

**ÇELTİK SAPLARININ GAZLAŞTIRILMASI İÇİN  
MEKANİK KARIŞTIRICILI AŞAĞI AKIŞLI  
PROTOTİP BİR GAZLAŞTIRICI TASARIMI**

**Serkan TUĞ**

**Doktora Tezi**

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU**

**2016**

**T.C.**  
**NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**ÇELTİK SAPLARININ GAZLAŞTIRILMASI İÇİN  
MEKANİK KARIŞTIRICILI AŞAĞI AKIŞLI  
PROTOTİP BİR GAZLAŞTIRICI TASARIMI**

**Serkan TUĞ**

**BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. BİROL KAYIŞOĞLU**

**TEKİRDAĞ - 2016**

**Her haklı saklıdır**

Bu tez TÜBİTAK tarafından 1001- Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 113O434 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU danıŐmanlıĐında, Serkan TUĞ tarafından hazırlanan “Çeltik Saplarının Gazlaştırılması İçin Mekanik Karıştırıcılı AŞağı Akışlı Prototip Bir Gazlaştırıcı Tasarımı" isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri BaŐkanı: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU (Danışman)

*İmza:*

Üye: Prof. Dr. Hasancan OKUTAN

*İmza:*

Üye: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

*İmza:*

Üye: Doç. Dr. Habib KOCABIYIK

*İmza:*

Üye: Yrd. Doç. Dr. UĞur AKYOL

*İmza:*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Doktora Tezi

### ÇELTİK SAPLARININ GAZLAŞTIRILMASI İÇİN MEKANİK KARIŞTIRICILI AŞAĞI AKIŞLI PROTOTİP BİR GAZLAŞTIRICI TASARIMI

**Serkan TUĞ**

Namık Kemal Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Çeltik sapı, biyokütle gazlaştırma teknolojileri ile değerlendirilebilecek Trakya bölgesindeki en önemli tarımsal atıklardan biridir. Bu çalışmada çeltik sapı gazlaştırması için, boğazsız tip sabit yataklı aşağı akışlı mekanik karıştırıcı bir prototip gazlaştırıcı tasarlanmıştır. Çeltik sapsarı farklı katkı maddeleri katılarak peletlenip gazlaştırılmıştır. Bu amaçla katkısız (PRF), %3 PVA katkılı (PVA3), %5 Melas katkılı (PM5), %5 kömür tozu katkılı (PC5) ve %15 kömür tozu katkılı (PC15) peletler kullanılmıştır. Gazlaştırma işleminde hava giriş şeklinin, hava fazlalık katsayısının, karıştırma işleminin gazlaştırma verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, reaktör içerisinde kor bölgesindeki sıcaklığın camlaşma ve aglomerasyon üzerine etkileri gözlenmiştir. Araştırmanın sonucunda kor bölgesindeki sıcaklığın 800°C'yi aşması durumunda camlaşma olayının başladığı saptanmıştır. Gazlaştırma işleminde üstten hava girişi ve 0,20 hava fazlalık katsayısı en iyi sonucu vermiştir. Karıştırma işleminin çeltik sapsının gazlaştırılmasında olumlu sonuç vermediği gözlenmiştir. Pelet örnekleri belirlenen en uygun yöntemle gazlaştırılmış ve elde edilen sentez gazı analiz edilerek ısı verimleri karşılaştırılmıştır. Sentez gazı için en yüksek alt ısı değer 4,430 MJ·Nm<sup>-3</sup> ile yalnızca çeltik sapı kullanılan (PRF) peletlerle, en düşük alt ısı değer 3,899 MJ·Nm<sup>-3</sup> ile %15 kömür tozunun kullanıldığı (PC15) peletlerle yapılan gazlaştırma işleminde elde edilmiştir. En yüksek gazlaştırma verimi katkısız pelet (PRF) örneklerinde %64,8 değeri ile elde edilmiştir. En düşük gazlaştırma verimi %59,6 ile %15 kömür karışımında olmuştur. Pelet örneklerinin gazlaştırma verimleri arasındaki fark istatistiki olarak önemli bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** biyokütle, gazlaştırma, gazlaştırıcı, çeltik sapı, sentez gazı, mekanik karıştırıcı

**2016, 92 sayfa**

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **A PROTOTYPE DOWNDRAFT GASIFIER DESIGN WITH MECHANICAL STIRRER FOR RICE STRAW GASIFICATION**

**Serkan TUĞ**

Namık Kemal University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Biosystem Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Rice straw is one of the most important agricultural residue in Trakya region that can be evaluated by biomass gasification technologies. In this research, a throathless type fixed bed downdraft gasifier prototype with mechanical stirrer has been designed for rice straw gasification. Rice straw was pelleted by using different additive materials and these pellet samples were gasified. For this purpose, pure (PRF), 3% PVA doped (PVA3), 5% molasses doped (PM5), 5% charcoal powder doped (PC5) and 15% charcoal powder doped (PC15) pellets were used. Experiments were conducted using throathless type reactor. The effects of air inlet direction, air excess coefficient and mixing process the gasification efficiency during the gasification process were investigated. In addition to these, effects of temperature in the reactor core zone on glass transition and agglomeration have been observed. According to research results, it was determined that glass transition started when the temperature in core zone exceeds 800°C. The best result was obtained in gasification process with upper air intake and excess air coefficient of 0,20. It was observed that the mixing process have not positive result during the gasification of rice straw. Pellet samples were gasified using most appropriate method that was determined by experiments and obtained synthesis gas yields were compared. The maximum lower heating value of syngas was determined for gasification process that was performed using pure rice straw pellets (PRF) as 4,430 MJ·m<sup>-3</sup> while the minimum lower heating value was determined for gasification process that was performed using 15% coal dust doped pellets (PC15) as 3,899 MJ·m<sup>-3</sup>. The highest gasification efficiency was determined using pure rice straw pellets (PRF) as 64,8 % and the lowest gasification efficiency was determined using 15% coal dust doped pellets (PC15) as 59,6%. Difference between gasification efficiency of pellet samples was found statistically significant.

**Key Words:** biomass, gasification, gasifier, rice straw, syngas, mechanical stirrer

**2016, 92 pages**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	iii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	v
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	viii
<b>ÖNSÖZ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Çeltik Sapı .....	1
1.2. Gazlaştırma .....	6
1.3. Gazlaştırma Sistemleri .....	10
1.4. Çeltik Sapının Gazlaştırılması .....	16
1.5. Çalışmanın amacı .....	19
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	20
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	26
3.1. Materyal .....	26
3.1.1. Gazlaştırma işleminde kullanılan çeltik sapları .....	26
3.1.2. Gazlaştırıcı .....	27
3.1.3. Ölçüm ve kontrol donanımı .....	28
3.1.4. Gaz kromatografi (GC) cihazı .....	30
3.2. Yöntem .....	30
3.2.1. Gazlaştırıcının tasarımı ve imalatı .....	30
3.2.2. Gaz temizleme ve soğutma üniteleri .....	37
3.2.3. Vakum pompası ve yakma ünitesi .....	38
3.2.4. Çeltik saplarının peletlenmesi .....	39
3.2.5. Pelet örneklerinin elementel ve fiziksel özelliklerinin saptanması .....	43
3.2.6. Gazlaştırıcının çalıştırılması .....	45
3.2.7. Sıcaklık ve basınç ölçümleri .....	47
3.2.8. Gaz analizleri .....	49
3.2.9. Gaz ve Hava Debilerinin Ölçümleri .....	51
3.2.10. Stokiyometrik hava miktarının hesaplanması .....	51
3.2.11. Hava fazlalık katsayısının hesaplanması .....	52
3.2.12. Özgül gazlaştırma oranının (SGR) hesaplanması .....	52
3.2.13. Özgül gaz üretim oranının (SGPR) hesaplanması .....	53
3.2.14. Birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarının saptanması .....	53
3.2.15. Gazlaştırma veriminin hesaplanması .....	53
3.2.16. Reaksiyon sıcaklığının gazlaştırma üzerine etkisinin saptanması: .....	54
3.2.17. En uygun hava fazlalık katsayısının (ER) ve hava giriş yönünün saptanması .....	55
3.2.18. Karıştırma etkisinin saptanması .....	56
3.2.19. Pelet örneklerinin gazlaşma özelliklerinin saptanması .....	56
3.2.20. Biyokütle yakıt hazırlama maliyetinin hesaplanması .....	56
3.2.20.1. Sap parçalama işleminin maliyetinin hesaplanması .....	56
3.2.20.2. Peletleme işleminin maliyetinin hesaplanması .....	57
3.2.21. Gazlaştırıcı sistemin işletme maliyetinin hesaplanması .....	58
3.2.22. Uygulanan istatistik yöntemleri .....	60
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	61

4.1. Pelet Örneklerinin Kimyasal ve Fiziksel Analiz Sonuçları .....	61
4.2. Stokiyometrik Hava Miktarları .....	63
4.3. Hava debilerinin tespiti .....	63
4.4. Reaksiyon sıcaklığının gazlaştırma işlemi üzerindeki etkisi .....	64
4.5. Hava fazlalık katsayısı (ER) ve giriş şeklinin gazlaştırmaya etkisi.....	72
4.6. Karıştırma işleminin gazlaştırmaya etkisi .....	77
4.7. Pelet örneklerinin gazlaştırma performansları .....	77
4.8. Ekonomik analiz .....	81
4.8.1. Biyokütle yakıt hazırlama maliyetleri .....	81
4.8.2. Gazlaştırıcı sistemin işletme giderleri .....	83
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>86</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>92</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 1.1. Bazı biyokütle yakıtlarının üst ısıl değerleri (Jenkins ve ark. 1998).....	6
Çizelge 1.2. Çeltik artıklarının analiz sonuçları (Jenkins ve ark. 1998).....	17
Çizelge 3.1. Kullanılan refrakter malzeme (Hycast70) kimyasal bileşimi ( <a href="http://www.kiltas.com.tr">www.kiltas.com.tr</a> 2015).....	33
Çizelge 3.2. Kullanılan refrakterin (Hycast70) fiziksel özellikleri ( <a href="http://www.kiltas.com.tr">www.kiltas.com.tr</a> 2015)	34
Çizelge 3.3. Biyoyakıt olarak hazırlanan pelet bileşimleri.....	42
Çizelge 3.4. Pelet örneklerine yapılan analizler ve standartları .....	44
Çizelge 4.1. Pelet örneklerinin nem, kül ve uçucu madde içerikleri (% ağırlık).....	61
Çizelge 4.2. Pelet örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlık) .....	61
Çizelge 4.3. Pelet örneklerinin fiziksel analiz sonuçları .....	62
Çizelge 4.4. Pelet örneklerinin kül içerik analiz sonuçları (% ağırlık).....	62
Çizelge 4.5. Peletlerin hacim ve parça yoğunluk, çap, uzunluk ve ağırlık değerleri .....	63
Çizelge 4.6. Stokiyometrik hava miktarları.....	63
Çizelge 4.7. Hava fazlalık katsayıları ve ortalama hava debileri .....	64
Çizelge 4.8. Nozullardan hava girişlerinde elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları .....	64
Çizelge 4.9. Üstten hava girişlerinde elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları .....	64
Çizelge 4.10. ER=0,20 için üstten hava girişiyle elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları (karıştırıcısız).....	69
Çizelge 4.11. Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre ölçülen FCR, GFR ve hesaplanan SGR, SGPR ve GM <sub>b</sub> değerleri.....	73
Çizelge 4.12. Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre elde edilen gazların analiz sonuçları .....	73
Çizelge 4.13. Hava fazlalık katsayısı (ER) ve hava giriş şekline göre gazlaştırma verimleri..	75
Çizelge 4.14. Hava giriş şeklinin gazlaştırma verimine etkisinin Tek Yönlü “Varyans Analiz Tablosu” (VAT).....	76
Çizelge 4.15. Hava fazlalık katsayısının gazlaştırma verimine etkisinin “Tek Yönlü Varyans Analiz Tablosu” (VAT) .....	77
Çizelge 4.16. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak çoklu karşılaştırma (Duncan) testi sonuçları.....	77
Çizelge 4.17. Pelet örneklerinin gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazların kimyasal analiz sonuçları.....	78
Çizelge 4.18. Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazın ısıl değerlerinin Tek Yönlü “Varyans Analizi Tablosu” (VAT).....	79
Çizelge 4.19. Sentez gaz ısıl değerlerinin Duncan aralık testi sonucu .....	79
Çizelge 4.20. Gazlaştırma esnasında biyokütle besleme ve gaz çıkış oranları.....	79
Çizelge 4.21. Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazın gazlaştırma verimleri.....	80
Çizelge 4.22. Pelet örneklerinin gazlaştırma verimlerinin Tek Yönlü “Varyans Analiz Tablosu” (VAT).....	81
Çizelge 4.23. Pelet örneklerinin sentez gaz verimlerinin çoklu karşılaştırma testi (Duncan) sonuçları.....	81
Çizelge 4.23. Gazlaştırıcı ünite de kullanılan elektrik motorları.....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1. 1. Türkiye çeltik üretiminin %41,62'sinin gerçekleştiği Meriç Havzası .....	1
Şekil 1. 2. Tarlada kalan çeltik sapının yakılması (Kayıoğlu ve ark. 2012) .....	2
Şekil 1. 3. <i>Non-flooding</i> sistem (a), <i>winter flooded</i> sistem (b). (Kayıoğlu ve ark. 2012).....	3
Şekil 1. 4. Biçme düzeniyle sapların balyalanması (Kayıoğlu ve ark. 2012) .....	4
Şekil 1. 5. Çeltik saplarının döner bıçaklı biçme düzenleriyle balyalanması (Kayıoğlu ve ark. 2012) .....	4
Şekil 1. 6. Mobilya ve yapı malzemesi olarak çeltik sapı kullanımı (Keijsers 2009) .....	5
Şekil 1. 7. Seralarda örtü malzemesi olarak ve fide yetiştirmek için çeltik sapı kullanımı (Kayıoğlu ve ark. 2012).....	5
Şekil 1. 8. Kompozit malzeme yapımında çeltik sapı kullanımı (PE, PP, PVC vb. plastiklerin yapımında katkı malzemesi olarak) (Keijsers 2009).....	5
Şekil 1. 9. Aşağı akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986) .....	9
Şekil 1. 10. Yukarı akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986) .....	9
Şekil 1. 11. Karşıt akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986).....	10
Şekil 1. 12. 1943 yılı, gazlaştırıcı ile çalışan araçların seri üretimi (NAS-NAE 1983) .....	11
Şekil 1. 13. Imbert gazlaştırıcı ile çalışan 1930 model bir araç (NAS-NAE 1983) .....	11
Şekil 1. 14. Akışkan yataklı gazlaştırıcı tipleri.....	12
Şekil 1. 15. Boğaz tipine göre üstü kapalı gazlaştırıcılar (Anonim 2016) .....	13
Şekil 1. 16. Hava giriş şekillerine göre üstü kapalı gazlaştırıcılar (Anonim 2016).....	14
Şekil 1. 17. Hava giriş şekillerine göre üstü açık gazlaştırıcılar.....	14
Şekil 1. 18. Üstü açık “Stratified” gazlaştırıcılarda bölgeler.....	15
Şekil 3. 1. Denemelerde kullanılan çeltik sapı balyaları .....	26
Şekil 3. 2. Gazlaştırıcı sistemin genel görünümü .....	27
Şekil 3. 3. Gazlaştırıcı sistemin akış şeması ve sıcaklık, basınç, debi ölçüm-kontrol noktaları .....	28
Şekil 3. 4. Otomasyon ve kontrol panosu .....	29
Şekil 3. 5. Gaz analizleri için kullanılan gaz kromatografi cihazı (Agilant 7890B GC).....	30
Şekil 3. 6. Reaktör ana gövdesi temel tasarım ölçüleri .....	32
Şekil 3. 7. İmalat aşamasındaki reaktör ana gövdesi (AISI 310) .....	33
Şekil 3. 8. Üst ünite (kapak, biyokütle besleme ve üst hava girişi, sıcaklık ve basınç sensörleri, mekanik karıştırıcı) .....	34
Şekil 3. 9. Üstten tahrikli mekanik karıştırıcı tasarımı şekil ve ölçüleri .....	35
Şekil 3. 10. (a) Kollektör, helezon ve kül tankı kesiti (b) Gaz çıkış (kollektör) ünitesi, helezon ve kül tankı.....	36
Şekil 3. 11. Gazlaştırıcı reaktör montajı .....	37
Şekil 3. 12. (a) Reaktör gaz çıkış hattı, (b) siklon bağlantısı.....	38
Şekil 3. 13. Gaz soğutma ünitesi genel ve alttan (serpantinli borular) görünüşleri.....	38
Şekil 3. 14. Vakum pompası, pompa servis suyu deposu ve çıkış hattı .....	39
Şekil 3. 15. Yakma ünitesi.....	39
Şekil 3. 16. Sap parçalama makinesi .....	40
Şekil 3. 17. Parçalanmış çeltik sapları .....	40
Şekil 3. 18. Pelet üretim çalışmaları .....	41
Şekil 3. 19. Kullanılan pelet makinesi .....	41
Şekil 3. 20. Hazırlanan 5 farklı bileşimdeki pelet numuneleri .....	42
Şekil 3. 21. Kullanılan kömürün ambalajı ve özellikleri.....	43

