklığı (°C)	>1250	>1000	>1000	>1250

#### 1.3.4. Eşdeğerlik Oranı

1979 yılında Tom Reed ve Ray Desrosiers [32], biyokütlenin ısıya ve gaza termal dönüşümü için gereken denge sıcaklıkları ve kompozisyonlarını hesapladı. Bu hesaplamalar sonucunda Şekil 3'de verilen eşdeğerlik diyagramı elde edildi. Diyagram basit haliyle ve Türkçe olarak buraya eklenmiştir.



Şekil 3. Biyokütle için eşdeğerlik oranı ve hava/yakıt değerleri

Burada görülen P, G ve Y noktaları, sırasıyla proliz, gazifikasyon ve yanma için ideal eşdeğerlik oranını göstermektedir. FP alanı, saf proliz ile izotermal gazifikasyon arasındaki bölgedir ve bu bölgedeki az miktarda hava nedeniyle proliz ve gazifikasyon karışır.

Yanma için gazlaştırıcıya sağlanan hava-yakıt oranının, kimyasal olarak tam yanma için gerekli olan hava-yakıt oranına (stokiyometrik oran) kıyaslanmasına gazlaştırma sürecinin eşdeğerlik oranı denir. Bu oran, gazlaştırma işlemlerinde yakıt-oksitleyici karışımının oksijen bakımından zengin, fakir veya stokiyometrik olup olmadığını nicel olarak göstermek için sıklıkla kullanılır. Eşdeğerlik oranı, bir yakıt oksitleyici karışımının fakir, stokiyometrik veya zengin olup olmadığını nicel olarak göstermek için yaygın olarak kullanılır. Aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$ER = \frac{\left(\frac{Hava}{Yakıt}\right)_{Stokiyometrik}}{\left(\frac{Hava}{Yakıt}\right)} = \frac{\left(\frac{Yakıt}{Hava}\right)}{\left(\frac{Yakıt}{Hava}\right)_{Stokiyometrik}} \quad (7)$$

Yanma ile ilgili reaksiyonlar geliştirilirken yakıt açısından zengin karışımlar için  $ER > 1$ , fakir karışımlar için  $ER < 1$  ve stokiyometrik karışım için  $ER = 1$  olmalıdır. Üretilen gazın kompozisyonu bu orana göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilir [33].

Gazifikasyonda kullanılan biyokütle, yaklaşık olarak %50 selüloz, %25 hemiselüloz ve %25 ligninden oluşur ve kesin bir formülü yoktur. Bu durum kömür için de geçerlidir. İçeriğinin detaylı olarak bilinebilmesi için kimyasal analize ihtiyaç vardır. Fakat kullanılan genel formüller pek çok hesaplama için yeterli olmaktadır. Bu formüller kömür için CH ve biyokütle için  $CH_{1,4}O_{0,6}$  şeklindedir.

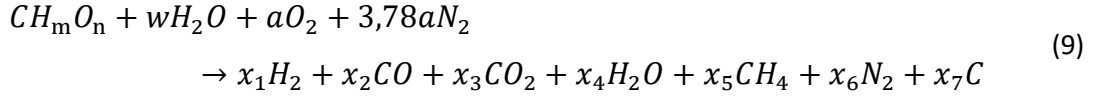
Biyokütlenin oksijen ile yakılmasında stokiyometrik yanma (Y noktası) formülü,



şeklindedir.

Hava ile yanmada eşitliğin her iki tarafına her  $O_2$  için 3,78  $N_2$  eklenmesi gerekir. Hava ile kuru ve külsüz yanma durumunda adyabatik alev sıcaklığı  $2025 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye ulaşır.

Gazifikasyon için elverişli olan eşdeğerlik oranı yaklaşık 0,25 olmaktadır (G noktası). Prolizde ise hava oranı daha azdır ve  $450\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında sıcaklıklara ulaşılır. Biyokütle gazifikasyonu için Prokash C. Roy ve arkadaşları tarafından belirlenen formül;



şeklinde verilmiştir. Yine bu çalışmada tayin edilen eşdeğerlik oranı ise;

$$ER = \frac{(1 + m/4 - n/2)}{a} \tag{10}$$

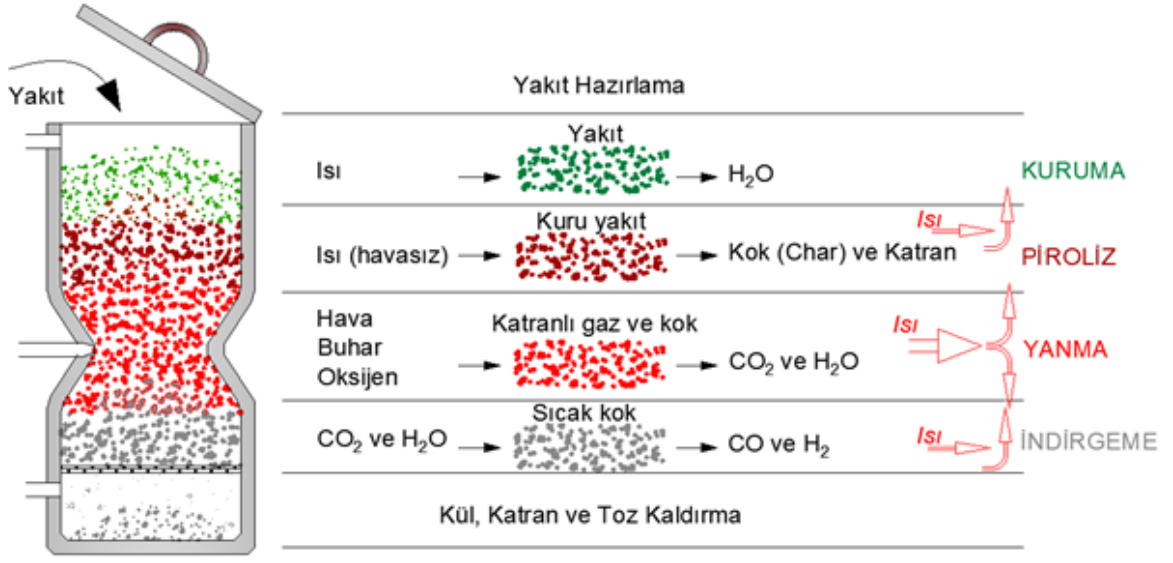
formülü ile belirlenebilmektedir [34].

## 1.4. Gazifikasyon

### 1.4.1. Gazifikasyonun Temel Prensipleri

Gazifikasyon, karbon ihtiva eden katı veya sıvı maddelerin oksijen, hava veya buhar gibi ilave bir oksidan kullanılarak termo-kimyasal dönüşüm ile gaz haline dönüştürülmesidir. Bu tanımlamaya göre yanma işlemi de gazifikasyon olarak düşünülebilir. Ancak gazifikasyon işleminde tam yanma için gerekli olan oksijenden daha az miktarda oksijen olması gerekir. Tam yanma sonucu stokiometrik miktarlarda karbondioksit ve su buharı ortaya çıkar. Gazifikasyon koşullarında ise, karbondioksit ve su buharının yanında belirli ısı değerlerine sahip yanabilir gaz karışımları da elde edilir. Yanabilir bu gaz karışımının içeriği, yakıt olarak kullanılan hammaddenin kompozisyonuna, oksidanın türüne ve gazlaştırıcı topolojisine bağlı olarak değişir. Ayrıca, gazifikasyon sürecinin sonunda karbon fazında katı madde (char), yoğunlaşabilir buharlar, katran ve kül ortaya çıkar [11, 35, 36]. Gazifikasyon işleminde ısı dönüşüm ve kimyasal değişimler şematik olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.

Gazifikasyon veya gazlaştırma, yakıtın tamamen yanması için gerekli olandan daha az oksijen sağlayarak organik yakıtların (biyokütle kaynakları gibi) gaz bileşiklerine dönüştürülmesi aşamalarını içerir.

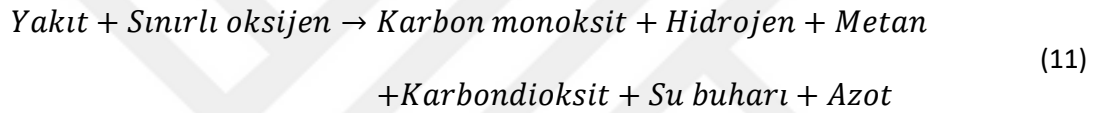


Şekil 4. Gazifikasyon işleminde fiziksel ve kimyasal değişimler

Konumuz olan gazifikasyon prosesinde bazı fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar ile dönüşüm sağlanır. Başlangıçta bir yakıt (katı veya sıvı), gaz fazında yeni bir tür yakıtla dönüştürülür. Bu reaksiyonları sağlayan distribütör maddeler; buhar, hava (yada saf oksijen) veya bunların karışımı olarak kullanılmaktadır. Gazlaştırma, 600 °C ve 1500 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir ve sonuç ürün olarak proses türüne ve çalışma koşullarına bağlı olarak düşük enerjili orta sınıf bir gaz üretir. Gazifikasyon sonucu üretilen bu gaza “gaz ürün” veya “sentez gazı” denir. Biyokütle kaynaklarının gazlaştırılması, ısı, güç üretmek (örneğin, sulama için), buhar ve elektrik üretiminde çift modlu motorlarda kullanım amacıyla biyoenerji ve biyolojik ürünler üretmek için zaten kullanılmaktadır. Otomobiller ve kamyonlardaki ulaşım yakıtları olarak kullanılmak üzere ekonomik olarak hidrojen, organik kimyasallar ve etanol üretmek ve kullanımını elektrik kaynağı olarak genişletmek için gazlaştırma teknolojileri geliştirmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir. Gazlaştırma işlemi sırasında yakıt, yüksek bir sıcaklığa ısıtılır; bu da uçucu bileşiklerin (gazların) ve karbonlu katı kalıntıların (char) üretilmesine neden olur. Uçucu bileşiklerin yapısı ve bileşim oranı, reaktör sıcaklığına ve türüne, yakıtın özelliklerine ve çeşitli kimyasal tepkimelerin süreç içinde ne dereceye kadar olduğuna bağlıdır. Oksijen varlığında oluşan birincil reaksiyonlar, yakıtın karbon monoksit ve karbondioksit dönüşürülmesine neden olur. Bu reaksiyonlar çok hızlıdır ve diğer gazlaştırma reaksiyonlarını sürdürmek için gereken enerjiyi sağlayan ıyı yayarlar. Kalan karbonlu katı maddelerin gazlaştırılması, ikincil reaksiyonlar ile yüksek sıcaklıklarda (> 650° C) meydana gelir ve sonuçta gaz karışımı,

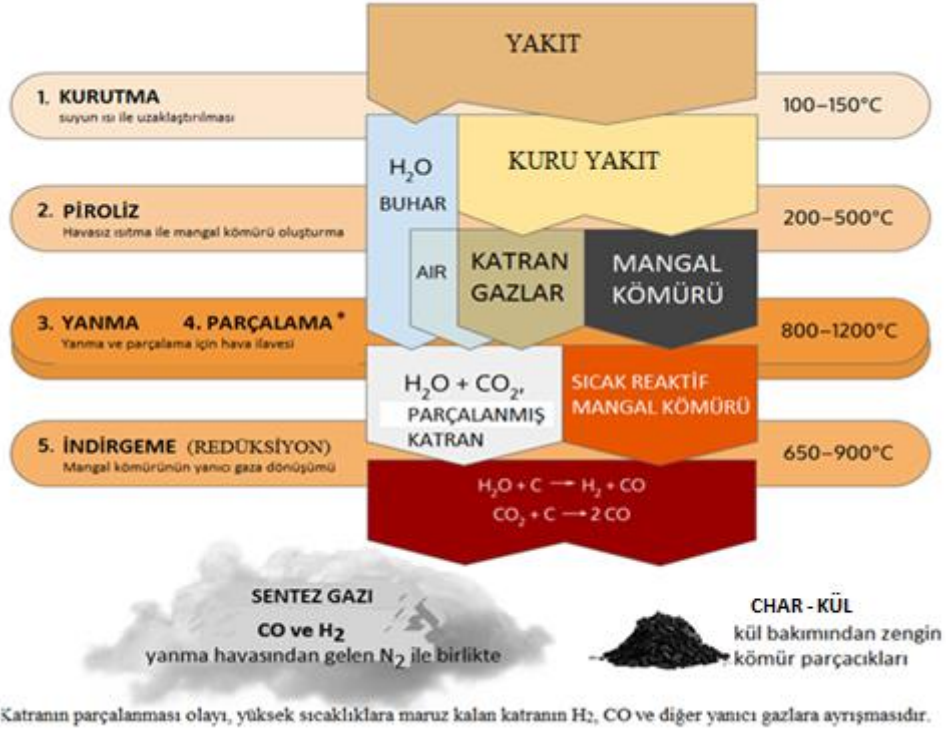
katran ve kül üretilir. Genel olarak bu reaksiyonlar, katı içeriğin uçucu bileşiklere dönüştürülmesine yardımcı olmak için reaktöre ilave edilen oksijen, buhar ve hidrojen gibi reaktif maddelerin varlığında gerçekleştirilir. Bu reaksiyonlar, gazlaştırma sürecine hâkimdir ve gaz ürün veya sentez gazının nihai kompozisyonunu belirler. 650 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda ve uygun basınç koşullarında meydana gelen ikincil reaksiyonlar, karbonların ve gazların üretilmesi için katranın parçalanmasını içerir. Gazifikasyon prosesinde ortaya çıkan ürünler genellikle CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> sabit gazlarının karışımı ile buhar, kok, katran ve kül olmaktadır [10, 37]. Bunların oluşumu ve kapsamı, gazlaştırıcının çalışma koşullarına bağlıdır.

Karbonlu yakıtların eksik yanması olan gazlaştırma, aşağıdaki alt stokiyometrik denklem ile temsil edilebilir.



#### 1.4.2. Gazifikasyon Aşamaları

Gazlaştırma işlemi boyunca ısı ve kütle transferleri gerçekleşmekte ve farklı fazlarda birçok kimyasal tepkimeler meydana gelmektedir. Gazlaştırma beş farklı termal süreçte gerçekleşir. Bu süreçler; Kuruma (kurutma), proliz, yanma (oksidasyon), karbonlaştırma ve indirgeme şeklinde sıralanabilir, Şekil 5. Bu işlemlerin tümü, bir kibriti yaktığınızda gördüğünüz alevde doğal olarak bulunur. Ancak kibritteki bu aşamalar, gazlaştırmanın gizemini henüz bilmeyen gözler tarafından görünmeyecek şekilde karışırlar. Gazlaştırma teknolojisi, bu "farklı işlemleri" birbirinden ayırmak ve izole etmek için kullanılan bir teknolojidir, Böylece, alevlenme kesilebilir ve elde edilen gazlar başka yerde kullanmak üzere bir kanal veya boruya gönderilebilir. Gazifikasyon prosesinde termo-kimyasal dönüşüm aşamaları gaz akışı boyunca sırasıyla aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 5. Gazifikasyon reaksiyon aşamaları

#### a) Kuruma (Kurutma)

Yakıt olarak kullanılan hammaddenin, gazlaştırma işlemine tabi tutulduğu ilk aşamasıdır. Gaz reaktörünün ilk reaksiyon bölgesi olan kuruma bölgesinde gerçekleşir. Bu bölgede, gazlaştırma reaktörüne yüklenen hammadde alt bölgelerden gelen yüksek ısı ile ısınır ve kuruyarak nemden kurtulur. Yakıtın yüzey neminin (kaba nem) yanı sıra gözenekli yapısındaki nemden (bağlı nem) de arınır. Yakma uygulamalarında kullanılan biyokütle genellikle %10-30 oranında neme sahiptir. Kömürde bu oran daha düşüktür. Standart uygulamalarda bölgedeki sıcaklık genellikle 100-150 °C arasındadır [13].

#### b) Piroлиз (Distilasyon)

Organik maddeler oksijensiz ortamda ısıtılırsa ortaya çıkan termal parçalanma sürecine piroliz adı verilir. Oksijensiz ortamda 500-600 °C'ye kadar yapılan ısıtmada; gaz bileşenleri, uçucu yoğunlaşabilen maddeler, mangal kömürü ve kül açığa çıkar. Daha yüksek sıcaklığa çıkıldığında ise gaz bileşenleri ve odun gazı açığa çıkar. Bu uçucu gazlar CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve su buharıdır. Uçucu gazların ayrılması ile kok (char) ve katran oluşur. Oluşan kok, yüksek oranda karbonla birlikte bir miktar kül içermektedir. Katran ise, içeriğinde katı



taneciklerden veya sıvı kısımdan duman şeklinde açığa çıkan ağır organik ve inorganik moleküller bulundurur. Uçuculardan arınan katı ve sıvı maddeler nispeten daha sıcak bölge olan yanma bölgesine hareket ederler.

#### c) Yanma (Oksidasyon)

Hammaddenin organik molekülleri karbon (C) ve hidrojen (H), kimyasal reaksiyonlar gereğince, okside olarak ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Bu reaksiyonlar oluşan ısının diğer bölgelere gönderildiği ekzotermik reaksiyonlardır. Reaktör içerisinde kalan kok ve katran oksijen ile tepkimeye girerek karbondioksit ve su buharına dönüşürler. Bu reaksiyonlar piroliz bölgesindeki reaksiyonlar ile karışmazlar. Yanma sonunda, içinde yanmayan inorganik minerallerin bulunduğu kül açığa çıkmaktadır. Bölgede sıcaklık 800-1200 °C arasındadır. Karbon ve hidrojenin oksidasyon reaksiyonları şu şekildedir;



#### d) Karbonlaştırma (Parçalama)

Yanmayan kok, indirgeme bölgesinde gazlaşmaya kadar aşağıya doğru hareket eder. Elde edilen gaz sentez gazıdır ve piroliz bölgesinde elde edilen gazlar ile aynı içeriktedir. Ancak yanabilir gaz miktarı artar, katran miktarı azalır. Mangal kömürü ise tamamen gaza dönüşür. Gaz-su buharı birleşme reaksiyonları 700 °C üzerinde oldukça iyidir ve bu sıcaklıkta H<sub>2</sub> üretilebilir. Ayrıca uygun bekleme zamanında 850 °C den daha yüksek sıcaklıklar için katran oldukça iyi bir şekilde parçalanabilir [38].

#### e) İndirgenme (Redüksiyon)

Organik maddelerin gazlaştırılmasında yaklaşık 500 °C sıcaklığa kadar olan süreç piroliz safhası olup burada; kok (char), gazlar (düşük ve orta ısıl değerde) ve katran elde edilir. Isıtma 1000 °C'ye kadar çıktığında karbon da su buharıyla tepkimeye girerek CO ve H<sub>2</sub> üretilir. Hammaddedeki değişken oksijen oranına bağlı olarak gazlaştırma işlemi için ilave oksijen girdisi değişkenlik gösterir. Su buharı ve karbondioksitin kok ile reaksiyonu şu şekildedir;



Gaz reaktörü içerisinde oluşan karbon monoksit ve hidrojene bağlı olarak bazı endotermik reaksiyonların olması mümkündür.



Reaksiyonlar sonunda üretilen gaz karışımı 300-400 °C arasında son halini alır ve reaktörün ilgili kısmından sistemden ayrılır. Eğer gaz ürün yeterli kalitede ise içten yanmalı motor (Internal Engine Combution-ICE) uygulamalarında ve gazlı elektrik jeneratörlerinde kullanılabilir. Tipik gazlaştırıcılarda, yanıcı gaz oranı %20-35 civarındadır ve ortalama 5 MJ/m<sup>3</sup> kalorifik değere sahiptir. Kullanılacak hammadde yakıtının nem miktarının %30'dan düşük olması bu tepkimelerin oluşumu bakımından önemlidir [36].

Gazlaştırma işlemi, katı kütlenin gaz haline getirilmesinin yanında reaksiyonlar öncesi ve sonrasında çeşitli şekillerde ve farklı uygulamaların yapılmasını gerektirir. Örneğin gazlaştırma öncesinde yakıtın koşullandırılması ve gaz üretiminden sonra gaz temizleme ve soğutma işlemleri, gazifikasyon prosesi için oldukça önemlidir. Şekil 6'da gazlaştırma öncesi ve sonrasını da kapsayan yakıt değerlendirme işlemleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 6. Gazlaştırma ürünü olarak gaz üretimi ve kullanımını akış şeması

### 1.4.3. Gazlaştırıcı Tipleri

Gazlaştırma teknolojisinin tanıtılmasında biyokütle veya kömür dönüşümü için geliştirilen çok farklı gazlaştırıcı tipleri vardır. Bunların çoğu, sıvı yakıt üretiminden ziyade sentez gazından ısı ve güç üretimi için geliştirilmekte ve ticari olarak kullanılmaktadır. Gazlaştırıcılarda, hammaddenin reaktöre giriş şekli ve içerideki hareketi değişiklik gösterebilir. Hammadde girişi üstten veya yandan olmakla birlikte reaktör içerisinde yerçekimi etkisiyle veya hava akışına göre hareket edebilmektedir. Oksidan olarak hava, buhar, oksijen veya karışımları kullanılabilir. Reaktör içerisinde gerekli ısı, iç kısımdaki kısmi yanma ile olur. Ancak bazı reaktör türlerinde dışarıdan da ısı verilmektedir. Gazlaştırıcıların uygulama basınçları da reaktöre göre farklılık gösterebilmektedir. Gazın faz durumuna göre gazlaştırıcılar, yoğun fazlı ve düşük fazlı olarak temelde iki tipte olmaktadır. Kısaca özetlemek gerekirse;

- Gazlaştırmada kullanılan oksidana göre; hava üflemleri, oksijen ve buharlı,
- Gazifikasyon ısısına göre; biokütlenin kısmi yanmasıyla sağlanır (*otothermal*) veya harici bir kaynaktan sağlanır (*allothermal*),
- Gazlaştırıcı basıncına göre; atmosferik veya basınçlı,
- Reaktörün tasarımına göre, sabit yatak, akışkan yatak, sürüklenmiş akış veya ikiz yataklı

olarak sıralamak mümkündür [39]. Bu sınıflandırmalara rağmen gazlaştırıcıları temel olarak beş kategoride değerlendirmek mümkündür [40]. Bunlar;

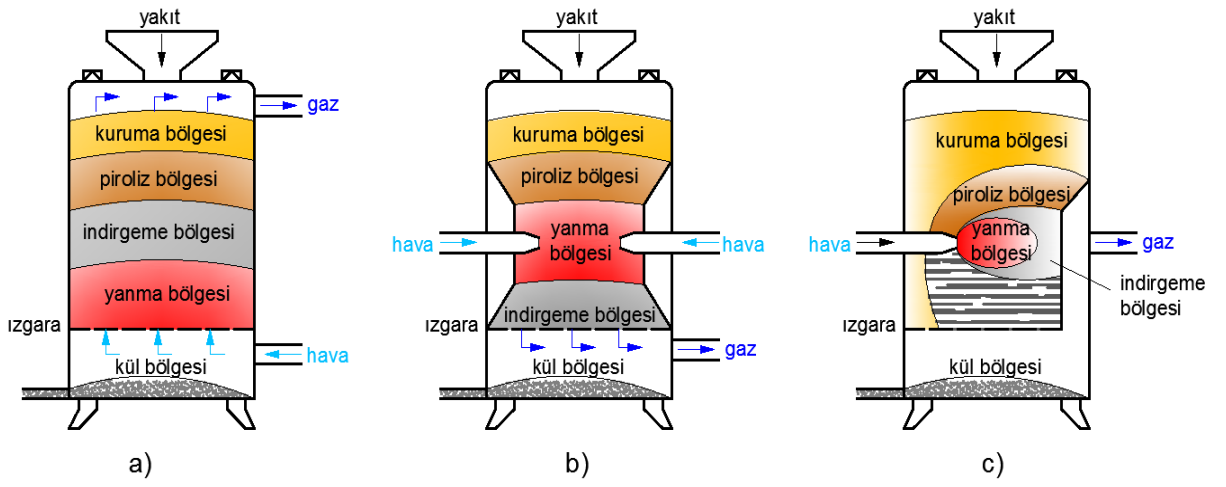
- Hareketli veya sabit yataklı gazlaştırıcılar
- Akışkan yataklı gazlaştırıcılar
- Sürüklemeli akışlı Gazlaştırıcılar
- Dolaylı gazlaştırıcılar
- Diğer özel gazlaştırıcılar

şeklinde sıralanabilir.

#### 1.4.3.1. Hareketli veya Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

Yoğun faz reaktörleri olarak değerlendirilen gazlaştırıcılardır. Bu tip gazlaştırıcılarda, reaktör içerisinde herhangi bir yatak malzemesi yoktur. Yalnızca hammaddenin kendisi

yatak malzemesini oluşturur. Reaktör iç kısmının çoğu hammadde ile doldurulur. Uygulama koşullarına bağlı olarak farklı tasarımları mevcuttur. Yatak içerisine ayrıca bir oksidan üflenerek reaksiyonların gerçekleşmesi sağlanır. Bu üfleminin akış yönü, reaktör tipini belirler. Akışın durumuna göre bu tipler; üstten akışlı, alttan akışlı ve karşıt akışlı gazlaştırıcılar olarak sıralanabilir. Havanın reaktöre girişi ve gaz çıkışına göre gazifikasyon reaksiyon bölgeleri ortaya çıkar. Bu bölgeler; kuruma, piroliz, yanma ve indirgeme bölgeleridir. Bu tip gazlaştırıcılarda, reaktörlerin bölgeleri ve gazın oluşumu Şekil 7’de görülmektedir.

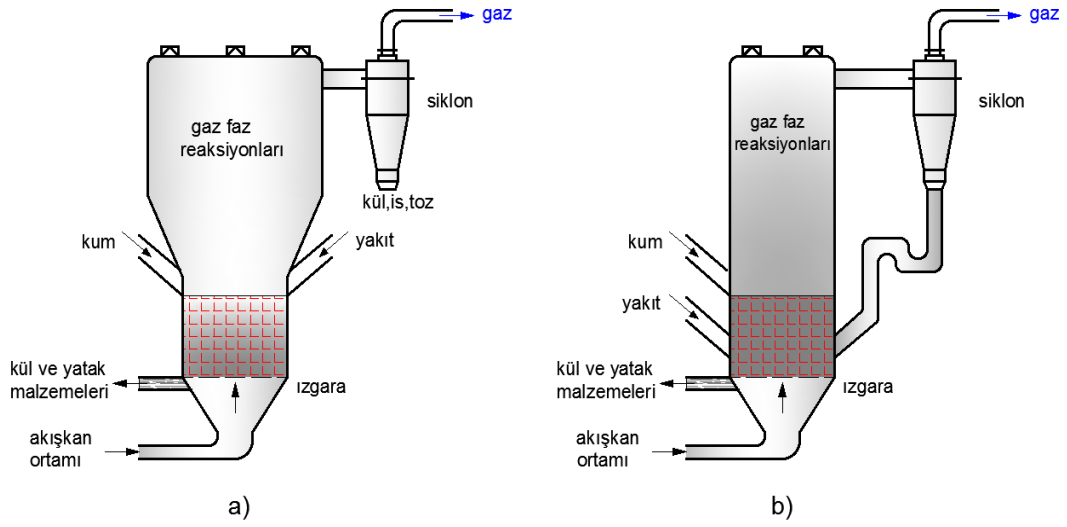


Şekil 7. Sabit yataklı gazlaştırıcılar a) Yukarı akışlı b) Aşağı akışlı c) Karşıt akışlı

#### 1.4.3.2. Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar

Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda, hammadde akışkan haldeki bir malzemenin (kum, kok vs.) bulunduğu bir yatağa getirilir. Yakıt, yoğunluk ve boyutuna bağlı olarak yatağın üst kısmından veya doğrudan yatak içerisine doldurulur. Normal bir uygulama için yatak ortamı 550 °C ile 1000 °C arasında bir sıcaklıkta tutulur. Bu sıcaklıkların altında yakıtın sisteme girmesiyle hızlı bir şekilde kuruma ve piroliz reaksiyonları gerçekleşir. Böylece yakıtın tüm gaz halindeki bölümleri nispeten daha düşük sıcaklıklara çekilir. Kalan kok, kurutma ve gazlaştırma reaksiyonlarının devamını sağlayan ısıyı üretmek için yatakta oksitlenir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar, yatak materyali ve biyokütle arasındaki aşınma fenomeninden ötürü sabit yüksek (800-1000 °C) yatak sıcaklığı sağlaması ile kısa sürede daha fazla ısı ürettikleri için yoğun faz reaktörlerinden daha iyidir. Akışkan yataklı

gazlaştırıcı, hava ile sürekli olarak çalkalanan kum parçacıklarının sıcak bir yatağı gibi çalışır. Hava, yatağın tabanında bulunan nozullar vasıtasıyla dağıtılır. Bu gazlaştırıcılar, dolaşimli ve kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılar olarak iki tiptedirler. Dolaşimli olanlar, genellikle hava veya oksijenin buhar ile karıştırılması ile oluşturulan oksidasyon ortamının yatak malzemelerini reaktörün bir bölümünden diğerine taşıması prensibine göre çalışırlar. Yatak malzemelerinin durağan olması ve gazın nispeten daha düşük hızda akması ise kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcıları çağırıştırır. Şekil 8'de akışkan yataklı gazlaştırıcıların farklı tipleri görülmektedir [41, 42].

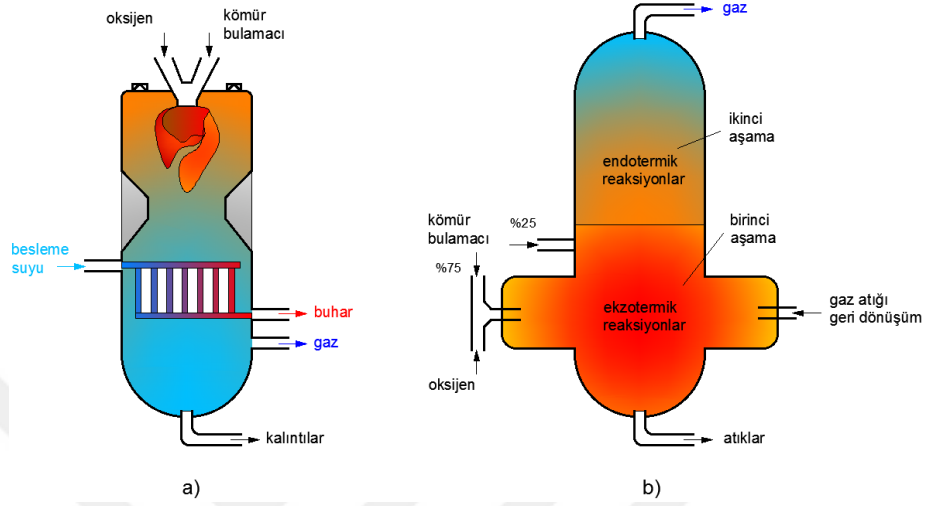


Şekil 8. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar a) Kabarcıklı b) Dolaşimli

### 1.4.3.3. Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırıcılar

Bu tip gazlaştırıcılarda, yakıt ve hava reaktörün üstünden yüklenir ve yakıt, reaktör içindeki havayla taşınır. Gazifikasyon sıcaklıkları, diğer gazlaştırıcılarda gerekenden daha fazladır. Çalışma sıcaklıkları 1200-1600 °C ve basınç 20-80 bar arasındadır. Reaksiyon zamanları ise oldukça kısadır. Kısa bekleme süresinden (0,5-4,0 saniye) dolayı, bu tür gazlaştırıcılar için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaktadır. Reaksiyon zamanının kısa olması nedeniyle yakıtın temas yüzeylerinin daha fazla olması gerekir. Yani yakıt çok iyi öğütülmeli veya sıvı halde olmalıdır. Kuru olduğu (düşük nemli) ve düşük kül içeriğine sahip olduğu sürece her tür yakıt için kullanılabilir. En büyük avantajı, üretilen gazın çok az katran içermesidir. Yüksek sıcaklık katran oluşum tepkilerini azaltır. Ancak sistemin küçük boyutlarda olması ekonomik olarak avantajlı değildir. Bu gazlaştırıcılar, Fischer-Tropsch

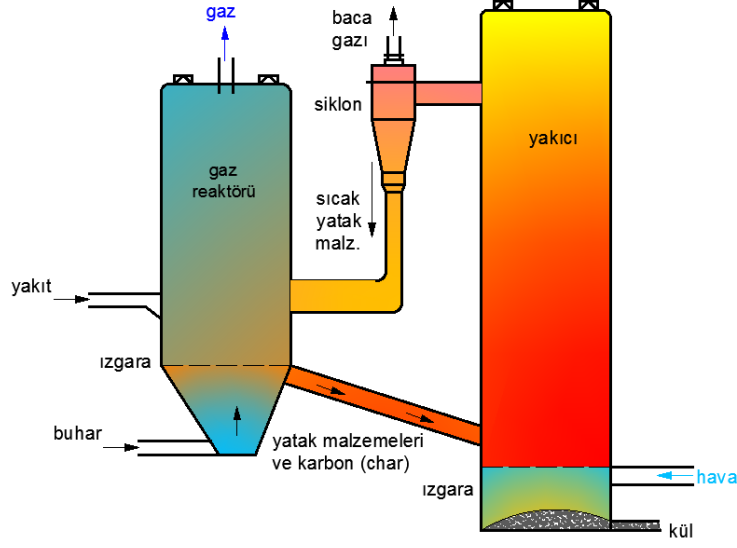
(FT) dizeli gibi biyolojik yakıtlar üretildiğinde beklenen yüksek H<sub>2</sub> ve CO seviyelerine sahip sonuçlar verir. Aşağı akış veya yukarı akış prensibine göre farklı tasarımlarda olabilirler. Bu gazlaştırıcıların en çok kullanılan iki tipi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar şematik gösterimleri a) Aşağı akışlı  
b) Yukarı akışlı

#### 1.4.3.4. Dolaylı Gazlaştırıcılar

Çift veya ikiz yataklı gazlaştırıcılarda, yanma ayrı bir reaktörde gerçekleşir ve oluşan ısı, sıcak yatak malzemelerinin dolaşımı ile gaz reaktörüne transfer edilir. Bu şekilde dolaylı gazlaştırma gerçekleştirilir. Yakıcıdan gelen sıcak yatak malzemeleri, gaz reaktörüne yüklenen yakıt ile sürekli temas halindedir ve termo-kimyasal sürekli reaksiyonlar sürdürülür. Bu tip gazlaştırıcıların farklı sürüm ve tasarımları mevcuttur. Tek kademeli buhar reformlu veya çift kademeli buhar reformlu şeklinde tasarımları mevcuttur. Bu tip gazlaştırıcıların avantajlarından biri, üretilen gazın azot içermemesi ve böylece ısıl değerinin yüksek olmasıdır. Bu tip gazlaştırıcılar için çalışma prensibi Şekil 10’den görülebilmektedir.



Şekil 10. Dolaylı gazlaştırıcı şematik gösterimi

#### 1.4.3.5. Diğer Özel Gazlaştırıcı Türleri

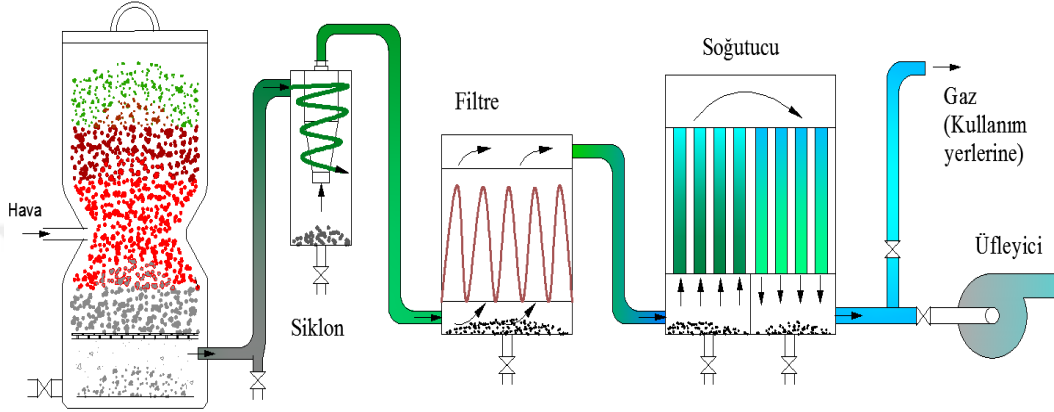
Kurulacak sitemin büyüklüğü, yakıtın cinsi ve üretilen gazın kullanım amacına uygun olarak farklı tiplerde çok sayıda gazlaştırıcı vardır. Akış hareketi, reaktör tasarımı ve sayısı, yatak malzemesi kullanılıp/kullanılmayacağı gibi temel faktörlerden yola çıkılarak üreticiler tarafından gazlaştırıcı çeşitliliği sağlanmaktadır. Bazı özel gazlaştırıcılar; Lurgi Kuru Kül Gazlaştırıcı, British Gas/Lurgi (BGL) Cürüflu Gazlaştırıcı, Mavi Kule, Siklon Gazlaştırıcı, Vidalı Gazlaştırıcı veya iki aşamalı Viking gazlaştırıcı, Döner Fırın, Carbo-V, Isı Borulu Gazlaştırıcılar, Plazma Gazlaştırıcılar, Termal Balastlı Gizli Isı Gazlaştırıcılar, Havayı ve Buharı Kullanan Çakılı Çakılı Yatak Gazlaştırıcı olarak sayılabilir.

#### 1.4.4. Gaz Soğutma ve Temizleme

Gazlaştırma sonucu üretilen gaz genellikle yüksek sıcaklıklardadır. Bu sıcaklık reaktör çıkışında normalde 300-400 °C arasındadır. Yüksek sıcaklıktaki bu gaz, enerji yoğunluğunu artırmak için soğutulmalıdır. Bu amaca ulaşmak için çeşitli soğutma teçhizatı kullanılmaktadır. Çoğu soğutucu, kullanılan ısı değiştiricinin dış yüzeyindeki havanın serbest taşınım ile soğutmanın yapıldığı gazdan havaya ısı aktarması şeklindedir. Gaz aynı zamanda nem ve katran içerdiğinden, bazı ısı değiştiricileri, gazın kısmen temizlenmesini

(scrubbing) sağlar. İdeal olarak, içten yanmalı bir motora giden gaz neredeyse çevre sıcaklığına kadar soğutulmalıdır.

Gazın temizlenmesi daha karmaşıktır ve gazın kullanımı için çok kritik öneme sahiptir. Normal bir temizleme sürecinde üç tip yüksek sıcaklık filtresi kullanılır. Bunlar, kuru, nemli ve ıslak filtreler olarak sınıflandırılırlar, Şekil 11.



Şekil 11. Gaz üretme ve koşullandırma işlemleri şematik gösterimi

Kuru filtreler, siklon filtreler olarak değerlendirilirler. Gaz üretim oranı ve toz içeriğine göre tasarlanırlar. Siklon içerisinde dönme hareketine zorlanan gaz ve parçacıklar, merkezkaç kuvvetlerin etkisiyle birbirinden ayrılır. Bu siklon filtreler, 5  $\mu\text{m}$  ve daha büyük parçacık boyutu için kullanışlıdır. Üretilen gazın %60-65'inde 60  $\mu\text{m}$  üzerinde parçacıklar bulunduğu için siklon filtre çok iyi bir temizleme aygıtıdır. 5  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük parçacıkların %90'a yakını bu şekilde temizlenebilir. Siklon filtreden geçtikten sonra gaz hala ince toz, partiküller ve katran içeriyor olabilir. Bu nedenle gaz, ilave bir sulu yıkayıcı filtre (wet scrubber) veya kuru bir bez filtresinden (cloth filter) geçirilerek temizlenmesi gerekir. Bu sulu gaz yıkayıcıda gaz, zıt akım modunda su ile yıkanır. Bu yıkayıcı, gazın son temizlik için bez veya mantar filtresine gönderilmesinde bir soğutucu vazifesi de görmektedir. Bez filtre, çok ince filtre olduğu için üzerinde yoğunlaşma olması halinde gaz akışı kesilir. Bunun nedeni içerisindeki basınç düşüşünün artmasıdır [43].

Katran, üretilen gazdan başlıca iki şekilde kaldırılabilir; bunlardan ilkinde damlacıklar formundaki katranın yoğunlaştırularak kaldırılması ve gaz fazındaki katranın bir çözücü ile emilmesidir. Diğer katranın termal parçalanma ile ayrılmasıdır. Islak yıkayıcıların (wet scrubber) kullanılabilmesi için gaz sıcaklığının 60  $^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük olması gerekir. Katran



hidrofobiktir ve suda çözünürlüğü düşüktür, bu da sadece aerosollerin (duman, is vs) ayrıldığını ima eder. Bazı çözücüler kullanılarak, gaz halindeki katran sıvı içinde çözülür ve gaz yıkama verimliliği artar. Termal parçalanma, katran seviyelerini düşürmenin başka bir yoludur. Büyük hidrokarbon molekülleri küçük parçalara ayrılır.

Katran oluşumu ve miktarı, temelde gazlaştırıcının çalışma koşullarından kaynaklanırken biyokütle hammaddesinin bileşiminden daha az kaynaklanır. Sülfür ve klor gibi katran içermeyen bileşenler için ise durum farklıdır. Dolayısıyla hammaddenin temel bileşimi gazlaştırıcının çıkışındaki temizleme için temel gereklilikleri belirler. Biokütledeki sülfür, esas olarak  $H_2S$  ve  $COS$  olarak ve sadece küçük parçacıklar halinde organik sülfür olarak salınmaktadır. Temizleme işlemlerinde sülfür bazen  $COS$  ve  $H_2S$  birlikte kaldırılırken, bazı durumlarda ise  $COS$  'un  $H_2S$ 'e dönüştürülmesi gerekir [43, 44].

#### 1.4.5. Ürün Gazının Özellikleri

Gazifikasyon biyokütle kullanımı için önemli bir teknolojidir. Farklı kimyasal ürünler üretmeye ilave olarak farklı türdeki hammaddelerin kullanımında da oldukça esneklik sağlar. Prensipte olarak her türlü biyokütle gazifikasyon ile sentez gazına dönüştürülebilir. Sentez gazı esas olarak hidrojen, karbon monoksit, karbon dioksit ve metan içermektedir. Bu gazdan farklı kimyasalların yanı sıra her türlü enerji veya enerji taşıyıcıları (Isı, Güç, Biyoyakıt, Hidrojen, Biyometan) sağlanabilir. Mevcut biyokütle kaynaklarının kullanımı yüksek verimlilik ve sürdürülebilirliği gerektirir. Neredeyse tüm karbonlu madde veya biyokütle yakıtları deneysel veya laboratuvar koşulları altında gaz haline getirilebilir. Ancak, biokütlenin % 20 ila % 40 arasındaki stokiometrik oranda hava ile yakılarak yanıcı gaz üretmenin yanında, bu yanıcı gazın aynı zamanda ekonomik açıdan cazip olabilmesi ve sürekliliğinin sağlanabilmesi önemlidir. Bu nedenle hammadde yakıtın özelliklerinin iyi belirlenmeli ve ona göre gazlaştırma yapılmalıdır. Yakıtın özelliğine göre gazlaştırıcı geliştirilmesi gerekir.

Genel ortalama olarak, 1 kg biyokütle, standart sıcaklık ve basınçta (0 °C, 1 Atm) yaklaşık 2,5 m<sup>3</sup> gaz ürün üretir. Bu proseste, yanma için yaklaşık 1,5 m<sup>3</sup> hava tüketilebilir. Odunun tam yanması için ise yaklaşık 4,5 m<sup>3</sup> havaya ihtiyaç vardır. Bu yüzden, biyokütle gazifikasyonu, odunun yakılması için gereken teorik stokiometrik oranın yaklaşık %33'ünü tüketir [45].

Bir başka değerlendirmeye göre [37]; Tam yanma için, 1 birim tam kuru (%0 nem) bioktleye yaklaşık 4,58 birim hava gerekir. Buna stokiyometrik hava denir. Gazlaştırma reaksiyonları için, alışılmış uygulama, eşdeğerlik oranı olarak adlandırılan stokiyometrik havanın belirli bir oranının sağlanması şeklindeyir. Kuru biyokütle ile gazlaştırmada en iyi sonuç normal şartlar altında yaklaşık 0.25 ER'lerde ve standart uygulamalarda 0.20-0.33 "tipik" bir aralıkta elde edilir. Bu nedenle, normal gazlaştırma için 1 birim biyokütle yaklaşık 1,5 birim hava gerektirir.

#### 1.4.5.1. Uçucu Gaz İçeriği

Gazlaştırma işleminde üretilen gazın koşullandırılması sonucu içeriğinde bulunan uçucu maddeler çoğunlukla CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> olmaktadır. Gaz içeriği, kullanılan hammadde türlerine ve uygulanan çeşitli proseslere göre farklılık göstermektedir. Tasarlanan gazlaştırıcı türüne göre de gaz içeriği değişiklik gösterebilir. Aynı yakıtın iki farklı gazlaştırıcıda kullanılmasıyla elde edilen gazın içeriğinin farklı olması oldukça sık görülür. Farklı yakıtlardan üretilen gaz içerikleri Tablo 4'te görülmektedir. Maksimum gaz seyreltmesi, gaz içeriğinde azotun olması nedeniyle gerçekleşir. Azot, üretilen gaza oksidan olarak hava kullanılmasıyla karışır. Gazın neredeyse %50-60'ı yanıcı olmayan azottan oluşabilir. Bu nedenle, gazlaştırma için havanın yerine oksijen kullanmak faydalı olabilir. Bununla birlikte, oksijenin maliyeti ve bulunabilirliği bu açıdan sınırlayıcı bir faktör olabilir.

Tablo 4. Bazı yakıtlara göre gaz ürün içerikleri ve kalorifik değerleri

Yakıt	Gazlaştırma yöntemi	Uçucu madde hacimsel oranı					Kalorifik değer [MJ/m <sup>3</sup> ]	Ref.
		CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
Mangal kömürü	Alttan akışlı	28-31	5-10	1-2	1-2	55-60	4,6 -5,65	[46]
Mangal kömürü	üstten akışlı	30	19.7	-	3.6	46	5,98	[46]
Odun (nem oranı %12-20)	Alttan akışlı	17-22	16-20	2-3	10-15	55-50	5-5,86	[46]
Hindistan cevizi kabuğu	Alttan akışlı	19-24	10-15	-	12-14	-	7,20	[46]
Fındıkkabuğu	Alttan akışlı	8-21	11-15	1-3	9-17	53-60	5,15	[38]
Mobilya atığı+kömür	Alttan akışlı	21-27	12-16	1-3	10-16	44-48	5,62	[12]
Mobilya atığı	Alttan akışlı	15-25	5-15	1-3	5-15	60-70	6,34	[35]
ay atığı	Alttan akışlı	17,9	36,5	6,1	35,2	-	-	[47]

Gazifikasyon prosesinde üretilen gazın içeriği, biyogaz üretim sistemlerindeki nihai gazdan içerik bakımından oldukça farklıdır. Biyogaz üretiminde başlıca yanıcı gazlardan biri metan olmasına rağmen söz konusu proses için metan gazı oluşumu düşüktür. Çamur gibi atıklardan yapılan gazlaştırma işlemlerinde bu oluşum nispeten daha fazla olabilir. Ancak başlıca yanıcı gazlar karbon monoksit ve hidrojen olmaktadır. Bu nedenle, bu iki farklı teknolojinin birbiriyle karıştırılmaması gerekir.

#### 1.4.5.2. Gaz Verimi

Gazifikasyon biokütle kullanımında yüksek potansiyel ve daha yüksek proses verimi sunmaktadır. Biyokütle gazifikasyonu, biyokütle içerisindeki karbonun yüksek sıcaklıkta ve hava, buhar veya saf oksijen gibi bir oksidan kullanılarak kısmi oksidasyonu ile gerçekleştirilir. Elde edilen sentez gazının kompozisyonu ve özellikleri, biyokütle hammaddesine, gazlaştırıcının tipine ve uygulama koşullarına bağlıdır. Prensipten olarak gazlaştırma metodu ve prosesine bağlı olarak düşük (4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>), orta (12-18 MJ/Nm<sup>3</sup>) ve yüksek (18-40 MJ/Nm<sup>3</sup>) kalorifik değere sahip gaz üretilebilir [48]. Bu koşullar oksidan kullanımı, sıcaklık ve gazlaştırıcıda beklenen süre olarak farklılık gösterebilir. Hava ile yapılan gazifikasyon, genellikle 4-7 MJ/m<sup>3</sup> ısı değerine sahip gaz üretimi sağlarken, oksidan olarak saf oksijen veya buhar kullanımı ile önemli ölçüde daha yüksek kalorifik değerde (10-18 MJ/m<sup>3</sup>) gaz üretimi sağlamaktadır [11, 49]. Hidrojen ve hidrojenasyon ile 40 MJ/Nm<sup>3</sup> kalorifik değerde gaz üretilebilir [48]. CH<sub>4</sub>'den daha büyük hidrokarbonların sentez gazı içerisinde bulunma oranları çok düşük olduğu için genellikle dikkate alınmaz. Biyokütle gazlaştırılmasında elde edilen gaz için alt ısı değeri (*LHV*) aşağıdaki bağıntı ile belirlenmektedir.

$$LHV_{gaz} = (25,7H_2 + 30CO + 85,4CH_4) \times \frac{4,2}{100} \quad (18)$$

Gazlaştırma sonucu elde edilen gaz, sisteme verilen oksidan (hava, saf oksijen veya buhar) ve tüketilen yakıt miktarlarının karşılaştırılması ile gaz üretim verimi belirlenebilir. Hava ile yapılan işlemler için bu hesaplama denklemi (20) kullanılarak yapılmaktadır [50].

$$\text{Gaz üretim verimi } (V_{gaz}) = \left( \frac{Q_{hava} \times 79}{N_2 \times m_{yakıt}} \right) \quad (19)$$

Burada,  $Q_{hava}$ , sisteme verilen havayı ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ) ve  $m_{yakıt}$ , yüklenen yakıtı ( $\text{kg/h}$ ) temsil etmektedir.  $V_{gaz}$  ise gaz üretim verimini ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$  yakıt) gösterir. Biokütle gazlaştırıcılarda ortalama enerji dönüşüm verimi yaklaşık %60-70 arasındadır. Üretilen gazın ve hammadde yakıtın kalorifik değerleri gaz dönüşüm verimini verir. Tablo 4'te farklı yakıtların gazlaştırılması sonucu elde edilen kalorifik değerler görülmektedir. Gaz verimi, aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\text{Soğuk gaz verimi } (\eta_{Gaz}) = \frac{LHV_{gaz} \times V_{gaz}}{LHV_{yakıt}} \times 100 \quad (20)$$

Hesaplanan soğuk gaz verimi ve kalorifik değer ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ) prosesin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Örneğin; 1 kg odunun gazlaştırılması sonucu yaklaşık  $5,4 \text{ MJ}/\text{m}^3$  kalorifik değerde  $2,5 \text{ m}^3$  gaz üretildiği düşünülürse, verim;

$$\eta_{Gaz} = \frac{2,5 (\text{m}^3) \times 5,4 (\text{Mj}/\text{m}^3)}{19,8 (\text{Mj}/\text{kg}) \times 1 \text{ kg}} = 0,68 (\%68) \quad (21)$$

olarak bulunur. Burada, odun için kalorifik değer  $19,8 \text{ MJ}/\text{kg}$  olarak alınmıştır [46].

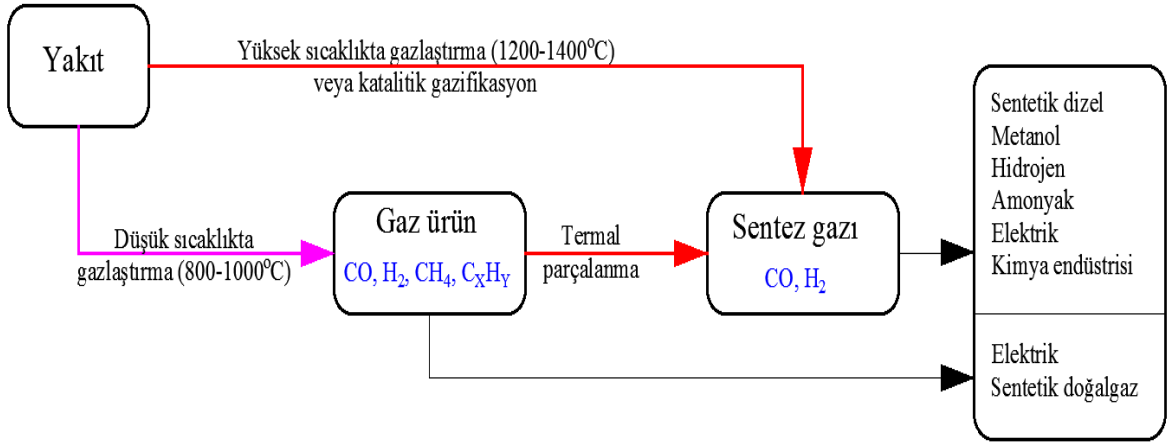
### 1.4.5.3. Gaz Sıcaklığı

Üretilen gaz, reaktörü terk ederken ortalama  $300\text{-}400^\circ\text{C}$  sıcaklığa sahiptir. Bu sıcaklıktaki gaz yakıt olarak kullanılmadan önce soğutma işlemine tabi tutulur. Reaktör çıkışında gaz sıcaklığın yüksek olması ( $\sim 500^\circ\text{C}$ ), reaktör içerisinde gaz içeriğinin kısmen yandığının göstergesidir. Bu durum genellikle reaktör boyunca belirlenen akış oranının üzerine çıkılmasıyla gerçekleşir.

#### 1.4.5.4. Gaz Ürün ve Sentez Gazı Arasındaki Fark

Gaz ürün, nispeten düşük sıcaklıklarda (700 °C ila 1000 °C) biokütle gibi organik materyalin gaz haline getirilmesiyle üretilen gaz karışımlarıdır. Bu gaz, karbon monoksit (CO), hidrojen (H<sub>2</sub>), karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve tipik olarak havadan gelen azot ile birlikte metan (CH<sub>4</sub>) gibi bir dizi hidrokarbondan oluşur. Bu gaz karışımı, ısı üretiminde kazan gibi bir yakıcının gaz yakıtı olarak, elektrik üretiminde veya kombine ısı ve güç (CHP) üretiminde bir içten yanmalı motorun gazı olarak yakılabilir. Gazın bileşimi, gazlaştırma parametrelerinin manipülasyonu ile değiştirilebilir [37].

Sentez gazı ise, biyokütle gibi organik materyallerin yüksek sıcaklık buharı veya oksijenin gazlaştırılması sonucu ortaya çıkan karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) karışımıdır. Üretilen bu gaz, içeriğindeki katran gibi yabancı maddelerin temizlenmesinden sonra sentetik doğal gaz gibi organik moleküller veya sentetik dizel gibi (Fischer-Tropsch sentezi yoluyla) sıvı biyoyakıt üretmek için kullanılabilir. Şekil 12, gaz ürün ve sentez gazının üretim ve kullanım alanlarına göre şematik gösterimidir [51].



Şekil 12. Gaz ürün ve sentez gazı farkı ve tipik uygulamaları

Her iki gazın da, nihai uygulama için doğru kompozisyon ve özelliklere sahip olması için ilave gaz temizleme ve şartlandırmaya ihtiyacı vardır. Bununla birlikte, sentez gazı kullanımının uzun vadede baskın olması beklendiğinden, sentez gazı uygulamaları üzerine odaklanılması beklenmektedir. Elektrik üretiminde başka yenilenebilir seçenekler (yani güneş PV ve rüzgâr türbinleri) mevcuttur. Ancak biokütle tek yenilenebilir karbon kaynağıdır.

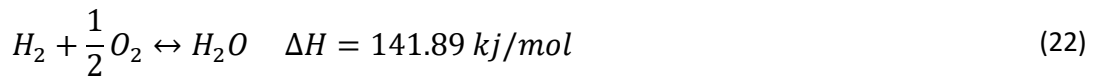
Biyolojik atıklar, çiftlik ürünleri, yaş biokütleler gibi katıların biyogaz üretim tesislerinde anaerobik fermantasyonu ile elde edilen gaz ise biyogaz olarak değerlendirilmektedir. Bu süreç, gazifikasyon ve piroliz işlemlerinden farklı olarak işlemektedir. Biyogaz üretimindeki bakteriyel oluşumların yerine bu işlemlerde termal parçalanmalar vardır [52].

### 1.5. Gazifikasyon Prosesinin Termodinamik İncelemesi

Biokütle gazlaştırma işleminde yapılan teorik incelemeler, özellikle yüksek sıcaklık dönüşümünün doğasını anlamak, sürecin kimyasını bilmek ve termodinamik kanunların değerlendirilmesi bakımından yararlıdır. Kütle, enerji ve ekserji dengeleri dâhil olmak üzere gazlaştırma sürecini anlamak için gerekli bazı termodinamik temellerin bilinmesi gerekir. Aynı zamanda bir gazlaştırma sisteminin termal analizinde kullanılan denklemlerin türevlerinin elde edilmesi ele alınmaktadır.

#### 1.5.1. Hidrojen ve Oksijenin Yanması

Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen gazifikasyon reaksiyonlarında gaz fazındaki oksijen ve hidrojen ısı kaynağı, oksitleyici ve su-gaz değişim reaksiyonları için kullanılır. Bu gazlar, tutuşma bölgesine ayrı ayrı enjekte olur. Hidrojenin yanması sonucu oluşan buhar gazifikasyon reaksiyonlarını devam ettirmek üzere, biyokütle ile reaksiyona girer. Biyokütle gazifikasyon kimyasının yanında, hidrojen yanma kimyasını da kullanarak gazifikasyon uygulama koşullarının kontrolü sağlanabilir.



Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan ısı, piroliz ve kuruma bölgelerindeki endotermik reaksiyonlar için kullanılır.

### 1.5.2. Enerji Analizi

Termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu kanuna göre, yalıtılmış bir sistemdeki toplam enerji miktarı artırılmaz veya yok edilemez. Bu durumda sistemin kontrol kütlesi için enerji dengesi şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (23)$$

$$\delta Q = dU - \delta W \quad (24)$$

Genel kontrol hacminde birinci kanun şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) \quad (25)$$

Kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edildiği kararlı hal durumu için denklem düzenlenirse;

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W} \quad (26)$$

### 1.5.3. Ekserji Analizi

Termal sistemlerin tasarımı ve analizinde ekserji analizi önemlidir. Enerji analizinden farklı olarak ekserji analizinde birinci kanun ile birlikte ikinci kanun da değerlendirilir. Böylece enerjinin niteliğiyle beraber niceliğinin de hesaba katılması söz konusudur. Ekserji analizinde, fiziksel, kimyasal, potansiyel ve kinetik enerjilerin dikkate alınması gerekir.

$$E = E_F + E_{KM} + E_K + E_P \quad (27)$$

Burada  $E_F, E_{KM}, E_K$  ve  $E_P$ , sırasıyla fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserjileri temsil etmektedir. Birim kütle için ifade şu şekilde yazılabilir;

$$e = e_F + e_{KM} + e_K + e_P \quad (28)$$

$$e = e_F + e_{KM} + \frac{1}{2}V^2 + gz \quad (29)$$

### 1.5.3.1. Fiziksel Ekserji ( $e_F$ )

Fiziksel ekserji, sistem  $T$  ve  $P$  basıncındaki başlangıç durumundayken çevresel durumla ( $T_0 = 298,15$  K,  $P_0 = 1$  atm) dengesine ulaştığı termal ve mekanik enerji alışverişiyle çıkarılabilecek maksimum iştir.

$$E_F = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (30)$$

Birim kütle için;

$$e_F = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (31)$$

Enerji denge denklemi:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_g e_g - \sum_e \dot{m}_e e_e - \dot{I} \quad (32)$$

Bu durumda toplam ekserji transferi şu şekilde yazılabilir;

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{1}{2}V^2 + gz + e_{KM} \quad (33)$$

Bu durumda fiziksel ekserji;

$$e_F = (h - T_0s) - (h_0 - T_0s_0) \quad (34)$$

şeklinde elde edilir.



### 1.5.3.2. Kimyasal Ekserji ( $e_K$ )

Maddenin sıcaklık, hız, basınç ve yüksekli bakımından çevresiyle dengeye gelmesinin yanı sıra referans maddelerin kimyasal konsantrasyonu bakımında da dengeye gelmesi durumunda sistem ölü durum olarak isimlendirilir. Sözü edilen referans maddeler, atmosferdeki gaz bileşenleri, okyanuslardan gelen iyonik ve iyonik olmayan maddeler ve litosferdeki katı maddelerdir. Kimyasal ekserji, maddenin çevresel durumdan ölü duruma getirilmesiyle elde edilebilecek maksimum iştir.

Bir k gazı için kimyasal ekserji;

$$\bar{e}_{KM,k} = -\bar{R}T_0 \ln \frac{x_k^e P_0}{P_0} \quad (35)$$

şeklindedir. Burada,  $x_k^e$  karışım içerisindeki her bir gazın sahip olduğu ekserjidir. Bu durumda karışımın birim molü için kimyasal ekserji;

$$\bar{e}_{KM} = -\bar{R}T_0 \sum x_k \ln \frac{x_k^e}{x_k} \quad (36)$$

olur. Son iki eşitliği topladığımızda kimyasal ekserji şu şekilde bulunur;

$$\bar{e}_{KM} = \sum x_k \bar{e}_{KM,k} + \bar{R}T_0 \sum x_k \ln x_k \quad (37)$$

Burada, eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim molar fraksiyonundaki saf elementin ekserji toplamıdır. İkinci terim ise aslında tersinmezliğin kaynağı olan elementlerin karışımıdır ve daima negatiftir.

### 1.5.4. Kütle Dengesi

Gazifikasyon sürecinde sisteme sokulan ve sistemden alınan kütlelerin belirlenmesi sonucu sistemin değerlendirilmesi yapılır. Sisteme ilave edilen yakıt ile birlikte herhangi bir oksidan (hava, buhar, saf oksijen) kütlesi giren kütle olarak değerlendirilirken üretilen gaz

ile birlikte kalan atıklar (katran, kül vs.) çıkan kütleler olarak hesaba katılır. Böylece gazifikasyon prosesi için kütlenin korunumu uygulanabilir.

$$\sum M_{Giren} = \sum M_{Çıkan} \quad (38)$$

Daha açık yazarsak;

$$M_{Giren,yakıt} + M_{Giren,Oksidan} = M_{Çıkan,gaz} + M_{Çıkan,atık} \quad (39)$$

### 1.5.5. Enerji Dengesi

Gazlaştırma prosesinin değerlendirilmesinde enerjinin korunumu kanunu uygulanarak enerji dengesi sağlanır. Kararlı durumda kinetik ve potansiyel enerjilerin ihmal edilmesiyle sabit kontrol hacminde termodinamiğin birinci kanunu şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{Q} + \sum_g \dot{m}_g h_g = \sum_{\zeta} \dot{m}_{\zeta} h_{\zeta} \quad (40)$$

Toplam giren ve çıkan kütlelerin enerjileri daha açık halde aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\sum_i \dot{m}_g h_g = \dot{m}_y h_y + \dot{m}_h h_h \quad (41)$$

$$\sum_e \dot{m}_{\zeta} h_{\zeta} = \dot{m}_a h_a + \dot{m}_{H_2} h_{H_2} + \dot{m}_{CO} h_{CO} + \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} + \dot{m}_{CH_4} h_{CH_4} + \dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} \quad (42)$$

Burada “y”, “h” ve “a” indisleri sırasıyla yakıt, hava ve atıkları temsil etmektedir. Diğer indisleri ise üretilen gaz karışımındaki ilgili gazları ifade etmektedir.

### 1.5.6. Karbon Dönüşüm Verimi

Karbon dönüşüm verimi, işlem sırasında reaksiyona giren katı karbonun ( $C$ ) mol sayısı ile biokütledeki katı karbon mol sayısı arasındaki oran olarak tanımlanır:

$$\eta_C = \frac{(n_{C,yakıt} - n_{C,gaz})}{(n_{C,yakıt})} \times 100 \quad (43)$$

Karbon dönüşüm verimi, gazlaştırma işlemi sırasında katı biokütleyi gaz formuna dönüştürmenin etkinliğini gösterir.

### 1.5.7. Termal Verim

Biyokütle gazlaştırma sistemi için termal verimlilik, üretilen gaz karışımının entalpisinin biokütle ve oksidanın entalpileri ile bölünmesi sonucu bulunur.

$$\eta_{tv} = \frac{H_{gaz}}{H_{yakıt} + H_{oksidan}} \times 100 \quad (44)$$

### 1.5.8. Ekserji Verimi

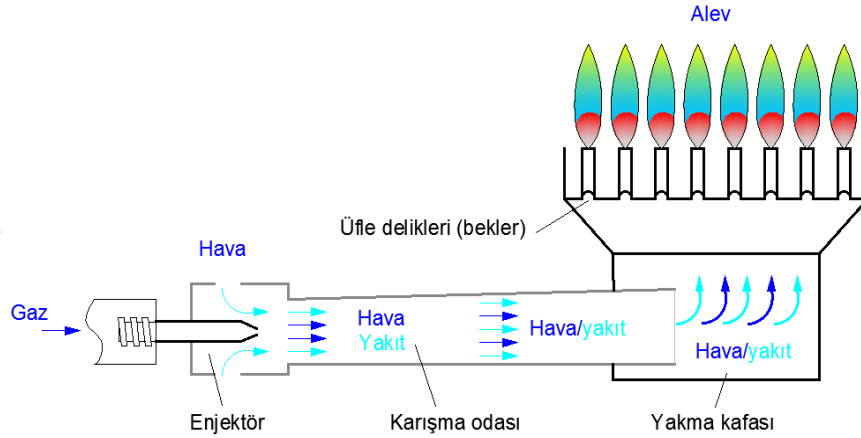
Biokütle gazlaştırma sistemi için ekserji verimi, üretilen gazın ekserjisinin biyolojik kütle ve oksidanın ekserjisi ile bölünmesiyle bulunur.

$$\eta_{Eks} = \frac{Eks_{gaz}}{Eks_{yakıt} + Eks_{oksidan}} \times 100 \quad (45)$$

## 1.6. Gaz Yakıcılar

Farklı gazların karışımından meydana gelen sentez gazı, ısı üretmek amacıyla bir yanma odasında yakılabilir. İçten yanmalı gaz motorlarında elektrik üretiminde yakıt olarak kullanılabilir. Veya birleşik ısı ve güç santrallerinde tüketilmek üzere ana yakıt olarak değerlendirilebilir. Sentez gazı, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) veya doğalgaza nispeten

daha düşük kalorifik değere sahiptir. Fakat pek çok uygulamada duman salınımı olmadan yüksek verimde ve iyi kontrol derecesiyle yakılabilir. Gaza özel yakıcı tasarlanabilmesi için üretilen gazın içeriği, yoğunluğu ve kalorifik değerinin bilinmesi gerekir. Yakıcılar için temel bileşenler enjektör, hava/gaz karışım odası ve brülör üzerindeki yakıcı potlardır (gaz püskürtme delikleri). Enjektör, hava/gaz karışım odasına giren ve üfleme yapan nozul (meme) yapısındadır. Hava/gaz karıştırma odası yanmanın olduğu brülör kafasına bağlıdır (Şekil13). Brülör kafasında, gazın tutuşabileceği püskürtme delikleri bulunur. Gazın yanması, enjektörün karışım odası içine veya dışına doğru hareketi ile ayarlanır. Bu hareket ile karışma odasına giren hava miktarı ayarlanmış olur. Enjektör, karışma odasında derinlere hareket ederse oksijenin brülöre sürüklenmesi azaltılarak yanma azaltılmış olur. Ters durumda yani enjektörün karışma odasından uzaklaşması halinde ise brülöre daha fazla oksijen taşınacağı için yanma artırılmış olur.



Şekil 13. Gaz yakma brülörü temel yapısı

Brülör, teorik bir karışıma yaklaşan bir hava/gazı oranında yüksek sıcaklıkta küçük bir alev ürettiği için yüksek hava/gaz oranında çalışabilir olmalıdır. Brülörün tüm bölümlerinde alevin üniform bir yükseklikte olması gerekir, böylece ısı dağılımı tekdüze olacaktır. Alevin karışma odasından geri gelmemesi ve patlamaması gerekir.

Üretilen gaz ürünün veya sentez gazının kullanımının temel ön şartı, özel olarak tasarlanmış gaz brülörlerinin olması veya mevcut gaz yakıcıların bu gaza uygun olarak değiştirilmesidir. Farklı yöntemler kullanılarak üretilen her gaz için özel yakma sistemlerinin geliştirilmesi gerekir. Hatta aynı yöntem ve sistemde üretilen gaz için kullanılan basınç, sıcaklık ve kalorifik değer gibi özelliklerinin gaz yakıcıların

belirlenmesinde hesaba katılması gerekir. Çoğu gaz uygulamalarında sistemin kilit elamanı gaz yakıcılar olmaktadır. Bu uygulamalarda genellikle hava/gaz yakıt ön karışımı sağlayan atmosferik tipte gaz yakıcılar tercih edilmektedir. Akışkan reaksiyon kinetikleri ve karmaşık koşullar nedeniyle, gaz brülörlerinin önceden kesin olarak belirlenmesi oldukça zordur [53]. Bu yüzden nihai tasarım ve ayarlamaların deneysel olarak gerçekleştirilmesi gerekebilir. Diğer gazlarla karşılaştırıldığında, sentez gazının yanması için daha az havaya ihtiyacı vardır. Bu nedenle, geleneksel gazlı ev aletleri, sentez gazının yakılması için kullanıldığında daha büyük gaz üfleme deliklerine (bek) ihtiyaç duyulur. Örneğin, bir litre sentez gazının tamamen yakılması için yaklaşık 5-6 litre hava gerekirken, bütan için 30,9 litre ve propan için 23,8 litre hava gereklidir.

Gazifikasyon yöntemiyle elde edilen sentez gazının yanma özellikleri, bireysel ısıtma ve pişirme cihazların için yakıcıların belirlenmesinde kilit öneme sahiptir. Temelde sentez gazı, içerdiği gaz karışımları ve hidrojen miktarı, kalorifik değeri, katran ve diğer içerikler bakımından LPG ve doğalgaza göre önemli farklılıklara sahiptir. Bu farklılıklar nedeniyle mevcut gaz yakma sistemlerinde kullanılmasında önemli tutuşma problemleri, yanma kararsızlıkları, emisyon kontrolü ve kirlenmeler gibi zorluklar ortaya çıkabilir. Bu nedenle üretilen gazın özelliklerine uygun gaz/hava karışım odasına ve üfleyicilere sahip yakıcılar (brülör veya bekler) geliştirilmesi gerekir [54]. Ya da bu problemler, mevcut cihazların bu kısımlarında bazı değişikliklerin yapılması ile çözülebilir. Şekil 14’de bazı gaz yakma brülörleri gösterilmiştir [55].



Şekil 14. Bazı gaz yakma brülörleri

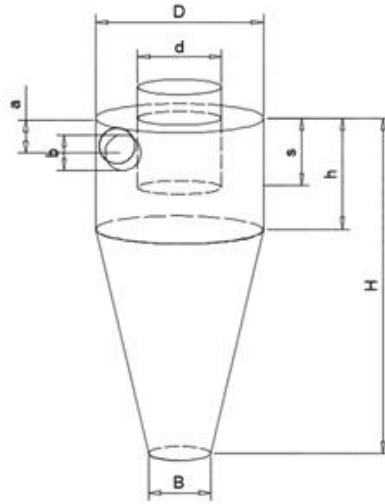
### 1.7. Siklon

Siklonlar, gaz-katı karışımları için yaygın olarak kullanılan en uygun ayırıcılardandır. Gaz karışımının akışında basınç ve hız parametrelerinin değerlendirilmesi optimum koşulları belirlemede önemli olmaktadır. Stairmand tarafından yapılan bir dizi deneyler sonucunda siklon ayırıcılar için en uygun geometrik oran belirlenmiştir. Şekil 15’de verilen siklon geometrisi için en uygun geometrik oranlar Tablo 5’ten görülmektedir.

Siklon içerisindeki katı parçacıklar gazın helisel hareketi sonucu siklonun dibine itilir. Genellikle yüksek sıcaklıktaki gazlar yukarı hareket ile doğal veya zorlanmış akış sayesinde siklonun üst kısmından çıkar.

Tablo 5. Stairmand tasarımında kullanılan siklon geometri için en uygun oranlar [56, 57]

Geometri	d/D	s/D	h/D	H/D	a/D	b/D	B/D
Stairmand yüksek verim siklon ölçüğü	0,5	0,5	1,5	4	0,5	0,2	0,375



Şekil 15. Siklon geometrisi

Diferansiyel kontrol hacmindeki akışkan parçacığı için kütle korunumu kanununu tarif eden süreklilik denklemi yazılabilir. Benzer şekilde, hareketli akışkan parçacığına Termodinamiğin Birinci Kanunu uygulanarak enerji denklemi üretilebilir. Bu çalışma

Bharath Raj Reddy Dere ve Ark. [56] tarafından yapılmış ve sonuçlar denklem 42 ve 43'te verilmiştir.

Süreklilik denklemi;

$$\left[ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \right] \quad (46)$$

Enerji denklemi;

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = K \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (47)$$

Burada,  $\rho$ ,  $u$  ve  $C_p$  akışkan parçacığının sırasıyla yoğunluk, hız ve özgül ısısını temsil etmektedir.  $K$  ise ısı transfer katsayısını göstermektedir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Gazifikasyon işlemlerinde hammadde yakıtın türüne bağlı olarak reaktör tipinin ve boyutlarının belirlenmesi önemlidir. Farklı hammaddelerin yakıt olarak kullanılabilmesi reaktör geliştirilmesi, bölgesel ve ekonomik koşullar nedeniyle bu tip sistemlerin kullanımını daha yaygın hale getirecektir. Bununla birlikte, gazifikasyon prosesi için önemli olan reaktör içerisinde nispeten daha yüksek sıcaklıklara ulaşılması, sistemin ve üretilen gazın verimini iyileştirmede doğrudan etkiye sahiptir. Bu etkinin yenilenebilir enerji kaynağı olan güneşten sağlanması ekonomik açıdan faydalı olacaktır. Böylece, biyokütle kaynaklarının daha verimli kullanımı sağlanacaktır. Güneş çanağı kullanılarak güneş enerjisinin reaktörün oksidasyon bölgesinde yoğunlaştırılması ile bu faydanın sağlanması mümkündür.

Bu amaçla, tüm çalışmalar K.T.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü Termodinamik Laboratuvarında yapılmış olup, pilot tesis burada kurulmuştur. Reaktör, siklon ve filtreleme ünitesi imalatı tamamlandıktan sonra gaz emme fanı ve diğer aparatlar bağlantı parçaları ile birleştirilerek sistem hazır hale getirilmiştir. Gerekli ölçüm ve test aletleri de sisteme ilave edildikten sonra yakıt hazırlama işlemlerine geçilmiştir. Sisteme giren ve sistemden çıkan tüm ürünlerin ölçme ve kontrolü sağlanarak bir bütün olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Farklı hammadde türleri için farklı zamanlarda bir dizi gazlaştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca reaktör içerisinde daha yüksek sıcaklıklarda gazlaştırma davranışlarını belirlemek için parabolik bir çanakla yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden yararlanılmaya çalışılmıştır.

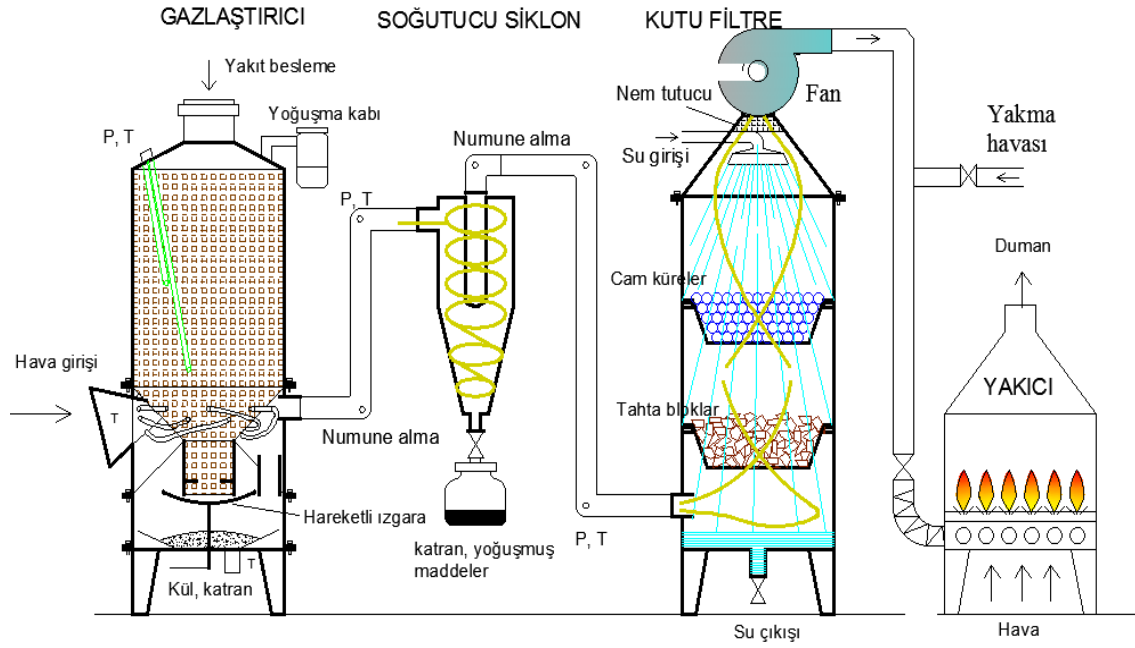
Tasarım ve fonksiyonellik bakımından gazlaştırma için oldukça önemli olan oksidasyon bölgesi SolidWorks programı ile katı model olarak tasarlanmış ve ilgili çalıştırma koşulları girilerek Ansys Workbench programı ile ısı analiz gerçekleştirilmiştir.