Şekil 3. 22. Reaktörün yüklenmesi (deneme başlangıcı).....	45
Şekil 3. 23. Deneme sonu (Kor biyokütle yakıtın üst seviyesine ulaşmış) .....	46
Şekil 3. 24. Denemeler sırasında sistem çalışırken .....	46
Şekil 3. 25. Elde edilen sentez gazı alevi .....	47
Şekil 3. 26. Reaktör üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları.....	48
Şekil 3. 27. (a) $T_1$ , $T_2$ ve $T_3$ sıcaklık sensörleri, (b) $P_3$ basınç sensörü.....	48
Şekil 3. 28. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü .....	49
Şekil 3. 29. GC'den alınan örnek bir gaz analiz raporu .....	50
Şekil 3. 30. Sentez gazı çıkış ve hava giriş debilerinin ölçülmesi için orifis debimetreler .....	51
Şekil 3. 31. Denemelerde kullanılan hava giriş şekilleri .....	55
Şekil 4. 1. $ER=0,15-0,20-0,25-0,30$ için nozullardan hava girişinde sıcaklık dağılımı .....	65
Şekil 4. 2. $ER=0,35$ için nozullardan hava girişinde sıcaklık dağılımı .....	66
Şekil 4. 3. $ER=0,15-0,20-0,25-0,30$ için üstten hava girişinde sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 4. 4. $ER=0,35$ için üstten hava girişinde sıcaklık dağılımı.....	68
Şekil 4. 5. $ER=0,20$ için üstten hava girişiyle karıştırıcısız elde edilen sıcaklık dağılımı .....	69
Şekil 4. 6. (a) Siklon yoğuşma tahliye vanası, (b) soğutucu yoğuşma tahliye vanası.....	70
Şekil 4. 7. Düşük sıcaklıklarda yoğuşma ve katran oluşumunun sistem elemanları üzerinde yarattığı kirlilik .....	71
Şekil 4. 8. Deney sonunda içinde camsı yapı görülen aglomerasyon (topaklaşma) oluşumu ..	71
Şekil 4. 9. Reaktör içinde bloklanma.....	72
Şekil 4. 10. Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre elde edilen gazların alt ısı değerleri .....	74
Şekil 4. 11. Hava fazlalık katsayısı (ER) ve hava giriş şekline bağlı olarak gazlaştırma verimleri .....	75
Şekil 4. 12. Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazların yanıcı gaz yüzdeleri .....	78
Şekil 4. 13. Pelet örneklerinin gazlaştırma verimleri .....	80

## SİMGELER ve KISALTMALAR

AFR	: <i>Air Flow Rate</i> (Hava debisi), ( $m^3h^{-1}$ )
BGM	: Birim gaz maliyeti, ( $TL \cdot Nm^{-3}$ )
BIM <sub>T</sub>	: Gazlaştırma işleminin saatlik maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
BKM <sub>pl</sub>	: Peletleme işleminde birim kütle maliyeti, ( $TL \cdot kg^{-1}$ )
BKM <sub>sp</sub>	: Sap parçalama işleminde birim kütle maliyeti, ( $TL \cdot kg^{-1}$ )
BKM <sub>T</sub>	: Biyokütle yakıt hazırlama işleminde birim kütle maliyeti, ( $TL \cdot kg^{-1}$ )
EB	: Birim elektrik enerjisi maliyeti, $TL \cdot (kWh)^{-1}$
EM <sub>bh</sub>	: Boşaltma helezonu saatlik enerji maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
EM <sub>pl</sub>	: Peletleme işleminde tüketilen enerjinin maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
EM <sub>sf</sub>	: Soğutma fanı saatlik enerji maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
EM <sub>sp</sub>	: Sap parçalama işleminde tüketilen enerjinin maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
EM <sub>vp</sub>	: Vakum pompası saatlik enerji maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
ER	: <i>Equivalence Ratio</i> (Hava fazlalık katsayısı), (kW)
ET <sub>pl</sub>	: Peletleme makinesinin kurulu gücü, (kW)
ET <sub>sp</sub>	: Sap parçalama makinesinin kurulu gücü, (kW)
FCR	: <i>Fuel Consumption Rate</i> (Yakıt tüketim hızı),
FT	: <i>Flowing Temperature</i> (Ergime Sıcaklığı)
GEM	: Birim gaz enerji maliyeti, ( $TL \cdot (kWh)^{-1}$ )
HT	: Hemisphere Temperature (Yarıküre Sıcaklığı), °C
IB	: Saatlik işçilik bedeli, ( $TL \cdot h^{-1}$ -kişi)
IDT	: İlk Deformasyon Sıcaklığı, °C
IM <sub>g</sub>	: Gazlaştırıcı saatlik toplam işçilik maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
IM <sub>pl</sub>	: Peletleme işleminin işçilik maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
IM <sub>sp</sub>	: Sap parçalama işleminin işçilik maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
KG <sub>bh</sub>	: Boşaltma helezonu kurulu gücü, (kW)
KG <sub>sf</sub>	: Soğutma fanı kurulu gücü, (kW)
KG <sub>vp</sub>	: Vakum pompası kurulu gücü, (kW)
KP <sub>pl</sub>	: Peletleme makinesinin kapasitesi, ( $kg \cdot h^{-1}$ )
KP <sub>sp</sub>	: Sap parçalama makinesinin kapasitesi, ( $kg \cdot h^{-1}$ )
LHV <sub>b</sub>	: <i>Lower Heating Value of Biomass</i> (Biyokütle alt ısı değeri), ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )
LHV <sub>g</sub>	: <i>Lower Heating Value of Gas</i> (Gazın alt ısı değeri), ( $MJ \cdot Nm^{-3}$ )
PC15	: %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti
PC5	: %5 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti
PML5	: %5 Melas katkılı çeltik sapı peleti
PRF	: Katkısız (referans) çeltik sapı peleti
PVA3	: %3 PVA ( <i>Polyvinyl acetat</i> ) katkılı çeltik sapı peleti
SGPR	: <i>Specific Gas Production Rate</i> (Özgül gaz üretim hızı), ( $Nm^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )
SGR	: <i>Specific Gasification Rate</i> (Özgül gazlaşma hızı), ( $kg \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )
SR	: Stokiyometrik hava miktarı (kütleli), ( $kg \cdot hava$ ).( $kg \cdot biyokütle$ ) <sup>-1</sup>
SR <sub>v</sub>	: Stokiyometrik hava miktarı (hacimsel), ( $m^3 \cdot hava$ ).( $kg \cdot biyokütle$ ) <sup>-1</sup>
ST	: <i>Softening Temperature</i> (Yumuşama Sıcaklığı), °C
TM	: Gazlaştırma işlemi saatlik maliyetlerinin toplamı, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
TM <sub>pl</sub>	: Peletleme işleminin saatlik toplam maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
TM <sub>sp</sub>	: Sap parçalama işleminin saatlik toplam maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )
YM <sub>bk</sub>	: Biyokütlenin gazlaştırma işlemindeki saatlik maliyeti, ( $TL \cdot h^{-1}$ )

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada çeltik saplarının gazlaştırılması amacıyla sabit yataklı, aşağı akışlı boğazsız ve mekanik karıştırıcı prototip bir gazlaştırıcı tasarlanmıştır. Tasarlanan gazlaştırıcının imalatı yapılarak gerekli deney düzeneğiyle birlikte bir biyokütle gazlaştırma laboratuvarı oluşturulmuştur. Sonraki aşamada çeltik saplarının biyoyakıt olarak hazırlanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Çeltik sapları parçalanarak boyutları küçültülmüş, enerji yoğunluklarını arttırmak üzere pelet haline getirilmiştir. 5 farklı karışım şeklinde hazırlanan peletlerin ısı özelliklerini belirlemek amacıyla TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsünde analizleri yapılmıştır. Gazlaştırma işlemlerinde farklı hava akış oranları ve şekilleriyle denemeler yapılarak uygun gazlaştırma şartları belirlenmiştir. Hazırlanan pelet numuneleri belirlenen şartlarda gazlaştırılarak gazlaşma özellikleri tespit edilmiş, elde edilen sentez gazının özellikleri gaz kromatografi cihazı (GC) yardımıyla belirlenmiştir.

Biyokütle, yenilenebilir, sürdürülebilir, temiz ve önemli bir alternatif enerji kaynağıdır. Yenilenebilir ve alternatif enerjiler arasında biyokütle enerjisi ve teknolojileri özellikle gelişmekte olan ülkeler için önemli rol oynamaktadır. Bu çalışma 1001 Program Kodu altında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Biyokütle enerjisi teknolojilerinin ve geliştirilmelerine yönelik çalışmaların yaygınlaşması için bu ve benzeri çalışmaların desteklenmesi bilimsel, teknolojik, ekonomik ve çevresel anlamda hem ülkemiz hem de gelecek nesillere bırakacağımız dünya için çok değerlidir. Bu anlamda desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın başından sonuna kadar öncülük eden ve her aşamasında değerli desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU'na; tecrübe ve bilgisiyle bu çalışmaya yön veren, kritik noktalarda önümü aydınlatan proje danışmanımız Sayın Prof. Dr. Hasancan OKUTAN'a; proje ekibinde yer alarak bu projeye destek ve emek veren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Türkan AKTAŞ, Sayın Doç. Dr. Yılmaz BAYHAN, Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim Savaş DALMIŞ ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Recai DURGUT'a teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvarın hazırlanmasına destek olan NKÜ Ziraat Fakültesi yönetimine, İpsala Kaymakamlığı'na, NKÜ Teknik Bilimler MYO'daki mesai arkadaşlarıma, verdikleri motivasyon için NKÜ Çorlu MYO'daki ve NKÜ Çorlu Mühendislik Fakültesi'ndeki arkadaşlarıma, yine proje ekibimizde görev alan Ziraat Yük. Müh. Figen TAŞÇI DURGUT'a, gazlaştırıcının tasarım ve imalatında önemli katkılar sağlayan İET Mühendislik'ten Anıl ÜNSAÇ ve Hasan ÜZER'e ve burada adını sayamadığım katkı sağlayan herkese teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın her anında en büyük desteği sevgili eşim Nebiye ERDEM TUĞ'dan ve canım kızım Özen TUĞ'dan aldım. Sevginiz ve sabrınız için, hep yanımda olduğunuz için yürek dolusu teşekkürler, siz olmasanız bu gücü bulamazdım.

Ocak 2016

Serkan TUĞ  
Öğretim Görevlisi

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Çeltik Sapı

Çeltik, bilindiği gibi Dünya’da buğdaydan sonra tüketilen en önemli tahıllardan birisidir. Ülkemizde de son yıllarda üretimi artmaya başlamıştır. 2014 yılı verilerine göre ülkemizde yaklaşık 110.884 ha ekiliş alanı ile 830.000 ton çeltik üretimi yapılmaktadır. Çeltik üretim alanlarının %67,33’ü Batı Marmara Bölgesinde bulunmaktadır. Edirne ili ise 46.154 ha üretim alanı ve 331.423 ton çeltik üretimiyle ülkemiz çeltik üretim alanlarının %41,62’lik kısmına sahiptir (TUİK 2014) (Şekil 1.1.). Edirne ilinde en fazla üretimin yapıldığı yer İpsala ilçesidir. Bölge tarımı için böylesine önemli olan çeltik üretiminin en önemli sorunlarından birisi, hasat sonrasında tarla yüzeyinde kalan sapların değerlendirilmesidir. Çeltik bitkisi sap/tane oranı ( $\approx 1/2$ ) fazla olan bitkidir. Bu yüzden hasattan sonra tarlada yaklaşık 350-400 kg arasında sap kalmaktadır. Çeltik sapında yüksek oranda bulunan silisyumdan dolayı parçalanması güçtür. Ayrıca, sap bu yüzden bir sonraki ekime kadar kolay kolay çürümemektedir. Bu nedenle üreticiler yasak olmasına rağmen tarlada kalan sapları yakmaktadırlar (Şekil 1.2.). Sadece Edirne ilinde her yıl yaklaşık 180.000 ton sap yakılmaktadır. Bu durum olumsuz çevre koşullarını yaratmasının yanı sıra önemli miktarda enerji kaybına neden olmaktadır. Çeltik sapının enerji içeriği  $15 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ’dir (Jain 2006). Buna göre bölgede her yıl  $2,7 \cdot 10^9$  MJ enerji değerine sahip çeltik sapı yakılmaktadır.



Şekil 1. 1.Türkiye çeltik üretiminin %41,62’sinin gerçekleştiği Meriç Havzası



**Şekil 1. 2.**Tarlada kalan çeltik sapının yakılması (Kayaşoğlu ve ark. 2012)

Çeltik sapının yakılmasına karşı önemli iki alternatif bulunmaktadır.

- Sapı uygun yöntemlerle tarlaya karıştırmak
- Tarla dışında sapın değerlendirileceği alternatif pazarlar bulmak.

Dünyada ve ülkemizde çeltik sapının tarlaya karıştırılması ile ilgili kullanılan belli başlı yöntemler şunlardır:

**Hasat sonrası sonbahar ve kış öncesi yağışları beklenerak toprağa karıştırma (“non-flooding” sistem):** Bu yöntemde hasat sonrasında sapın yeteri kadar nem kazanmasını sağlamak için sonbahar ve kış öncesi yağışları beklenir, daha sonra diskaro ve pulluk gibi toprak işleme makineleriyle çeltik sapsarı toprağa karıştırılır (Şekil 1.3a). Bu yöntemde sapın toprakta çürümesinin derecesini yağış miktarı ve sıcaklık önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle çürüme oranı yıldan yıla değişiklik göstermektedir. Yeterli yağış ve sıcaklığın olmadığı yıllarda, çürümeyen sapsarı toprak hazırlığında sorun yaratmaktadır.

**Hasat sonrası tarlanın su altında bekletilerek baharda toprağa karıştırma (“winter flooded” sistem):** Hasattan kısa bir süre sonra tarlaya su verilerek bahara kadar bekletildiği bu yöntemde, bu süre zarfında sapsarı toprağın daha iyi temasını sağlamak amacıyla, tarla yüzeyinde birkaç kez kafesli silindir geçirilmektedir (Şekil.1.3b). Bu yöntemde sapın çürümesi iklim koşullarına bağlı değildir ve birinci yöntemle göre daha etkili sonuçlar elde edilmektedir.

**Uygun ekipmanlarla ya da hasat sırasında sapın parçalanarak toprağa karıştırılması:** Çeltik sapının parçalanması işlemi hasat sırasında biçerdövere eklenecek ekipmanlarla ya da, hasattan sonra çeşitli parçalama makineleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 1. 3.** *Non-flooding* sistem (a), *winter flooded* sistem (b). (Kayışoğlu ve ark. 2012)

Çeltik sapını tarlaya karıştırmak yerine alternatif yöntemler için hasat sırasında sapı namlu halinde bırakan, biçerdöver tablasının altına yerleştirilen biçme düzeni yardımıyla saplar balyalanabilmektedir (Şekil 1.4.). Ya da saplar, döner bıçaklı biçme düzenleriyle biçilip namlu haline getirilerek de balyalanabilmektedir (Şekil 1.5.).

Çeltik sapının tarla dışında değerlendirilebileceği farklı kullanım alanları da bulunmaktadır. Çeltik sapı mobilya ve yapı malzemesi olarak (Şekil 1.6.), seralarda fide yetiştirme amaçlı ve örtü malzemesi olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.7.). Ayrıca tarımsal alanlarda set oluşturma amaçlı da kullanılmaktadır. Hediyelik eşya yapımında, hayvancılık ve tavukçulukta altlık olarak, mantarcılıkta, paketlenme malzemesi yapımında, kâğıt ve karton sanayiinde ve kozmetik sektörü gibi daha birçok alanda çeltik sapı ve küllerinden faydalanılmaktadır. Çeltik sapının, termoplastik ve termoset kompozitlerin yapımında (Şekil 1.8.), metal döküm teknolojisinde de kullanım alanı bulmaya başladığı bilinmektedir. Çeltik kavuzu ve sapı, sürdürülebilir ve alternatif enerjiler içerisinde giderek daha önemli bir yer tutan biyokütle enerjisinin ilgi alanlarından biri olmuştur.

Çeltik sapının uygun teknikler ve farklı yöntemlerle değerlendirilmesi hem ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacak hem de olumsuz çevresel koşulların azalmasına yardımcı olacaktır. Gazlaştırma işlemi bu yöntemlerden birisidir. Sapların %65 dolayında verimle gazlaştırılması mümkün olduğunda, bölgede her yıl  $1,75 \cdot 10^9$  MJ enerji kazancı sağlanmış olacaktır. Bu her gün 24 saat çalışan bir santralin 55,5 MW kurulu gücüne denk gelmektedir. Elde edilen gaz, ya doğrudan yakılarak enerji gereksinimi çok olan çeltik kurutma işleminde ya da gaz motorlarında mekanik enerjiye dönüştürülüp elektrik santrallerinde elektrik üretiminde kullanılabilir. Böylece yenilenebilir bir enerji kaynağı olan çeltik sapından elde



edilen biyokütle enerjisi, fosil yakıtlara alternatif olacak ve ülke ekonomisine önemli katkı sağlayacaktır.



**Şekil 1. 4.** Biçme düzeniyle sapların balyalanması (Kayışoğlu ve ark. 2012)



**Şekil 1. 5.** Çeltik saplarının döner bıçaklı biçme düzenleriyle balyalanması (Kayışoğlu ve ark. 2012)



**Şekil 1. 6.** Mobilya ve yapı malzemesi olarak çeltik sapı kullanımı (Keijsers 2009)



**Şekil 1. 7.** Seralarda örtü malzemesi olarak ve fide yetiştirmek için çeltik sapı kullanımı (Kaişoğlu ve ark. 2012)



**Şekil 1. 8.** Kompozit malzeme yapımında çeltik sapı kullanımı (PE, PP, PVC vb. plastiklerin yapımında katkı malzemesi olarak) (Keijsers 2009)

## 1.2. Gazlaştırma

Ana bileşenleri karbonhidrat olan, bitkisel veya hayvansal kökenli tüm doğal maddeler, biyokütle enerji kaynağı, bu kaynaklardan üretilen enerji ise biyokütle enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyokütle enerjisi önemli bir yere sahiptir ve sera gazı emisyonlarını azaltıcı etkisi olduğu düşünüldüğünde, fosil yakıtlar yerine alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmasının yararları büyüktür.

Biyokütle yakıtlar içerdikleri enerji değerleri açısından çeşitlilik göstermektedir. Çizelge 1.1.'de bazı biyokütle yakıtlarının üst ısıl değerleri verilmiştir.

Biyokütle dönüşüm teknolojileri fiziksel, termokimyasal ve biyolojik prosesler olarak 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bu çalışmada termokimyasal süreçler içerisindeki "gazlaştırma" işlemi ele alınmış, gazlaştırıcıda kullanılacak, biyokütle yakıtının hazırlanmasında fiziksel proseslerden (kurutma, boyut küçültme, yoğunluk artırma) yararlanılmıştır.

Gazlaştırma genel olarak, kömür ve biyokütlenin az oksijenli ortamda kısmi olarak yakılması ile yanıcı gaza ya da karbon monoksit ve hidrojen açısından zengin gaz ürününe dönüşmesi olarak tarif edilir. Yakıtın stokiometrik hava miktarından daha az havayla yakıldığı kısmi yanma sürecidir. Gazlaştırmanın kuruma, piroliz, yanma ve indirgeme aşamaları bulunmaktadır (Rasvanshi 1986). Biyokütle gazlaştırma yoluyla sentez gazı elde edilir. Sentez gazı esas olarak CO, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> içermektedir ve bu gazdan elektrik üretimi yakmaya göre daha verimlidir. Normal yanmaya göre 1/3 oranında daha az oksijen tüketmekte, elde edilen gazın yanmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonu daha az olmaktadır.

**Çizelge 1.1.** Bazı biyokütle yakıtlarının üst ısıl değerleri (Jenkins ve ark. 1998)

Biyokütle	Üst ısıl değer (MJ·kg <sup>-1</sup> )
Çeltik sapı	15,09
Çeltik kavuzu	15,84
Buğday samanı	17,94
Şeker pancarı küspesi	19,0
Alfalfa sapı	18,67
Badem kabuğu	19,49
Fıstık kabuğu	18,22

Gazlaştırmanın avantajları şöyle sıralanabilir:

- Elektrik üretiminde kullanılmaya müsait gaz ürün üretilebilmesi (Akpınar 2006)
- Denetimli ve sınırlı bir oksijen ortamında gerçekleştiği için yanmaya göre çok daha az SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> salımı gerçekleştirilmesi (Akpınar 2006)
- Çok çeşitli hammaddelerin işlenebilmesi (Hacıoğlu 2007)
- Hammaddelerdeki kirleticiler ayrıldıktan sonra temiz bir sentez gazı ürünü üretilebilmesi (Hacıoğlu 2007)
- Atıkların ya da düşük değerli ürünlerin, yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesi (Hacıoğlu 2007)
- Yok edilmesi gereken katı atık miktarının en aza indirilmesi (Hacıoğlu 2007)
- Sentez gazının yakılması, katı ve sıvı formlara göre daha verimli olması (Yinesor 2008)
- Enerji çıkışının kontrol edilebilir ve ayarlanabilir olması (Yinesor 2008)

Sentez gazı elde edilirken oksitleyici ortam olarak hava, su buharı veya saf O<sub>2</sub> kullanılabilir. Oksitleyici ortam olarak hava kullanıldığında elde edilen sentez gazının içeriği yaklaşık şöyledir: %15 H<sub>2</sub>, %20 CO, %15 CO<sub>2</sub>, %2 CH<sub>4</sub>, %48 N<sub>2</sub>.

Gazlaştırma ile katı ya da sıvı hammadde gaz haline dönüştürüldüğünde, oluşan kükürtlü bileşikler ve kül gibi istenmeyen maddeler artırılabılır. Hava fazlalığı ile çalışan ısı işlemlerin aksine gazlaştırma oksijen miktarının kontrol edildiği bir işlemdir. Tam yanma için gereken oksijen miktarından daha düşük miktarlarda oksijen kullanarak gerçekleştirilir (Hacıoğlu 2007).

Gazlaştırıcı reaktörlerde, gazlaştırılacak biyokütle kimyasal olarak dört aşamadan geçmektedir. Kuruma, piroliz, oksidasyon (yanma) ve redüksiyon (indirgeme). Şekil 1.9., Şekil 1.10. ve Şekil 1.11.'de sabit yataklı temel reaktör tiplerinde gazlaştırma bölgeleri şematik olarak gösterilmektedir.

**Kuruma bölgesi:** Biyokütle gazlaştırıcıya %10-30 nemle girmektedir. Kuruma bölgesinde ana işlem biyokütlenin nem kaybetmesidir. Bu safhada gazlaştırıcının korozyonuna da sebep verebilen bazı organik asitler de şekillenebilmektedir (Rajvanshi 1986). Bu bölge sıcaklığı 70-200°C civarındadır (Yinesor 2008).

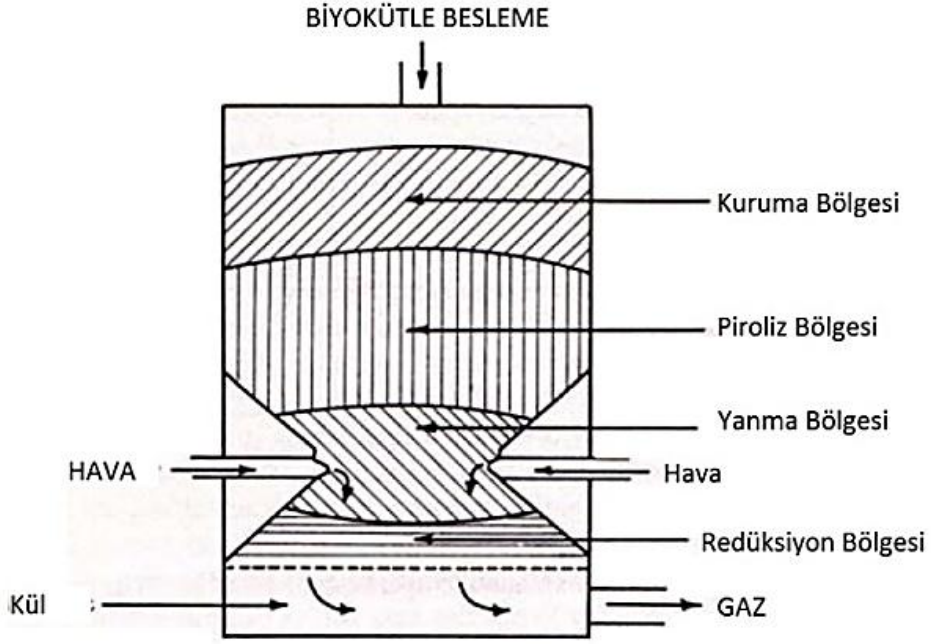
**Piroliz bölgesi:** Piroliz bölgesinde büyük moleküller orta büyüklükteki moleküllere dönüşürler; bu safha biyokütlenin kimyasal bozunmasında ilk aşamadır. Piroliz ürünleri olarak sıvı veya gaz formda uçucu maddeler, katı halde cüruf ve sıvı katran görülür. Bu ürünler daha sonra oksidasyon bölgesindeki yüksek sıcaklıklarda yeterince kaldıkları takdirde yanarak daha küçük moleküllü H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO ürünlerine dönüşeceklerdir. Piroliz bölgesi sıcaklığı 350-500°C arasındadır (Yinesor 2008). 200-280 °C arası CO<sub>2</sub>, asetik asit ve su çıkışı gerçekleşir. Bu aşamada önemli miktarda katran ve CO<sub>2</sub> içeren gaz çıkışı gerçekleşir. Hafif katran oluşumunun yanı sıra metil alkol de görülebilir. 500-700 °C arası sıcaklıklarda gaz üretimi düşük seviyededir ve hidrojen içermektedir (Rajvanshi 1986).