### 2.1. Deney Düzeneginin Tanıtımı

Gazlaştırma düzeneginin şematik görünümü ve süreç akışı Şekil 16'da verilmiştir. Sistem içerisinde katı, sıvı ve gaz fazlarının birlikte kullanımı, tüm prosesi temsil etmektedir. Reaktöre yüklenen katı hammadde, sistem çıkışında gaz yakıtına dönüşmektedir. Kısmi yanmayı gerçekleştirmek için reaktör içerisine hava beslemesi yapılmıştır. Bu



besleme reaktör gövdesine yerleştirilen hava kanalları vasıtasıyla olmaktadır. Hava emişi tek bir noktadan yapılmasına rağmen oksidasyon bölgesinin farklı simetrik noktalarından üfleme sağlanmıştır. Ayrıca sistemde reaktörün ve siklonun alt kısımlarından katı kül ve toz parçacıkları ile birlikte sıvı fazında katran ve yoğunlaşmış içeriğe sahip sıvılar alınmaktadır. Bununla birlikte filtreleme ünitesine üst kısımdan nozullar ile fişkırtılan şebeke suyu, filtrenin alt kısmından katranlı ve kirlenmiş su olarak atılmaktadır. Gaz numunesi alma haricinde sistemden başka kütle çıkışı olmamaktadır.

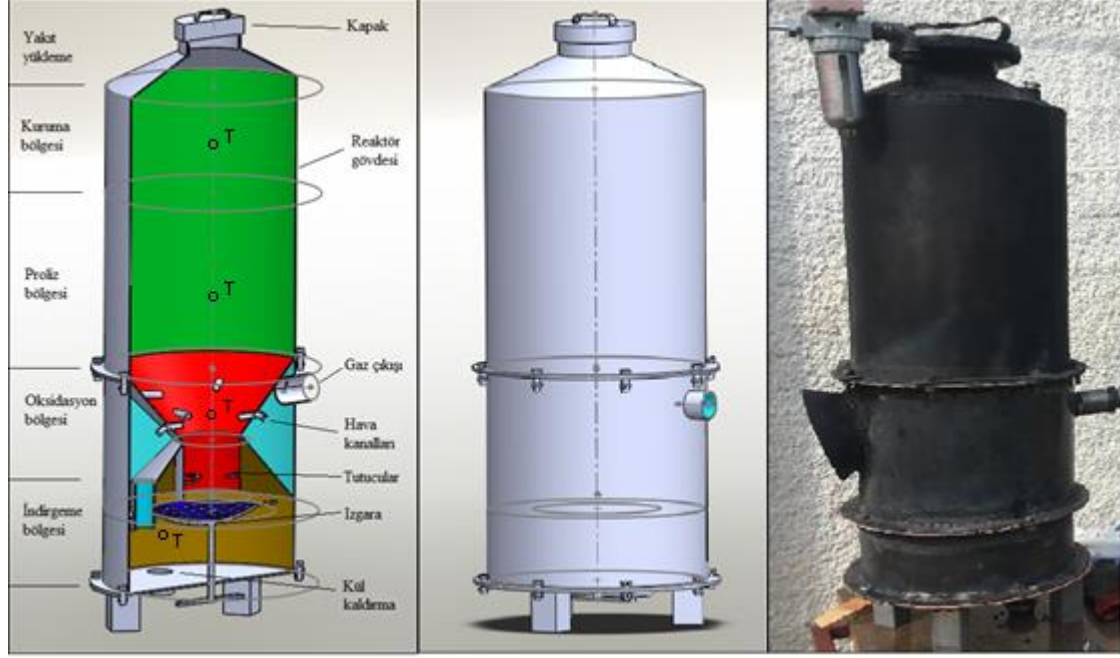


Şekil 16. Deney düzeneğinin şematik çizimi

Gazlaştırma reaksiyonlarının gerçekleştiği reaktör 2 mm sacdan imal edilmekle birlikte toplamda 30 cm çapında ve 65 cm yüksekliğinde silindirik gövdeden oluşmaktadır. Kullanılan gaz reaktörü alttan akışlı tipte (Downdraft) tasarlanmıştır. Şekil 17’de ayrıntılı olarak görülebilmektedir.

Gaz çıkış kısmı ve hava besleme düzeneği, standart alttan akışlı gazifikasyon reaktörlerinden oldukça farklıdır. Reaktörün üst kısmından aşağıya doğru 5 cm yükseklik gaz oluşumu ve yoğunlaşma bölgesi, devamındaki 40 cm yükseklik kuruma ve proliz bölgeleri için ayrılmıştır. Reaktörün üst kısmında bulunan basınçlı tüp sayesinde ortaya çıkan buharın yoğunlaştırularak sistemden atılması hedeflenmiştir. Bu sayede reaktörün alt bölgelerinde su buharı oluşumu azaltılmıştır. Reaktör üst kapağı vidalı sıkıştırma ile tam

sızdırmazlık sağlayacak şekilde düzenlemiştir ve tüm çalıştırmalar boyunca kapalı kalmaktadır.

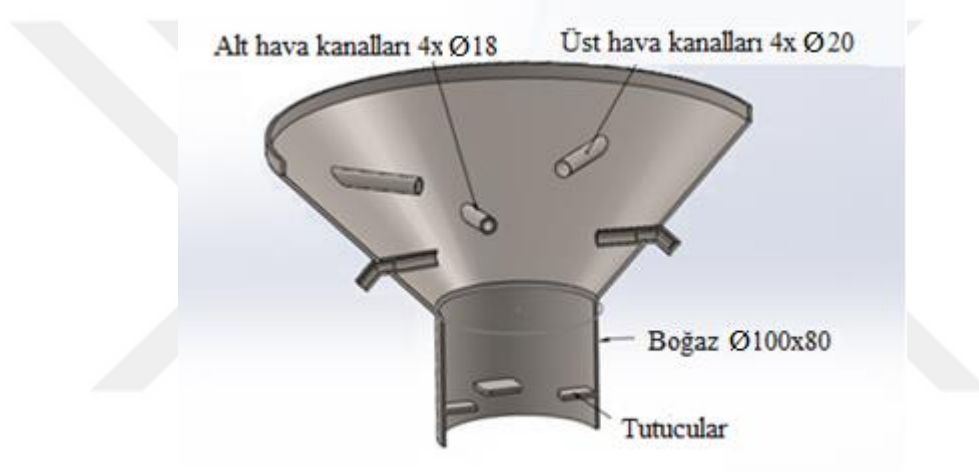


Şekil 17. Gazlaştırma reaktörünün tasarım ve imalat resimleri

Oksidasyon bölgesi, gazifikasyonun kalbi olarak değerlendirilebilir. Gazlaştırma işleminin başladığı kurutma ve proliz bölgelerinden farklı olarak biokütlenin tamamen gaz haline dönüştürülmesi burada yapılır. Oksidasyon bölgesinin tasarımı, kanal boyutları ve pozisyonları Şekil 18’de verilmiştir.

Standart gazlaştırma uygulamalarında, bu bölgenin genelinde sıcaklık dağılımı ve kütle akışının dengeli olmaması gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Biyokütle boyut azalması bölge içerisinde farklı olmaktadır [58]. Bu çalışmada ise, bölge içerisindeki kararsız oluşumların ortadan kaldırılması için 8 farklı noktadan hava beslemesi yapılmıştır. Oksidasyon bölgesi dar çapı 10 cm, geniş çapı reaktör gövdesi ile eşit ve yüksekliği ise 10 cm olacak şekilde konik yapıdaki kısım ile başlar. Bu kısmın alt orta ve üst orta konumlarında merkezci olarak eşit uzaklıkta 4’er kanal bulunmaktadır. Bu kanallar, iç kısımlara dengeli hava beslemesinin yapılması için alt ve üst kanal uzunlukları birbirinden farklı olarak derinlik kazandırılmıştır. İlk tutuşturmanın tek noktadan başlatılmasına rağmen kısa sürede (ortalama 10 dakika) bölgenin her yerinde yaklaşık eşit oluşumlar gözlenmiş ve ölçülmüştür. Bu şekilde, hammaddenin merkezden aşağıya doğru doğal

hareketi gerçekleşmiştir. Bunun sonucu olarak gazlaştırma işlemi için oldukça önemli olan parça boyutunun eşit olarak azalması sağlanmıştır. Oksidasyon bölgesinin ikinci kısmında 10 cm çapında ve 8 cm yüksekliğinde bir boğaz bulunmaktadır. Bu daralma ile katı fazdan gaz fazına geçişte hammadde yakıtın hareketinin kontrolü sağlanmıştır. Yakıt, gaz fazına geçerken ağırlıkça yer çekiminin etkisiyle tükenerek indirgeme bölgesine doğru hareket eder. Sistemin tıkanması önlemek ve kütle hareketini kısmen sınırlandırmak için boğaz bitiminden 2 cm önce tutucu tırnaklar kullanılmıştır. Böylece ana ızgara üzerinde yığılmanın önüne geçilmek hedeflenmiştir. Bekletme etkisi ile parçacık boyutunun daha da küçülmesi sağlanmıştır.



Şekil 18. Oksidasyon bölgesinin kesit görünüşü

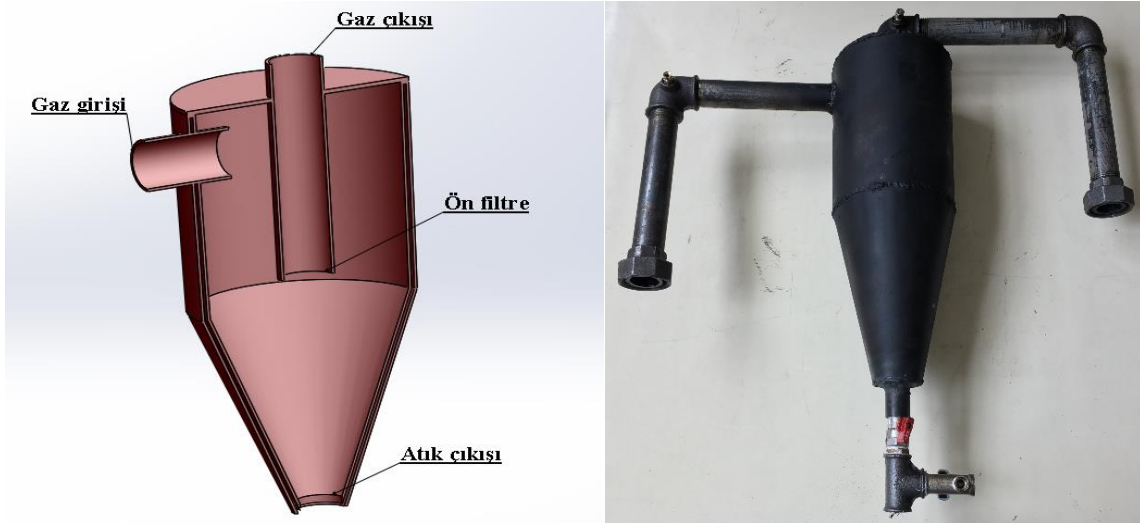
Oksidasyon bölgesi bitimine yerleştirilen bir ızgara ile reaktör alt tabanı arasındaki bölge 12 cm yükseklikteki redüksiyon bölgesini oluşturur. Izgara, dönme ve aşağı yukarı hareket etme kabiliyetindedir. Böylece tıkanma ve kül ergimesi gibi oluşumların önüne geçilmektedir. Oluşan kül ile birlikte bazı diğer atık ürünler indirgeme bölgesinin alt kısmından sitemden atılmaktadır.

Redüksiyon bölgesinde katı içerikten kurtulan gaz oksidasyon bölgesi ile reaktör gövdesi arasında kalan boşluktan geçerek reaktörü terk eder. Bu bölgede yalnızca gazlaştırılmış ürünler bulunmaktadır. Gaz bu bölgeden geçerken oksidasyon bölgesindeki malzemelere sıcak yatak görevi görür. Bu yatak oksidasyon bölgesini yalıtarak ortam koşullarının etkisini azalmaktadır. Hava, bu bölgede indirgeme bölgesi ürünleri ile karışmaz. Bununla birlikte indirgeme bölgesindeki katı partikülleri gaz fazından ayıran

önemli bir depolama hacmini oluşturur. Esnek çelik bağlantı elemanlarından oluşan hava besleme kanalları bu bölgeden geçmektedir. Dış ortamdan çekilen bu kanallardan geçerken ısınır ve reaktör sıcaklığının düşmesi engellenmiş olur. Ayrıca, bu kanallar sayesinde aynı anda farklı oksidanlar kullanılarak sistemin beslenmesi mümkün olmaktadır.

Hava kanalları, reaktör yüzeyine yerleştirilen konik gövdeye (pota) bağlandığı için, güneş çanağı ile yapılan deneylerde yüksek sıcaklıklarda hava beslemesinin yapılması mümkün olmaktadır. Sistem hava girişi tek bölgeden sağlanmasına rağmen oksidasyon bölgesinin farklı noktalarından eşit dağılımını mümkün kılmak için 2 cm çapında 8 farklı kanaldan geçirilir.

Reaktörden çıkan gaz 15 cm çapında ve 40 cm yüksekliğindeki gaz temizleme siklonu içerisinde helisel harekete zorlanır. Siklon silindirik ve konik olmak üzere iki gövdeden oluşmaktadır. Şekil 19'dan görüldüğü gibi; gaz girişi, silindirik gövdenin üst yan kısmından olmaktadır ve helisel hareketlerle konik gövdeye çekilmektedir. Bu zorlanmış hareket ile gaz içerisinde olası toz, kül, katran vb. gibi istenmeyen içeriklerin ağırlıklarının da etkisiyle sistemden atılması sağlanmaktadır. Gaz çıkışı ise, silindirik gövdenin alt kısmından ve merkez boyunca uzanan kanal yoluyla üst kısımdan olmaktadır. Kanal ucuna ilave olarak tel ızgara konmuş ve ön filtreleme sağlanmıştır. Siklonun en altında sistem atıklarının birikmesini sağlayacak cam tüp bulunmaktadır. Tüp içerisindeki atık maddeler sistem çıktıları olarak hesaba katılmaktadır.



Şekil 19. Gaz temizleme siklonunun kesit görünüşü ve imalat resmi

Sulu kutu filtre 30 cm çapında ve 65 cm yukseklisinde silindirik yapıdan oluşur. Sulu gaz filtreleme işlemleri üç aşamalı olarak gerçekleştirilir. İlk olarak, fitreye alttan giren gaz, gazlaştırma yakıtları ile aynı özellikteki kütlerden geçer. İkinci aşamada, tepsiye yerleştirilen 2 cm çapındaki cam küreler filtreleme vazifesi görür. Son aşamada ise kutu filtrenin üst kısmına yerleştirilen nem tutucu ince filtre ile üretilen gazın istenmeyen tüm içerikten temizlenmesi amaçlanır. Gaz üretimi ve sistem içerisinde düşük basıncın sağlanması için düzeneğin son kısmında gaz emişi yapan oransal fan bulunmaktadır.

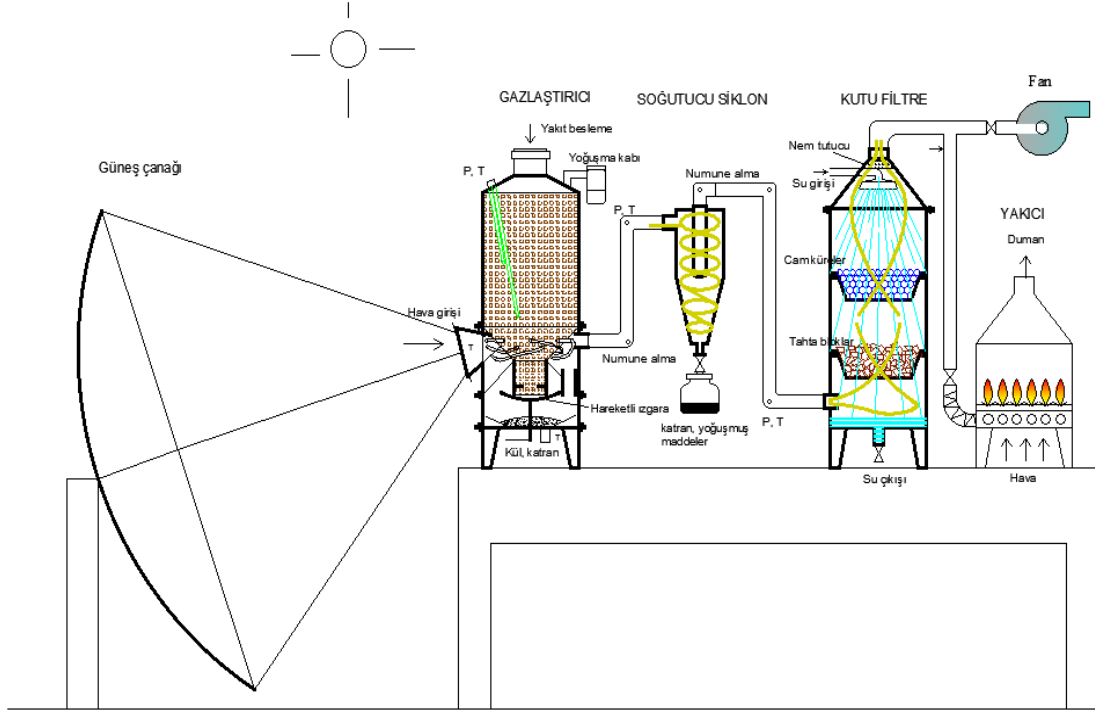
Deney düzeneğinin son elemanı ise üretilen gazın doğrudan yakıldığı farklı yakıcılar bulunmaktadır. Düzeneğin tüm boru bağlantıları 1" gaz borusu ile yapılmış ve sızdırmazlık sıvısı kullanılarak dişli bağlantılarla birleştirilmiştir. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. Deney düzeneğinin genel görünümü

## 2.2. Güneş Enerjili Sistemin Tanıtımı

Güneş enerjili sisteminde, deney düzeneğindeki süreç, beş aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek, gazifikasyonu iyileştirmek amacıyla gazlaştırıcı boğazına etki edecek şekilde konumlandırılan güneş enerjisi çanağı ile başlar. Düzeneğe ait şematik ve gerçek görünüm sırasıyla Şekil 21 ve Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 21. Deney düzeneğinin şematik çizimi (Güneş enerjili sistem)

Güneş radyasyonunu belirli bir noktada yoğunlaştırmak için yüzeyi krom nikelaj folyo (yansıtıcılığı 0,90) ile kaplı parabolik çanak kullanıldı. Çanağın çapı 1,5 m’dir. Odak noktası çanak merkezinden 58 cm uzakta olacak şekilde ayarlanmış ve gazlaştırıcının oksidasyon bölgesine etki etmesi sağlanmıştır. Bu amaçla, parabolik çanağın odak noktası, deney düzeneği üzerinde hazırlanan bir alıcı potaya ayarlanmıştır. Alıcı potada, yoğunlaştırılan güneş enerjisi sayesinde, belli bir sıcaklıktaki ısı muhafaza edilerek reaktör içerisine gönderilmesi sağlanmıştır. Güneş radyasyonu, CEM-DT 1307 tipi Solarimetre ile sürekli olarak ölçülmüştür.



Şekil 22. Deney düzeneğinin (Güneş enerjili halde)

Türkiye’de ortalama güneş enerji potansiyeli yaz ayları için  $167,47 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ ’dır [59, 60]. 1,5 m çanak çapı için yansıyabilecek günlük güneş enerjisi yaklaşık  $9,86 \text{ kWh}$  olacaktır. Bu enerjinin reaktör içerisindeki sıcaklığı artırmak için kullanılması sağlanmıştır. Işınım izleme sistemli çanak kullanılarak, bu enerjiden güneşlenme süresinde en yüksek seviyede yararlanılması mümkündür. Mevcut durum için yalnızca saatlik değerlendirme yapılmıştır. Deney süresinin kısa olması nedeniyle süreklilik arz eden ilave sistemler düşünülmemiştir.

Gazlaştırma reaksiyonlarının gerçekleştiği reaktör bu sitemde ikinci aşamada bulunmaktadır. Gazlaştırma reaktörü, kurutma ve proliz reaksiyonlarının gerçekleştiği 30 cm çapında ve 40 cm yüksekliğinde silindirik bir gövdeye ve gövdeye monte edilen dar kısmı 15 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde bir boğaza sahiptir. Oksidasyon işlemi bu boğazda gerçekleşir. Yanma sıcaklığını ve reaktör içerisindeki sıcaklığı artırmak ve sisteme üflenen havayı iyileştirmek için boğazın çanağa bakan kısmına 10-15 cm çaplarında bir pota yerleştirilmiştir. Boğazın alt kısmında 10 cm yükseklikteki silindirik kanal ve hemen sonra yerleştirilen ızgara ve reaktörün alt kısmı redüksiyon olayının

gerçekleştiği kısımdır. Reaktörün üst kısmından yüklenen biokütle, sırasıyla kurutma, proliz, oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarına tabi tutularak boğaz dışındaki boş hacimden reaktörü terk eder. Reaktörün üst kısmında, biyokütle içerisindeki nemin alındığı bir yoğuşma kabı ve alt kısmında kül ve katranın kaldırıldığı temizleme kapağı bulunur. Düzeneğe ait ilave resimler Ek 2’de verilmiştir.

Önceki kısımda izah edilen sistemle aynı olarak, düzeneğin üçüncü ve dördüncü aşamasında, katran uzaklaştırma, gaz soğutma ve temizleme işlemleri için yerleştirilen siklon ve kutu filtre bulunmaktadır. Reaktörden çıkan gaz siklon içerisinde helisel hareketler yaparak katran ve isten arındırılır. Ayrıca, siklon ve filtre giriş ve çıkışlarından gaz numunesi alınarak gaz içeriğinin değişimi gözlemlenir.

Son aşamada ise, bir fan vasıtasıyla emilen gazın yakıldığı yanma odası bulunmaktadır. Gazlaştırıcı içerisinde ve düzeneğin bazı noktalarındaki basınç düşüşleri U-manometre kullanılarak izlenir. Üretilen nihai gaz, uygun gaz-hava karışımı oluşturmak üzere brülörden geçirilerek sistemin son bileşeni olan bir yanma odasında yakılır.

Tüm silindirik gövdeler 2 mm sacdan imal edilmiş ve gaz bağlantıları için 1” çapında gaz borusu kullanılmıştır.

### **2.3. Deney Düzeneğinin Çalıştırılması**

Yığın yoğunluğu belirlenen hammadde yakıtı, tartılarak üst kısımdan reaktöre yüklenir. Tüm çalıştırmalarda farklı hammadde türlerinin her biri için 8 kg ağırlığında yükleme tercih edilmiştir. Reaktör içerisinde farklı gazlaştırma aşamaları için uygun ortam ve koşulların oluşturulmasına çalışılmıştır. Reaktörün boş kalan üst kısmı kurutma bölgesi olarak ayrılmıştır. İlk çalıştırma öncesinde, oksidasyon bölgesi altında kalan hacim, önceki deneme çalışmalarından elde edilen kömürleşmiş hammadde ile doldurulmuştur. Bunun amacı, gazlaştırmanın doğrudan başlamasını sağlamak ve farklı termo-kimyasal oluşumları engellemektir. Sistemin tüm giriş ve çıkışları kapatılarak ölçüm cihazlarının bağlantısı sağlanmıştır. Tutuşturma işleminden önce emme fanı çalıştırılarak hava akış hızının stabil kalması beklenmiştir. Kutu filtrenin su soğutma sistemi aktif hale getirilmiştir. Tutuşturma işlemi, merkezi hava besleme kanalı içerisinde gaz üfleme yakıcı ile sağlanmıştır. Başlangıç yanma reaksiyonları, gaz akış hızının dengelenmesi ve tutuşturma gazının sistemden atılması için ilk 3 dakika ölçüm yapılmamıştır.



Proses boyunca sıcaklık, basınç ve akış hızı gibi parametrelerin tüm gazlaştırma bölgeleri için değerlendirilebilmesi amacıyla hammaddenin tamamen tükenmesini beklemeden proses kontrollü olarak sonlandırılmıştır. Çalıştırma sonunda, sistemin hava besleme kanalları kapatılmış ve ölçülen sıcaklıklar doğrultusunda reaktör boşaltılmıştır. Yapılan tüm ölçümler 90 dakika olarak belirlenen çalıştırma süreci içerisinde kaydedilmiştir. Ayrıca, en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığı süreler kaydedilmiş ve bu sürelerde alınan gaz numuneleri, numune alma çantalarına doldurulmuştur. Bunun için teflon hortumların sızdırmaz bağlantılarla sisteme bağlantısı yapılmıştır.

Gazlaştırıcı, önceden belirlenen bir seviyeye kadar, belirlenen ağırlıktaki yakıt ile yüklenir. Yakıt ortalama ebatları; çam blok için 1x1x2 cm, pelet için Ø6x2 cm, çam kozalağı için 0,3x1x2 ve findıkkabuğu için 1x0,5x2 cm yaklaşık değerlerindedir. Tam sızdırmazlık sağlanan sistemde öncelikli olarak fan ve temizleme suyu aktif hale getirilir. Reaktör içerisindeki hammadde, oksidasyon bölgesindeki pota içerisindeki merkezi hava kanalından bir tutuşturucu yardımıyla yakılır. Hava, pota üzerindeki 8 kanaldan yanmaz esnek bağlantı borularıyla oksidasyon bölgesine çekilir. Oksidasyon bölgesi ve reaktör dış yüzeyi arasında kalan hacim, redüksiyon bölgesindeki gazın akış yolu üzerindedir ve hava kanallarının geçtiği kısımdır. Hava ve gaz bu bölgede karışmaz.

Redüksiyon bölgesinden gelen sıcak gaz, bu bölgede oksidasyon bölgesinin sıcaklığının yüksek kalmasına yardımcı olur. Hava akış kontrolü sistem çıkışındaki fan ile yapılır.

#### **2.4. Yapılan Ölçümler ve Gaz Numunesi Alma**

Çalıştırma öncesinde, sistem hava giriş ve gaz çıkış noktaları kapatılarak 1 bar basınç altında sızdırmazlık ve mukavemet testlerine tabii tutulmuştur. Reaktör içerisinde kurutma ve proliz bölgelerine daldırılan sabit silindirik kanallar vasıtasıyla sıcaklık ölçümlerine olanak sağlanmıştır. Oksidasyon bölgesi sıcaklığı hava giriş kanallarından ve indirgeme bölgesi sıcaklığı reaktör alt kısmından yapılmıştır. Reaktör ve siklon arasında konumlandırılan test nipelleri ile sıcaklık ve basınç ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, K-tipi termokupullar ile kullanılan CEM DT-610B Dijital Termometre ile yapılmıştır. Sistem başlangıcından sonuna kadar geçen süre boyunca U-tipi manometre (1 mmSS hassasiyetinde) kullanılarak basınç düşüşü ölçümü yapılmıştır. Çok fazla hassasiyet gerektirmemekle birlikte sistem içerisinde basınç düşüşünü sağlamak uygun gazlaştırma

için önemlidir. Sistem içerisinde gazın özelliklerinin değişebileceği belli bölgelerde bırakılan bağlantılar sayesinde gaz numuneleri alınabilmektedir. Tam yakıt yükleme ve gazlaştırma süresi boyunca üretilen gaz debisi ile birlikte yoğunlaşmış içerik, katran ve kül ölçümleri yapılarak kaydedilmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde görülen sıra dışı artışlar, ölçüm probunun kor haldeki yakıtla temas etmesi olarak değerlendirilmiştir. Bu durumlarda, farklı noktalarda yeniden ölçümler yapılmıştır.

Gazlaştırma için temel kriterlerden olan sıcaklık ölçümleri 5 dakikalık zaman aralıklarında kaydedilmiştir. Gazlaştırıcının tüm reaksiyon bölgelerinde, siklon giriş ve çıkışlarında ve kutu filtre çıkışındaki sıcaklıklar ölçülmüştür. Yakıtın tamamen tüketilmesine kadar yapılan her koşturma için kalan kül, katran, yoğunlaşık ve kömür belirlenerek değerleri kaydedilir. Alınan gaz numuneleri, üretilen gazın içeriğinin ve kalorifik değerinin belirlenmesi için gaz analizi yapılmak üzere gaz numune balonlarına doldurulmuştur. Sistem çalışması boyunca elde edilen gaz, sistem çıkışına bağlanan gaz yanma beklerinde yakılır ve elde edilen duman baca gazı analizi için ayrıca depolanır.

Sistem çıkışında gaz akış hızı kontrol edilerek yakıtın tükenmesi ile ilişkisi hesaplamalarda dikkate alınmıştır. Kutu filtre içerisinde tıkanmalardan kaynaklı problemlerin belirlenmesi için soğutma suyu giriş ve çıkış debileri kontrol altında tutulmuştur.

Çalıştırma sonunda artan yakıt, tartılarak toplam yükleme ile karşılaştırılmıştır. Reaktör alt kısmında biriken kül ve siklon alt kısmında biriken katranlı içerik sistem çıktıları olarak değerlendirmeye alınmıştır.

## **2.5. Numunelerin Hazırlanması**

Gazlaştırıcı yakıtı olarak kullanılacak maddelerin özelliklerinin belirlenmesi, uygulama koşulları açısından önemlidir. Bu amaçla yakıt türleri için yaklaşık eşit koşulların oluşturulmasına çalışılmıştır. Önceden belirlenen yakıt özelliklerinin sağlanması için yakıtların bulunduğu ortamın nem ve sıcaklık değerlerinin sabit tutulması sağlanmıştır.



Şekil 23. Gazlaştırma için hazırlanan yakıt numuneleri a) çam kozalağı  
b) fındikkabuğu c) karışık pelet d) çam pelet e) ladin bloklar f) çam bloklar

Gazlaştırma için uygun boyut ve şekillerdeki bazı hammaddeler Şekil 23’de görülmektedir. Reaktör kapasitesi ve geometrisine uygun olması bakımından daha önce ölçüleri verilen yaklaşık eşit büyüklükte hammaddeler değerlendirmeye alınmıştır. Fındikkabuğu ve çam kozalağı, kırma ve parçalama işlemleri sonrasında yaklaşık boyutlarda ve gazlaştırma için uygun hale getirilebilmektedir. Toz, kir ve ilave atıklardan kurtulmak için gazlaştırma öncesi yıkama, kurutma ve eleme işlemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Tahta blokların reaktör kapasitesine uygun olarak istifleme ve eleme işlemleri sonrasında uygun yakıt haline getirilmesi mümkündür. Bu çalışmada, kullanılan katı bloklar belirlenen ölçülerde mobilya tezgâhlarında kesilmiştir. Çam kozalağı, araziden toplanarak el ile yaklaşık eşit parçalarına ayrılmıştır. Çoğunlukla ısıtma amaçlı yakma sistemlerinde kullanılan fındikkabuğu ve pelet ise piyasada bulunduğu haliyle doğrudan gazlaştırma yakıtı olarak kullanılabilirler. Ladin blokların gazlaştırma performansı çam bloklara yakın olduğu için ayrıca değerlendirilmemiştir.

Yakıt hammaddelerinin bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için gazlaştırma işleminden bağımsız olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Yakıt elementel analizi (bakınız Tablo 1) ve sahip olduğu nem oranları belirlenmiştir. Bu amaçla hammaddeler Şekil 24’de görüldüğü gibi toz haline getirilmiştir. Toz halindeki yakıtların


gazlaştırma işlemi için kullanılması mümkündür. Ancak çalışılan numuneler için bu işlem bazı zorluklara sahip olmakla birlikte ekonomik değildir.



Şekil 24. Toz haline getirilen yakıt numuneleri a) fındıkkabuğu b) fındık yaprağı c) çam pelet d) karışık pelet e) çam bloklar f) çam kozalağı

Farklı hammaddeler için nem ölçümü yapılarak elde edilen değerler Tablo 6'da verilmiştir. Bu işlem için Ohaus MB-45 modelinde nem analiz cihazı (0.01 hassasiyet) kullanılmıştır. Belirlenen hammadde yakıtlarının tamamında nem oranı %30'un altında kalmaktadır. Bununla birlikte alttan akışlı reaktörlerde yüksek performans sağlanması için gerekli olan en fazla %15 nem sınırının altında kalındığı görülmektedir. Nem içeriği bakımından en yüksek değere sahip olan fındık yaprağının, yığın yoğunluğunun düşük olduğu ve şekilsel kontrolünün oldukça zor olduğu anlaşılmıştır. Reaktör içerisinde akış kontrolünün sağlanması ve fiziksel özelliklerindeki kararsızlıklar nedeniyle deneylerde kullanılmamıştır. Ayrıca sürekli ve ekonomik bir gazlaştırma yakıtı olamayacağı anlaşılmıştır.

Tablo 6. Hammadde yakıtları için nem analizi

	Yakıt	Ağırlık (gr)	Süre (dak.)	Nem (%)
	Fındıkkabuğu	10,782	24,12	11,97
	Fındık yaprağı	6,276	17,55	13,35
	Çam pelet	10,027	17,14	9,54
	Karışık pelet	10,396	15,13	9,82
	Çam kozalağı	10,567	23,37	12,12

Prosesin ilerlemesinin yanı sıra sistem verimini de etkileyen önemli bir fiziksel özelliğin yığın yoğunluk olduğu önceki açıklamalarda belirtilmiştir. Bu değerler Tablo 7’de görülmektedir. Yığın yoğunlukların belirlenebilmesi için 8 dm<sup>3</sup> (20cmx20cmx20cm) iç hacminde karton kutu kullanılmıştır. Numuneler kutu içerisine hacmi tam işgal edecek şekilde rastgele doldurmuş ve sonrasında terazide ölçülerek ağırlıkları belirlenmiştir. Ölçülen bu değerler yaklaşık olmakla birlikte, hammaddelerin kıyaslanması bakımından faydalı olmaktadır. Yığın yoğunluğu ve kolay ulaşılması nedeniyle analizler karışık pelet için yapılmıştır.

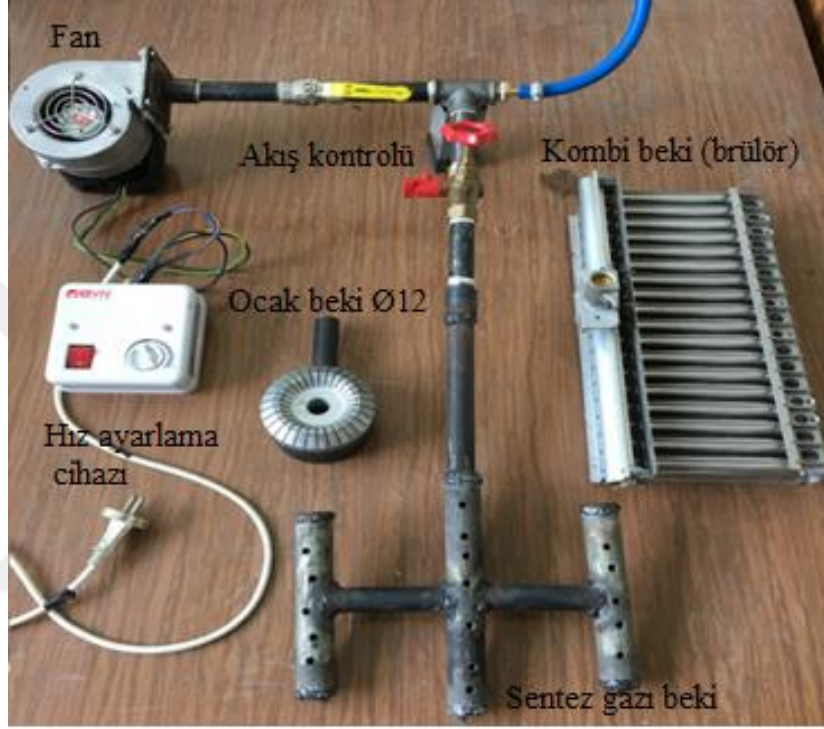
Tablo 7. Hammadde yakıtlar için ölçülen yığın yoğunluk değerleri (kg/m<sup>3</sup>)

Yakıt cinsi	Çam bloklar	Çam pelet	Karışık pelet	Fındıkkabuğu	Çam kozalağı
Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]	248	608	675	250	337

## 2.6. Gaz Yakma Sistemlerinin Tanıtılması

Gaz filtreleme sisteminden alınan ve fan ile yakma düzeneğine üflenen “temiz gaz” üç farklı yakma bekinde yakılmış ve yanma karakteristikleri gözlenmiştir. Gaz yakma düzeneğinde, hava ve fan oransal iki farklı fan ile gaz karışım kanalına üflenmekte ve karışım ayarı yapılarak yakma beklerine gönderilmektedir. Gazın yanmasını

değerlendirmek amacıyla üç farklı bek kullanılmıştır. Bu beklerin bir tanesi standart 12 cm endüstriyel ocak beki, bir tanesi ise yine standart gaz yakıtlı kombi beki (brülör) şeklindedir. Üçüncü bek ise düşük ısıl değerde ve basınçtaki sentez gazı için özel olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu beklerin ve gaz yakma düzeneğinin gösterimi Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 25. Gaz yakma düzeneği ve yakma brülörleri

### 3. BULGULAR

Çalışma süresince her yakıt için beş farklı deney gerçekleştirildi. Her deney sonunda sistemden kalan kok, kül, katran ve yoğuşuk miktarları tartılarak muhafaza edildi. Düzeneğin belirli noktalarında (Şekil 14'e bakınız) deney boyunca sıcaklık ve basınç ölçümleri yapılarak kaydedildi. Tüm sıcaklık ölçümlerinde K-tipi termokupullar ile kullanılan CEM DT-610B Dijital Termometre kullanıldı.

Yapılan tüm koşurmalar sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri ortalama sıcaklık olarak hesaplanmıştır. Reaktör içerisinde gazifikasyonun termo-kimyasal işlem sürecini gösteren kurutma, proliz, oksidasyon ve redüksiyon bölgelerinde ideal sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır. Gazifikasyon için gerekli oksidasyon bölgesi sıcaklığı olan 700°C'nin üzerine çıkmıştır. Elde edilen sentez gazı soğutma ve temizleme işlemlerinden sonra yanma odasında kullanılabilir azami sıcaklık olan 50°C'nin altına düşülmüştür.