**Yanma (oksidasyon) bölgesi:** Biyokütle yakıtı esas itibariyle karbon, hidrojen ve oksijen elementleri içerir. Tam yanmada bu karbon içeriği CO<sub>2</sub>'e, hidrojen içeriği de su buharına dönüşmektedir. Yanma reaksiyonu ekzotermiktir ve oksidasyon sıcaklığı yaklaşık 1000-1500°C civarındadır. Bu aşamada şu reaksiyonlar gerçekleşmektedir:

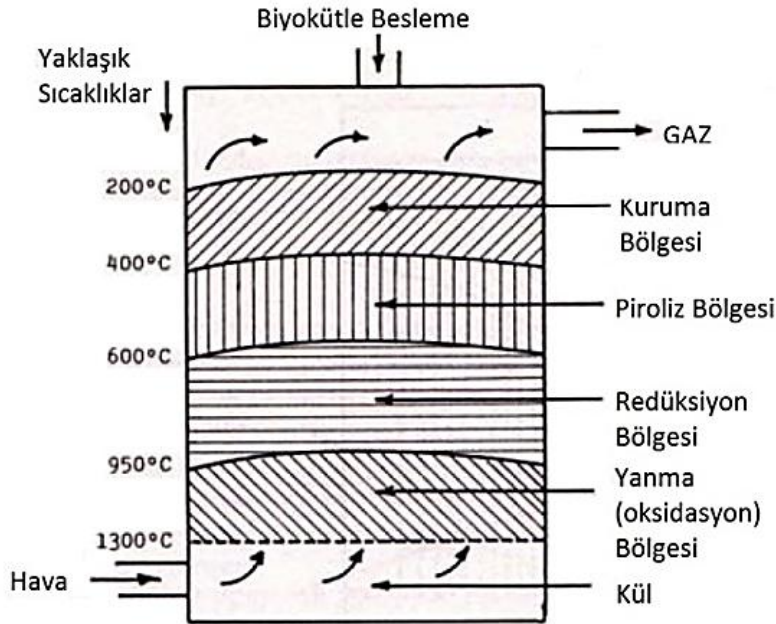


**İndirgeme (redüksiyon) bölgesi:** Redüksiyon bölgesi sıcaklığı 800-1000°C dolaylarındadır. Kısmi yanma sonucu oluşan su, karbon dioksit ve yanmamış, kısmen kırılmış piroliz ürünleri, kor bölgesinden geçerlerken aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir:

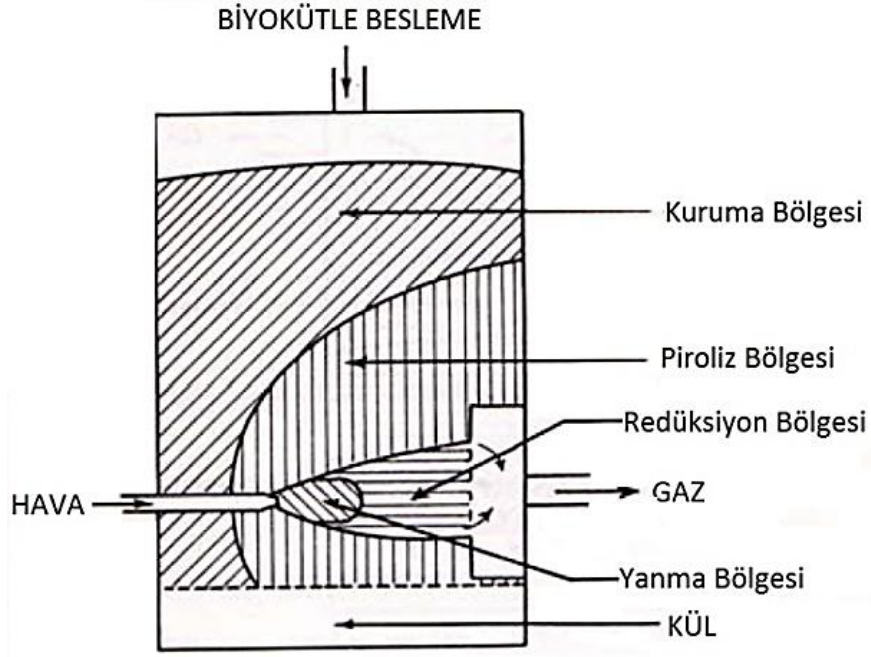




Şekil 1. 9. Aşağı akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986)



Şekil 1. 10. Yukarı akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986)



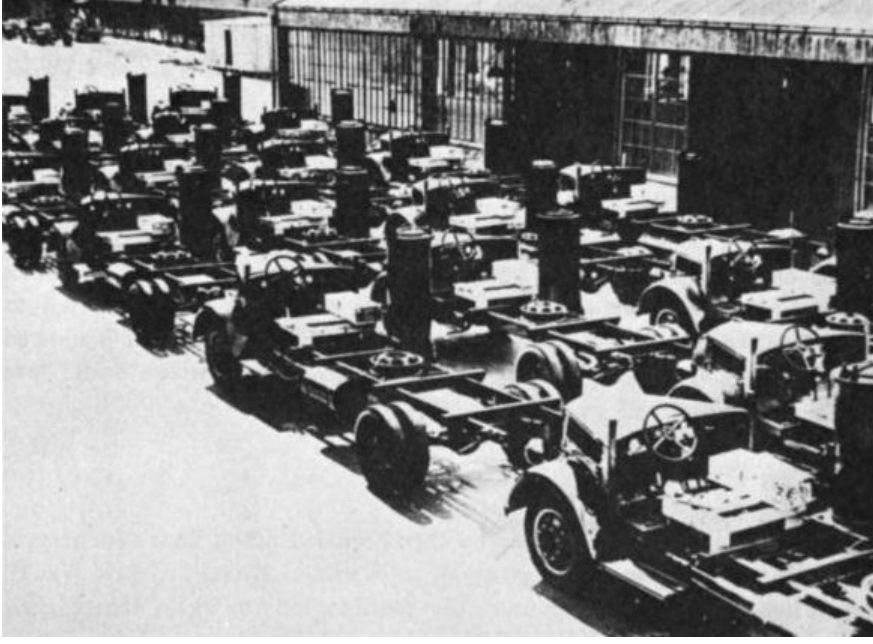
**Şekil 1. 11.** Karşıt akışlı reaktörde bölgeler (Rajvanshi 1986)

### 1.3. Gazlaştırma Sistemleri

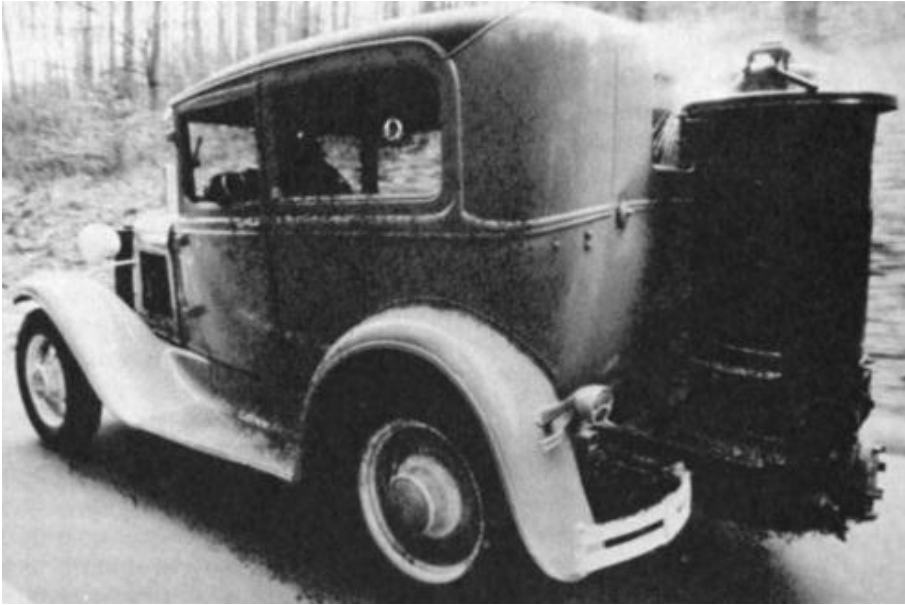
Gazlaştırma işlemi gazlaştırıcı adı verilen reaktörlerde yapılır ve elde edilen sentez gazı temizlenip soğutularak yoğunluğu arttırılmış gaz yakıt olarak içten yanmalı motorlarda veya ısıtma uygulamalarında kullanılabilir. İçten yanmalı motorlarda gazlaştırıcıların kullanılması özellikle II. dünya savaşı yıllarında kuzey Avrupa ülkelerinde oldukça yaygınlaşmıştır (Şekil 1.12. ve Şekil 1.13.). Ancak savaş yılları sonrası petrol ürünleri kullanımı tekrar öne geçmiştir.

Gazlaştırıcı sistemler genel olarak dört grup altında incelenebilir:

- Yakıt hazırlama ve besleme sistemleri (kurutma, briketleme, peletleme)
- Gazlaştırıcı reaktörler
- Gaz temizleme ve soğutma sistemleri (siklonlar, filtreler, gaz yıkama, gaz soğutma)
- Enerji dönüşüm üniteleri (içten yanmalı motorlar, türbinler)



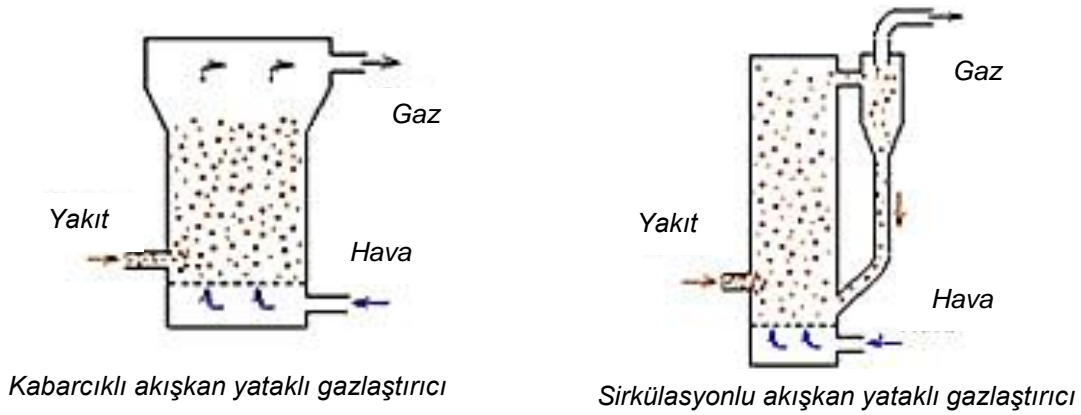
**Şekil 1. 12.** 1943 yılı, gazlaştırmacı ile çalışan araçların seri üretimi (NAS-NAE 1983)



**Şekil 1. 13.** Imbert gazlaştırmacı ile çalışan 1930 model bir araç (NAS-NAE 1983)



Gazlaştırıcılar sabit yataklı, akışkan yataklı ve sürüklemeli yataklı gazlaştırıcılar olarak üç ana gruba ayrılırlar. Son senelerde dördüncü tip reaktör şekli olan plazma gazlaştırıcıların da önemi ortaya çıkmıştır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda ise hava akış yönüne göre aşağı akışlı, yukarı akışlı ve yatay akışlı gazlaştırıcılar olarak sınıflandırma yapılabilir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar kendi içinde kabarcıklı akışkan yataklı ve dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırıcılar olarak ayrılırlar ve bu sistemler büyük ölçekli enerji dönüşümleri için tercih edilmektedir (Şekil 1.14.) Sürüklemeli yataklı gazlaştırıcılar ise genellikle kömür gazlaştırma işleminde tercih edilmektedirler.

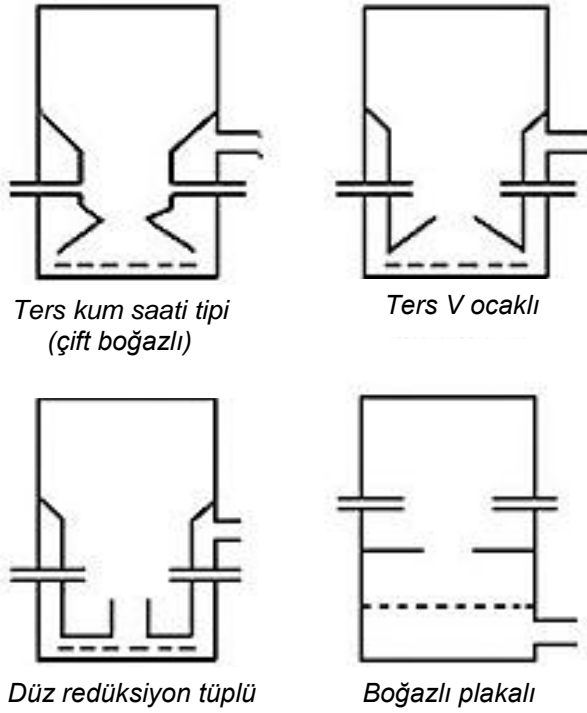


**Şekil 1. 14.** Akışkan yataklı gazlaştırıcı tipleri

Yukarı akışlı gazlaştırıcılar, yüksek kül oranı (%15'e kadar) ve nem içeriği (%50'ye kadar) olan yakıtlar için uygun olup elde edilen sentez gazı yüksek miktarda katran içermektedir (50-100 g/Nm<sup>3</sup>). Ayrıca elde edilen sentez gazının ısıl değeri de düşüktür ve alt ısıl değerin artırılması için oksitleyici ortam olarak sıcak hava (830°C) kullanılması gerekmektedir. (Chopra ve Jain 2007).

Aşağı akışlı gazlaştırıcılar boğazlı ve boğazsız (sabit kesitli) tip olarak farklılık göstermektedir. Bu tip gazlaştırıcılarda en öne çıkan özellik küçük ölçeklerde ekonomik ve verimli olması ve elde edilen gazdaki düşük katran miktarıdır. Ancak odunsu olmayan yakıtlar için ızgara ve besleme ünitelerinde ürüne göre değişiklikler gerekebilmektedir.

Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda boğaz şekline göre değişik tip tasarımlar mevcuttur: kum saati tipi (çift boğazlı) , ters V ocaklı, düz reaksiyon tüplü, boğazlı plakalı (Şekil 1.15.).

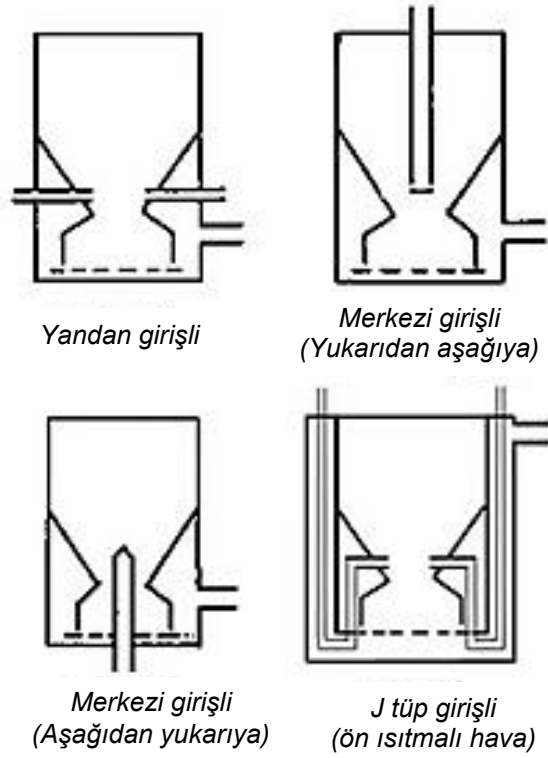


**Şekil 1. 15.** Boğaz tipine göre üstü kapalı gazlaştırıcılar (Anonim 2016)

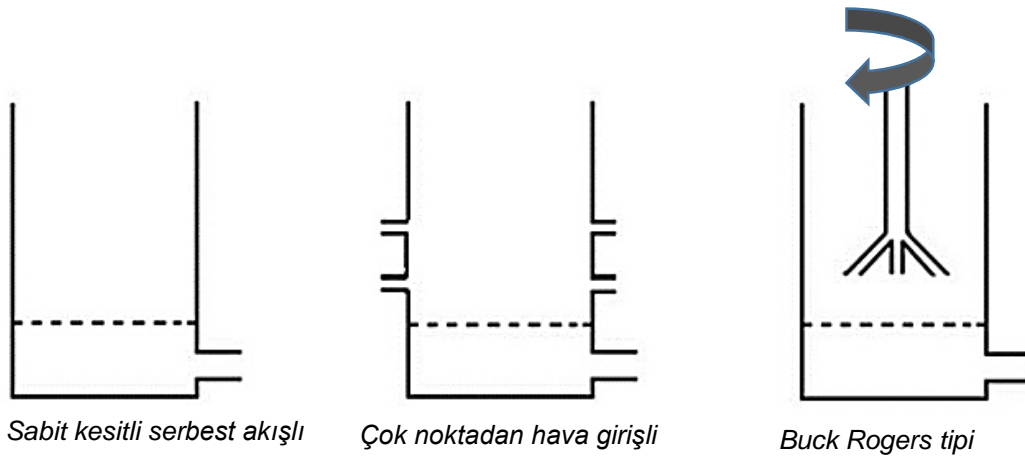
Sabit yataklı aşağı akışlı gazlaştırıcılarda hava giriş şekilleri için de yandan girişli, merkezi girişli (yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı), J şeklinde borularla ön ısıtma yapılmış hava girişli gibi değişik tasarımlara rastlamak mümkündür (Şekil 1.16).

Boğazlı ve üstü kapalı tip gazlaştırıcılarda, bazı yakıtlarda görülen bloklanma, köprüleme problemlerini çözmek için boğazsız tip gazlaştırıcılar geliştirildiler. Bu tip gazlaştırıcılar, çeltik kavuzu, odun cipsi, şeker kamışı küspesi ve yaprağı, hindistan cevizi kabuğu gibi yakıtlar için başarılı sonuçlar vermişlerdir. Gazlaştırıcının izolasyonunun iyileştirilmesi, ürün gazının resirkülasyonu, hava dağılımının optimize edilmesi, sentez gazındaki katran miktarının azalması gibi iyileştirilmeler yapılan çalışmalar arasındadır. (Chopra ve Jain 2007).

Boğazsız tip gazlaştırıcılarda üstü açık ve sabit kesitli bir reaktör kullanılmakta ve hava girişi üstten serbest bırakılmaktadır (Şekil 1.17). “*Stratified*” olarak da adlandırılan boğazsız (sabit kesitli) ve üstten hava girişli gazlaştırıcıların, boğazlı tipte karşılaşılan birçok problemin üstesinden gelmesinde önemli bir basamak teşkil ettiği söylenebilir.



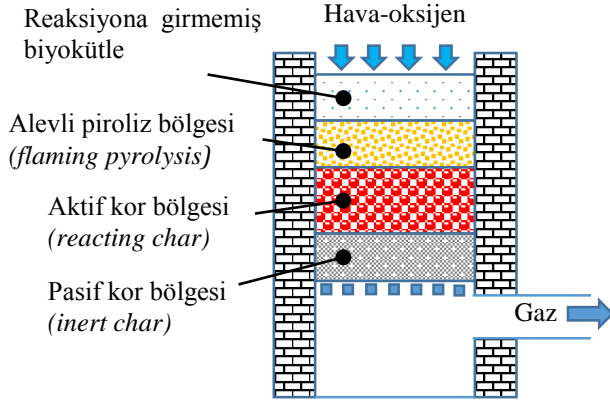
**şekil 1. 16.** Hava giriş şekillerine göre üstü kapalı gazlaştırıcılar (Anonim 2016)



**şekil 1. 17.** Hava giriş şekillerine göre üstü açık gazlaştırıcılar

Bu tip gazlaştırıcılarda hava ve biyokütle üniform bir şekilde dört ana bölgeden geçer. En üstteki bölge havanın ilk giriş yaptığı “reaksiyona girmemiş biyokütle” bölgesidir. İkinci bölge, havanın biyokütle ile reaksiyonda olduğu “alevli piroliz” bölgesidir. nc bölge, alevli piroliz sonucu oluşan ve piroliz gazlarını indirgeyen aktif kor bölgesidir. Bunu takiben, üçüncü bölgeye oranla çok daha soğuk olan, “inert char” olarak da adlandırılan soğuk veya

sakin kor bölgesi dördüncü bölge olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 1.18.) (Reed ve Das 1988).



**Şekil 1. 18.** Üstü açık “Stratified” gazlaştırıcılarda bölgeler

Boğazsız tip aşağı akışlı gazlaştırıcılar %20'ye varan yüksek kül içeriğine sahip küçük boyutlu biyoküteller için olumlu sonuçlar vermektedirler. Çeltik sapının kül oranı %20 civarındadır ve kül de %75 civarı Silika ( $\text{SiO}_2$ ) içermektedir. Gazlaştırma esnasında  $\text{SiO}_2$  yüksek sıcaklıklarda camlaşarak malzeme akışını bloke eden köprüler meydana getirebilmekte ve ızgaradan gaz geçişini kısıtlayabilmektedir. Malzeme ve gaz akış sürekliliği için öngörülen bu risk boğazlı tip gazlaştırıcılarda daha yüksektir. Bu yüzden boğazsız gazlaştırıcı tipi çeltik gazlaştırma için daha uygun bir seçim olarak karşımıza çıkmaktadır (Reed ve Das 1988, Jain 2006). Ayrıca konstrüksiyonlarının basitliği, olası bloklanmaları önlemek için ilave donanımlar eklemek, geliştirmek ve sistemi daha büyük ölçeklere taşımak için de imkân sunmaktadır. Bu açıdan Trakya Bölgesi tarımsal çeltik sapı atıklarının gazlaştırılmak suretiyle değerlendirilmesi için bu tip bir gazlaştırıcı reaktör tasarlanması, geliştirilmesi ve ileriye dönük ölçeklendirme ve fizibilite çalışmaları yapılması önem kazanmaktadır.

Gazlaştırmayla elde edilen yanıcı gazlar içten yanmalı motorlarda, doğrudan ısıtma uygulamalarında kullanılabilir. Ancak bunun için gazın katran ve tozdan arındırılarak soğutulması gerekmektedir. Gazlaştırma sistemi içerisinde en önemli süreçler gaz temizleme ve soğutma işlemleridir. Sentez gazının reaktörden çıkış sıcaklığı  $300-500^\circ\text{C}$  dolaylarındadır ve birim hacimdeki enerji içeriğinin artırılması için soğutulması gerekmektedir (Rajvanshi 1986). Isıl değeri düşük materyallerin, özellikle çeltik sapı gibi biyokütellerin gaz çıkış sıcaklıkları daha düşük seviyelerde olabilmektedir.

#### 1.4. Çeltik Sapının Gazlaştırılması

Çeltik sapının enerji kaynağı olarak kullanılmasına ilişkin çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir. Bununla birlikte çeltik sapının enerji içeriği ve yoğunluğu az, bazı alkali bileşimleri fazladır. Bu durum sapın toplanması, taşınması ve depolanması işlemlerini güçleştirmektedir. Ancak, çeltik sapına bazı ön işlemler uygulanarak bu sakıncalar giderilebilir. Bu işlemler boyutlandırma, balyalama, briketleme ve peletleme olarak sıralanabilir. Bu işlemlerle sapın fiziko-kimyasal özellikleri değiştirilebilir ve enerji içeriği arttırılabilir. Cüruf oluşumunu da azaltır. Böylece saptan enerji sağlamak daha ekonomik hale getirilebilir. Ayrıca yıkama ile potasyum oranı %40, kül miktarı da %10 azaltılabilmektedir (Kargbo ve ark. 2009).

Katı yakıtların özellikleri iki yakıt analiz yöntemiyle tanımlanabilir. Bunlar kısa analiz ve elementer analizlerdir (Hacıoğlu 2007). Tarımsal çeltik atıkları olan çeltik kavuzu ve çeltik sapı için önceki çalışmalarda yapılan analizlere Çizelge 1.2.'de örnek verilmiştir (Jenkins ve ark. 1998).

Küçük ölçekli gazlaştırma sistemlerinde kullanılacak çeltik sapının enerji yoğunluğunu arttırmak için peletleme en uygun yöntem olarak görünmektedir. Çeltik sapı peletleri için parça yoğunluğunu  $1,35 \pm 0,02 \text{ g.cm}^{-3}$  ve yığın yoğunluğunu  $0,64 \text{ g.cm}^{-3}$  olarak vermiştir (Liu ve ark. 2013).

Çeltik ürünleri gazlaştırılması için boğazsız ve üstü açık gazlaştırıcı tasarımlarında faydalı olabilecek bazı optimum değerler önceki çalışmalarda; özgül gazlaşma hızı için  $200 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ , özgül gaz üretimi hızı  $420 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$  olarak bildirilmiştir. Sentez gazının reaktörden çıkış sıcaklığı  $200-350^\circ\text{C}$ , gaz yıkama ünitesine girişi  $80-150^\circ\text{C}$ , gaz yıkamadan çıkışı  $40-50^\circ\text{C}$  olarak verilmiştir (Jain 2006).

Gazlaştırma işleminde en önemli yan ürün küldür. Kül alma işlemi altı kapalı gazlaştırıcılarda mekanik bir helezon sistemi kullanılarak yapılabildiği gibi reaktörün açık olan alt kısmı bir su kilidiyle kapatılarak da yapılabilir. Sürekli sistemlerde kül tahliyesi bu suyun bir pompa ile sirküle edilerek temizlenmesi suretiyle de yapılabilmektedir.

Toplanan külün değerlendirilebileceği pek çok alan da mevcuttur.

**Çizelge 1.2.** Çeltik artıklarının analiz sonuçları (Jenkins ve ark. 1998)

Kısa analiz (%)		
	Çeltik kavuzu	Çeltik sapı
Sabit karbon	16,22	15,86
Uçucu madde	63,52	65,47
Kül	20,26	18,67
Elementer analiz (%)		
	Çeltik kavuzu	Çeltik sapı
Karbon	38,83	38,24
Hidrojen	4,75	5,20
Oksijen	35,47	36,26
Nitrojen	0,52	0,87
Sülfür	0,05	0,18
Klorin	0,12	0,58
Kül	20,26	18,67
Kül elementer kompozisyonu (%)		
	Çeltik kavuzu	Çeltik sapı
SiO <sub>2</sub>	91,42	74,67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,78	1,04
TiO <sub>2</sub>	0,02	0,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14	0,85
CaO	3,21	3,01
MgO	0,01	1,75
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,96
K <sub>2</sub> O	3,71	12,30
SO <sub>3</sub>	0,72	1,24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,43	1,41
Isıl değer (MJ/kg)	15,84	15,09

Betonun, yıllarca dış etkilere ve betonun bileşenlerinden ileri gelen faktörlerden olumsuz olarak etkilenmeden, dayanımını ve niteliklerini kaybetmemesine "durabilite" özelliği denilir. Başlangıçtaki özelliklerini ve tasarlandığı fonksiyonunu çevre ve hizmet koşulları altında koruyarak devam ettirebilmesi betonun dayanıklılığı olarak tanımlanabilir. Pirinç kabuğu külünün yüksek dolgu etkisi ile betonun geçirimsizliğinin azalmasına, beton bünyesindeki çeliğin korozyonunu engelleyerek ve donma çözünmeye karşı iyi bir direnç sağlayarak beton durabilitesinde olumlu bir etki gösterdiği ve betonun yüksek dayanıma ulaşmasına yardımcı olduğu ortaya çıkarılmıştır (İşbilir 2010).

Kompozit plastiklerin üretiminde de katkı malzemesi olarak kullanılması üzerine çalışmalar vardır. Eko yapılarda enerji verimliliğini arttırmak üzere kullanılacak bu tarz kompozit panellerin ısı yalıtımına katkısı olduğu bildirilmektedir (Buzarovska 2008).