Güneş enerjisi desteği ile yapılan deneylerde, güneş enerji çanağının pota üzerine etki ettiği ısı irdelendi ve potada belirli sürelerde sıcaklık ölçümleri yapıldı. Farklı zamanlarda ve farklı hava koşullarında, güneş enerji çanağının pota üzerinde sıcaklık dengesine geldiği süreler belirlendi. Bu deneylerde ayrıca güneş enerji çanağının odağında bulunan pota yüzeyi için güneş ışınımı de CEM-DT 1307 tipindeki Solarimetre ile ölçüldü.

Reaktör kapalı ve boş durumdayken, gelen güneş enerji ışınım şiddeti ile birlikte pota yüzeyinde ve reaktör iç kısmında sıcaklık ölçümleri yapıldı. Alınan ölçümler için gerekli sıcaklık dengeleme zamanı yaklaşık 10 dakika olarak seçilmiştir.

Tüm deneylerde, reaktör önceden belirlenen bir seviyeye kadar yaklaşık olarak eşit kütlede yakıt ile doldurulmuştur. Her koşurma için tutuşturma sonrası denge zamanı olarak 10 dakika beklenmiş ve süreç tamamlanana kadar her 5 dakikada bir sıcaklık ve basınç ölçümleri kaydedilmiştir.

Güneş enerjisinden yararlanılarak yapılan son deneylerde özellikle oksidasyon bölgesinde sıcaklığın oldukça yükseldiği görülmüştür. Tüm bölgelerde arzu edilen sıcaklık artışına rağmen sistem çıkışında elde edilen gaz sıcaklığı kullanılabilir sıcaklık olan 50°C'nin altında kaldığı görülmüştür.

Koşurma süresi tüm koşurmalar için ortalama 90 dakika olarak belirlenmiştir. Sıcaklıktaki artış, koşurma süresini ortalama %20 oranında azaltarak 70 dakikaya

düşürmüştür. Ayrıca koşturma sonunda sistemden kalan kok ve katran miktarı önemli ölçüde azalmıştır.

Deneyle sonunda reaktör tamamen boşaltılarak kalan yakıt ve artan kütleler değerlendirilmiştir. Yakıt tüketim hızı, oluşan gaz debisi ve sistem içerisindeki basınç düşüşü Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Hammadde yakıt türlerine göre gazlaştırma performansı değerleri

Yakıt türü	Yakıt tüketimi [kg/h]	Debi [Nm <sup>3</sup> /h]	Basınç düşüşü [mmSS]
Çam bloklar	6,0-6,4	15,7-16,0	35-45
Fındıkkaşuğu	5,8-6,2	15,1-15,5	30-40
Çam kozalağı	5,8-6,0	14,2-14,7	30-45
Pelet 6 mm	5,1-5,5	13,8-14,3	25-35
Karışım	5,4-5,6	14,1-14,6	30-35

Deneyle boyunca eşdeğerlilik oranının en iyi koşullar olan 0,20-0,35 arasında kalması hedeflenmiştir. Bu amaçla yakıt besleme ve çıkış fan hızı kontrol altında tutulmuştur. Bu oranın çoğunlukla gazlaştırıcının termal olarak yetersizliği ve kullanılan yakıtın nem içeriğinin yüksek olması ile olumsuz yönde etkilendiği bilinmektedir. Yani, sistemin ısı kayıplarının fazla olması veya su buharı oluşumu için harcanan fazladan enerji gibi olumsuzluklar daha yüksek ER oranlarına ihtiyaç duyulmasına neden olur. Ancak bu durumda daha sıcak gaz üretimine rağmen daha düşük ısı değerinde gaz ürün ortaya çıkacaktır. Tipik aralığın altındaki oranlarda ise, düşük sıcaklıkta ve yüksek ısı veriminde ancak yoğun katran içeren gaz üretimi meydana gelir. Buda yapılan işlemin çoğunlukla piroliz işlemi olduğunun göstergesidir.

Kullanılan hammadde yakıtlar içeriğinde bulunan karbon, hidrojen ve azot bakımından birbirine yakındır. Tablo 9’de bu maddelerin elementel analiz sonuçları verilmiştir.



Tablo 9. Kullanılan hammadde yakıtlarını oluşturan elementler ve bulunma oranları

%Kuru ağırlık	Odun bloklar	Fındıkkabuğu	Çam kozalağı	Pelet
Karbon [C]	47,18	51,25	42,62	47,52
Hidrojen [H <sub>2</sub> ]	5,27	4,99	5,56	5,15
Azot [N <sub>2</sub> ]	0,37	0,54	0,76	0,26
Oksijen [O <sub>2</sub> ]	43,12	43,22	51,01	42,16
Kükürt [S]	<0,1	<0,1	0,05	<0,1
Klor [Cl]	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
Kül	1,6	0,7	0,9	0,671
Ref.	[61]	[62]	[63]	[64]

Reaktöre yüklenen 10 kg yakıt, 90 dakikalık gazifikasyon süresi boyunca davranışları incelenmiştir. Bu süre içerisinde reaktörde kalan yakıt tartılarak tüketilen yakıt miktarı belirlenmiştir. %8-10 civarında nem içeriğine sahip biyokütleler için stokiyometrik yanma oranı şu şekilde belirlenmiştir;

$$1 \text{ kg biyokütle} + 6,5 \text{ kg hava} = 7,5 \text{ kg baca gazı (N}_2, \text{H}_2\text{O, CO}_2)$$

$$10 \text{ kg biyokütle} + 65 \text{ kg hava} = 75 \text{ kg baca gazı (N}_2, \text{H}_2\text{O, CO}_2)$$

Eğer gazlaştırma reaksiyonu nominal ER (0,25) değerinde uygulanırsa, 1 kg odun ile birlikte 1,6 kg hava kullanılacaktır. Bu durumda çıkan gaz ürün 2,6 kg olması beklenir. Böylece;

$$1 \text{ kg biyokütle} + 1,6 \text{ kg hava} = 2,6 \text{ kg gaz ürün (CO, H}_2, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{CH}_4)$$

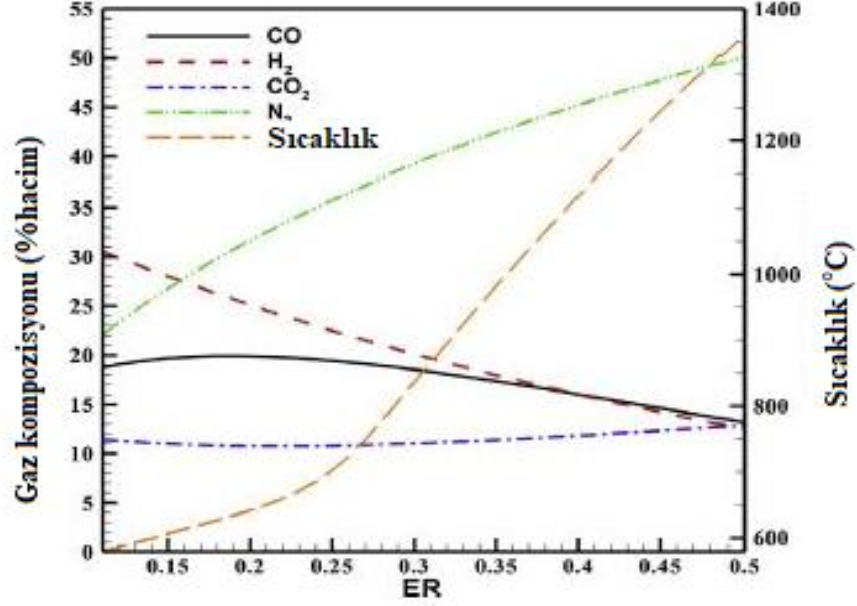
$$10 \text{ kg biyokütle} + 16 \text{ kg hava} = 26 \text{ kg gaz ürün (CO, H}_2, \text{CO}_2, \text{N}_2, \text{CH}_4)$$

Bununla birlikte üretilen bu gazın yakılması için 1,88 stokiyometrik oranında hava/yakıt oranına ihtiyaç vardır. Yani bu 2,6 kg gaz ürün için 4,9 kg havaya ihtiyaç vardır.

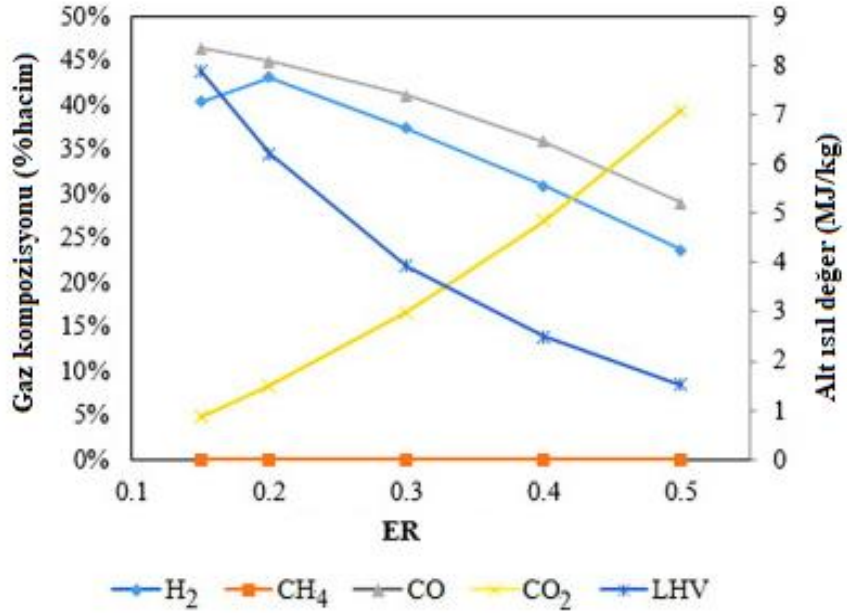
$$2,6 \text{ kg gaz ürün} + 4,9 \text{ kg hava} = 7,5 \text{ kg baca gazı}$$

$$26 \text{ kg gaz ürün} + 49 \text{ kg hava} = 75 \text{ kg baca gazı}$$

Buradan anlaşılacağı gibi tüm reaksiyonlar boyunca oluşan reaksiyon miktarı, tam yanma için olanla tam olarak aynıdır. Üretilen gazın içeriği eşdeğerlik oranına göre değişmektedir. Bu değişim Şekil 26 ve 27’de verilmiştir.



Şekil 26. Eşdeğerlik oranının üretilen gazın içeriğine etkisi



Şekil 27. Eşdeğerlik oranının gaz kompozisyonu ve kalorifik değere etkisi

1,6 kg hava= 1,328 m<sup>3</sup> ve 2,6 kg gaz ürün=2,738 m<sup>3</sup> olduğunda;  
Hava/gaz çıkış oranı = 0,485 (veya 2,062)

Bu durumda kural olarak odun gazı çıkış hacminin, sabit sıcaklık koşulunda hava giriş hacminin yaklaşık 2 katı olduğu söylenebilir.

Pirolizde üretilen katran gazları, mevcut karbon miktarı göz önüne alındığında, doğrudan yakıp azaltabileceğimizden 2,2 kat daha fazladır.

Moleküler kütleler;

Biyokütle: C H(1,4) O(0,6) = 12+1\*1,4+16\*0,6= 23

Hava: N<sub>2</sub>(%78) O<sub>2</sub>(%21) CO<sub>2</sub>(%0.03) = 28\*0,78+32\*0,21+44\*0,03=29

Karbonmonoksit: CO= 12+16=28

Su buharı: H<sub>2</sub>O=2+16=18

Standart odun gazı; CO(%20) H<sub>2</sub>(%10) CO<sub>2</sub>(%15) N<sub>2</sub>(%55) =  
28\*0,2+2\*0,1+44\*0,15+28\*0,55 = 28

Pratikte hidrojen oranının daha yüksek olduğu ve azot oranının daha düşük olduğu gaz üretme uygulamalarına rastlanmaktadır.

Karbon monoksit moleküler ağırlığı havaninkine çok yakın olduğu için hava gibi teneffüs edilmesi oldukça kolaydır. Doğalgaz gibi hafif gazlar yaşam alanlarında tavanda birikirken, LPG gibi ağır gazlar ise zeminde birirmektedirler. Bu özellikleri bakımından karbon monoksit zehirlenmeleri ve buna bağlı ölümler daha sıklıkla olmaktadır.

Üretilen gazın stokiyometrik yanma oranı yaklaşık olarak 1,88'dir. Bu gazın yoğunluğu havanın yoğunluğu ile yaklaşık aynı olmaktadır. Yani gazın tam yanmasının gerçekleşmesi için kabaca iki katı havaya ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 28'de üretilen gazın reaktör çıkışında yakılması ile oluşan alev görülmektedir.



Şekil 28. Reaktör çıkışında üretilen gazın doğal yanması

Gazlaştırma prosesi boyunca katı haldeki yakıtın fiziksel değişimi tahmin edildiği gibi kütleli küçülme ve şekil değişimi şeklinde gerçekleşmiştir. Deneyler sonunda, reaktörün farklı noktalarından alınan yakıtlar meydana gelen termo-kimyasal reaksiyonlar hakkında bilgi vermektedir. Yüklenen hammaddenin, kurutma bölgesinde sudan arındırılması ile şekil değişimi ve küçülme başlamaktadır. Proliz ve oksidasyon bölgelerindeki reaksiyonlarda ise hedeflenen sentez gazı oluşumunu kanıtlayan karbonlu oluşumlar ortaya çıkmıştır. Düzenli küçülme olayı, kül oluşumunun azalması ve karbonsu yapının parçalanarak gaz fazına dönüşümünü kanıtlamaktadır. Tüm yakıt numunelerine ait fiziksel değişim aşamaları Şekil 29, 30, 31 ve 32’de gösterilmiştir.



Şekil 29. Katı bloklar gazlaştırma boyut değişimi



Şekil 30. Pelet gazlaştırma boyut değişimi



Şekil 31. Fındikkabuğu gazlaştırma boyut değişimi



Şekil 32. Çam kozalağı gazlaştırma boyut değişimi

Deneyler sonunda elde edilen gaz ürünlerden farklı yakıt türleri için numuneler alınarak gaz numune saklama torbalarına doldurulmuştur (Şekil 33). Analizler ODTÜ-Petrol

Araştırma Merkezi laboratuvarında yapılmıştır. Analizlerde kullanılan cihaz Agilent 6890 Gaz Kromatografi Cihazı olarak seçilmiş ve ASTM D1945 yöntemine göre değerlendirme yapılmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Ek'te verilmiştir. Gaz numune alma torbalarından gaz tutucu şırınga ile alınan gaz numunesi, cihaz girişine enjekte edilir. Akış boyunca taşıyıcı gaz olarak argon gazı kullanılır. Akış basıncı 10 psi olarak sabit tutulur. Kolon, 50°C sabit sıcaklıkta 8 dakika bekletilir. Daha sonra, her 1 dakikada 12°C olacak şekilde sıcaklık artışı sağlanarak 185°C sıcaklığa çıkılır ve 4 dakika beklenir. Son olarak, dakikada 20°C sıcaklık artışı ile 200°C'ye ulaşılır ve 10 dakika daha beklenir. Belirlenen sonuçlar veri görüntüleme ekranından izlenir.



Şekil 33. Üretilen gaz türlerinin numune torbalarına (Tedlar bags) doldurulması

Kullanılan ASTM D1945 standart test metodu, doğalgaz ve benzeri gaz karışımlarının kimyasal kompozisyonunun analizi için geliştirilmiştir. Daimi gazlar bir moleküler elek kolonu kullanılarak ayrılır ve C<sub>1</sub> ile C<sub>7</sub> bileşenlerinin arta kalanı, geri akış ile yıkanarak ikinci bir kolona yollanır. C<sub>1</sub> ile C<sub>4</sub> oluşumlarından gelen hidrokarbonlar çözülebilir. Böylece, C<sub>5</sub> hidrokarbonlar ve daha yüksekleri birlikte gruplanabilir. Hidrojen sülfür, 100 ppm ve daha yüksek değerlerde tespit edilebilir. Elde edilen bu sonuçlar Tablo 10, 11, 12, 13 ve 14'de ayrı ayrı verilmiştir. Detaylı sonuçlar ve orijinal raporlar Ek 5'te verilmiştir.

Tablo 10. am bloklar yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği

Numune cinsi	Kod	Ref. No.
am bloklar	Nu:1 B	17-847
PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Oksijen, %mol	ASTM D1945	0,274
Azot, %mol		72,094
Karbondioksit, %mol		1,972
Metan, %mol		2,288
Etan, %mol		0,132
Propan, %mol		0,045
i-bütan, %mol		0,012
n-bütan, %mol		0,024
i-pentan, %mol		<0,01
n-pentan, %mol		<0,01
C6+, %mol		<0,01
Hidrojen, %mol		4,293
Karbonmonoksit, %mol		18,861
Hidrojen sülfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100.0



Tablo 11. Pelet yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği

Numune cinsi	Kod	Ref. No.
Pelet	Nu:2 PJ	17-848
PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Oksijen, %mol	ASTM D1945	1,696
Azot, %mol		67,534
Karbondioksit, %mol		2,891
Metan, %mol		6,367
Etan, %mol		0,733
Propan, %mol		0,225
i-bütan, %mol		0,014
n-bütan, %mol		0,054
i-pentan, %mol		<0,01
n-pentan, %mol		0,021
C6+, %mol		0,018
Hidrojen, %mol		3,233
Karbonmonoksit, %mol		17,209
Hidrojen sülfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100.0

Tablo 12. Fındikkabuğu yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği

Numune cinsi	Kod	Ref. No.
Fındikkabuğu	Nu:3 FK	17-849
PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Oksijen, %mol	ASTM D1945	1,406
Azot, %mol		67,645
Karbondiyoksit, %mol		3,126
Metan, %mol		5,761
Etan, %mol		0,489
Propan, %mol		0,126
i-bütan, %mol		0,016
n-bütan, %mol		0,049
i-pentan, %mol		<0,01
n-pentan, %mol		0,02
C6+, %mol		0,047
Hidrojen, %mol		4,434
Karbonmonoksit, %mol		16,874
Hidrojen sülfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100.0

Tablo 13. am kozalağı yakıtının gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği

Numune cinsi	Kod	Ref. No.
am kozalağı	Nu:4 K	17-850
PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Oksijen, %mol	ASTM D1945	0,07
Azot, %mol		72,592
Karbondioksit, %mol		<0,01
Metan, %mol		0,513
Etan, %mol		0,035
Propan, %mol		0,035
i-bütan, %mol		0,017
n-bütan, %mol		0,042
i-pentan, %mol		<0,01
n-pentan, %mol		0,022
C6+, %mol		0,046
Hidrojen, %mol		5,01
Karbonmonoksit, %mol		21,69
Hidrojen sülfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100.0

Tablo 14. Karışık yakıtın gazlaştırılması sonucu üretilen gazın içeriği

Numune cinsi	Kod	Ref. No.
Karışım	Nu:5 K	17-851
PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
Oksijen, %mol	ASTM D1945	0,07
Azot, %mol		74,726
Karbondioksit, %mol		<0,01
Metan, %mol		1,444
Etan, %mol		0,028
Propan, %mol		0,026
i-bütan, %mol		0,012
n-bütan, %mol		0,034
i-pentan, %mol		<0,01
n-pentan, %mol		0,018
C6+, %mol		0,038
Hidrojen, %mol		3,01
Karbonmonoksit, %mol		20,668
Hidrojen sülfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100.0

Üretilen gaz karışımındaki gaz bileşenlerinin yakıt türlerine göre karşılaştırılması Tablo 15'te verilmiştir. Gaz içerisinde yüksek miktarda bulunan azot, tamamıyla reaktöre gönderilen hava ile alakalıdır. Biyokütle içerisindeki azot miktarı ihmal edilebilir düzeydedir. Farklı zamanlarda yapılan deneylerin hava kalitesine göre de değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca yakıtların reaktör içerisindeki performansları sisteme çekilen hava miktarını etkilemiştir.

Tablo 15. Gaz analiz sonuçlarının yakıt türlerine göre karşılaştırılması

PARAMETRE	ÇAM BLOKLAR	PELET	FINDIKKABUĞU	ÇAM KOZALAĞI	BİYOKÜTLE KARIŞIMI
Oksijen, %mol	0,274	1,696	1,406	0,07	0,07
Azot, %mol	72,094	67,534	67,645	72,592	74,726
Karbondioksit, %mol	1,972	2,891	3,126	<0,01	<0,01
Metan, %mol	2,288	6,367	5,761	0,513	1,444
Etan, %mol	0,132	0,733	0,489	0,035	0,028
Propan, %mol	0,045	0,225	0,126	0,035	0,026
i-bütan, %mol	0,012	0,014	0,016	0,017	0,012
n-bütan, %mol	0,024	0,054	0,049	0,042	0,034
i-pentan, %mol	<0,01	<0,01	<0,02	<0,01	<0,01
n-pentan, %mol	<0,01	0,021	0,02	0,022	0,018
C6+, %mol	<0,01	0,018	0,047	0,046	0,038
Hidrojen, %mol	4,293	3,233	4,434	5,01	3,01
Karbonmonoksit, %mol	18,861	17,209	16,874	21,69	20,668
Hidrojen sülfür, %mol	<0,08	<0,08	<0,09	<0,08	<0,08
Toplam, %mol	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Gaz numunelerinin içeriğinde bulunan yanıcı özelliğe sahip gazların yakıtlara göre değerlendirilmesi ve hesaplanan alt ısıl değerleri Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Üretilen yanıcı gaz içeriği ve alt ısıl değerlerinin yakıt türlerine göre karşılaştırılması

Yakıt türü	CO [%]	H <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	N <sub>2</sub> [%]	Diğer [%]	LHV <sub>katı</sub> [MJ/kg]
Çam bloklar	18,861	4,293	2,288	1,972	72,094	0,49	17,60
Fındıkkabuğu	16,874	4,434	5,761	3,126	67,645	2,16	18,36
Çam kozalağı	21,69	5,01	0,513	<0,01	72,592	0,71	19,10
Pelet	17,209	3,233	6,367	2,891	67,534	2,76	19,40
Biyokütle karışımı	20,668	5,01	1,444	<0,01	74,726	3,15	18,61

Üretilen gazın içeriği, gaz üretim verimliliği ve soğuk gaz verimine doğrudan etki etmektedir. Eşdeğerlik oranının belirlenmesinde, üretilen gazın miktarı ile verilen hava oranının dengeli olarak değişimi sağlanmıştır. Her bir biyokütle türü için hesaplanan gaz üretim verimliliği, sentez gazının alt ısıl değeri ve soğuk gaz verimi Tablo 17’de verilmiştir. Oksidasyon bölgesine gönderilen havanın hızı ve besleme kanallarının kesit alanı, verilen havanın debisini belirlemektedir. Burada hava için Uluslararası Standart Atmosfer (ISA) şartlarındaki (15 °C, 1 Atm) değerler dikkate alınmıştır. Biyokütle hammaddelerinin alt ısıl değerleri için Tablo 16’da verilen değerler hesaba katılmıştır. Bu değerler literatür kısmında verilmiştir. Biyokütle karışımı için bu değer, diğer hammaddelerin ortalaması bulunarak yazılmıştır. Biyokütle karışımı için ortalama kalorifik değer belirlenmiştir. Yakıt tüketimi için, yapılan deneylerin ortalama tüketimleri hesaba katılmıştır. Sistem çıkışında 50 °C sıcaklığın altında ve 2 Nm<sup>3</sup>/kg yakıt gaz üretim verimliliğinin üstünde gaz üretebilmek amacıyla yakıt türleri için farklı ER değerlerinin uygulanmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Biyokütle karışımı için yapılan değerlendirme sonucunda tek tipte hammaddenin kullanılmasının daha uygun olacağı anlaşılmaktadır.

Tablo 17. Üretilen yanıcı gazın yakıt türlerine göre performans değerlendirmesi

Yakıt türü	ER	$V_{gaz}$ [Nm <sup>3</sup> /kg yakıt]	LHV <sub>gaz</sub> [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	CGE [%]
Çam bloklar	0,36	2,00	3,66	41,6
Fındikkabuğu	0,37	2,21	4,47	53,7
Çam kozalağı	0,38	2,09	3,99	43,7
Pelet	0,42	2,50	4,80	61,9
Biyokütle karışımı	0,40	2,18	3,65	42,7

Yapılan deneyler sonucunda sistemden alınan kül miktarı her 10 kg yakıt yükleme için 250-350 gr arasında %2,5-3,5 oranında belirlenmiştir. Benzer şekilde, deneyler sonunda oluşan katranlı sıvı içerik 50-150 gr arasında %0,5-1,5 oranında olmaktadır. Düzeneğin bağlantı noktalarından oluşabilecek gaz kaçaqları, çıkışta gaz kalitesini etkilediği ve böyle bir durumda yanıcı gaz oranının azaldığı anlaşılmıştır. Yanıcı gazın önemli bir kısmını oluşturan H<sub>2</sub>'nin bu küçük boşluklardan sızarak gaz çıkışına ulaşmadan sistemi terk ettiği tahmin edilmektedir. Sistem içerisinde ortaya çıkabilecek ani basınç düşüşleri ve buna bağlı olarak sıcaklıklardaki azalmalar, sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dış ortamda yapılan deneylerde hava koşullarının (özellikle hava akışı) etkisi ölçümlerde fark edilmiştir.

## 4. TARTIŞMA

Gazlaştırma sıcaklıkları yakıt türlerine göre değişiklik göstermektedir. Sistem basınç düşüşünün yakıtın fiziksel özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu söylemek mümkündür. Tasarlanan reaktör geometrisinin belirlenen yakıt türleri için performansını değerlendirmek mümkündür ve bu bölümde tartışılmıştır.

### 4.1. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Üretilen gaz, içeriğine uygun olarak oldukça açık gri renğinde elde edilmiştir. Temiz ve soğutulmuş gazın hareketsiz halde çıplak gözle görülmesi oldukça zordur. Tüm analizlerde elde edilen sentez gazı için kalorifik değer 3,5 MJ/kg üzerinde olduğu ve en yüksek değerin 4,80 MJ/kg olarak pelet yakıtı ile sağlandığı görülmektedir. Aynı şekilde, soğuk gaz veriminin en yüksek değeri %61,9 olarak pelet yakıtı ile başarılmıştır.

Kurutma sonrasında ortaya çıkan pelet tozlarının, proliz ve oksidasyon bölgesine ulaştığında hacimce genişlemeleri sonucu reaktör iç çeperlerine yapışması gözlenmiştir. Bu durumda yakıtın ağırlığının etkisiyle aşağı hareketi engellenmekte ve reaktörde sıkışma meydana gelmektedir. Izgara üzerinde meydana gelen bu yumuşama ve yapışma durumları ızgaranın hareket ettirilmesi ile önemli oranda engellenebilmiştir. Ayrıca reaktörün silkelmesi de bu açıdan yararlı olmaktadır. Kullanılan pelet yakıtın, yakıt özelliklerini ile birlikte üretim tekniği açısından “kaliteli” olması da gerektiği anlaşılmıştır.

Yapılan deneyler boyunca tüm hammadde türleri için gazlaştırma 1000°C ‘nin altında sıcaklıklar elde edilmiştir. Üretilen gazın içeriğinde NO<sub>x</sub> oluşumuna rastlanmamıştır. SO<sub>x</sub> oluşumu ise oldukça küçük değerlerde kalmıştır. Ancak güneş çanağı kullanılarak yapılan deneylerde 1500°C üzerinde oksidasyon bölgesi sıcaklıklarına çıkılmıştır. Biyokütlenin doğrudan yanmasında 1400°C sıcaklığın üzerinde NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> oluşumları önem kazanmaktadır [65]. Ancak seçilen biyokütlerdeki N ve S oranı çok düşüktür. Ürün gazı içeriğindeki N<sub>2</sub> oluşumu, çoğunlukla besleme havasından kaynaklanmaktadır. Oksidasyon bölgesinde kısmi yanmayı sağlayan oksijen miktarı, tam yanmaya kıyasla oldukça düşük kalmaktadır. Bu nedenle, ulaşılan bu yüksek sıcaklıklara rağmen bu oluşumların ihmal edilebileceği varsayılmıştır.

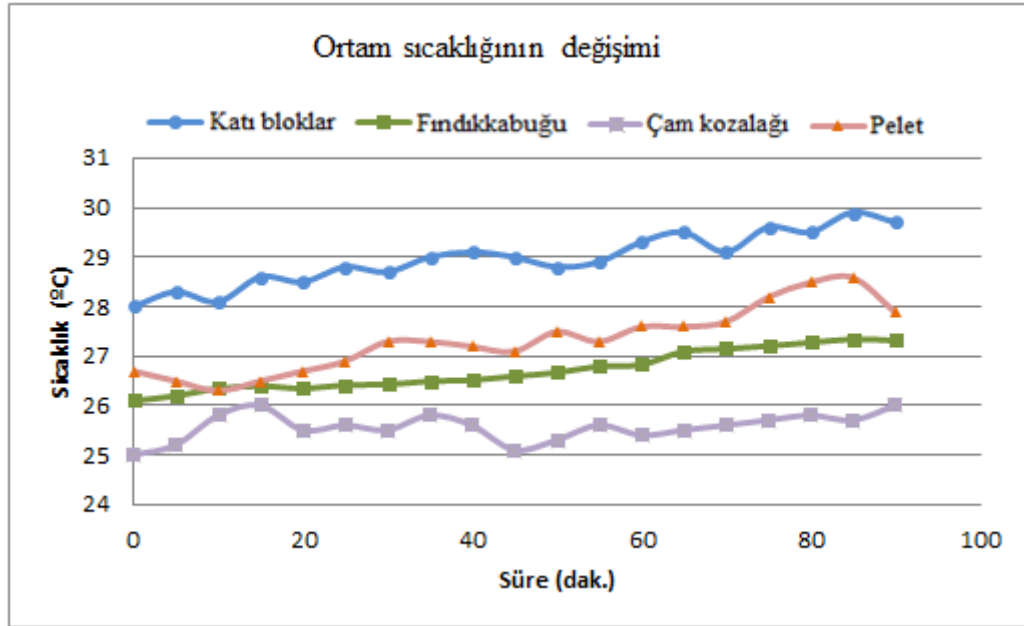


#### 4.1.1. Standard Deney Düzeninde Hız ve Sıcaklık Değişimleri

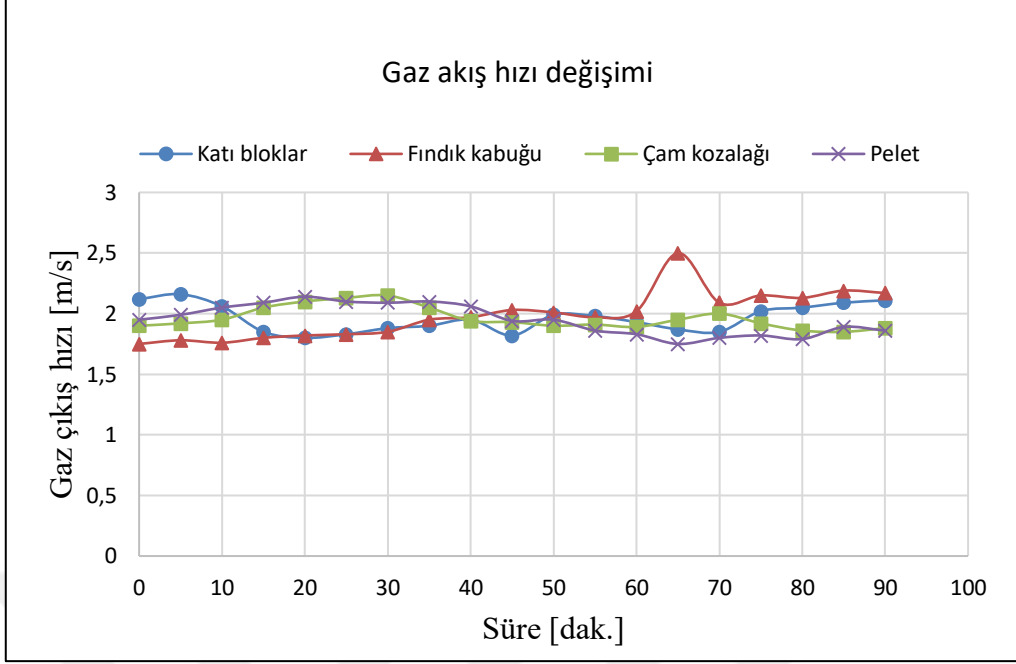
Yapılan tüm deneylerde ani sıcaklık artışları ve düşüşleri gözlenmiştir. Katı kütleli hareketi sonucu termo elemanların bulunduğu ortam koşulları değişmektedir. Kor halindeki yakıt parçacığının termo elemanın üzerine düşmesi sonucu ani sıcaklık artışlarının olduğu ve tersi durumda yani, kül ve yanmamış yakıtın termo elemanı örtmesi sonucu ani sıcaklık düşüşleri meydana geldiği anlaşılmıştır.

Reaktör içerisinde yakıt-gaz karışımının hareketlerine ve reaksiyonlarına bağlı olarak ayarlanan sabit emiş hızında inişli-çıkışlı değişikliklerin olduğu belirlenmiştir. Bu durum en uygun ER için ihtiyaç duyulan hava miktarını etkilemiştir.

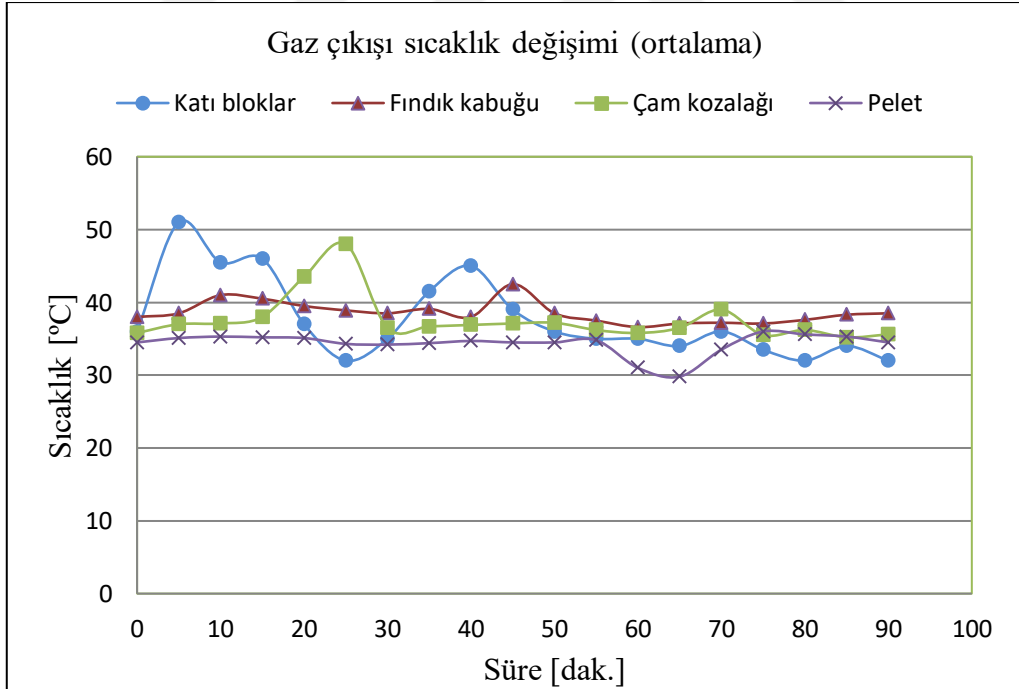
Pelet yakıtlı deneylerde ulaşılan sıcaklıkların diğer yakıtlara göre daha düşük olduğu grafiklerden görülmektedir. Bunun nedeni, oksidasyon bölgesinde kısmi yanmanın sürekliliğinin sağlanmasında yaşanan zorluklardır. Parçalanan pelet tozları, hava akışını engellemeyi yanı sıra gaz akışında da kesintilerin yaşanmasına neden olmaktadır. Deneyler, yaz koşullarında ve Şekil 34'te verilen ortalama hava sıcaklıklarında yapılmıştır. Sistem çıkışında gaz akış hızı ve çıkış sıcaklığı değerleri sırasıyla Şekil 35 ve Şekil 36'da verilmiştir. Çıkış hızı, ısıtma ve pişirme amaçlı kullanımda gerekli olan debiyi sağlayabilecek miktardadır. Gaz çıkış sıcaklığı ise genellikle uygun sıcaklık olan 40°C'nin altındadır.