Çeltik sapı yaklaşık %20 civarı kül içeriğine sahiptir ve bu külün de yaklaşık %75'i SiO<sub>2</sub> dur (Jenkins ve ark. 1998). Kül ergime sıcaklığı 1400°C üzerinde olmasına rağmen, yapısındaki K<sub>2</sub>O gibi alkaliler SiO<sub>2</sub> bağlarını kırarak daha düşük sıcaklıklarda (700-800°C) ergiyen ötektik yapılar oluşturmaktadır (Wang ve ark. 2007). Bu ötektik yapılar ergidiklerinde çeltik sapının içeriğindeki karbon dönüşümünü kısıtlamakta, aglomerasyona neden olmaktadır (Rozainee ve ark. 2008). Bunun önlenmesi ya da etkilerinin azaltılması için biyokütlenin gazlaştırma öncesinde yıkama gibi bazı ön işlemlerden geçirilerek yapısındaki alkalilerin yoğunluğunun azaltılması etkili olmakla beraber (Krishnarao ve ark. 2001, 2009) ekonomik açıdan birinci tercih olarak değerlendirilmemektedir.

Yukarıda kısaca açıklanan aglomerasyon probleminin çözümü için çalışma sıcaklıklarının düşük tutulması, diğer bir seçenek olarak düşünülmektedir (Rozainee ve ark. 2008). Bu açıdan bakıldığında, akışkan yataklı sistemlerde gazlaşma verimi daha yüksek olduğundan düşük sıcaklıklarda çalışma imkânı olmaktadır; ancak bu sistemlerde de benzeri oluşumlar gözlenmekte ve bu konuda çalışmalar yapılmaktadır (Volakova ve ark. 2012, Baratieri ve ark. 2010). Akışkan yataklı gazlaştırıcılar, sabit yataklılara göre daha büyük ölçekli sistemler olup küçük ölçeklerde ekonomik olmamaktadır. Bu yüzden, çeltik saplarının gazlaştırılmasına yönelik küçük ölçekli sabit yataklı sistemler de mutlaka geliştirilmeli ve yaygınlaştırılmalıdır.

Sabit yataklı gazlaştırıcılarda düşük sıcaklıklarda çalışabilmek için de gazlaştırıcıda, verimliliği artıracak modifikasyonlar gerekmektedir. Bunun için uygun mekanik karıştırıcıların tasarlanması, reaktörün yalıtılması, sentez gazı sıcaklığının giriş havasını ısıtmak için kullanılmasına yönelik tasarımların yapılması, gibi geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Karıştırma işlemi, sistematik olarak kontrol edilen gelişigüzel bir işlemdir ve homojen dağılımı hedef alır. Karıştırma işleminde hedef, karıştırılan malzeme içerisinde izafi hareketlenmeleri etkili bir şekilde meydana getirmek ve kontrol altına alınmasını sağlamaktır. Mekanik karıştırıcılarla yakıtın ve havanın reaktör içerisine düzgün dağılımının sağlanarak gazlaşma verimliliğinin artırılması, reaktör içerisinde malzeme ve hava akışını kısıtlayan oluşumların engellenmesi amaçlanmaktadır.

Karıştırma, yükseklik boyunca yanmayı önler, yapışan yakıt ve cüruf kütlelerini parçalar. Cidar-yakıt ve yakıt taneleri arasında meydana gelen sürtünme ile yakıtın üzerine yapışan kül tabakasını döker ve gazlaşmayı kolaylaştırır (Recepoğlu 1972).

Akışkan yataklı sistemlerde denenen bir diğer destekleyici çalışma da dolomit, olivin, zeolit, KOH, KHCO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CaO veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile SiO<sub>2</sub> gibi katalizörler kullanarak ötektiklerin ergime sıcaklıklarını yükseltmek ve gaz kalitesini iyileştirmektir (Volakova ve ark. 2012, Baratieri ve ark. 2010).

### 1.5. Çalışmanın amacı

Bu çalışmada;

- Trakya Bölgesinde yaygın olarak üretimi yapılan çeltiğin hasat sonrası tarlada kalan saplarının enerji kapasitesinin, gazlaştırılarak değerlendirilmesi için uygun bir gazlaştırıcı tasarlanması,
- Tasarlanan gazlaştırıcının uygun çalışma şartlarının tespit edilmesi (hava akış şekli, hava fazlalık katsayısı, sıcaklıklar)
- Farklı bileşimlerde hazırlanmış çeltik sapı peletlerinin gazlaşma özelliklerinin belirlenmesi,
- Elde edilen sentez gazlarının içeriğinin, kalorifik değerlerinin ve gazlaşma verimliliklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çeltiğin gazlaştırılmasında karşılaşılan camlaşma, bloklanma ve aglomerasyon gibi problemlerin çözümüne yönelik olarak bu çalışmada mekanik çözümler ele alınmıştır. Cidarlardaki yapışma ve bunun neden olacağı biyokütle akış problemlerine yönelik olarak reaktör, refrakterli olarak tasarlanmıştır.

Reaktör içerisinde biyokütle hareketliliğine müdahale edebilmek ve bunun oluşabilecek camlaşma ve bloklanma olaylarına etkisini belirlemek üzere reaktör üstten tahrikli, mekanik karıştırıcılı olarak tasarlanmıştır. Mekanik karıştırıcının konumu ayarlanabilmekte ve gerektiğinde çıkarılabilmektedir.

Tasarlanan reaktör, sabit kesitli serbest akışlı ve çok notadan hava girişli sistemlerin özelliklerini bir araya toplaması, üstten tahrikli mekanik karıştırıcılı olması ve refrakterli olması açısından orjinallik taşımaktadır. Ayrıca sistemin modüler tasarımı, çeltik dışındaki farklı biyokütlelerin gazlaştırılabilmesi için de gerekli konstrüktif değişikliklerin yapılmasına izin verecek esnekliktedir.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Japonya’da çeltik sapı ve kavuzundan gazlaştırma yoluyla elektrik enerjisi elde edilmesi durumunda, bir yılda 3,8 milyar kWh elektrik enerjisi elde edilebileceği ve bunun ülkenin elektrik enerjisi gereksiniminin % 0,47’lik kısmını karşılayacağı belirtilmiştir. Ancak, bu yolla elde edilen elektrik enerjisinin maliyetinin 0,21 \$/kWh olduğu, bu maliyetin mevcut elektrik enerjisi maliyetinin iki katına yakın bir değere karşılık geldiği, bu nedenle yeni üretim teknolojileriyle maliyeti düşürmek için teşviklerin gerekli olduğu bildirilmektedir. Araştırmacılar, Japon teknolojisinin tarımsal atıkları efektif kullanabilecek düzeye ulaşması durumunda, CO<sub>2</sub> emisyonunun da azalarak Kyoto Protokolünün belirttiği sınırlar altına düşebileceğini ifade etmişlerdir (Matsumura ve ark. 2005).

Delivand ve ark. (2011) yaptıkları araştırmada, Tayland’da çeltik saplarından gazlaştırma yoluyla elektrik enerjisi elde edilmesi durumunda birincil enerji kaynaklarından %7-9 oranında tasarruf sağlanacağını, bununla birlikte CO<sub>2</sub> emisyonunun %27 oranında düşeceğini belirtmişlerdir.

Tu ve ark. (2009), çeltik sapının pirolizinde kullanılan düşük enerji ve yüksek katran ortaya çıkaran geleneksel yöntem yerine, radyo frekans piroliz teknolojisini geliştirmişlerdir. 740, 813, 843 ve 880 K ortam sıcaklıklarında sırasıyla 357, 852, 574 ve 664 W yükleme gücü uyguladıkları denemelerde, elde edilen gazların ısı değerleri 4558, 4284, 4469 ve 4438 kcal.kg<sup>-1</sup> olmuştur. Bu yöntemle elde edilen ısı değerlerinin ortalamasının geleneksel yöntemlere göre %4 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar ortam sıcaklığının artışı ile birlikte yanıcı gazın dönüşme oranının arttığını bildirmişlerdir.

Biyokütlenin gazlaştırılması, kısmi yanma sonucunda CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> gibi yanıcı içeriğe sahip sentez gazı adı verilen gaz elde etme işlemidir. Bu işlemin yapıldığı reaktöre gazlaştırıcı denmektedir. Sabit yataklı gazlaştırıcılar yukarı, aşağı, yatay ve sürüklemeli akışlı olarak sınıflandırılmaktadır. Gazlaştırma işleminde biyokütle 4 aşamadan geçer: kuruma, piroliz, yanma ve redüksiyon. Peletlenmiş çeltik kavuzundan, %16,1 CO, %9,6 H<sub>2</sub>, %0,95 CH<sub>4</sub> içeren ve ısı değeri 3,25 MJm<sup>-3</sup> olan sentez gazı elde edilebilir. Gazın, reaktörden çıkış sıcaklığının da ortalama 300-400°C olmaktadır (Rasvanshi 1986).

Chopra ve Jain (2007), yukarı akışlı sistemlerin yüksek kül ve nem içeriğine sahip yakıtlar için uygun olduğunu ancak elde edilen sentez gazının yüksek katran içeriği olduğunu, eğer sıcaklık arttırılırsa katranın azalacağını ancak bu kez de gazın kalorifik değerinde de

azalma olacağını ifade etmektedirler. Aşağı akışlı sistemlerde daha temiz gaz üretilmekte ancak boğazlı tiplerde malzeme akışında bazı biyokütleler sorun yaratmakta ve bunun çözümü için gazlaştırıcı yapısında modifikasyonlara gidilmesi gerekebilmektedir. Sabit kesitli (boğazsız) gazlaştırıcılarda ise çeltik kavuzu, odun cipsi, hindistan cevizi kabuğu, şeker pancarı yaprağı gibi biyokütleler başarıyla gazlaştırılabilir. Bu tip gazlaştırıcılarda gazlaştırıcının izolasyonu, ürün gazının yakılmasıyla elde edilen egzoz gazı ısısının kullanılması, hava dağılımının iyileştirilmesi performansın artmasına ve katran oranının azalmasına yardımcı olmaktadır. Üstü açık boğazsız tip gazlaştırıcıların, yüksek kül içeriğine sahip küçük boydaki biyokütleler için uygun olduğunu bildirilmiştir.

Pathak (1985) ve Bhatnagar (1990) yaptığı çalışmalarda, çeltik kavuzunun boğazlı tip gazlaştırıcılarda malzeme akışı problemlerinden dolayı yakıt olarak uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Jain ve Goss (2000), yaptıkları çalışmada 4 farklı çapta boğazsız çeltik kavuzu gazlaştırıcı ile çalışarak elde ettikleri performans karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Çeltik kavuzu için optimum özgül gazlaştırma oranı olarak  $192,5 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$  ve 0,4 hava fazlalık katsayısı önermişlerdir.

Jain (2006), 152, 203, 244, 303 ve 343 mm çaplı 5 farklı boyuttaki reaktörde yaptığı çeltik kavuzu gazlaştırma denemelerinde her bir gazlaştırıcının optimum parametrelerini karşılaştırarak, bu tip gazlaştırıcı tasarımlarında hava fazlalık katsayısının 0,4, özgül gazlaşma hızının  $200 \text{ kg.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ , özgül gaz üretim hızının da  $420 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$  civarında alınabileceğini, en iyi işletme şartları sağlandığında da verimin %65 civarında olacağını öngörülebileceğini belirtmiştir. Ayrıca 1 kg çeltik kavuzu için, element içeriklerine göre yaptığı hesaplarda stokiometrik hava miktarının  $3,3468 \text{ m}^3$  olarak alındığını ifade etmiştir. Sentez gazının reaktörden çıkış sıcaklığının 200–350 °C, ıslak *scrubber* ünitesine giriş sıcaklığının 80-150 °C, gaz yıkayıcı (*scrubber*) çıkışının 40-50 °C olduğunu tespit etmişlerdir.

Yong ve Chaoguang (2003) yaptıkları çalışmada, ısıtma amaçlı dikdörtgen kesitli bir sap gazlaştırma sistemi geliştirmişler, sürekli besleme ve sürekli kül alma üniteleri ve reaktörde negatif basınç kullanmışlardır. Gaz temizleme bir siklon kullanılarak yapılmış, ısıtma amaçlı kullanım için gaz soğutma işlemi yapılmamıştır. Bu sistemde %75,5 ısı verim alındığı belirtilmiştir.

Khater ve ark. (1992) yaptıkları araştırmada, 30 cm çaplı, 140 cm boyundaki gazlaştırıcılarında çeltik kavuzu gazlaştırarak, sentez gazı içerisindeki yanicıların

maksimizasyonuna çalışmışlardır, %13,67 CO, %5,13 H<sub>2</sub>, %2,42 CH<sub>4</sub> bileşiminde gaz üretmişlerdir.

Tiangco, Jenkins ve Goss (1996), sabit yataklı çeltik kavuzu gazlaştırıcılarda 1-30 cm arası reaktörler için özgül gazlaşma hızının optimizasyonu için çalışmışlar, gazlaşma hızının artmasıyla elde edilen gazın enerji değerinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Kargbo ve ark. (2009), enerji kaynağı olarak çeltik sapının kullanılması süreçlerinde yapılabilecek ön iyileştirilmeleri ele almışlar, yıkama ile potasyum oranın %40, kül miktarının da %10 azaltılabildiğini ve kül çeltik sapı 5-2 mm arası kesilmiş olduğunda yanma davranışının iyileştiğini belirtmişlerdir.

Kirubakaran ve ark. (2009), çalışmalarında, çeltik sapı için uçucu madde %80,2, kül %19,8 ve sabit karbon oranı %19,8 olarak vermişlerdir. Çeltik kavuzu için de aynı değişkenler sırasıyla %81,6, %23,5 ve %18,4 olarak belirtilmiştir.

Calvo ve ark. (2004), yaptıkları çalışmada çeltik sapı ısıtma ve yakma sürecini ele almışlar, açık alanda yakmanın sakıncalarına dikkat çekmişler, çeltik sapının elementel analizi sonucu %37,87 C, %4,61 H, %0,63 N, %0,14 S, %1,01 Cl ve %34,87 O değerlerini vermişlerdir. Nem oranı %7,43, kül %67,95, sabit karbon 12,98 ve üst ısıl değer 14,71 MJ/kg olarak belirtmişlerdir.

Zhu ve Venderbosch (2003), yaptıkları çalışmada hava fazlalık katsayısının gazlaştırmada 0,2 - 0,5 arasında, yanmada ise birden büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

Jenkins ve ark.(1998), çeltik atıklarının kapsamlı olarak kimyasal analizlerini yapmışlardır. Çeltik kavuzu için 15,84 MJ.kg<sup>-1</sup> ve çeltik sapı için de 15,09 MJ.kg<sup>-1</sup> değerlerini bildirmişlerdir.

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

Yalçın ve Sevinç (2000), Trakya Bölgesi çeltik kavuzuna yıkama, kurutma ve asit banyosu uygulayarak 600°C sıcaklıkta farklı ortamlarda (sakin hava, hareketli hava, argon ve oksijen, hareketli oksijen) yakmışlar, silika içeriğinin sıcaklıkla arttığını, en yüksek silika içeriğinin de hareketli oksijen ortamında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Krishnarao ve ark. (2001), silika külünde siyah sabit karbon partiküllerinin oluşumunu üç parametre (asit uygulaması, sıcaklık ve ısıtma hızı) açısından incelemişler, amorf silikanın 700°C üzerindeki sıcaklıklarda, sabit karbonun dönüşmesine izin vermeyerek kristalleştiğini gözlemlemişlerdir. Ham çeltik kavuzu ve distile suyla hazırlanmış HCl çözeltisinde 1 saat kaynatılarak fırında kurutulmuş numuneler üzerinde çalışma yapmışlardır. Amorf yapının bozulmasına sebep veren ana etken maddenin potasyum olduğunu, potasyumun bir yüzey eriyiği oluşturarak karbon dönüşümünü engellediği ve amorf silikanın kristobalite dönüşmesine sebep verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yavaş ısıtma yapıldığında K<sub>2</sub>O ergimesinden önce karbon dönüşümünün tamamlandığını gözlemlemişlerdir.

Tomishige ve ark. (2003), konvansiyonel yöntemlerden daha fazla enerji verimliliği olan katalizörler geliştirmişlerdir. Akışkan yataklı gazlaştırıcıda Rh/CeO<sub>2</sub> kullanarak selülozdan yüksek sentez gazı dönüşüm oranları elde etmişlerdir. CeO<sub>2</sub> nin işlem sırasında sinterlenmesi üzerine katalizörü geliştirerek Rh/CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> kullanmışlar, daha kararlı bir katalizör elde ettiklerini bildirmişlerdir. Geliştirilen katalizörün kullanılmasıyla ağaç tozunun 873 K'de karbon dönüşümünü tamamlayarak başarılı bir şekilde gazlaşmasını sağladığını ifade etmişlerdir.

Volakova ve ark. (2012), Çek Cumhuriyetinde Zluticka Isıtma Tesisinde akışkan yataklı yakıcı reaktör içerisinde çeperele yapışarak camlaşan eriyiklerin kolayca temizlenmesini sağlayan özel bir ayırma tabakası geliştirmişlerdir. Bu tabaka sayesinde camsı yapıların reaktör cidarlarına nüfuz ederek zarar vermesinin önüne geçilmiş, bakım maliyetleri ve zamanı azaltılmıştır. Ayrıca CaO veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile SiO<sub>2</sub> katkıları kullanılarak laboratuvar ortamında yakma testleri yapmışlar, camsı yapıların oluşumunu belirgin bir şekilde baskılamayı başardıklarını belirtmişlerdir.

Javed ve ark. (2008), Potasyum permanganat uygulanmış çeltik kavuzunun pirolizinde termal bozunmanın daha hızlı olduğunu ifade etmiştir.

Baratieri ve ark. (2010), küçük ölçekli atmosferik akışkan yataklı bir gazlaştırıcıda katalizör olarak dolomit çeşitleri denemişler, katran oluşumunun azaldığını ve gaz dönüşüm oranının arttığını tespit etmişlerdir.

Wang ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada, biyokütle gazlaştırma teknolojilerinin sinterleşme, aglomerasyon ve korozyon gibi problemlerine değinmişler, 900°C altındaki sıcaklıklarda bile silika ile reaksiyona girerek Si-O-Si bağlarını kıran potasyum gibi alkalilerin ana etkenlerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Potasyumun, oluşturduğu alkali silikat ve alkali sülfatların 700°C altında eriyerek reaktör duvarlarında ve yatakta yapışkan kalıntılar bıraktığını ifade etmişlerdir. Bu konuda yapılacak çalışmaları da; ön iyileştirmeler, gazlaştırıcı modifikasyonları, operasyon parametrelerinin ayarlanması, yatak katkılarının/katalizörlerinin kullanımı olarak sınıflandırmışlardır.

Recepoğlu (1972), mekanik karıştırıcılarla yakıtın ve havanın reaktör içerisine düzgün dağılımının sağlanarak gazlaşma verimliliğinin artırılmasına katkı sağlandığını belirtmiştir. Reaktör içerisinde malzeme ve hava akışını kısıtlayan oluşumların engellenmesi de yine mekanik karıştırıcılar yardımıyla sağlanmaktadır. Karıştırma, yükseklik boyunca yanmayı önler, yapışan yakıt ve cüruf kütlelerini parçalar. Cidar-yakıt ve yakıt taneleri arasında meydana gelen sürtünme ile yakıtın üzerine yapışan kül tabakasını döker ve gazlaşmayı kolaylaştırır.

Sheth ve Babu (2009), mobilya imalatında elde edilen ağaç atıklarını gazlaştırarak sentez gazı elde etmişler bunun için Hint gülü ağacı kullanmışlardır. Çalışmalarında yakıt tüketim hızının biyokütle nem içeriği arttıkça azaldığını, bununla birlikte hava debisi arttırıldıkça da artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca sentez gazı içerisindeki N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> oranlarının hava fazlalık katsayısı arttıkça azaldığını, bunun 0,205 hava fazlalık değerine kadar gözlemlediklerini ancak daha yüksek hava fazlalıklarında çalıştıkça N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının tekrar artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. 0,205 hava fazlalığında piroliz ve oksidasyon bölgeleri maksimum sıcaklığa ulaşmakta, bununla birlikte 0,205 ile 0,35 aralığında kalorifik değer artış göstermektedir. Çalışmalarında kullandıkları gazlaştırıcı ve biyokütle için optimum hava fazlalığı 0,205 olarak tespit edilmiştir.

Erlich ve Fransson (2011), aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcıda ağaç, palmye yağı artıkları ve şeker pancarı küspesi peletlerini gazlaştırarak karşılaştırmışlardır. Aynı gazlaştırıcının her ürün için uygun farklı parametreler kullanılmak suretiyle çok yakıtlı biyokütle gazlaştırıcı olarak kullanılabilceği sonucunu çıkarmışlardır.

Pedroso ve ark. (2013), sentez gazı içerisindeki katran oranını azaltmak üzere, yukarı akışlı sabit yataklı bir gazlaştırıcıyı modifiye etmişler, ızgara üzerinden alttan sürekli beslemeli biyokütle girişi uygulamışlardır. %77 verimliliğe ulaştıkları bu sistemde gazın ısı değerinde

bir miktar azalma ile birlikte, reaktör içerisindeki proses kararlı hale geldikten sonra katran miktarında bir miktar azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Striugas ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada aşağı akışlı sabit yataklı boğazlı tip gazlaştırıcılarında peletlenmiş ve peletlenmemiş halde farklı biyokütleleri gazlaştırmışlar ve tam otomasyonlu düzeneklerinde performans mukayesesi yapmışlardır. Ağaç yongası, ağaç peleti, Ağaç yongası için maksimum 1100°C ve peletlenmiş numuneleri için de 800-850°C sıcaklıklara eriştiklerini bildirmişlerdir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Gazlaştırma işleminde kullanılan çeltik sapları

Projede deneme materyali olarak kullanılan çeltik sapları İpsala Kaymakamlığının desteği ile İpsala yöresinden temin edilmiştir. Peletlenmek üzere parçalanacak olan saplar balyalanmış olarak üniversitemize getirilmiştir. Denemelerde kullanılan çeltik balyaları Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Denemelerde kullanılan çeltik sapı balyaları

### 3.1.2. Gazlaştırıcı

Çeltik sapı peletlerini gazlaştırmak için sabit yataklı, aşağı akışlı, boğazsız tipte bir reaktör tasarlanmıştır. Reaktör çapı 350 mm olup, iç cidarlar 50 mm refrakter kaplamalı olarak imal edilmiştir. Ayrıca çeltik sapının gazlaştırılması üzerindeki etkilerini gözlemek üzere tasarım üstten mekanik karıştırıcı olarak yapılmıştır. Gazlaştırıcı sistemin genel görünümü Şekil 3.2.'de verilmiştir.

Deney düzeneği reaktör, siklon, gaz soğutma ünitesi, vakum pompası, yakma ünitesi (*flare*), ölçme-kontrol ve veri toplama birimlerinden oluşmaktadır. Sistemde elde edilen gaz 1,5 kW gücünde elektrik motoruyla tahrik edilen  $50 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  debi kapasiteli vakum pompası kullanılarak negatif basınç altında emilerek, çıkış hattına yönlendirilmektedir. Üretilen gaz siklondan geçerek, gaz soğutma ünitesinde soğutulmakta buradan yakma birimine gönderilmektedir. Deney düzeneğine ait akış şeması Şekil 3.3.'de görülmektedir.

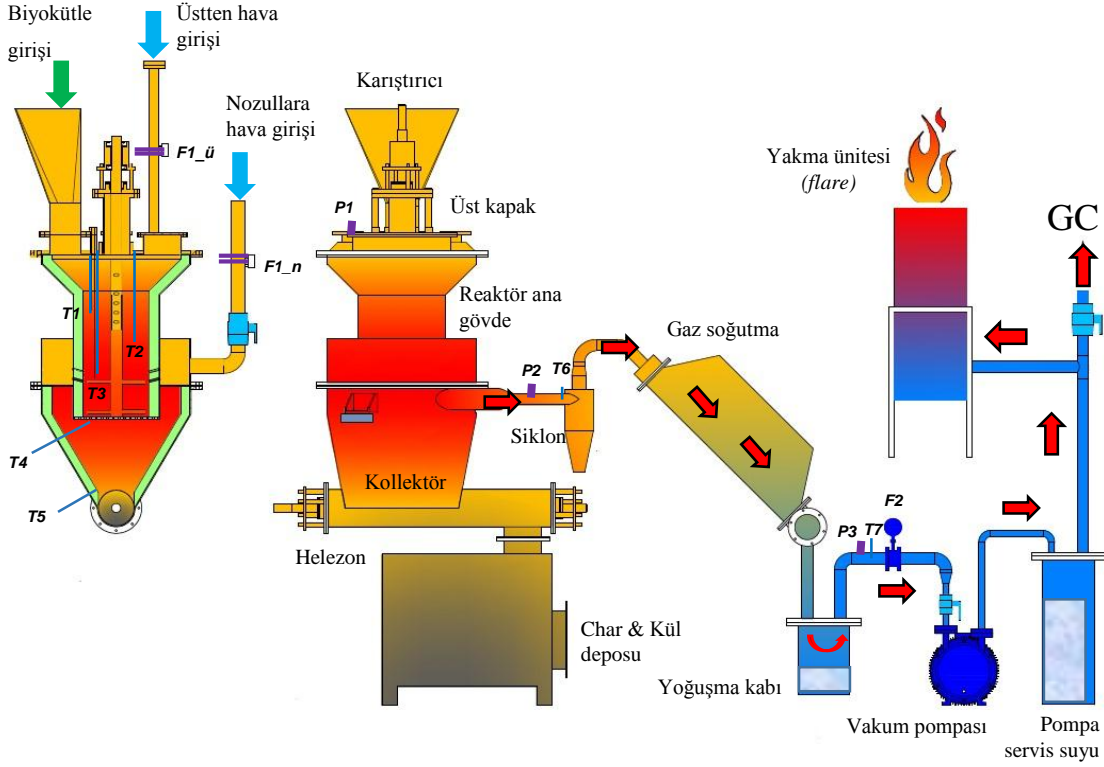


Şekil 3. 2. Gazlaştırıcı sistemin genel görünümü



### 3.1.3. Ölçüm ve kontrol donanımı

Gazlaştırıcı ünitenin ölçüm ve kontrol noktaları Şekil 3.3.'te gösterilmiş, ölçüm ve kontrol donanımının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 3. Gazlaştırıcı sistemin akış şeması ve sıcaklık, basınç, debi ölçüm-kontrol noktaları

**Sıcaklığın izlenmesi:** Sistem üzerinde 7 farklı noktadan alınacak sıcaklık verisinin otomasyon paneline ve dolayısıyla veri toplama sistemine aktaran 7 adet K tipi sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Sensörler 1200°C dayanım sıcaklığına sahip ve hava sızdırmaz bağlantılıdır.

**Basıncın izlenmesi:** Sistem üzerinde 3 farklı noktadan alınacak basınç verisinin otomasyon paneline ve dolayısıyla veri toplama sistemine aktaran 3 adet basınç transmitteri vardır. Basınç transmitterleri vakum ortamında konumlanacağı için +1 ve -1 bar aralığında veri toplayabilmektedir.

**Ağırlık değişiminin izlenmesi:** Gazlaştırıcı ünitesinin ayaklarına yerleştirilen 3 adet yük hücresi ile ünitenin tartımı anlık olarak yaptırılarak, toplanan veriler otomasyon paneline

aktarılabılır özelliktedir. Yük hücreleri 0-500 kg ağırlık aralığında çalışabilmektedir ve lama tipidir.

**Akış debisi ölçümleri:** Gazlaştırıcı üzerinde fark basınç ile çalışan hava emişi ölçen ve alınan veriyi otomasyon paneline taşıyan ölçüm sistemi bulunmaktadır. Sentez gazı hattı üzerinde vakum pompasından önce gaz debisini ölçen bir adet orifis tipi debimetre bulunmaktadır. Orifis debimetre DN50 ölçüde, 200°C sıcaklıkta çalışabilir ve hem kendi üzerinde indikatörlü hem de otomasyon paneline veriyi 4-20 mA çıkış ile taşıyabilir özelliktedir.

**Motor kontrolleri:** Sistem üzerinde 3 adet 0,55 kW gücünde ve 1 adet de 1,5 kW gücünde motor bulunmaktadır. Vakum pompası için 1,5 kW, karıştırıcı, helezon ve soğutucu fanı için de 0,55 kW gücünde motorlar kullanılmıştır. Otomasyon paneli üzerinde bu motorların şalterleri bulunmaktadır. 0,55 kW gücündeki motorların bir tanesini ve 1,5 kW gücündeki motorun frekans kontrolünü yapabilen 2 adet invertör vardır. Vakum pompası ve karıştırıcı invertörle kontrol edilmektedir. Panoya yerleştirilen invertörler, PLC paneli üzerinden ayarlanabilir biçimdedir.