Şekil 34. Deney numuneleri için deney ortamı sıcaklıklarının ortalama değişimi



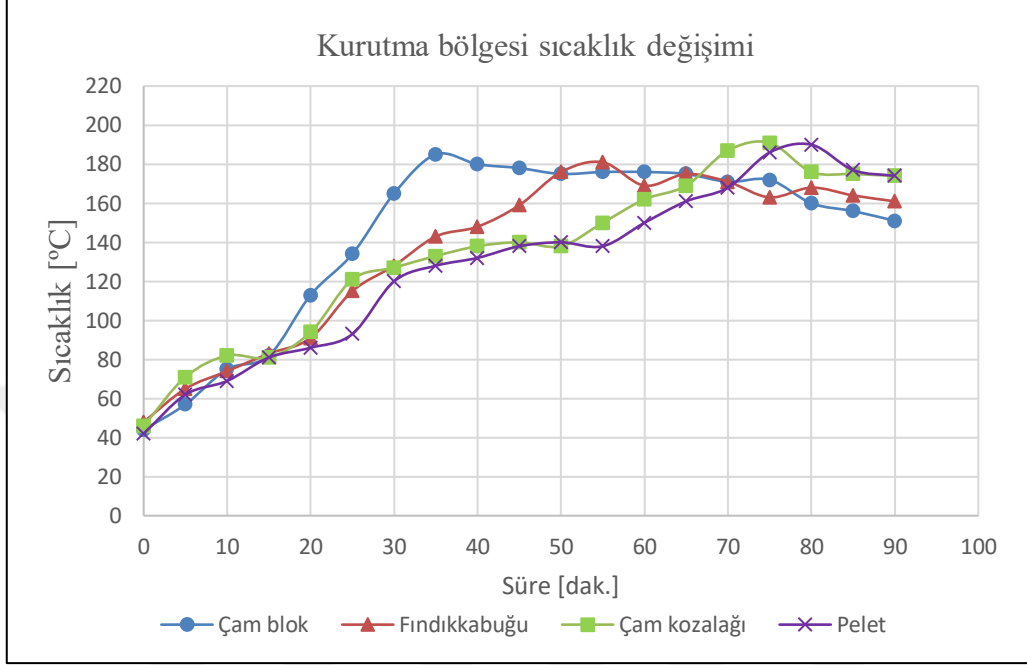
Şekil 35. Deney numunelerine göre gaz çıkış hızı ortalama değişimi



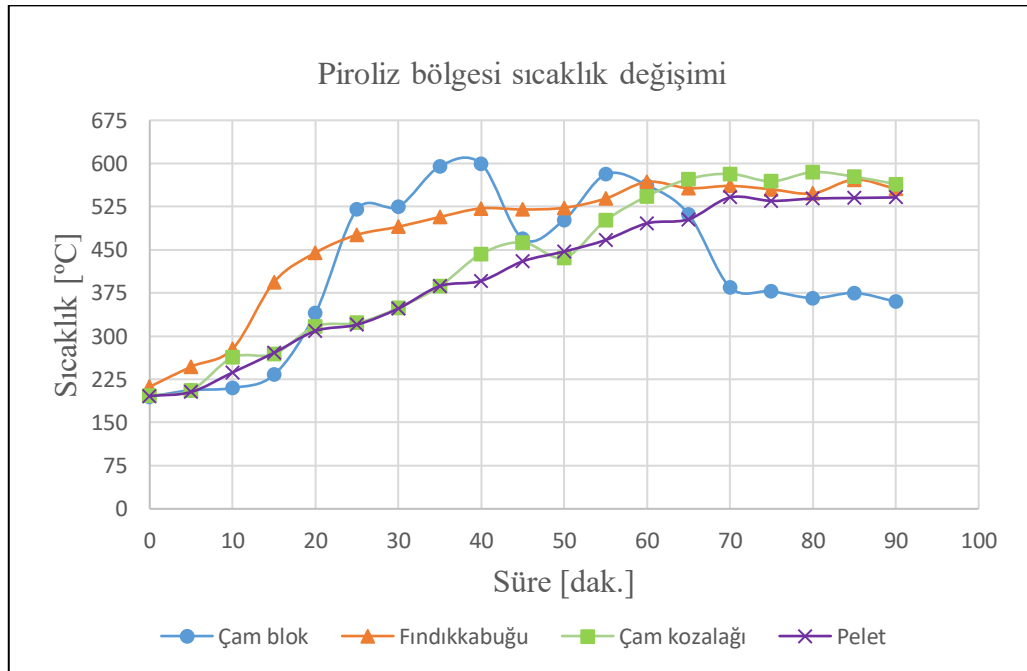
Şekil 36. Gaz çıkış sıcaklığı ortalama değişimi

Yapılan deneylerde tüm biyokütle yakıtları için gazlaştırma sıcaklıkları kaydedilmiştir. Her yakıt numunesi için elde edilen ortalama sıcaklık sonuçları Şekil 37-

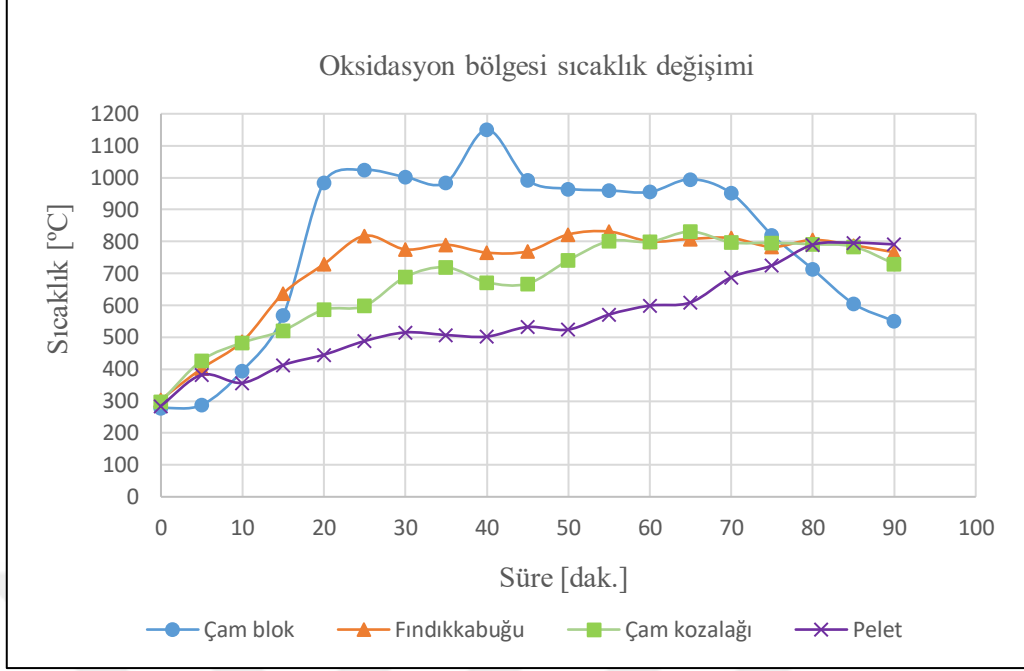
40'da verilmiştir. Ortalama 20 dakikalık denge süresinden itibaren literatürde verilen gazlaştırma sıcaklıklarının sağlandığı görülmektedir.



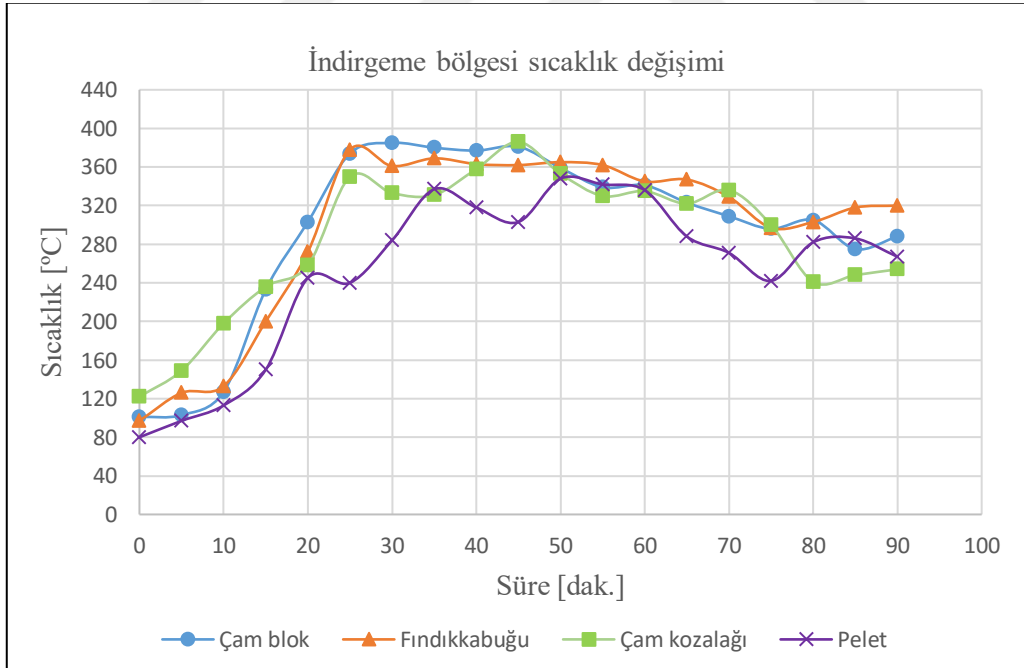
Şekil 37. Kurutma bölgesi ortalama sıcaklık değişimi



Şekil 38. Proliz bölgesi ortalama sıcaklık değişimi



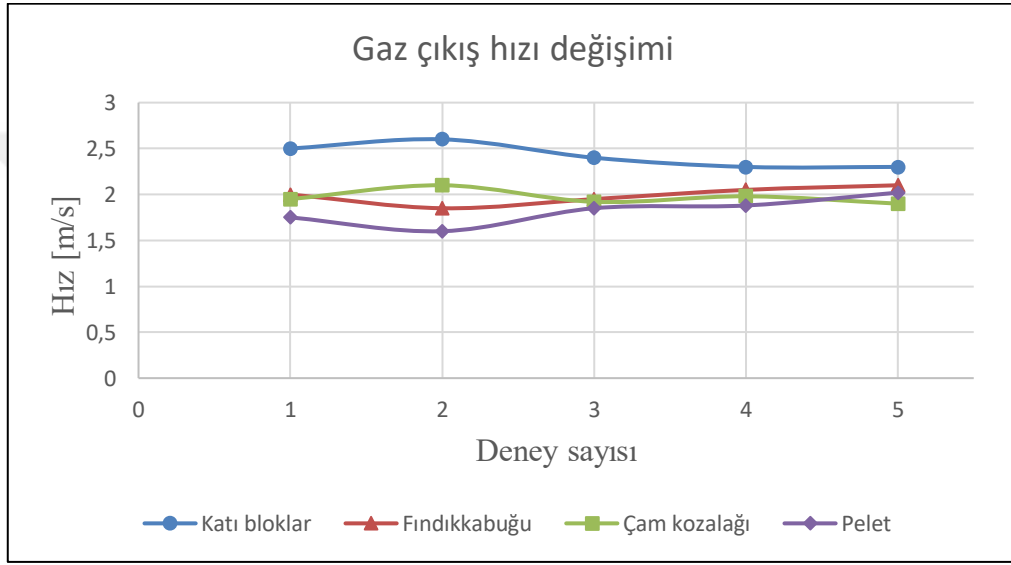
şekil 39. Oksidasyon bölgesi ortalama sıcaklık değişimi



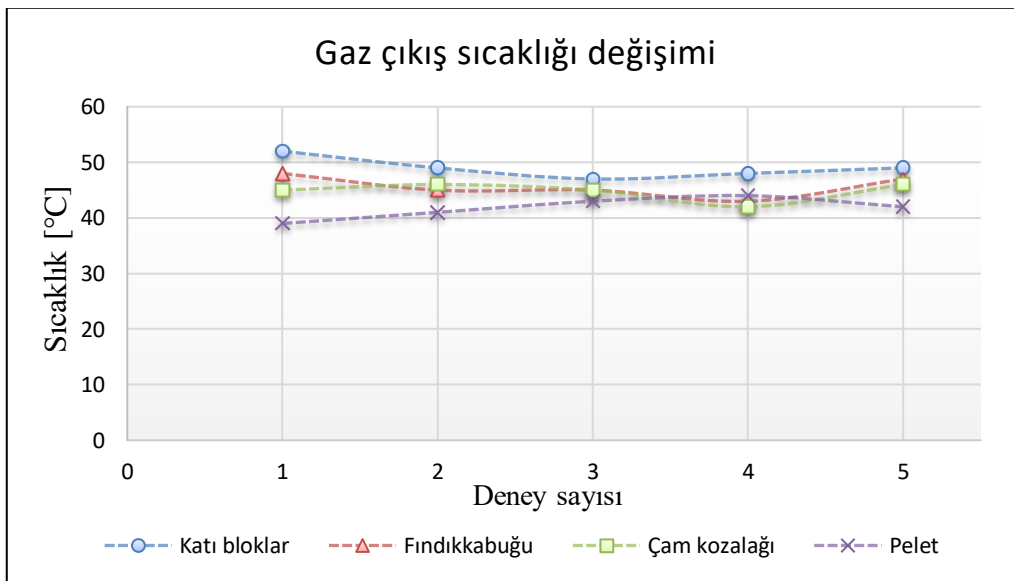
şekil 40. İndirgeme bölgesi ortalama sıcaklık değişimi

#### 4.1.2. Güneş Enerjili Sistem Hız ve Sıcaklık Değişimleri

Güneş enerjisi desteği ile yapılan deneylerde gaz çıkış hızı ve sıcaklığı ile ilgili ortalama değerler elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 41 ve 42’de verilmiştir. Gaz çıkış hızı standart gazlaştırma yöntemine yakın kalmakla birlikte, debi ihtiyacı için uygun olan küçük artışlar(>%10) olmuştur. Gaz sıcaklığı ise standart sisteme göre yaklaşık 10°C artışla birlikte literatürde kritik sıcaklık olarak kabul edilen 50°C’nin altında kalmıştır.

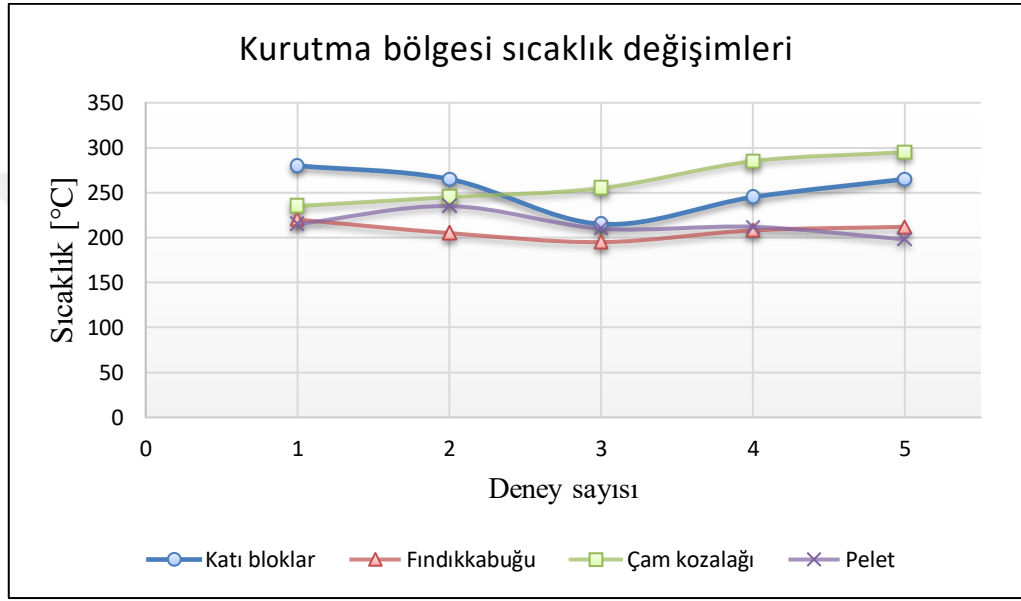


Şekil 41. Gaz çıkış hızı ortalama değişimi

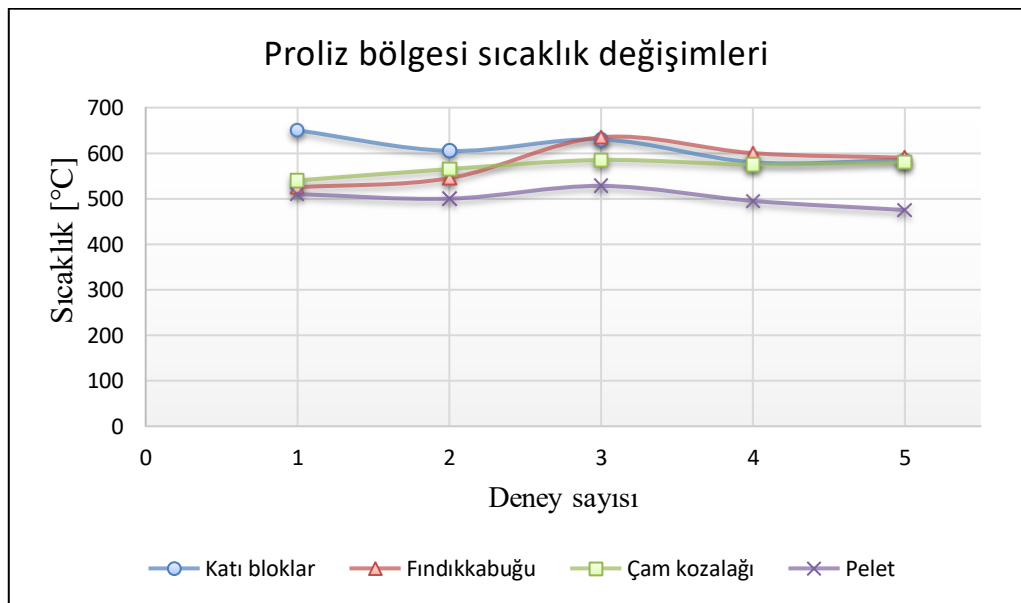


Şekil 42. Gaz çıkış sıcaklığı ortalama değerleri

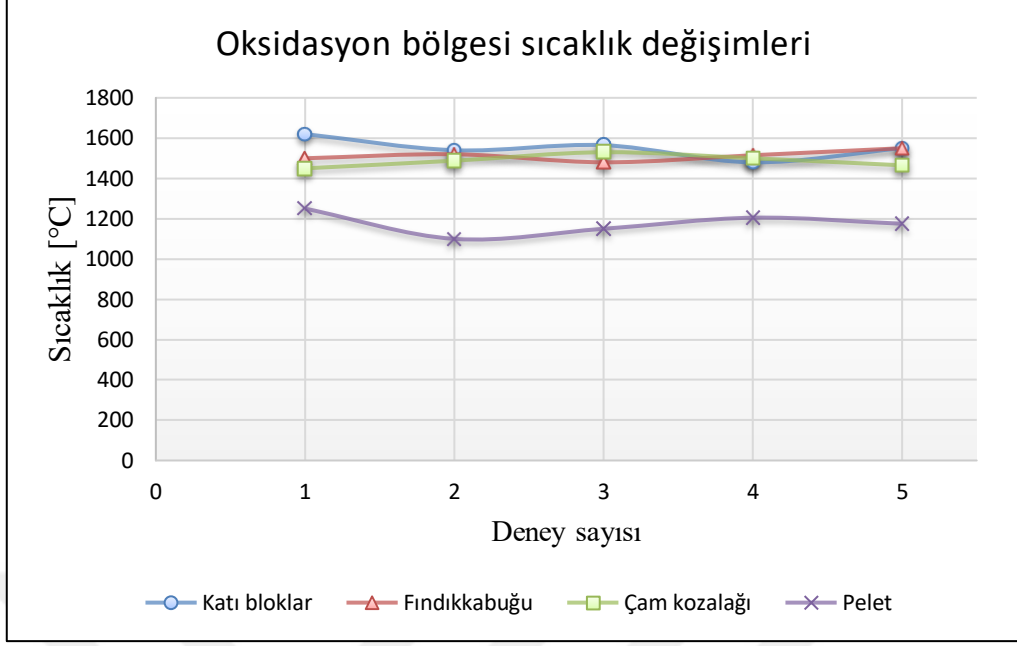
Reaktör içerisinde ulaşılan sıcaklıklar için ortalama değişim her bölge için sırasıyla Şekil 43-46'da verilmiştir. Tüm biyokütle türleri için standart gazlaştırmaya göre önemli iyileştirmenin yapıldığı görülmektedir. Oksidasyon bölgesinde ulaşılan sıcaklıklar yaklaşık %50 oranında daha yüksek olmakla birlikte, diğer bölgelerde de yüksek sıcaklıklara neden olmuştur. Yalnızca pelet yakıtı için bu ortalamanın altında bir artış olması, bu yakıtın yüksek sıcaklıkta hacimce genişlemesi sonucu hava beslemesinin az olduğunu göstermektedir.



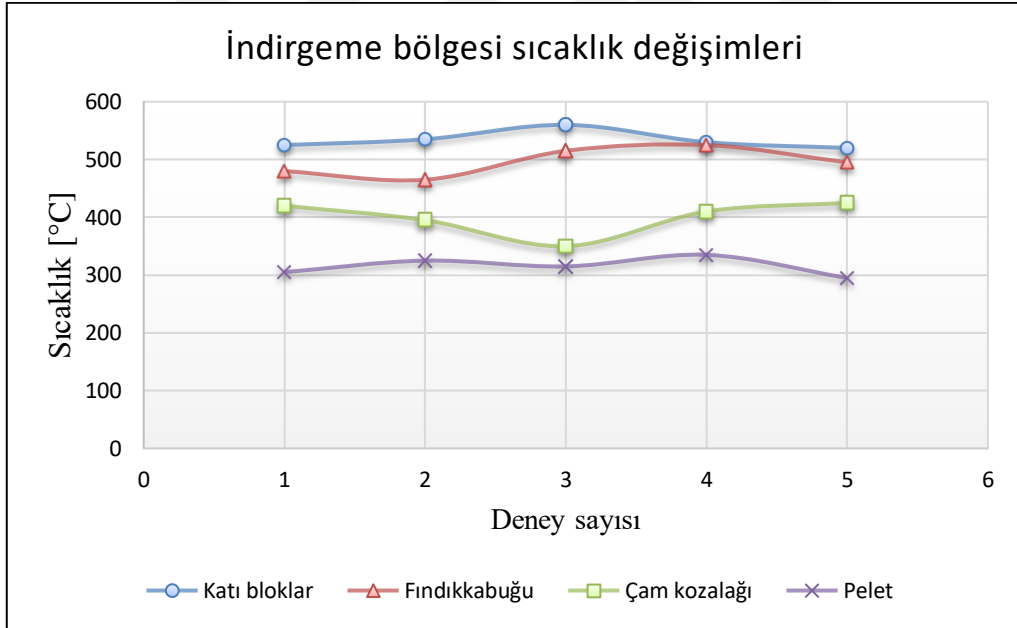
Şekil 43. Kurutma bölgesi için ortalama sıcaklık değişimleri



Şekil 44. Proliz bölgesi için ortalama sıcaklık değişimleri

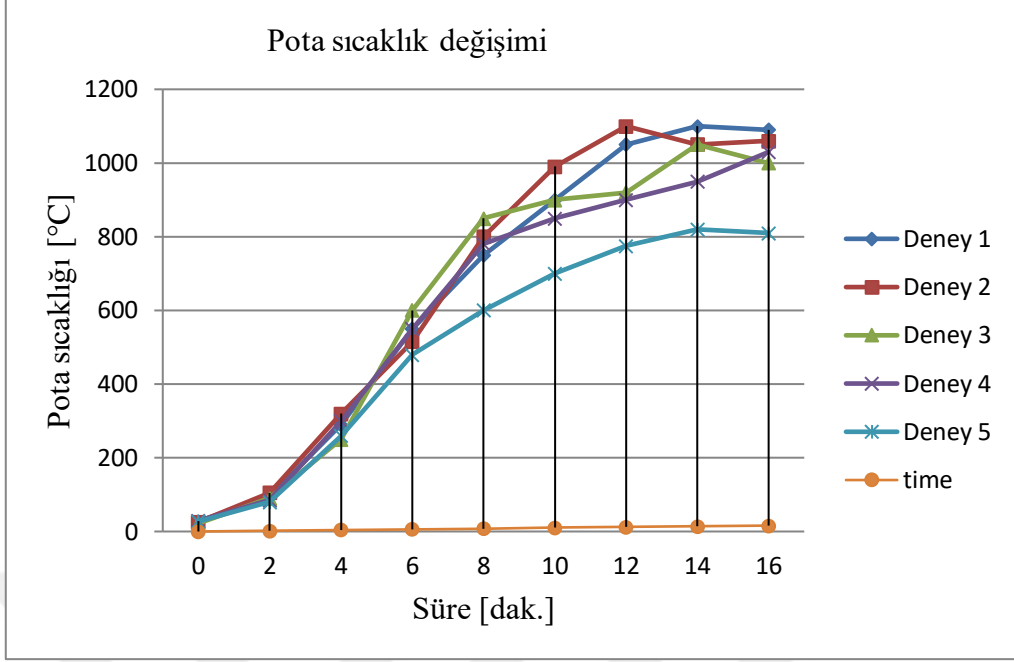


Şekil 45. Oksidasyon bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri

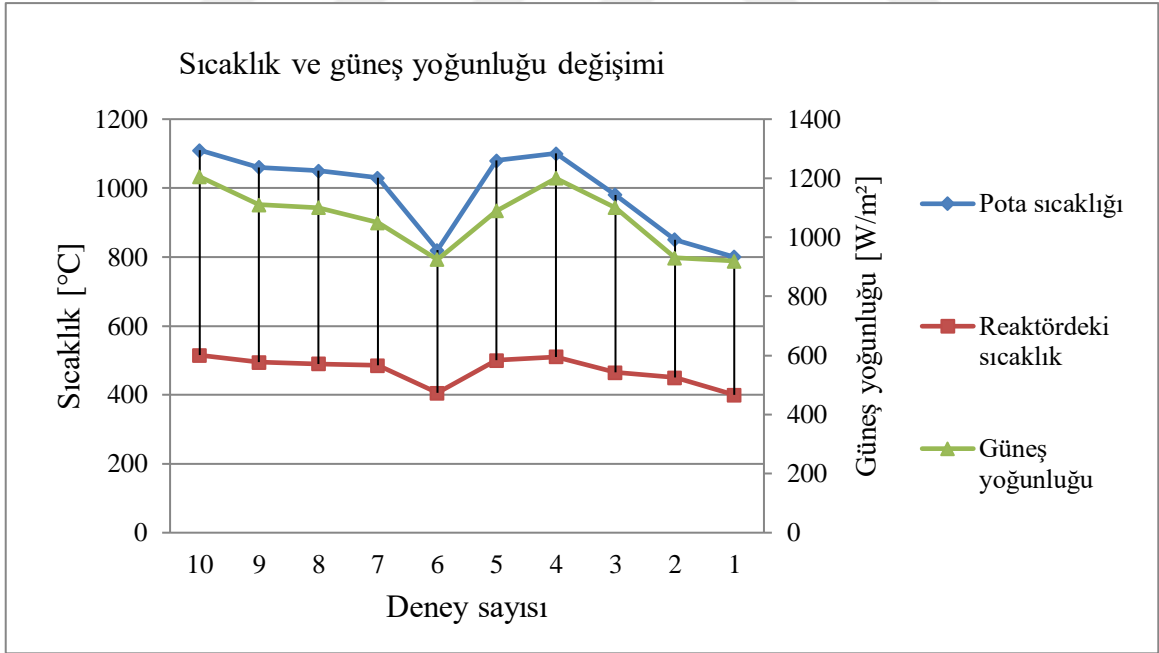


Şekil 46. İndirgeme bölgesi için bölgelerin ortalama sıcaklık değişimleri

Güneş yoğunluğunun sağlanmasında kullanılan çanağın pota üzerinde sıcaklık dengesini sağlaması gerekir. Bu süre ortalama 12 dakika olarak belirlenmiştir ve bu değişim Şekil 47’de verilmiştir. Yapılan on farklı deneyde, pota ve reaktördeki sıcaklık değişimleri güneş yoğunluğu ile birlikte Şekil 48’den görülmektedir.



şekil 47. Pota üzerinde denge sıcaklığına ulaşıncaya kadar geçen süre



şekil 48. Pota, reaktör sıcaklık değişimi ve güneş radyasyonu değişimi



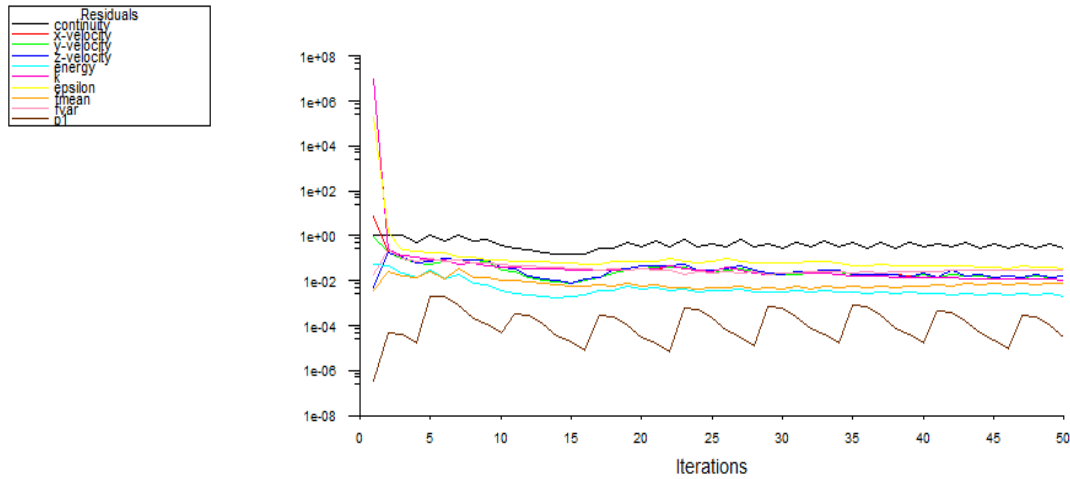
## 4.2. Isıl Analizler ve Kütle Fraksiyonları

### 4.2.1. Standart Gazlaştırma Analizi

Yapılan çalışmalar kısmında geometrik ölçüleri verilen oksidasyon bölgesi, Solidworks programında katı model olarak çizilmiştir. Katı model Ansys workbench 16.2 programında akış alanında (fluid domain)  $5e-2$  ölçüsünde sonlu elemanlarına (mesh) ayrılarak değerlendirilmiştir. Oksidasyon bölgesindeki kanallar hava giriş kanalları olarak tanımlanmış ve oksidasyon bölgesi alt ve üst kısmı ise kütle akışı için tanımlanmıştır.

Sistem ayarları; enerji denklemi, standart k-epsilon modeli, standart çelik duvar fonksiyonları, standart radyasyon  $P_1$ , ön karışimsız yanma (non-premixed combustion) ve atmosfer basıncı olarak ayarlanmıştır.

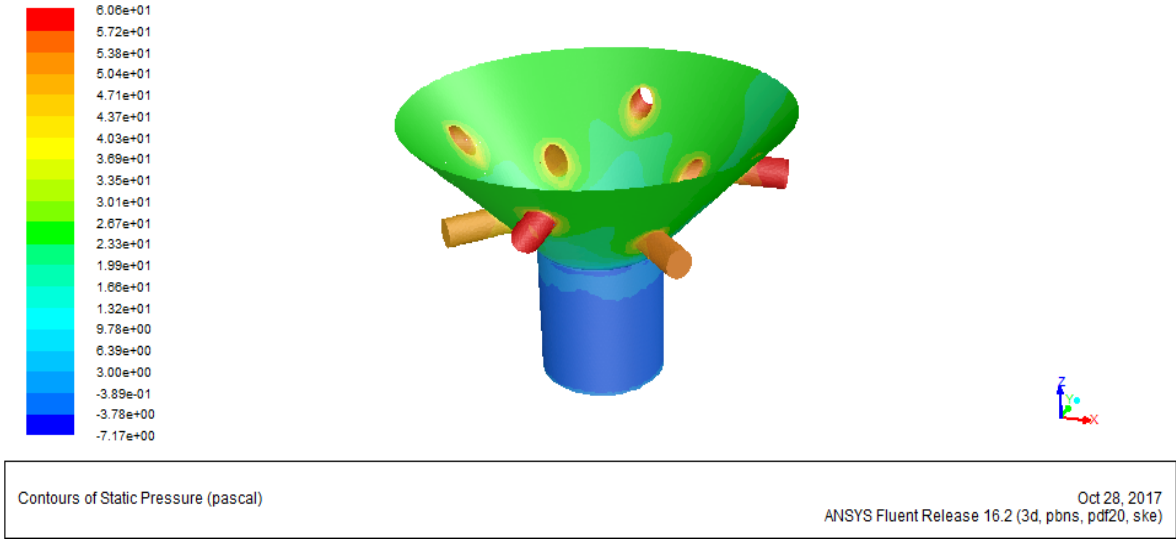
Sınır koşulları Matlab R2009a programında yazılan kısa bir program ile hesaplanarak sisteme girilmiştir. Bu koşullar hava/yakıt beslemesi için belirlenen eşdeğerlik oranına göre sisteme girilmiştir. Bu program Ek 4'te verilmiştir. Alt ısı değerleri biyokütle türlerinin ortalama değerleri olarak alınmıştır. Yakıt giriş ve çıkış sıcaklıkları ise sırasıyla  $550$  ve  $350^\circ\text{C}$  olarak tanımlanmıştır. Yapılan 50 iterasyon (Şekil 49) ile bölgenin statik ve dinamik basınç kontürleri belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 50 ve Şekil 51'de verilmiştir.



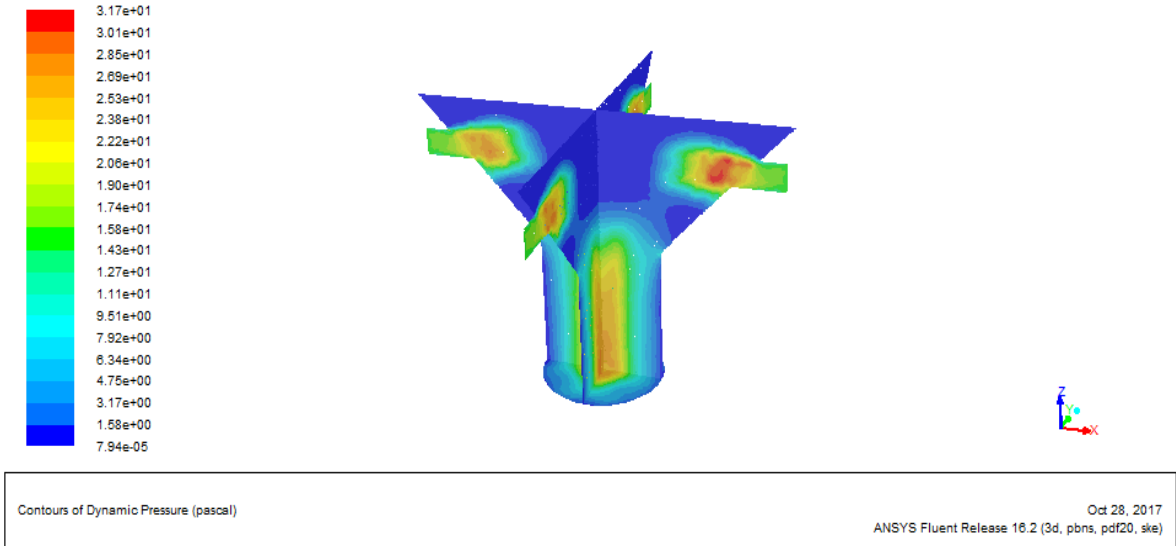
Scaled Residuals

Oct 28, 2017  
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, pbns, pdf20, ske)

Şekil 49. Koşuturma yakınsaması

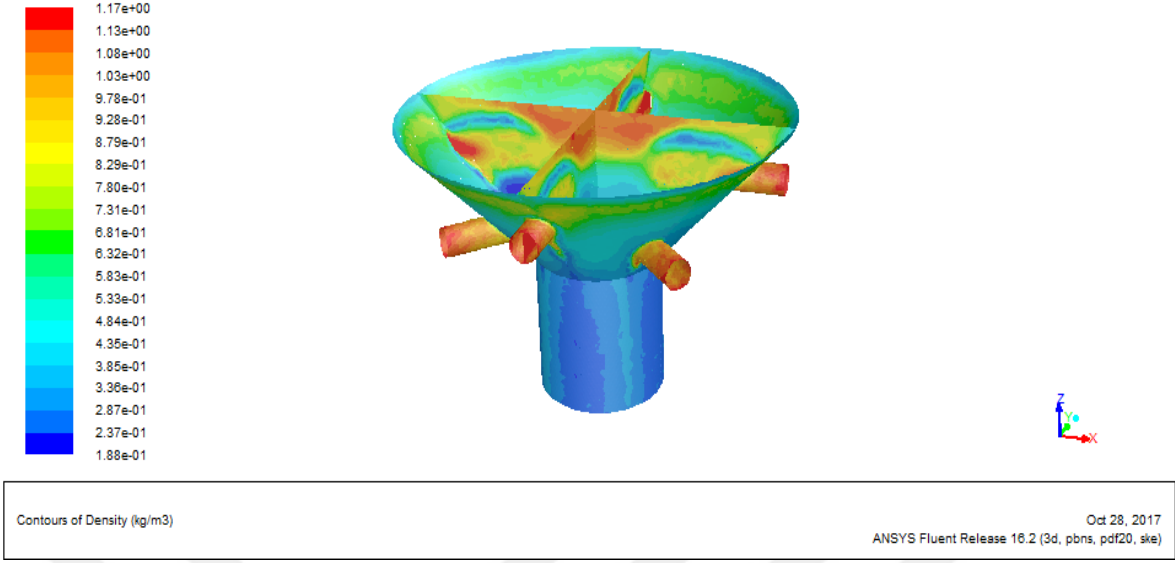


Şekil 50. Oksidasyon bölgesi statik basınç kontürleri

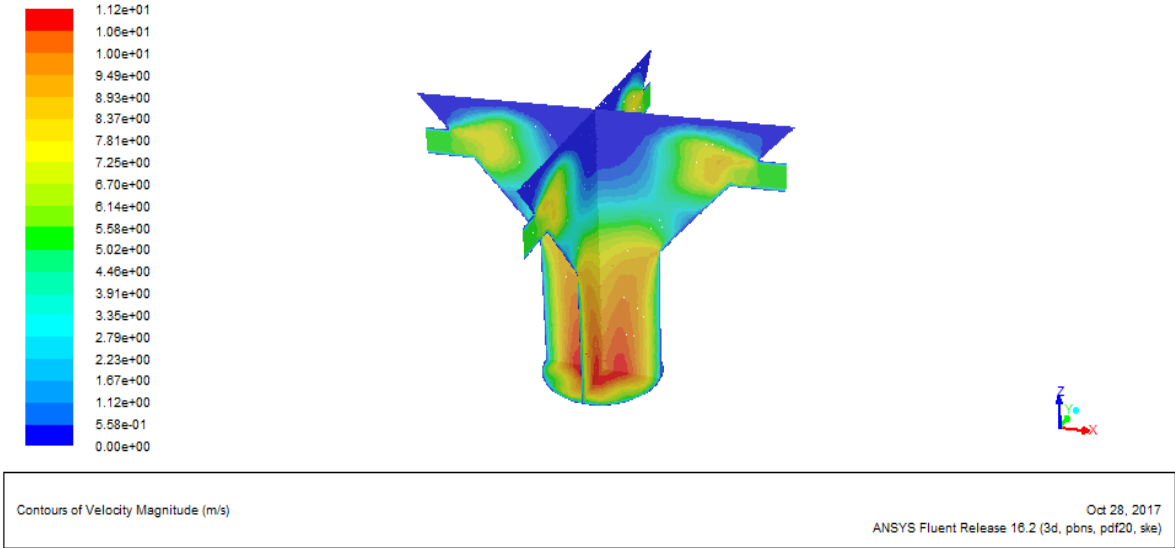


Şekil 51. Oksidasyon bölgesi dinamik basınç kontörleri

Oksidasyon bölgesi içerisinde, hava beslemesinin yapıldığı kanal girişleri ve biyokütlenin yığıldığı bölgenin merkezi, katı-gaz karışımına ait yoğunluğun en fazla olduğu kısımlardır(Şekil 52). Hız kontürleri ise, Şekil 53'den görülebileceği gibi hava besleme kanalları girişleriyle birlikte gazın bölgeyi terk ettiği alt kısımda daha yüksektir.

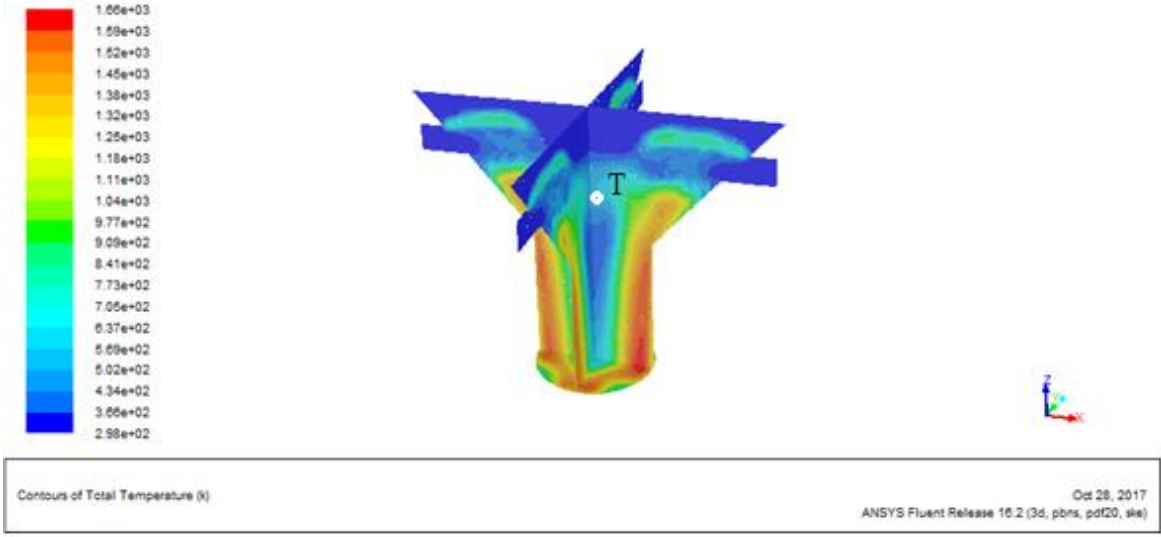


Şekil 52. Oksidasyon bölgesi yoğunluk kontrolleri

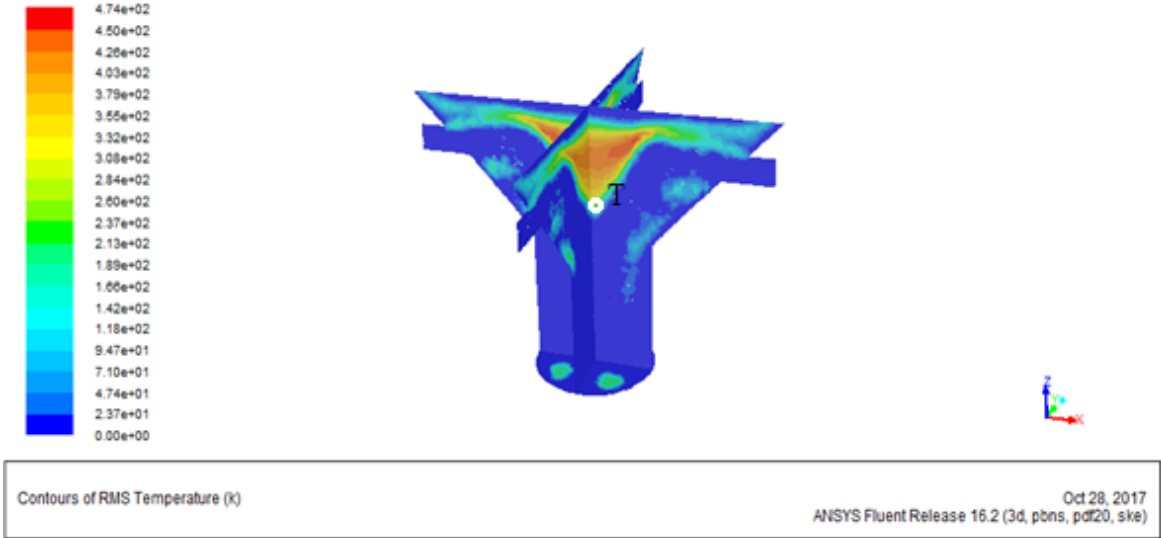


Şekil 53. Oksidasyon bölgesi hız kontrolleri

Deneysel boyutlarda oksidasyon bölgesinin merkez kısmında yapılan sıcaklık ölçüm değerleri (Şekil 54-55), yapılan ısı analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Standart gazlaştırma ile elde edilen 750-1000C arasındaki ortalama sıcaklık değerleri, ısı analizinde ölçüm noktası için yaklaşık 800°C olduğu Şekil 54'te görülmektedir. Moleküler sıcaklık kontrolleri ise, Şekil 55'ten görülebileceği gibi bölgenin orta kısmında en fazladır.

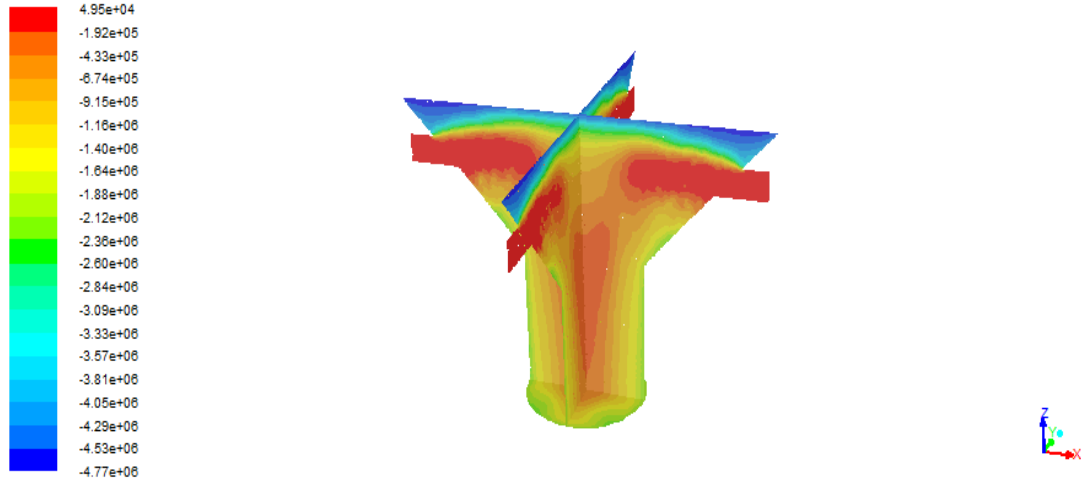


Şekil 54. Oksidasyon bölgesi toplam sıcaklık kontörleri



Şekil 55. Oksidasyon bölgesi moleküler (Root-Mean-Square) sıcaklık kontürleri

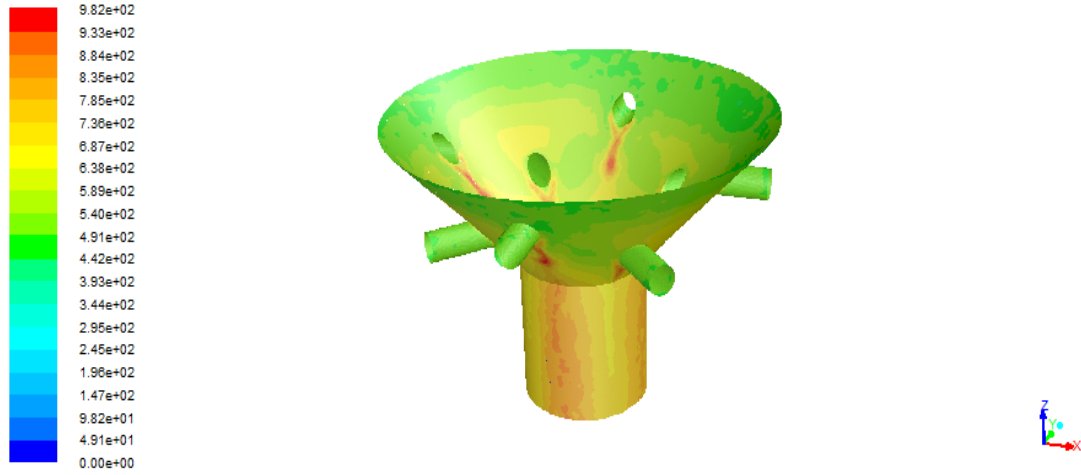
Tasarlanan gazlaştırıcı reaktörün oksidasyon bölgesi için toplam enerji değişimi, cidar sıcaklık dağılımı ve kinetik enerji değişimi sırasıyla Şekil 56, Şekil 57 ve Şekil 58’de verilmiştir. Hava besleme kanalları ile oksidasyon bölgesi cidarının birleştiği kısımlar, yüksek sıcaklıkların olduğu kritik kısımlardır ve reaktör ömrünü doğrudan etkileyeceği söylenebilir.



Contours of Total Energy (J/kg)

Oct 28, 2017  
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, pbns, pdf20, ske)

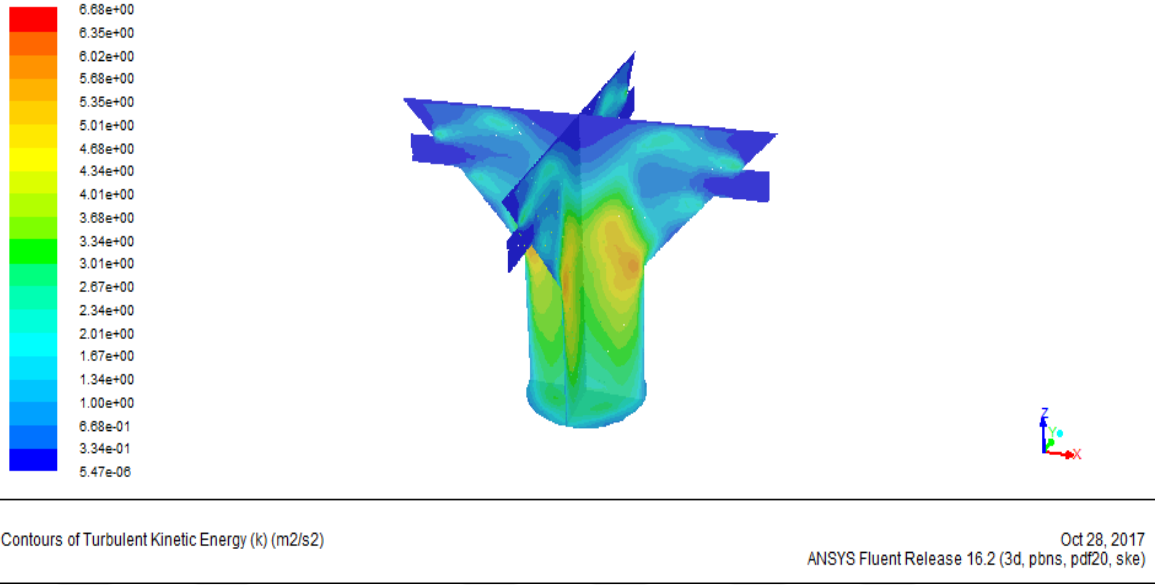
Şekil 56. Oksidasyon bölgesi toplam enerji kontörleri



Contours of Wall Temperature (K)

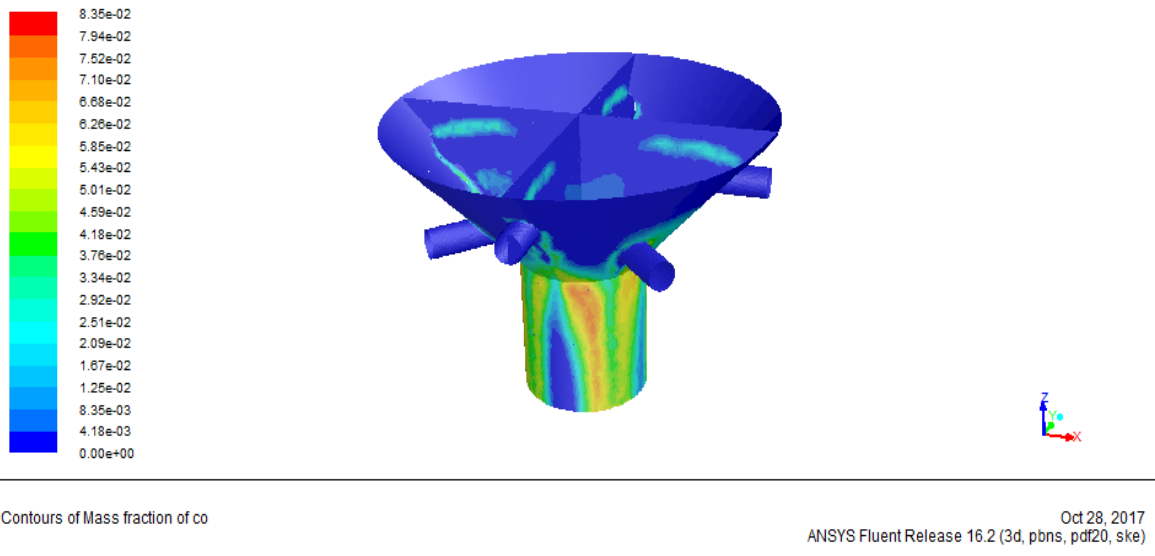
Oct 28, 2017  
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, pbns, pdf20, ske)

Şekil 57. Oksidasyon bölgesi duvar sıcaklığı kontürleri

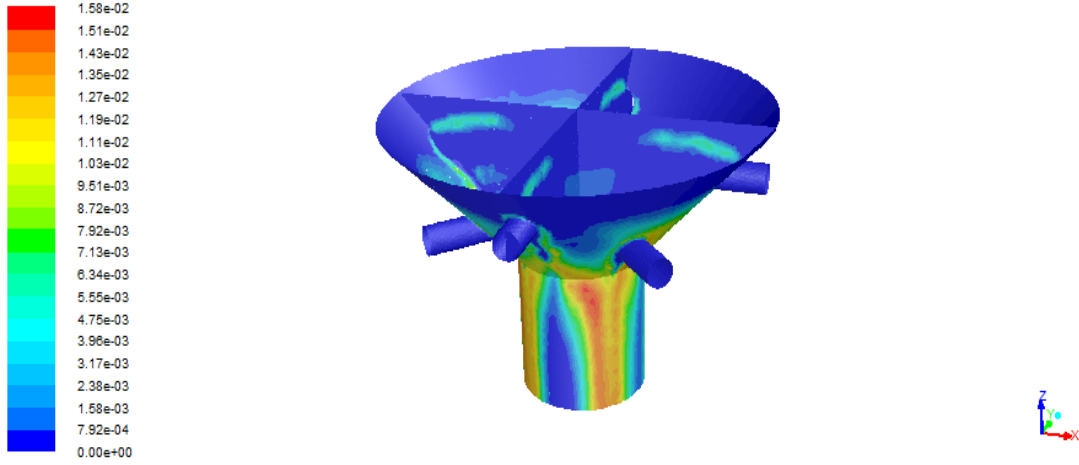


Şekil 58. Oksidasyon bölgesi türbülans kinetik enerjisi kontürleri

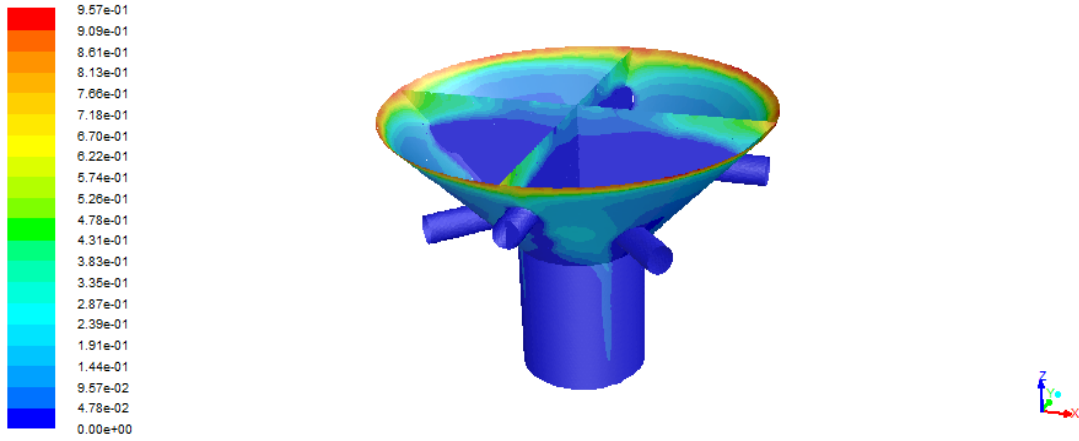
Bazı yanma ürünlerine ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  ve  $\text{N}_2$ ) ait kütle fraksiyonları ise Şekil 59-62'de verilmiştir. Gaz yoğunluğunun en fazla olduğu kısım olan oksidasyon bölgesinin çıkışında özellikle  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ve  $\text{CO}_2$  bileşenlerinin oluşumu en fazladır. Bu durum söz konusu gazlar için sırasıyla Şekil 59, Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'de görülmektedir.



Şekil 59. Oksidasyon bölgesi CO kütle fraksiyonu kontürleri

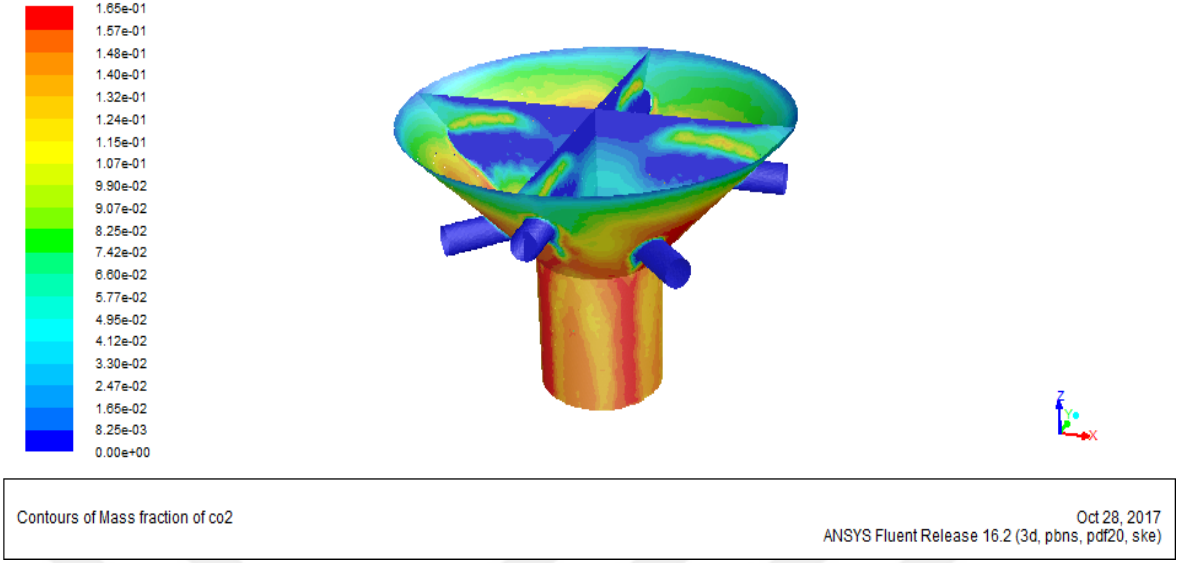


Contours of Mass fraction of h2

Oct 28, 2017  
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, pbns, pdf20, ske)Şekil 60. Oksidasyon bölgesi H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri

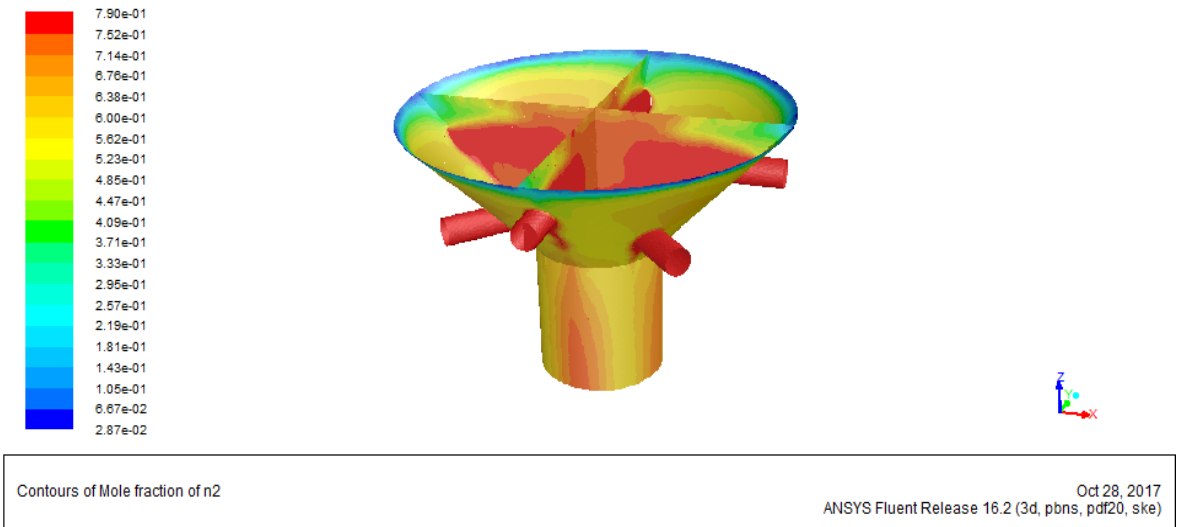
Contours of Mole fraction of ch4

Oct 28, 2017  
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, pbns, pdf20, ske)Şekil 61. Oksidasyon bölgesi CH<sub>4</sub> kütle fraksiyonu kontürleri



Şekil 62. Oksidasyon bölgesi CO<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri

Diğer gaz bileşenlerinin aksine N<sub>2</sub> fraksiyonu, oksidasyon bölgesinin her tarafına dağılmıştır. Bunun nedeni, sistemden çıkan azot miktarının çok büyük bir kısmının besleme havasından kaynaklanmasıdır. Bölgenin iç kısımlarında dengeli dağılımın olması, gazlaştırma için uygun besleme koşullarının sağlandığını göstermektedir. Bu durum Şekil 63'te görülmektedir.

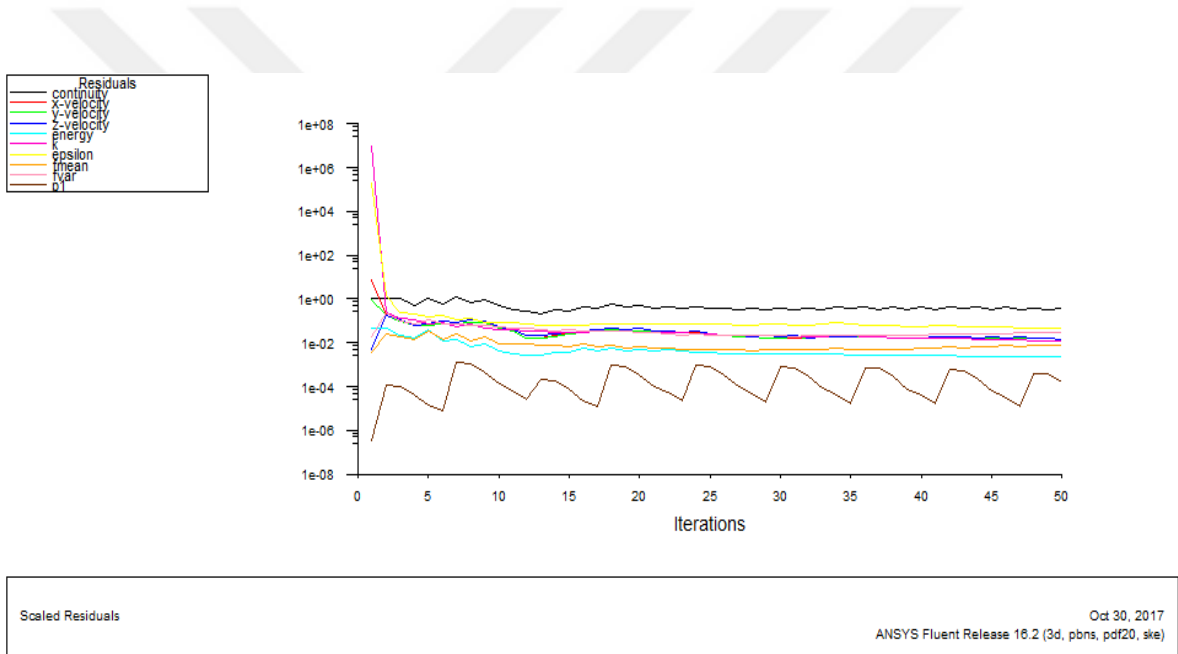


Şekil 63. Oksidasyon bölgesi N<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri

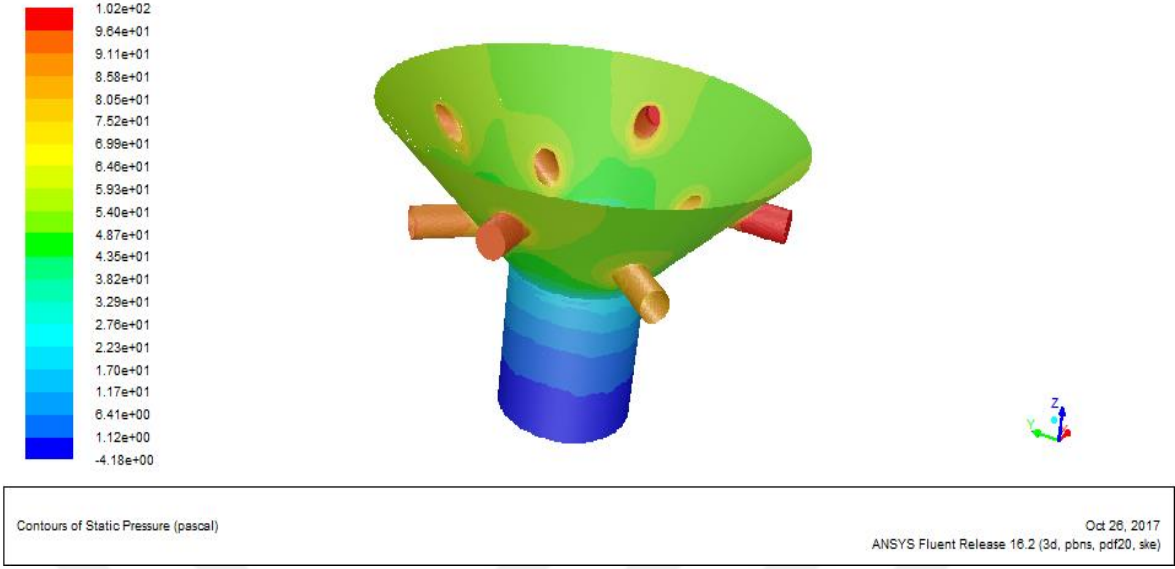


#### 4.2.2. Güneş Çanaklı Gazlaştırma Analizi

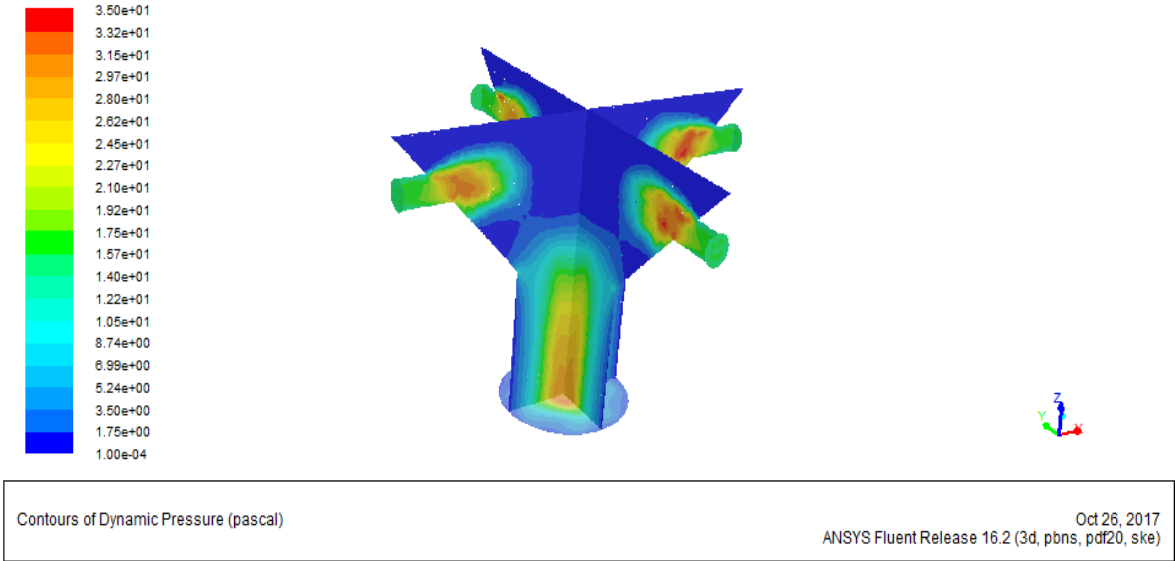
Güneş enerjisinden yararlanılarak yapılan deneylerde ölçülen oksidasyon bölgesi ortalama sıcaklığına bağlı olarak giriş koşulları değiştirilmiştir. Bu durumda yakıt giriş ve çıkış sıcaklıkları ise sırasıyla 700 ve 450 °C olarak tanıtılmıştır. Ancak eşdeğerlik oranı ve biyokütle yakıtının alt ısıl değeri, standart analizle aynı kalmıştır. Yapılan 50 iterasyon için (Şekil 64) elde edilen statik ve dinamik basınç kontürleri yeniden sırasıyla Şekil 65 ve 66'da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği gibi sıcaklık artışına bağlı olarak maksimum statik basınç 60,6 Pa'dan 102 Pa'a ve dinamik basınç ise 31,7 Pa'dan 35'Pa'ya çıkmıştır. Böylece, gazlaştırma prosesinde basınç düşüşlerinin etkisinin değerlendirilmesine mümkündür.



Şekil 64. Koşturma yakınsaması (700°C'de)

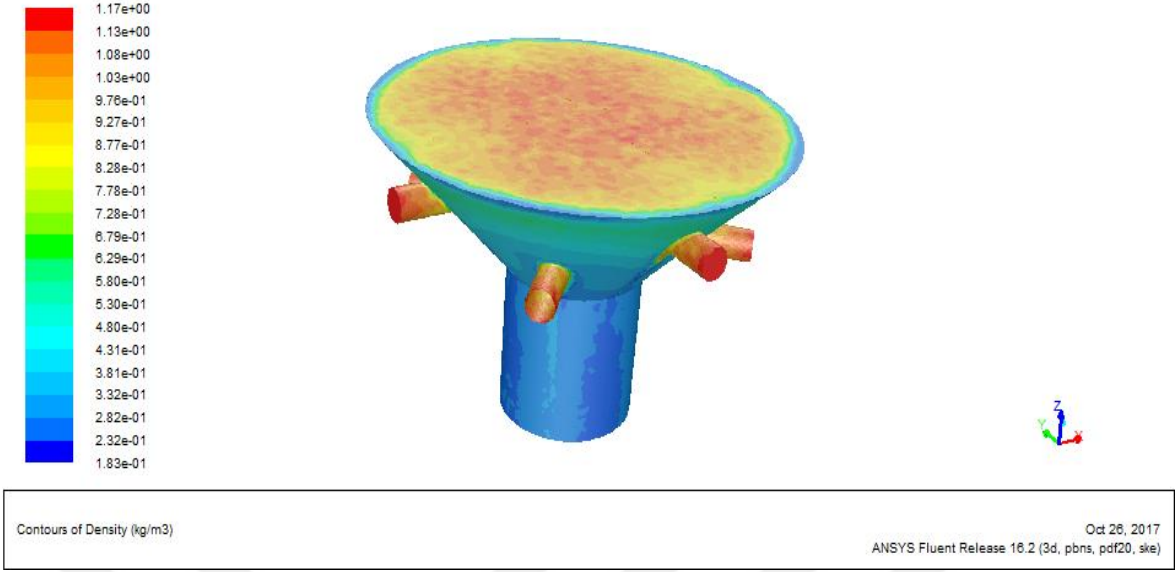


Şekil 65. Oksidasyon bölgesi statik basınç kontürleri

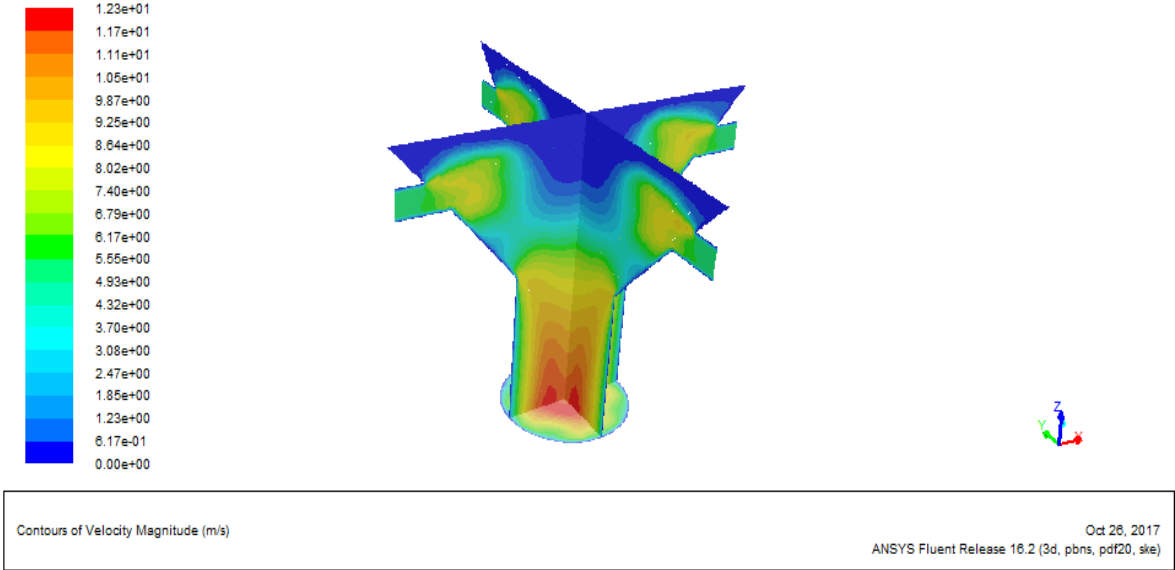


Şekil 66. Oksidasyon bölgesi dinamik basınç kontürleri

Sıcaklık artışı, oksidasyon bölgesinin yoğunluk ve hız değerlerini de standart gazlaştırmaya göre az miktarda artırmıştır. Bu değişimler yoğunluk ve hız kontürleri için sırasıyla Şekil 67 ve Şekil 68’de verilmiştir. Gaz çıkış noktasından önceki bölgelerde gaz akışı yavaşlayacağı için, bu küçük artışlar gaz debisi değişimi ihmal edilebilir ölçülerdedir.

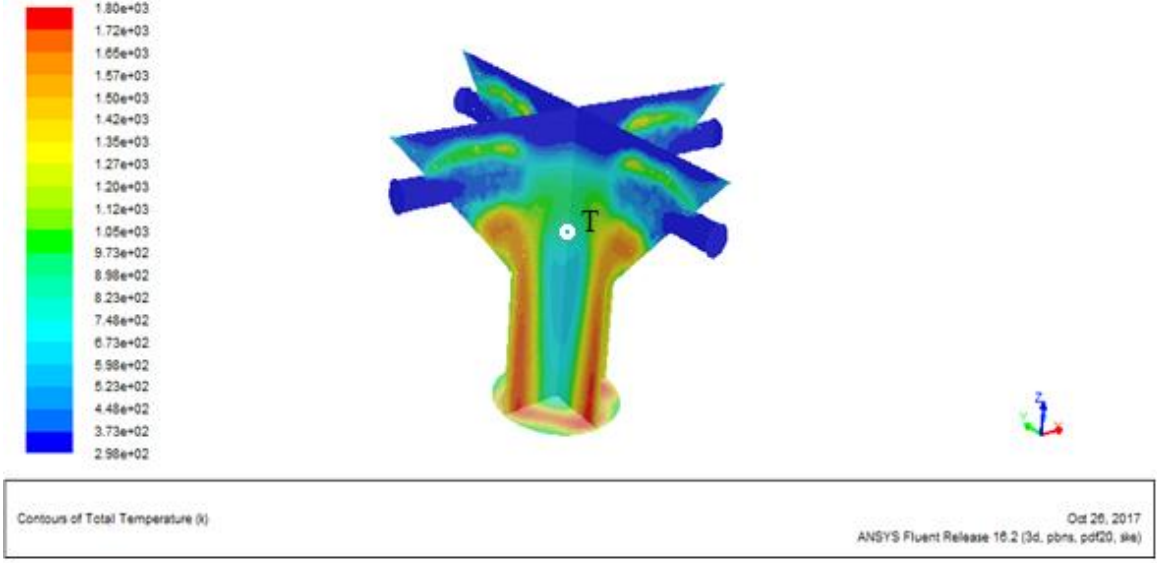


Şekil 67. Oksidasyon bölgesi yoğunluk kontürleri

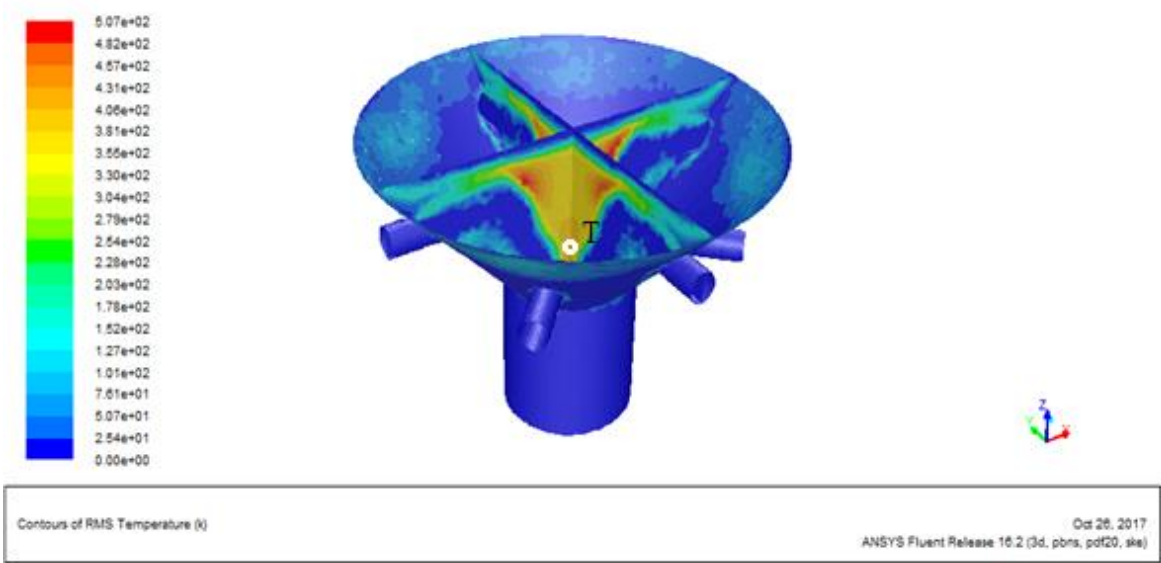


Şekil 68. Oksidasyon bölgesi hız kontürleri

Standart ve güneş enerjili sistem elde edilen sıcaklık değerlerinin ısıl analizlerde ölçüm noktası için elde edilen sıcaklıklar (yaklaşık %30 artış) ile uyumaktadır. Güneş enerjili koşullarda yapılan ısıl analizde elde edilen toplam ve moleküler sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 69 ve Şekil 70'de verilmiştir.

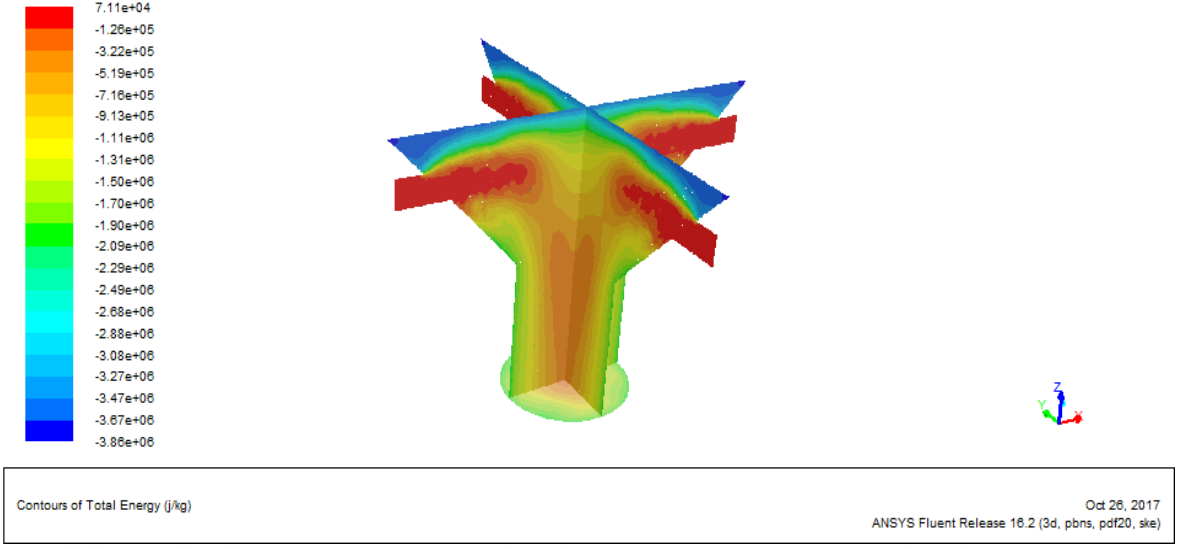


Şekil 69. Oksidasyon bölgesi toplam sıcaklık kontürleri



Şekil 70. Oksidasyon bölgesi moleküler (Root-Mean-Square) sıcaklık kontürleri

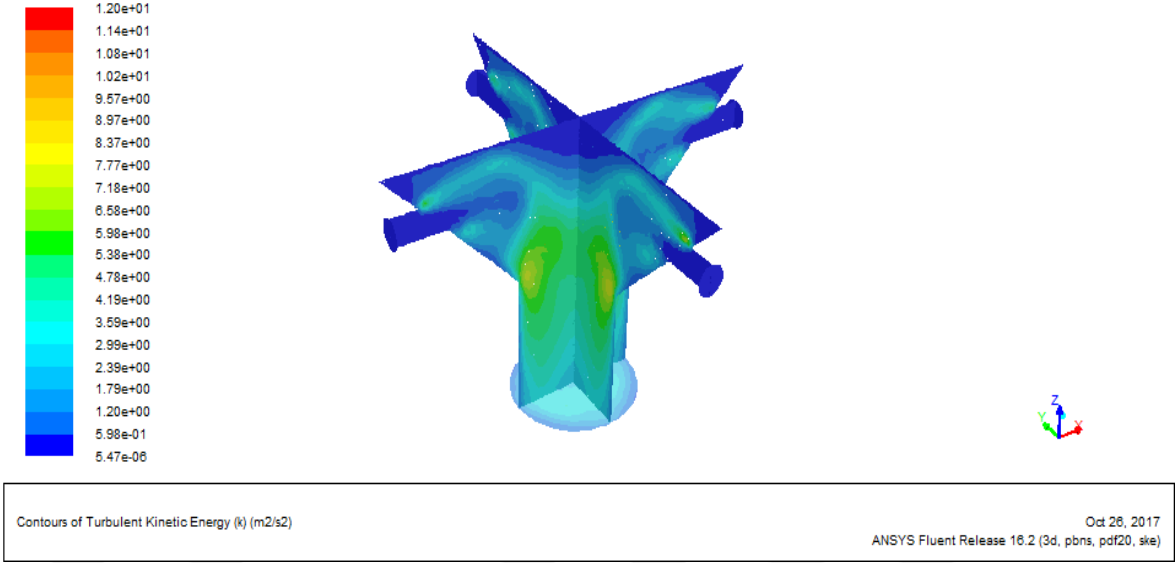
Gazlaştırıcı reaktör kullanım ömrü ve dayanıklılığı bakımından dikkate alınması gereken enerji değişimi, cidar sıcaklık dağılımı ve kinetik enerji değişimi, güneş enerjili sistem için sırasıyla Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73'de verilmiştir.



Şekil 71. Oksidasyon bölgesi toplam enerji kontürleri

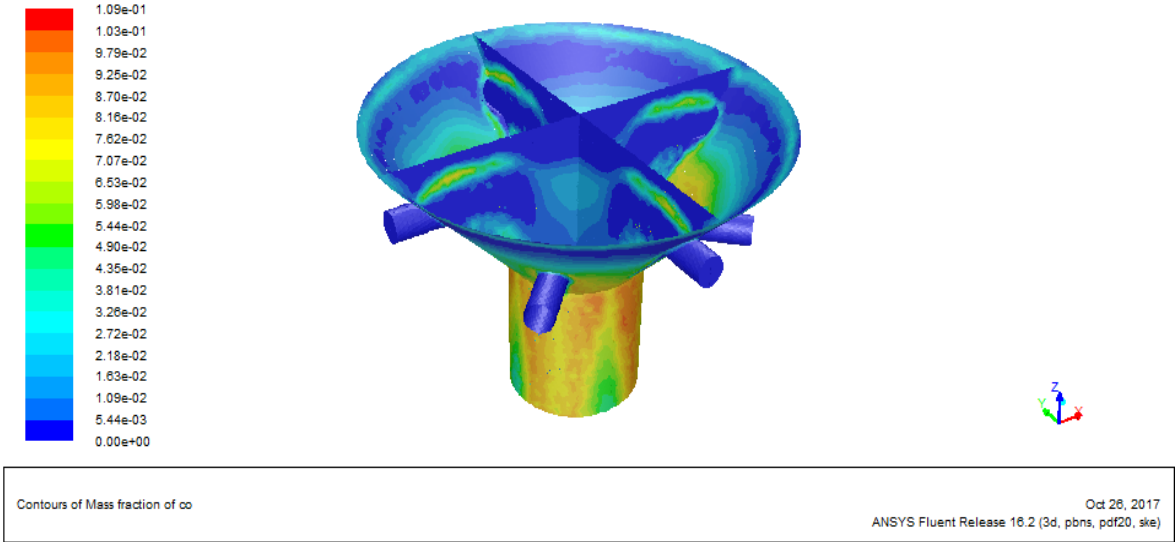


Şekil 72. Oksidasyon bölgesi duvar sıcaklığı kontürleri

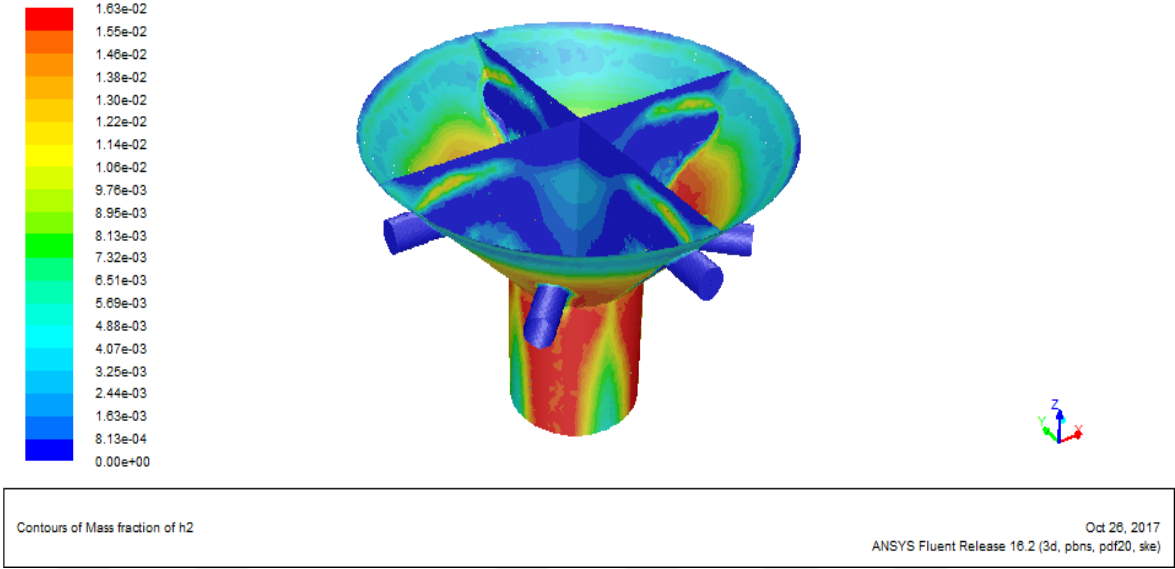


Şekil 73. Oksidasyon bölgesi türbülans kinetik enerjisi kontürleri

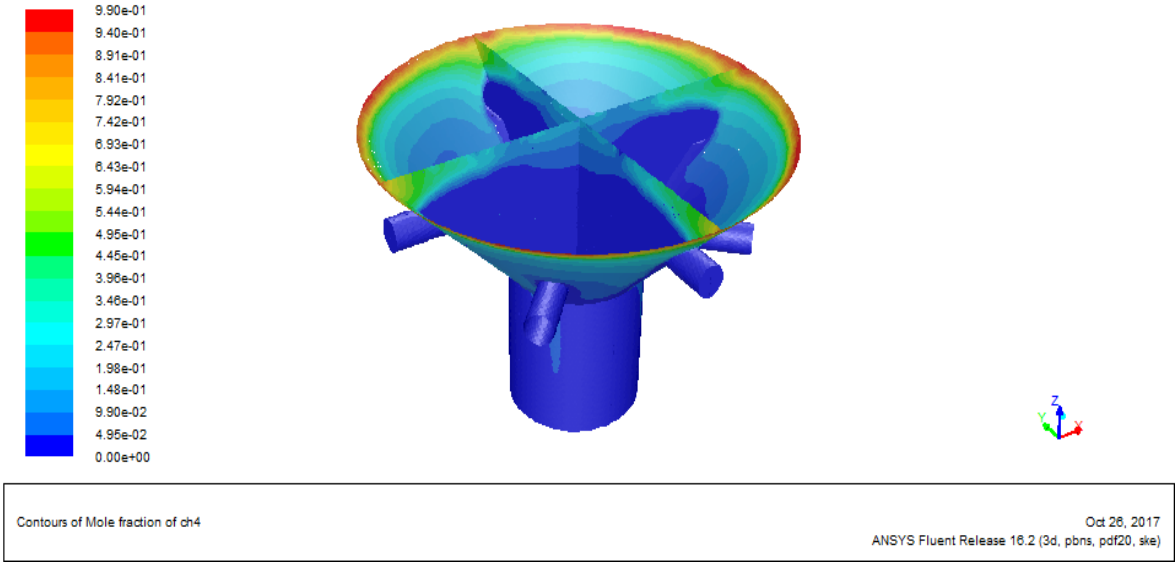
Isıl analiz sonucunda güneş enerjili sistem için elde edilen CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gazlarına ait kütle fraksiyonları, sırasıyla Şekil 74, Şekil 75, Şekil 76, Şekil 77 ve Şekil 78’de verilmiştir. Elde edilen değerler, gazifikasyon prosesinde sağlanan sıcaklık artışlarının üretilen gazın kalitesini ve yanıcı bileşenlerinin oranını değiştirdiği anlaşılmıştır.



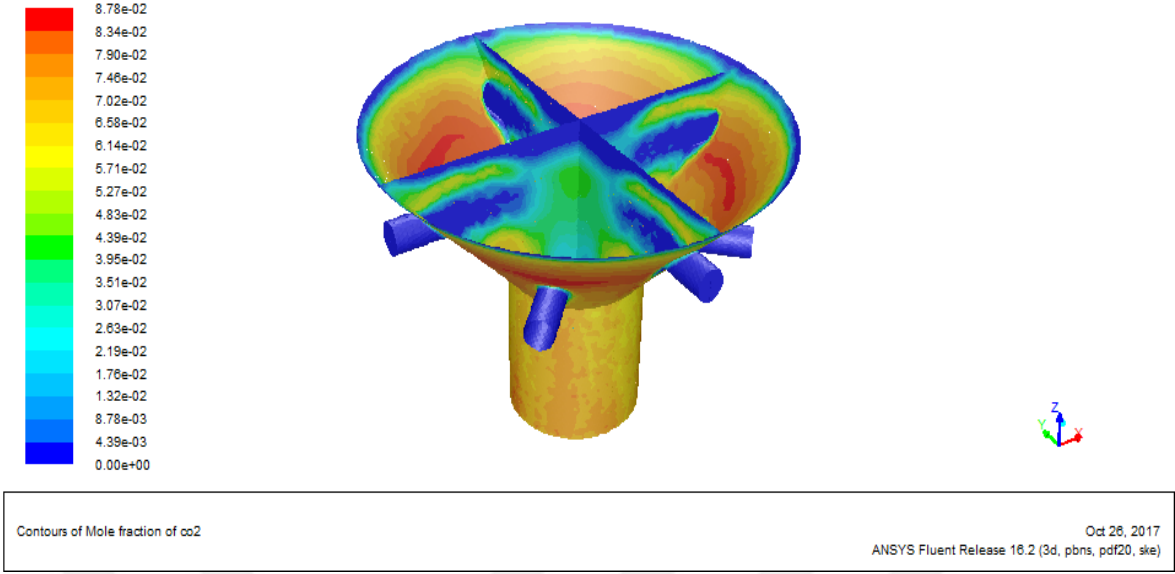
Şekil 74. Oksidasyon bölgesi CO kütle fraksiyonu kontürleri



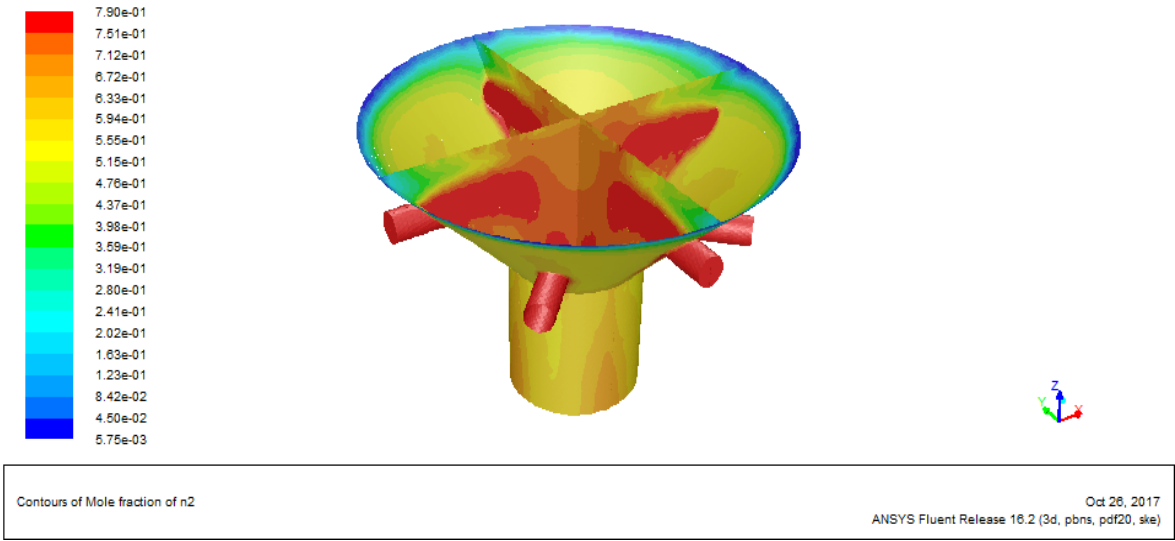
Şekil 75. Oksidasyon bölgesi H<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri



Şekil 76. Oksidasyon bölgesi CH<sub>4</sub> kütle fraksiyonu kontürleri



Şekil 77. Oksidasyon bölgesi CO<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri



Şekil 78. Oksidasyon bölgesi N<sub>2</sub> kütle fraksiyonu kontürleri



## 5. SONUÇLAR

1. Kömür ve odun, gazifikasyon teknolojisinde önemli hammaddeleri oluşturur. Bu çalışma sonucunda, odun türleri ile birlikte atık haldeki odun dışı orman ürünlerinin de gazlaştırma ile değerlendirilebileceği gösterildi. Böylece, çoğunlukla ısıtma ve pişirme amaçlı yakma sistemlerinde doğrudan yanabilen alternatif gaz elde edilmesi sağlandı
2. Reaktör içerisine 8 farklı kanaldan hava beslemesi sağlanarak gazifikasyon prosesinin temelini oluşturan termo-kimyasal dönüşümün reaktör içerisinde dengeli ve sürekli olabileceği belirlendi.
3. Çam bloklar, fındikkabuğu, çam kozalağı ve pelet gibi farklı biyokütle türlerinin tek tip bir gazlaştırma reaktöründe sentez gazı üretiminde kullanılabileceği anlaşıldı.
4. Gazifikasyon teknolojisinde, verimli sentez gazı üretimi için sınırsız enerji kaynağı olan güneşten faydalanılarak standart gazlaştırmaya kıyasla daha yüksek sıcaklıklara ulaşıldı.
5. İki alternatif ve yenilenebilir enerji kaynağı olan biyokütle ve güneş bu çalışmada birlikte değerlendirilmesi sağlandı.
6. Bu çalışma ile gazifikasyon yöntemiyle üretilen sentez gazının, pişirme ocakları veya yanma odalı gaz yakıtlı cihazlarda kullanılabilmesi sağlandı.
7. Standart ve güneş enerji destekli gazifikasyon proseslerinde yüksek sıcaklıklarda üretilen gazın, uygun soğutma ve temizleme yöntemleriyle sistem çıkışında 50°C altındaki sıcaklıklara düşürülmesi sağlandı.
8. Her iki proseste de, üretilen yanıcı gazın içeriği çoğunlukla CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gibi uçucular olarak belirlendi. Kullanılan hammadde türüne bağlı olarak, bu uçucuların sentez gazı içerisinde bulunma oranları ve bu hammaddeler için ulaşılan sıcaklık değerleri tespit edilerek karşılaştırıldı.

## 6. ÖNERİLER

1. Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen odunsu biyokütle türlerinin yanı sıra ülkemizde bulunan yüksek potansiyelli odun dışı biyokütle türlerine yönelik rezerv ve gazlaştırma özelliklerinin belirlenmesi,
2. Güneş enerjisinin yoğun olduğu bölgelerde güneş enerji destekli gazlaştırma ile enerji üretimine yenilikler kazandırılması,
3. Çalışma yöntemi ve sonuçlarından hareketle, daha büyük çaplı tesisler tasarlanarak kasaba ve kentler için ısı ve enerji merkezi olarak değerlendirilmesi,
4. Doğal gazın ulaşmadığı kesimlerde (özellikle kırsal kesimler) verim iyileştirme çalışmaları ile “biyokombi” ve “biyoocak” gibi mobil cihazların geliştirilmesi,
5. Ülkemizde bulunan düşük kaliteli, yüksek nemli, düşük kalorili ve yüksek rezerv kömürlerin yanma verimlerinin de düşük olması bu kömürleri değersiz kılmaktadır. Bu nedenle, gazifikasyon teknolojisi kullanılarak, tek bir merkezde üretilen yüksek yanma verimine sahip gaz üretimi ile bu problemlerin üstesinden gelmek mümkündür. Bu çalışma ışığında, Ülkemizde Enerji Bakanlığının önemseydiği yerli enerji kaynaklarına yönelmeye katkı sağlayacak, gazlaştırma tekniği ile Türkiye kömürlerinin değerlendirilmesi.
6. Tasarlanan bu pilot ölçekli sistem için enerji ve ekserji analizlerinin yapılabileceği daha geniş kapsamlı bir çalışmanın yapılması.

## 7. KAYNAKLAR

1. Sharma, A. K., Experimental Study on 75 kWth Downdraft (biomass) Gasifier System, Renewable Energy, 34 (2009) 1726-1733.
2. Bhattacharya, S. C., Hla, S. S. ve Pha, H., A study on a multi-stage hybrid gasifer-engine system, Biomass and Bioenergy, 21 (2001) 445-460.
3. Brandt, P., Larsen, E. ve Henriksen U., High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier, Energy Fuels, 4,14 (2000) 816–819, 2000.
4. Demirtaş, C. ve Danişmaz, M., Gazifikasyon Yöntemiyle Sentez Gazı Üretimi ve Gaz Yakma Sistemlerinde Kullanımı, International Journal of Nuclear and Radiation Science and Technology (Ijnurasat), 1 (2016) 14-19.
5. Digma, B., Joo H. S. ve Kim S., Recent progress in gasification/pyrolysis technologies for biomass conversion to energy, Sustainable Energy, 28,1 (2009) 47-51.
6. Sheth, P. N. ve Babu, B. V., Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier, Bioresource Technology , 100 (2009) 3127–3133.
7. Bandt, P., Larsen, E. ve Henriksen, U., High tar reduction in a two-stage gasifier, Energy and Fuels , 14(2000) 816–819.
8. Dogru M., Howrath, C. R., Akay, G. ve Keskinler, B., Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier, Energy, 27 (2002) 415–427.
9. Dutta, A., A study of biomass gasification for engine application, AIT Thesis, Bangkok, Thailand, 1998.
10. Jaojaruek, K. Jarunthammachote, S., Kathrina, M., Wongsuwan, H., Suwan, H., Experimental study of wood downdraft gasification for an improved producer, Bioresource Technology, 2011.
11. Reed, T. B. and Das, A., Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado,1988.
12. Zainal, Z. A., Rifau, A, Quadir, G. A. and Seeth, K. N., Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier, Biomass Bioenergy, 23 (2002) 283-289.
13. Das, A. ve Reed, T. B., Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Second Edition, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 2002.
14. Milne, T. A., Abatzoglou, N. ve Evans, R. J., Biomass gasifier tars and their nature formation and conversion , NREL/TP-570-25357, Golden, CO, 1998.

15. Jaojaruek, K. ve Kumar, S., Numerical simulation of the pyrolysis zone in a downdraft gasification process, Bioresource Technology, 23, 100 (2009) 6052–6058.
16. Doğru, M., Midilli, A. ve Howarth, C. R., Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis, Fuel Processing Technology, 1, 75 (2002) 55-82.
17. Devi, L., Ptasiniski, K. ve Krzysztof, J., A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, Biomass and Bioenergy, 24 (2003) 125–140.
18. Jayaraman, K. ve Gökal, I., Thermal characterization, gasification and kinetic studies of different sized Indian coal and char particles, International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 1, 21-2 (2014) 31-40.
19. Alexander, T.ve ark., Experimental investigation of high temperature and high pressure coal gasification, Applied energy, 11 (2012) 279-285.
20. Prins, M. J., Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Technische Universiteit Eindhoven , Eindhoven, 2000.
21. Prins, M. J., Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Second edition, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2005.
22. Grootjes, A. J., Vreugdenhil, B. J.ve Zwart, R. W., Indirect gasification of waste to create a more valuable gas, 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Albi, France, 2016.
23. Jenkinsa, B. M., Baxterb, L. L., MilesJr, T. R. and Milesc, T. R., Combustion properties of biomass, Fuel Processing Technology, 54, 1-3 (1998) 17-46.
24. Vassilev, S. V. ve Vassileva, C. G., A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour, Fuel, 86, 10-11(2007) 1490-1512.
25. Blazquez, G. ve ark., Copper biosorption by pine cone shell and thermal decomposition study of the exhausted biosorbent, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, (2012) 1741–1750.
26. Parikha, J., Channiwalab, S. A. ve Ghosalc, G. K., A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels, Fuel, 84 (2005) 487–494.
27. Qiang, L., Wen-Zhi, L. ve Xi-Feng, Z., Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils, Energy Conversion and Management, 50, 5 (2009) 1376-1383.
28. Almendros, A. I., Martín-Lara, M. A., Ronda, Perez, A., Blázquez, G. ve Calero, M., Physico-chemical characterization of pine cone shell and its use as biosorbent and fuel, Bioresource Technology, 195 (2015) 406-412.

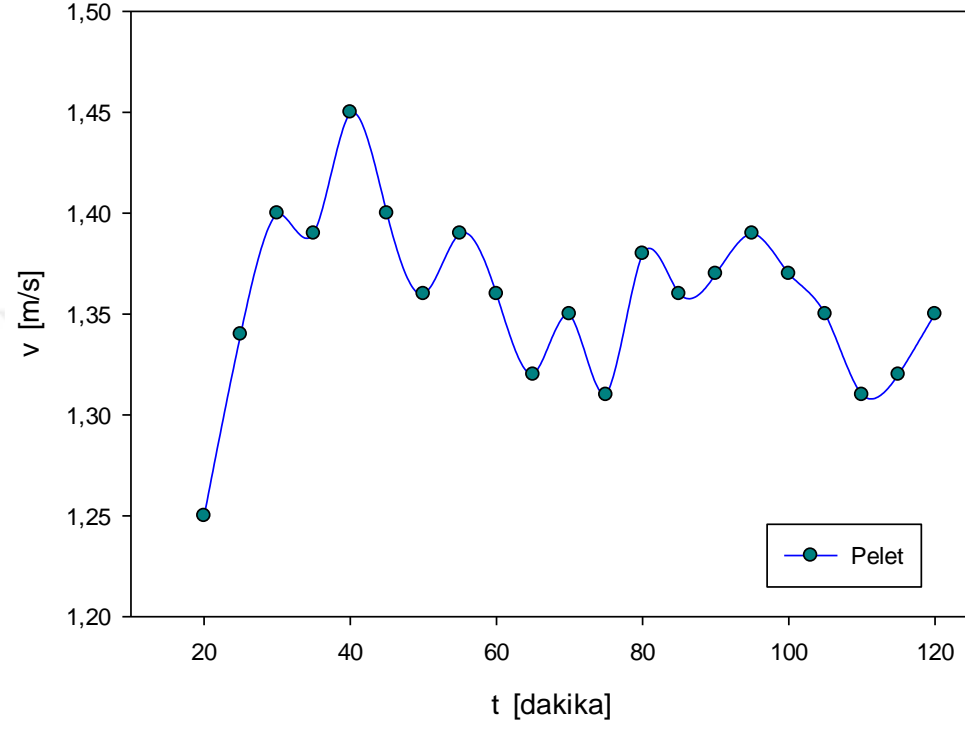
29. Jong, W., Pirone, A. ve Wójtowicz, M. A., Pyrolysis of Miscanthus Giganteus and wood pellets: TG-FTIR analysis and reaction kinetics, Fuel, 9, 82 (2003) 1139-1147.
30. Arnavat, M. P., Performance Modeling and Validation of Biomass Gasifiers, Ph-D Thesis, Universitat Tòrrida, Tarragona, 2011.
31. Collot, A. G., Matching gasification technologies to coal properties, International Journal of Coal Geology, 65, 3-4 (2006) 191-212.
32. Reed, T. B. ve Jantzen, D., A Survey of Biomass Gasification Volume II - The Principles of Gasification, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 1979.
33. Jangsawanga, W., Laohalidanonda, K. and Somrat, K., Optimum Equivalence Ratio of Biomass Gasification Process Based on Thermodynamic Equilibrium Model, Energy Procedia, 79 (2015) 520 – 527.
34. Roy, P. C., Datta, A. ve Chakraborty, N., Modelling of a downdraft biomass gasifier with finite rate kinetics in the reduction zone, International Journal of Energy Research, 33 (2009) 833-851.
35. Pratik, S. N. and Babu, B. V., Experimental studies on producer gas generation from wood waste, Bioresource Technology, 100 (2009) 3127-3133.
36. Dogru, M., Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis, Fuel Processing Technology, 75 (2002) 55–82.
37. Sadaka, S., Gasification, Producer Gas and Syngas, Agriculture and Natural Resources, 1051 (2010) 123-135.
38. Dogru, M., Horward, C., Akay, G., Keskinler B., Malik, A., Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier, Energy, 27 (2002) 415–427.
39. Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E. ve Bouziane ,K., Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas, Energy Procedia , 36 (2013) 596–606.
40. E4Tech, Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes, London, United Kingdom, 2009.
41. Ściążko, M., Biomass gasification, Lecture No. L3-2, Swedish Gas Technology Centre, Malmö, Sweden, 2012.
42. Mehrdokht, N. M., Nikoo, B., Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS, Biomass and Bioenergy, (2008) 1245–1254.
43. Jörgen, H., Gasification-- Status and technology, Svenskt Gastekniskt Center, Malmö, Sweden, 2012.

44. Olgun, H., Doğru, M. ve Howarth, C. R, Katı Atıkların enerji dönüşümünde Kullanılması ve Gazlaştırıcılar, Ulusal tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir, 1999.
45. Rajvanshi, A. K., Biomass Gasification, Alternative Energy in Agriculture, CRC Press, Maharashtra, India, (1986) 83-102.
46. Rajvanshi, A. K., Biomass Gasification in Alternative Energy in Agriculture, Maharashtra, India, CRC Press, (1986) 83-102.
47. Hanaok, T., Minowa, T., Miyamota, A. and Edashi, Y., Effect of Chemical Property of Waste Biomass on Air-Steam Gasification, Journal of the Japan Institute of Energy, no. 82, pp. 1012-1018, 2005.
48. McKendry, P., Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass, Bioresour Technology, 1,83 (2002) 37-46.
49. Sharma, A. K., Experimental study on 75 kWth downdraft (biomass) gasifier system, Renewable Energy, 1 (2008) 278-291.
50. Jayathilake, R. ve Rudra, S., Numerical and Experimental Investigation of Equivalence Ratio (ER) and Feedstock Particle Size on Birchwood Gasification, Energies, 10,1232 (2017). 1-19.
51. Boerrigter, H. ve Rauch, R., Review of applications of gases from biomass gasification,» ECN Biomass, Coal & Environmental Research, ECN-RX, 06-066, 2006.
52. Lassi, U., Lampiainen, H. and Wikman, B., Biomass to Energy and Chemicals, University of Jyväskylä, Kokkola, 2013.
53. Amico, M. D., Desideri, U. and Fantozzi, F., CFD Simulation of a burner for syngas characterization, 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, France, 2010.
54. Punnarapong, P., Sucharitaku, T. ve Tippayawong, I. N., Performance evaluation of premixed burner fueled with biomass derived producer gas, Case Studies in Thermal Engineering, 9 (2017) 40-46.
55. Bethold, D. G., Gas Burner Technology & Gas Burner Design for Application, WORGAS Energy Transformation Technology, Derbyshire, United Kingdom, 2017.
56. Dere, B. R., Babu, G. M., Sree, D. A. ve Rao, S. R., Design and Analysis of Cyclone Separator, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 3, 8 (2014) 12-20.
57. Elsayed, K., An Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry using RANS and LES Methodologies., PhD thesis, 20-160, 2011.

58. Nourredine, A., Kim, S. and Abdoulmoumine, A., Effects of Temperature and Equivalence Ratio on Pine Syngas, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53 (2014) 5767–5777.
59. Çınar, M. A. ve Toros, H., Güneş Enerjisini Odaklı Kollektör ile Toplanıp Yeraltında Depolama Sistemi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 2008.
60. Dickinson, W. C. ve Cheremisinoff, P. N., Solar energy technology handbook, Part B - Applications, systems design and economics, AA California University, Livermore, New York, 1980.
61. Türkoğlu, T. T. ve Gökoğlu, C., Kızılçam Ormanları Hasat Artıklarından Yapılan Odun Peletinin Yakıt Özelliklerinin, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21, 1 (2017) 58-63.
62. Onay, Ö. ve Koçkar, Ö. M., Fındık kabuklarından hızlı proliz yöntemiyle sintetik sıvı Eldesi, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, XI, 1 (1998) 72-81.
63. Brebua, M., Ucar, S., Vasile, C. ve Yanik, J., Co-pyrolysis of pine cone with synthetic polymers, Fuel, 89, 8 (2010) 1911-1918.
64. Erlich, C. ve Fransson, T. H., Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: Experimental study, Applied Energy, 88, 3 (2011) 899-908.
65. Arayıcı, S., Doğalgaz Yanmalarında NOx Oluşumu, MMO, Ankara, 2010.
66. Güney M., Madencilik, Madencilik, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın Organı, Ankara, 5, 17, 1965.
67. Department, F. F., Wood gas as engine fuel, Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nation, Italy, 1986.
68. [www.enggcyclopedia.com/2012/01/types-gasifier/](http://www.enggcyclopedia.com/2012/01/types-gasifier/), Types of Gasifier, 25 Eylül 2017.
69. McKendry, P., Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, Bioresource Technology, 83 (2002) 55–6.

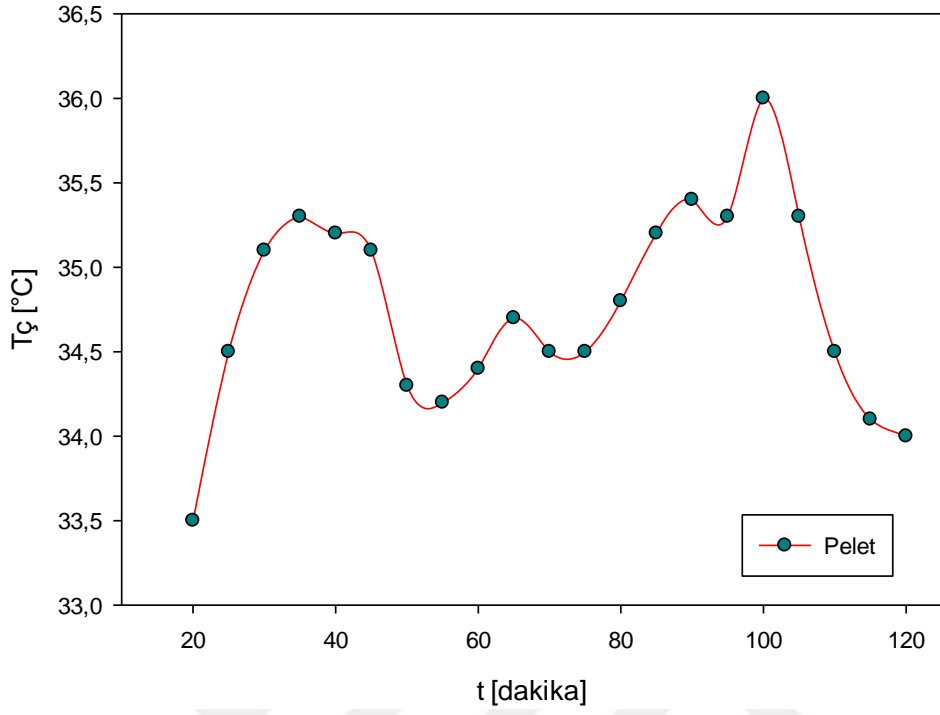
## 8. EKLER

### Ek 1. Sentez Gazı İçin Ek Grafikler

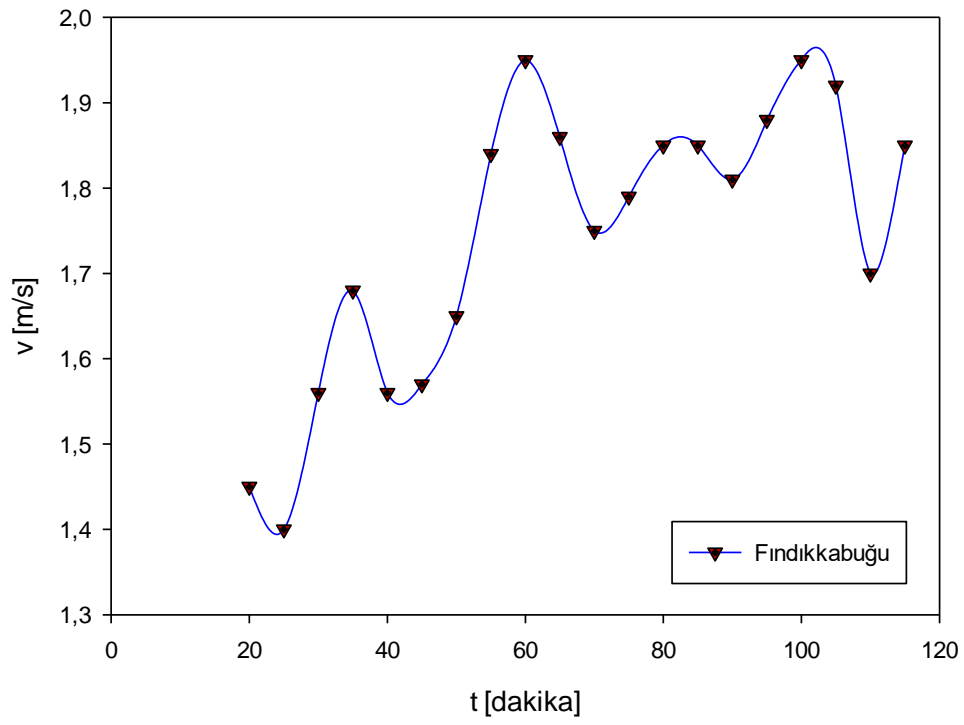


Ek Şekil 1. Pelet yakıtı için gaz çıkış hızı değişimi

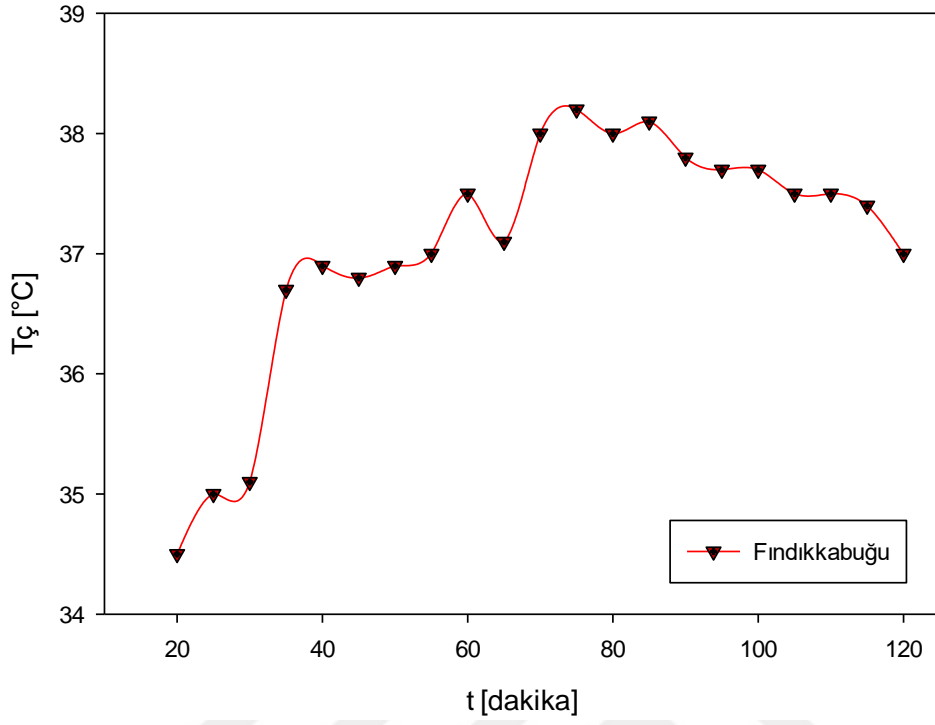




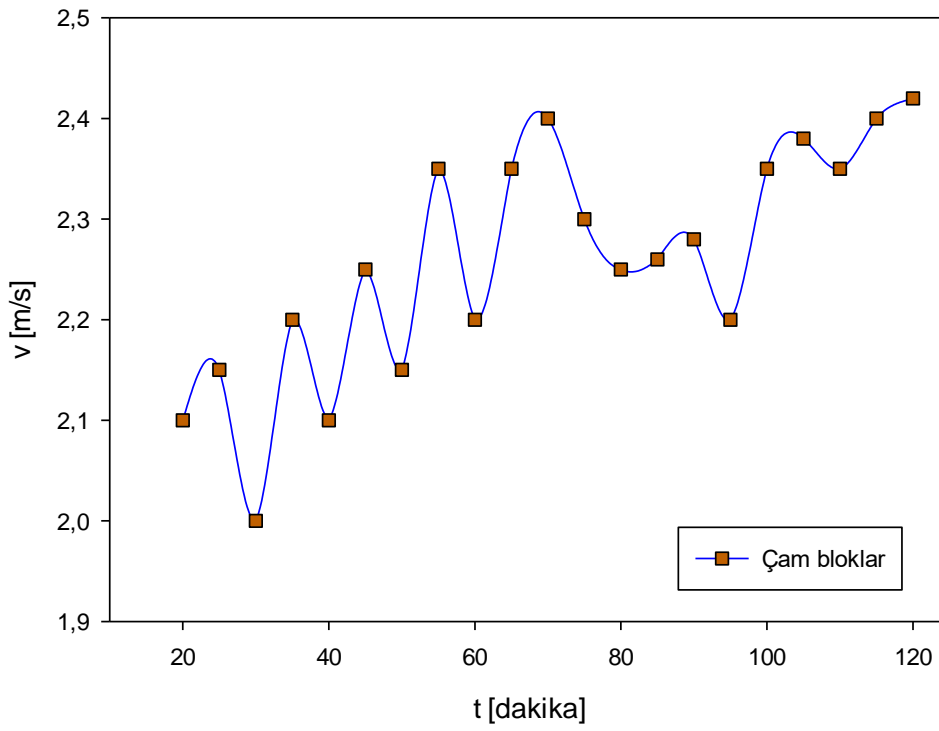
Ek Şekil 2. Pelet yakıtı için gaz çıkış sıcaklığı değişimi



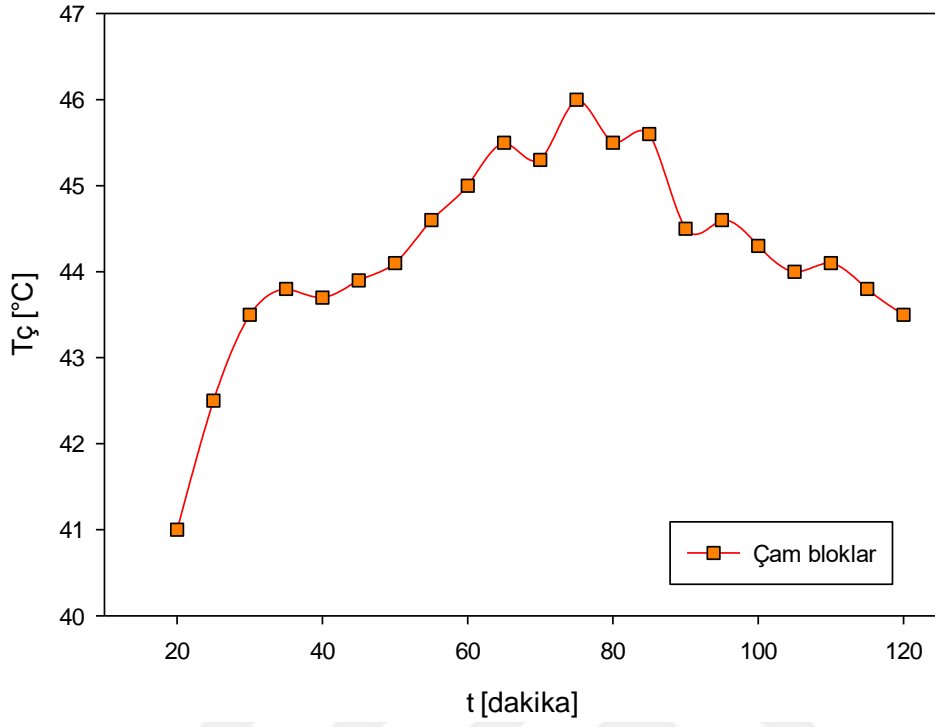
Ek Şekil 3. Fındikkabuğu yakıtı için gaz çıkış hızı değişimi



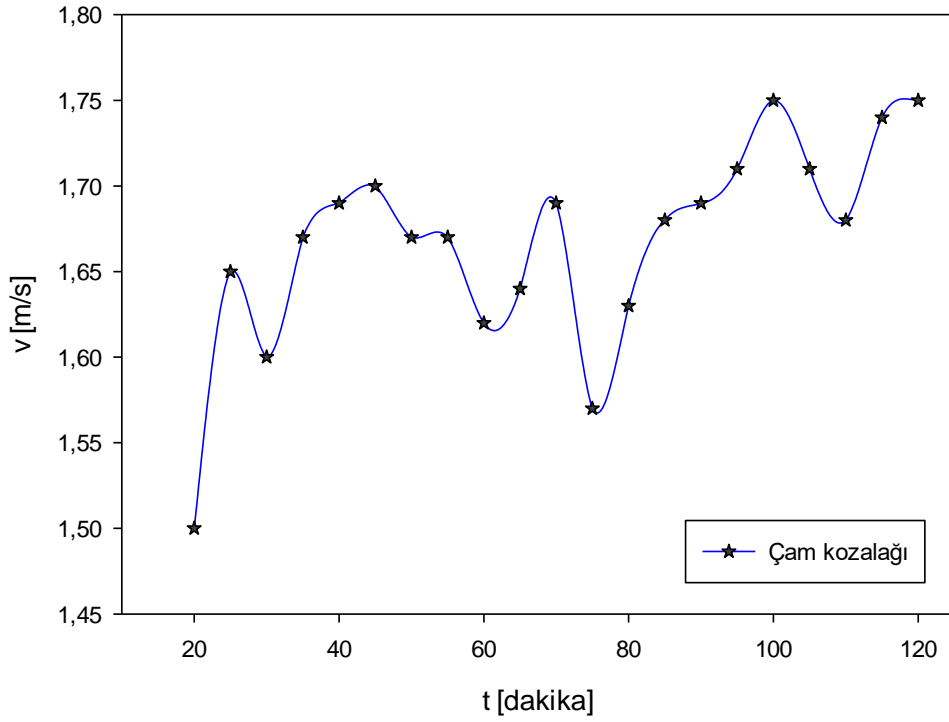
Ek Şekil 4. Fındikkabuğu yakıtı için gaz çıkış sıcaklığı değişimi



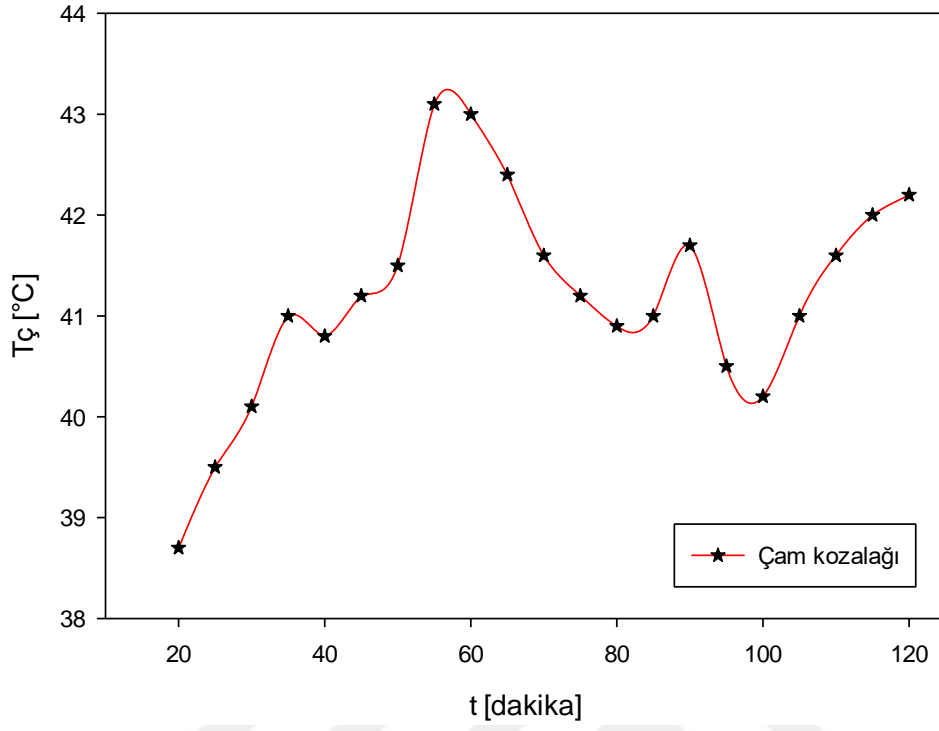
Ek Şekil 5. Çam bloklar yakıtı için gaz çıkış hızı değişimi



Ek Şekil 6. Çam bloklar yakıtı için gaz çıkış sıcaklığı değişimi



Ek Şekil 7. Çam kozalağı yakıtı için gaz çıkış hızı değişimi

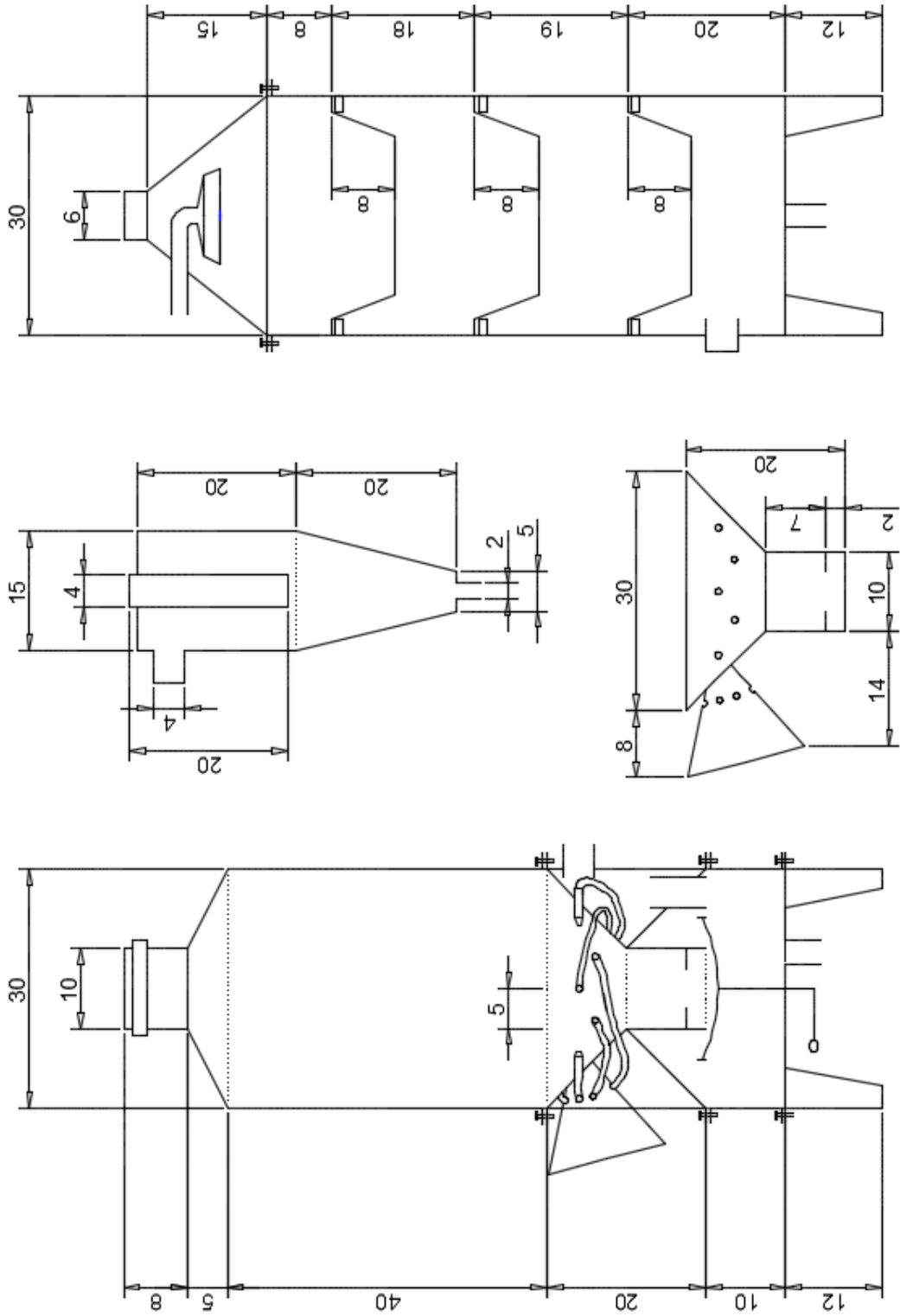


Ek Şekil 8. Çam kozalağı yakıtı için gaz çıkış sıcaklığı değişimi

## Ek 2. Deney Düzenəğinin İlave Resimleri



Ek Şekil 9. Deney düzenəği genel görünüm



Ek Şekil 10. Deney düzeneğinin ana elemanlarına ait ölçüler (cm)



Ek Şekil 11. Reaktör atıkları (kül)



Ek Şekil 12. Reaktör atıkları (katran+yoğuşmuş ürünler)

### Ek 3. Bazı Gazlara İçin Temel Özellikler

Ek Tablo 1. Bazı gazlar için yoğunluk, molekül ağırlığı ve kimyasal formül bilgileri

Gaz	Formül	Moleküler ağırlık	Yoğunluk- $\rho$ -	
			( $kg/m^3$ )	( $lb_m/ft^3$ )
Hava		29,00	1.205 <sup>1)</sup>	0.0752 <sup>1)</sup>
			1.293 <sup>2)</sup>	0.0806 <sup>2)</sup>
Karbon dioksit	$CO_2$	44.01	1.842 <sup>1)</sup>	0.1150 <sup>1)</sup>
			1.977 <sup>2)</sup>	0.1234 <sup>2)</sup>
Karbon monoksit	$CO$	28,01	1.165 <sup>1)</sup>	0.0727 <sup>1)</sup>
			1.250 <sup>2)</sup>	0.0780 <sup>2)</sup>
Yanma ürünleri			1.11 <sup>2)</sup>	0.069 <sup>2)</sup>
Hidrojen	$H_2$	2.016	0.0899 <sup>2)</sup>	0.0056 <sup>2)</sup>
Doğalgaz		19,50	0.7 - 0.9 <sup>2)</sup>	0.044 - 0.056 <sup>2)</sup>
Azot	$N_2$	28,02	1.165 <sup>1)</sup>	0.0727 <sup>1)</sup>
			1.250 <sup>2)</sup>	0.0780 <sup>2)</sup>
Oksijen	$O_2$	32,00	1.331 <sup>1)</sup>	0.0831 <sup>1)</sup>
			1.429 <sup>2)</sup>	0.0892 <sup>2)</sup>
Propan	$C_3H_8$	44.09	1.882 <sup>1)</sup>	0.1175 <sup>1)</sup>
Sülfür	$S$	32.06		0.135
Sülfür dioksit	$SO_2$	64.06	2.279 <sup>1)</sup>	0.1703 <sup>1)</sup>
			2.926 <sup>2)</sup>	0.1828 <sup>2)</sup>
Sülfür trioksit	$SO_3$	80.062		
Sülfür oksit	$SO$	48.063		
Su buharı	$H_2O$	18.016	0.804	0.048
<sup>1)</sup> NTP - Normal Sıcaklık ve Basınçta [20°C (293.15 K, 68°F) and 1 atm ( 101.325 kN/m <sup>2</sup> , 101.325 kPa, 14.7 psia, 0 psig, 30 in Hg, 760 torr)]				
<sup>2)</sup> STP - Standart Sıcaklık ve Basınçta [ 0°C (273.15 K, 32°F) and 1 atm (101.325 kN/m <sup>2</sup> , 101.325 kPa, 14.7 psia, 0 psig, 30 in Hg, 760 torr)]				
$1 lb/ft^3 = 16.018 kg/m^3$				
$1 kg/m^3 = 0.0624 lb/ft$				





## Ek 5. Gaz Analiz Sonuçları



PETROLEUM RESEARCH CENTER  
PETROL ARAŞTIRMA MERKEZİ



Sayı No:16069519-897

26.09.2017

**Karadeniz Teknik Üniversitesi**  
**Makine Mühendisliği Bölümü**  
**Arsin MYO Trabzon**

İlgi: 20.09.2017 tarihli yazınız.

İlgi yazınızda adı geçen Gaz Numuneleri numuneleri 13.09.2017 tarihinde ODTÜ Kimya Bölümünden KM sifalullah tarafından Petrol Araştırma Merkezine teslim edilmiştir. Numunelerin analizleri tamamlanmış olup ölçüm sonucu ekte bilgilerinize sunulmaktadır. Numune analiz şartları aşağıda belirtilmiştir.



Cihaz: Agilent 6890 GC

Kolon: 1- HP Plot Al2O3 (50 m x 0,53 mm x 15 µm)  
2- MolSieve (30 m x 0,53 mm x 50 µm)  
3- Proplot Q (30 m x 0,53 mm x 40 µm)

Kolon Sıcaklık: 50 °C de 8 dk beklenir. Dakikada 12 °C artış ile 185 °C ye çıkarılır ve 4 dk beklenir. Dakikada 20 °C artış ile 200 °C ye çıkarılır ve 10 dk beklenir.

Akış: 10 psi sabit basınçta akış verilir.

Taşıyıcı gaz: Argon

Enjeksiyon: Gaz Tutucu Şırınga

Dedektörler: Termal Conductivity Detector (TCD)

Flame Ionization Detector (FID)

Sıcaklık: 250 °C

Aldığımız hizmeti ek'te gönderdiğimiz anketi doldurup değerlendirmenizi ve petrol@metu.edu.tr adresine veya (0312 210 56 68 ) numaralı faksa göndermenizi rica ederiz.

Saygılarımla,

Prof.Dr.Serhat AKIN

Petrol Araştırma Merkezi

Başkanı

*Ek: 5 adet analiz raporu*

*Döner Sermaye No: 17-16-25-3-00-556*

*Müşteri Memniyeti Anketi*

**PAL**  
**Petrol Araştırma Merkezi**  
**ODTÜ**

**CT**

PAL, Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY

PAL, Petrol Araştırma Merkezi, Üniversiteler Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı, No:1 Çankaya, 06800 Ankara-TÜRKİYE

Tlf: (90)(312)210 2897, 210 5673 Fax: 210 5668

Akreditasyon kapsam listemize [www.turkak.org.tr](http://www.turkak.org.tr) adresinden AB-0022-T akreditasyon numarası ile ulaşabilirsiniz.



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

Üniversiteler Mah. Dumlupınar Blv.  
No:1 06800 Çankaya/Ankara  
Tel: 0(312) 2102897 / Fax: 0(312) 2105668  
e-posta: petrol@metu.edu.tr



17-556-847

26.09.2017

### DENEY RAPORU

Testing Report

(\*) İşaretili deneyler akreditasyon kapsamında değildir.

<b>Müşterinin Adı Soyadı / Adresi</b> <i>Customer name / address</i>	Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ / Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	
<b>İstek Numarası</b> <i>Order No</i>	<b>PAL Referans No</b> 17-847	<b>ODTÜ Döner Sermaye No</b> 17-16-25-3-00-556
<b>Numunenin Adı ve Tarifi</b> <i>Name and identity of test item</i>	Sentez Gazı	
<b>Numunenin Kabul Tarihi</b> <i>The date of receipt of test item</i>	13.09.2017	
<b>Açıklamalar</b> <i>Remarks</i>		
<b>Deneyin Yapıldığı Tarih</b> <i>Date of Test</i>	20.09.2017	
<b>Laboratuvar Numune Kodu</b> <i>Code of Test Item</i>	17-847	
<b>Raporun Sayfa Sayısı</b> <i>Number of pages of report</i>	2	

**Mühür**  
*Seal*

**Tarih**  
*Date*

**Laboratuvar Sorumlusu**  
*Person charge of laboratory*

**Merkez Başkanı**  
*Head of the Research Center*

26.09.2017

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

Prof. Dr. Serhat AKIN

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

## DENEY RAPORU

17-556-847

26.09.2017

Talep Eden : Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ Numune Alınan Adres : Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Numune Alınan Şirket : - Numune Alın Yeri : -  
 Numuneyi Alan Kurum/ Kişi : - Numune Mühür No : -  
 Numuneyi Teslim Eden : KM Sifatullah Numune Cinsi : Sentez Gazı NU:1 B  
 Numune Alınış Tarihi : - Numune Kabul Tarihi : 13.09.2017  
 PAL'e Geliş Tarihi : 13.09.2017 Rapor Tarihi : 26.09.2017  
 Döner Sermaye No : 17-16-25-3-00-556 PAL Ref. No : 17-847

## SENTEZ GAZI

PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
*Oksijen, %mol	ASTM D1945	0,274
*Azot, %mol		72,094
*Karbondiyoksit, %mol		1,972
*Metan, %mol		2,288
*Etan, %mol		0,132
*Propan, %mol		0,045
*i-bütan, %mol		0,012
*n-bütan, %mol		0,024
*i-pentan, %mol		<0,01
*n-pentan, %mol		<0,01
*C6+ , %mol		<0,01
*Hidrojen, %mol		4,283
*Karbonmonoksit, %mol		18,861
*Hidrojen Sulfur, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100,0

**NOT:** Numuneler poşet içerisinde getirilmiştir. Gaz tutucu iğne ile enjeksiyon yapılmıştır.

## Değerlendirme:

Prof. Dr. Serhat AKIN

Doç. Dr. Çağlar SINAYUÇ

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ

\* İşaretili deneyler akreditasyon kapsamına dahil değildir.

\*\*Numune, analizi talep eden kurum/kişi tarafından alınıp merkezimize gönderilmiştir. Sonuçlar analizi yapılan numuneye aittir.

Bu rapor laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.\*

PAL, Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY Tlf: (90) (312) 210 2897, 210 5673 Fax: (312) 210 5668



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

Üniversiteler Mah. Dumlupınar Blv.  
No:1 06800 Çankaya/Ankara  
Tel: 0(312) 2102897 / Fax: 0(312) 2105668  
e-posta: petrol@metu.edu.tr



17-556-848

26.09.2017

### DENEY RAPORU

Testing Report

(\*) işaretli deneyler akreditasyon kapsamında değildir.

<b>Müşterinin Adı Soyadı / Adresi</b> <i>Customer name / address</i>	Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ / Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	
<b>İstek Numarası</b> <i>Order No</i>	<b>PAL Referans No</b> 17-848	<b>ODTÜ Döner Sermaye No</b> 17-16-25-3-00-556
<b>Numunenin Adı ve Tarifi</b> <i>Name and identity of test item</i>	Sentez Gazı	
<b>Numunenin Kabul Tarihi</b> <i>The date of receipt of test item</i>	13.09.2017	
<b>Açıklamalar</b> <i>Remarks</i>		
<b>Deneyin Yapıldığı Tarih</b> <i>Date of Test</i>	21.09.2017	
<b>Laboratuvar Numune Kodu</b> <i>Code of Test Item</i>	17-848	
<b>Raporun Sayfa Sayısı</b> <i>Number of pages of report</i>	2	

**Mühür**  
*Seal*

**Tarih**  
*Date*

**Laboratuvar Sorumlusu**  
*Person charge of laboratory*

**Merkez Başkanı**  
*Head of the Research Center*

26.09.2017

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

Prof. Dr. Serhat AKIN

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

## DENEY RAPORU

17-556-848

26.09.2017

Talep Eden : Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ Numune Alınan Adres : Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Numune Alınan Şirket : - Numune Alım Yeri : -  
 Numuneyi Alan Kurum/ Kişi : - Numune Mühür No : -  
 Numuneyi Teslim Eden : KM Sifatullah Numune Cinsi : Sentez Gazı NU:2 PJ  
 Numune Alınış Tarihi : - Numune Kabul Tarihi : 13.09.2017  
 PAL'e Geliş Tarihi : 13.09.2017 Rapor Tarihi : 26.09.2017  
 Döner Sermaye No : 17-16-25-3-00-556 PAL Ref. No : 17-848

## SENTEZ GAZI

PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
*Oksijen, %mol	ASTM D1945	1,696
*Azot, %mol		67,534
*Karbondioksit, %mol		2,891
*Metan, %mol		6,367
*Etan, %mol		0,733
*Propan, %mol		0,225
*i-bütan, %mol		0,014
*n-bütan, %mol		0,054
*i-pentan, %mol		<0,01
*n-pentan, %mol		0,021
*C6+, %mol		0,018
*Hidrojen, %mol		3,233
*Karbonmonoksit, %mol		17,209
*Hidrojen Sulfur, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100,0

**NOT:** Numuneler poşet içerisinde getirilmiştir. Gaz tutucu iğne ile enjeksiyon yapılmıştır.

## Değerlendirme:

Prof. Dr. Serhat AKIN

Doç. Dr. Çağlar SINAYUÇ

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ






\* İşarefli deneyler akreditasyon kapsamına dahil değildir.

\*\*Numune, analizi talep eden kurum/kişi tarafından alınıp merkezimize gönderilmiştir. Sonuçlar analizi yapılan numuneye aittir.

Bu rapor laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçerlidir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.\*

PAL - Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY Tlf: (50) (312) 210 2897, 210 5673 Fax: (312) 210 5668

 <b>ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi</b> Üniversiteler Mah. Dumlupınar Blv. No:1 06800 Çankaya/Ankara Tel: 0(312) 2102897 / Fax: 0(312) 2105668 e-posta: petrol@metu.edu.tr			
<b>DENEY RAPORU</b> <i>Testing Report</i>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">           17-556-849            26.09.2017         </div>	
(*) işaretli deneyler akreditasyon kapsamında değildir.			
<b>Müşterinin Adı Soyadı / Adresi</b> <i>Customer name / address</i>	Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ / Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü		
<b>İstek Numarası</b> <i>Order No</i>	<b>PAL Referans No</b> 17-849	<b>ODTÜ Döner Sermaye No</b> 17-16-25-3-00-556	
<b>Numunenin Adı ve Tarifi</b> <i>Name and identity of test item</i>	Sentez Gazı		
<b>Numunenin Kabul Tarihi</b> <i>The date of receipt of test item</i>	13.09.2017		
<b>Açıklamalar</b> <i>Remarks</i>			
<b>Deneyin Yapıldığı Tarih</b> <i>Date of Test</i>	21.09.2017		
<b>Laboratuvar Numune Kodu</b> <i>Code of Test Item</i>	17-849		
<b>Raporun Sayfa Sayısı</b> <i>Number of pages of report</i>	2		
<b>Mühür</b> <i>Seal</i>	<b>Tarih</b> <i>Date</i>	<b>Laboratuvar Sorumlusu</b> <i>Person charge of laboratory</i>	<b>Merkez Başkanı</b> <i>Head of the Research Center</i>
	26.09.2017	Yüksek Kimyager Neslihan HAS 	Prof. Dr. Serhat AKIN 
			



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

## DENEY RAPORU

17-556-849

26.09.2017

Talep Eden : Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ Numune Alınan Adres : Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Numune Alınan Şirket : - Numune Alm Yeri : -  
 Numuneyi Alan Kurum/ Kişi : - Numune Mühür No : -  
 Numuneyi Teslim Eden : KM Sifatullah Numune Cinsi : Sentez Gazı NU:3 FK  
 Numune Alınış Tarihi : - Numune Kabul Tarihi : 13.09.2017  
 PAL'e Geliş Tarihi : 13.09.2017 Rapor Tarihi : 26.09.2017  
 Döner Sermaye No : 17-16-25-3-00-556 PAL Ref. No : 17-849

**SENTEZ GAZI**

PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
*Oksijen, %mol	ASTM D1945	1,406
*Azot, %mol		67,645
*Karbondioksit, %mol		3,126
*Metan, %mol		5,761
*Etan, %mol		0,489
*Propan, %mol		0,126
*i-bütan, %mol		0,016
*n-bütan, %mol		0,049
*i-pentan, %mol		<0,01
*n-pentan, %mol		0,020
*C6+ , %mol		0,047
*Hidrojen, %mol		4,434
*Karbonmonoksit, %mol		16,874
*Hidrojen Sulfur, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100,0

**NOT:** Numuneler poşet içerisinde getirilmiştir. Gaz tutucu iğne ile enjeksiyon yapılmıştır.

**Değerlendirme:**

Prof. Dr. Serhat AKIN

Doç. Dr. Çağlar SINAYUÇ

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ

\* İşaretili deneyler akreditasyon kapsamına dahil değildir.

\*\*Numune, analizi talep eden kurum/kişi tarafından alınıp merkezimize gönderilmiştir. Sonuçlar analizi yapılan numuneye aittir.

Bu rapor laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz raporlar geçersizdir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.

PAL, Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY Tlf. (90) (312) 210 2897, 210 5673 Fax: (312) 210 5668



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

Üniversiteler Mah. Dumlupınar Blv.  
No:1 06800 Çankaya/Ankara  
Tel: 0(312) 2102897 / Fax: 0(312) 2105668  
e-posta: petrol@metu.edu.tr



17-556-850

26.09.2017

### DENEY RAPORU

Testing Report

(\*) İşaretili deneyler akreditasyon kapsamında değildir.

<b>Müşterinin Adı Soyadı / Adresi</b> <i>Customer name / address</i>	Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ / Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	
<b>İstek Numarası</b> <i>Order No</i>	<b>PAL Referans No</b> 17-850	<b>ODTÜ Döner Sermaye No</b> 17-16-25-3-00-556
<b>Numunenin Adı ve Tarifi</b> <i>Name and identity of test item</i>	Sentez Gazı	
<b>Numunenin Kabul Tarihi</b> <i>The date of receipt of test item</i>	13.09.2017	
<b>Açıklamalar</b> <i>Remarks</i>		
<b>Deneyin Yapıldığı Tarih</b> <i>Date of Test</i>	21.09.2017	
<b>Laboratuvar Numune Kodu</b> <i>Code of Test Item</i>	17-850	
<b>Raporun Sayfa Sayısı</b> <i>Number of pages of report</i>	2	

**Mühür**  
*Seal*

**Tarih**  
*Date*

**Laboratuvar Sorumlusu**  
*Person charge of laboratory*

**Merkez Başkanı**  
*Head of the Research Center*

26.09.2017

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

Prof. Dr. Serhat AKIN

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ





## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

### DENEY RAPORU

17-556-850

26.09.2017

Talep Eden : Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ Numune Alınan Adres : Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Numune Alınan Şirket : - Numune Alın Yeri : -  
 Numuneyi Alan Kurum/ Kişi : - Numune Mühür No : -  
 Numuneyi Teslim Eden : KM Sifatullah Numune Cinsi : Sentez Gazı NU:4 ÇK  
 Numune Alınış Tarihi : - Numune Kabul Tarihi : 13.09.2017  
 PAL'e Geliş Tarihi : 13.09.2017 Rapor Tarihi : 26.09.2017  
 Döner Sermaye No : 17-16-25-3-00-556 PAL Ref. No : 17-850

#### SENTEZ GAZI

PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
*Oksijen, %mol	ASTM D1945	<0,07
*Azot, %mol		72,592
*Karbon dioksit, %mol		<0,01
*Metan, %mol		0,513
*Etan, %mol		0,035
*Propan, %mol		0,035
*i-bütan, %mol		0,017
*n-bütan, %mol		0,042
*i-pentan, %mol		<0,01
*n-pentan, %mol		0,022
*C6+ , %mol		0,046
*Hidrojen, %mol		5,01
*Karbonmonoksit, %mol		21,690
*Hidrojen Sulfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100,0

**NOT:** Numuneler poşet içerisinde getirilmiştir. Gaz tutucu iğne ile enjeksiyon yapılmıştır.

#### Değerlendirme:

Prof. Dr. Serhat AKIN

Doç. Dr. Çağlar SINAYUÇ

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ






\* İşaretili deneyler akreditasyon kapsamına dahil değildir.

\*\*Numune, analizi talep eden kurum/kişi tarafından alınıp merkezimize gönderilmiştir. Sonuçlar analizi yapılan numuneye aittir.

Bu rapor laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.

PAL, Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY Tlf: (90) (312) 210 2897, 210 5673 Fax: (312) 210 5668

		<b>ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi</b> Üniversiteler Mah. Dumlupınar Blv. No:1 06800 Çankaya/Ankara Tel: 0(312) 2102897 / Fax: 0(312) 2105668 e-posta: petrol@metu.edu.tr			
				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">           17-556-851            26.09.2017         </div>	
<b>DENEY RAPORU</b> <i>Testing Report</i>					
(*) işaretli deneyler akreditasyon kapsamında değildir.					
<b>Müşterinin Adı Soyadı / Adresi</b> <i>Customer name / address</i>		Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ / Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü			
<b>İstek Numarası</b> <i>Order No</i>		<b>PAL Referans No</b> 17-851		<b>ODTÜ Döner Sermaye No</b> 17-16-25-3-00-556	
<b>Numunenin Adı ve Tarifi</b> <i>Name and identity of test item</i>		Sentez Gazı			
<b>Numunenin Kabul Tarihi</b> <i>The date of receipt of test item</i>		13.09.2017			
<b>Açıklamalar</b> <i>Remarks</i>					
<b>Deneyin Yapıldığı Tarih</b> <i>Date of Test</i>		21.09.2017			
<b>Laboratuvar Numune Kodu</b> <i>Code of Test Item</i>		17-851			
<b>Raporun Sayfa Sayısı</b> <i>Number of pages of report</i>		2			
<b>Mühür</b> <i>Seal</i>		<b>Tarih</b> <i>Date</i>		<b>Laboratuvar Sorumlusu</b> <i>Person charge of laboratory</i>	
		26.09.2017		Yüksek Kimyager Neslihan HAS	
				<b>Merkez Başkanı</b> <i>Head of the Research Center</i>  Prof. Dr. Serhat AKIN	



## ODTÜ Petrol Araştırma Merkezi

### DENEY RAPORU

17-556-851

26.09.2017

Talep Eden : Öğr. Gör. Merdin DANIŞMAZ Numune Alınan Adres : Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Numune Alınan Şirket : - Numune Alın Yeri : -  
 Numuneyi Alan Kurum/ Kişi : - Numune Mühür No : -  
 Numuneyi Teslim Eden : KM Sifatullah Numune Cinsi : Sentez Gazı NU:5 K  
 Numune Alınış Tarihi : - Numune Kabul Tarihi : 13.09.2017  
 PAL'e Geliş Tarihi : 13.09.2017 Rapor Tarihi : 26.09.2017  
 Döner Sermaye No : 17-16-25-3-00-556 PAL Ref. No : 17-851

#### SENTEZ GAZI

PARAMETRE	YÖNTEM	PAL SONUÇ
*Oksijen, %mol	<	0,07
*Azot, %mol		74,726
*Karbondiyoksit, %mol		<0,01
*Metan, %mol		1,444
*Etan, %mol		0,028
*Propan, %mol		0,026
*i-bütan, %mol		0,012
*n-bütan, %mol	ASTM D1945	0,034
*i-pentan, %mol		<0,01
*n-pentan, %mol		0,018
*C6+ , %mol		0,038
*Hidrojen, %mol		3,01
*Karbonmonoksit, %mol		20,668
*Hidrojen Sulfür, %mol		<0,08
Toplam, %mol		100,0

**NOT:** Numuneler poşet içerisinde getirilmiştir. Gaz tutucu iğne ile enjeksiyon yapılmıştır.

#### Değerlendirme:

Prof. Dr. Serhat AKIN

Doç. Dr. Çağlar SINAYUÇ

Yüksek Kimyager Neslihan HAS

\* İşaretili deneyler akreditasyon kapsamına dahil değildir.

\*\*Numune, analizi talep eden kurum/kişi tarafından alınıp merkezimize gönderilmiştir. Sonuçlar analizi yapılan numuneye aittir.

Bu rapor laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İnzasız ve mühürlü raporlar geçersizdir.

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Testing reports without signature and seal are not valid.

PAL - Petroleum Research Center, Middle East Technical University, 06800 Ankara-TURKEY Tlf: (90) (312) 210 2897, 210 5673 Fax: (312) 210 5668

**PAL**  
Petrol Araştırma Merkezi  
ODTÜ

## ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Trabzon'da doğdu. Liseyi eski adıyla Araklı Lisesinde okudu. 2004 yılında lisans ve 2008 yılında yüksek lisansını Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tamamladı. 2004-2008 yılları arasında çeşitli mühendislik, proje, taahhüt ve doğalgaz firmalarında yetkili Makine Mühendisi olarak çalıştı. Mekanik tesisat, doğalgaz ve asansör avan proje hazırlama üzerine serbest mühendis olarak kendi iş yerinde faaliyet gösterdi. Askerlik hizmetini olarak 2008-2009 yılları arasında yedek subay olarak görev yaptı. 2010-2012 yılları arasında Gaziosmanpaşa Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalıştı ve 2012 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesinde aynı göreve devam etmektedir. 2011 yılında Hindistan'da International School of Languages'de İngilizce dil eğitimi aldı. Evli ve iki çocuk babasıdır.