**Otomasyon panosu:** Yukarıda belirtilen elemanların şalterlerinin, alıcılarının ve PLC ekranının bulunduğu pano, 1100x600x400 mm boyutlarında ve piyano tipindedir. PLC ekranı minimum 7" ölçüsünde, USB veya ağ üzerinden bilgisayar ile bağlantı kurabilir, ölçülen verileri USB belleğe veya bilgisayara depolayabilir özelliktedir. Ekran, piyano panonun ekran yerleştirme yüzeyine monte edilmiştir. Şekil 3.4.'de kontrol ve otomasyon panosu görülmektedir.



Şekil 3. 4. Otomasyon ve kontrol panosu

### 3.1.4. Gaz kromatografi (GC) cihazı

Gazlaştırma işleminde üretilecek olan sentez gazı bileşiminde CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gibi bileşenler bulunmaktadır. Sentez gazının bileşimini tespit etmek amacıyla AGILANT 7890B GC model gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.5.).



Şekil 3. 5. Gaz analizleri için kullanılan gaz kromatografi cihazı (Agilant 7890B GC)

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Gazlaştırıcının tasarımı ve imalatı

Gazlaştırıcı reaktörü sabit yataklı, aşağı akışlı, boğazsız tipte tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım aşamasında çizimler için üç boyutlu katı modelleme yazılımı olarak Solidworks 2012 yazılımı kullanılmıştır.

Reaktör ayrılabilir 3 ana ünitelerden oluşmaktadır.

**Reaktör ana gövdesi:** Reaktör iç çapı, gazlaştırıcı reaktörlerin ısı güç kapasiteleri için en belirleyici tasarım parametrelerden biridir. Bu çalışmada tasarım aşamasında optimum özgül gazlaştırma hızı  $SGR=200 \text{ kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$  (Jain 2006) kabul edilerek yaklaşık  $FCR=20 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$

biyokütlenin gazlaştırılması hedeflenmiş ve reaktör çapı olarak  $D_r=0,350$  m seçilmiştir. Tasarım sırasında çeltik sapının enerji içeriği, varsayılan değer olarak  $15 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  alınarak (Jenkins ve ark. 1998) reaktörün biyokütle ısı gücü olarak yaklaşık  $80 \text{ kW}$  olarak öngörülmüştür.

$$\phi D_r = \sqrt{\frac{4 \cdot FCR}{\pi \cdot SGR}} \quad (3.1)$$

Burada;

- $D_r$  : Reaktör iç çapı (m)  
 $FCR$  : Yakıt tüketim hızı ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )  
 $SGR$  : Özgül gazlaşma hızı ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )

Bu çap, bu çalışma sonucunda elde edilecek verilerin endüstriyel ölçeklere geçiş için bir referans olması açısından tercih edilmiştir.

Reaktör yüksekliği ( $H_r$ ) için (3.2.) bağıntısı kullanılmıştır. Çeltik sapı peletlerinin hacim yoğunluğu  $\rho_b=500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  ve yakıt tüketim hızı  $FCR=20 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  alınarak  $t=2$  h operasyon süresi için reaktör yüksekliği minimum  $H_r=0,8316$  m hesaplanmış ve  $840$  mm olarak seçilmiştir.

$$H_r = \frac{FCR \cdot t}{A_r \cdot \rho_b} \quad (3.2)$$

Burada reaktör yüksekliği  $H_r$  (m), yakıt tüketim hızı  $FCR$  ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ), operasyon süresi  $t$  (h), reaktör kesit alanı  $A_r$  ( $\text{m}^2$ ) ve  $\rho_b$  pelet hacim yoğunluğu ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) olarak verilmiştir.

Nozullardan girecek hava hızı için  $10-30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  aralığı alınarak  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  seçilmiştir (Yinesor 2008, Reed ve Das 1988). Bunun için  $1/8''$  (DN6) boru kullanılmıştır (dış çap  $10,3$  mm, iç çap  $7,8$  mm). Nozul çapı hesabında öncelikle kullanılması düşünülen en fazla hava debisi (AFR) hesaplanmıştır. AFR, en fazla hava fazlalık katsayısı  $ER=0,4$  için stokiyometrik hava oranı (hacimsel)  $SR_v=3,257 \text{ m}^3\text{-hava/kg-biyokütle}$  alınarak (3.3.) bağıntısı yardımıyla  $26 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  olarak tespit edilmiştir.

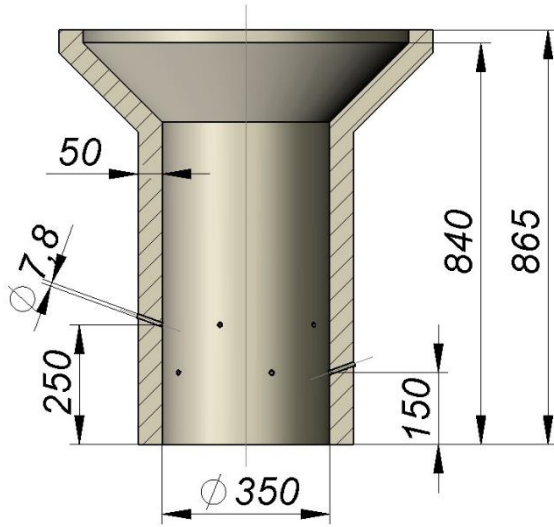
$$AFR = FCR \cdot ER \cdot SR_v \quad (3.3)$$

Nozullardan hava girişinde sisteme alınan hava çevresel olarak beşerli iki sıra halinde yerleşmiş toplam 10 adet nozuldun geçerek reaktöre girmektedir. Nozullardan geçecek hava hızı en fazla  $V_{noz}=15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  olup bağıntı (3.4) ile bulunmuştur.

$$V_{noz} = \frac{AFR \cdot 4}{z \cdot 3600 \cdot \pi \cdot d_{noz}^2} \quad (3.4)$$

Burada  $V_{noz}$  nozullardan geçen hava hızı ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $d_{noz}$  nozul iç çapı (m),  $AFR$  nozullardan geçen toplam hava debisi ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) ve  $z$  nozul adedidir.

Şekil 3.6.'da reaktör ana gövdesi temel tasarım ölçüleri görülmektedir.



Şekil 3. 6. Reaktör ana gövdesi temel tasarım ölçüleri

Ana gövde malzemesi olarak 5 mm kalınlığında AISI 310 paslanmaz çelik kullanılmıştır. AISI 310 yüksek sıcaklıkta ve korozif ortamda çalışmaya mukavemetli bir paslanmaz çelik malzemedir. Sürekli olarak  $1150^{\circ}\text{C}$ 'de çalışabilir ve paslanma oluşmaz. 310 kalite paslanmaz çeliğin içinde bulunan yüksek krom ve nikel miktarı da yüksek sıcaklık oksidasyonunu önlemede başrol oynamaktadır. Kaynak edilebilme özelliği olup rahatlıkla her türlü kaynak teknikleri kullanılabilir.

Sistemin ısı rejiminin daha uzun süre istikrarlı kalabilmesi ve aynı zamanda çelik gövdenin korozif ve yüksek sıcaklıktaki ortam etkilerinden korunması için reaktör gövdesi ve kül bölgesi refrakter kaplamalı olarak imal edilmiştir. Refrakter kaplama kalınlığı, kaplamanın

yüksek sıcaklıktaki mukavemetinin sağlanması için 50 mm olarak uygulanmıştır. Refrakterin kullanılması ayrıca çalışma esnasında oluşacak ısıl değişimler ve bunun sonucundaki ısıl gerilmeler neticesinde gövde yapısındaki kalıcı şekil değişimlerine karşı da önlem olarak düşünülmüştür. Bunun yanı sıra, refrakter kullanımı ile çeltik sapı peletlerinin yüksek sıcaklıklar etkisinde oluşturacağı camsı yapıların, reaktör gövdesi iç cidarlarına yapışmasının önlenmesi ve bunun biyokütle akışına ve gazlaştırma prosesine olumsuz etkilerinin azaltılması hedeflenmiştir. Şekil 3.7.'de imalat aşamasındaki reaktör ana gövdesi görülmektedir.



**Şekil 3. 7.** İmalat aşamasındaki reaktör ana gövdesi (AISI 310)

Reaktör ana gövdesi içerisinde refrakter malzemesi olarak Hycast70 kullanılmıştır. Bu malzeme ısı ile ilgili her türlü endüstride geniş uygulama alanı olan, özellikle erozyon, çarpma ve dökülmelere dayanıklı bir malzemedir. Hycast70 için üretici firma tarafından maksimum kullanma sıcaklığı 1500°C, malzeme hacimsel yoğunluğu kuru bazda 2,69 kg·dm<sup>-3</sup> ve döküm harcına katılacak su miktarı %12 olarak verilmektedir. ([www.kiltas.com.tr](http://www.kiltas.com.tr) 2015). Hycast70'in kimyasal bileşimi Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Ayrıca malzemenin bazı farklı kullanım sıcaklıklarına ait fiziksel özellikleri de Çizelge 3.2.'de belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan refrakter malzeme (Hycast70) kimyasal bileşimi ([www.kiltas.com.tr](http://www.kiltas.com.tr) 2015)

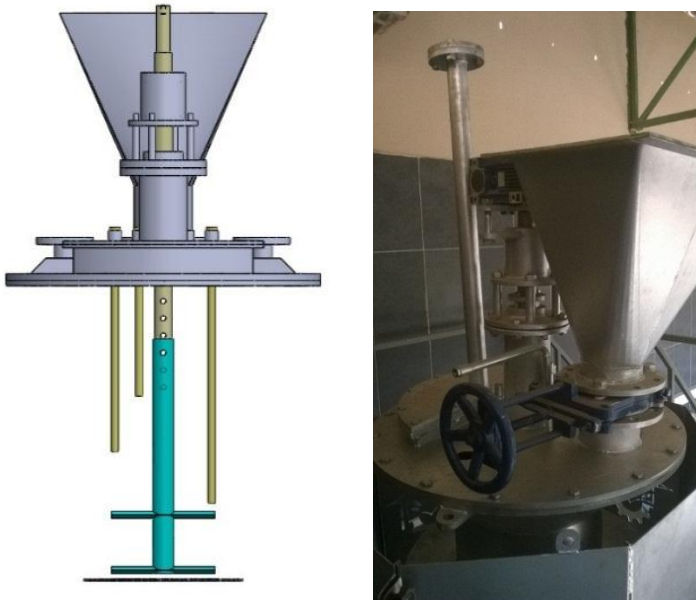
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Alkali
74,80	2,65	14,70	1,15	5,50	1,20

**Çizelge 3.2.** Kullanılan refrakterin (Hycast70) fiziksel özellikleri ([www.kiltas.com.tr](http://www.kiltas.com.tr) 2015)

Sıcaklık (°C)	800	1100	1300
Kırılma modülü(kg·cm <sup>-2</sup> )	55	51	130
Basma mukavemeti(kg·cm <sup>-2</sup> )	530	700	850
Lineer değişme (%)	-0,18	-0,10	-0,40
Termal iletkenlik (kcal·h <sup>-1</sup> )	0,90	1,10	1,20

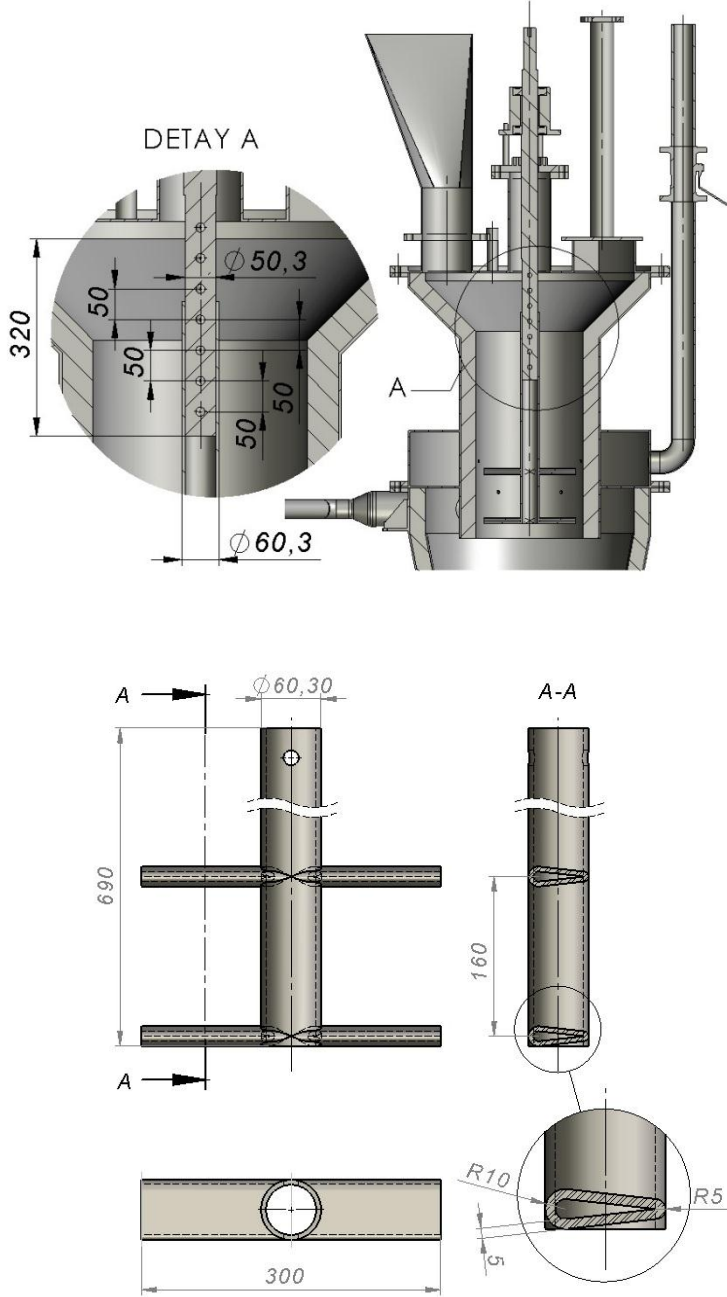
Reaktörde gazlaştırma ajanı olarak kullanılacak olan hava hem üst kapaktan, hem de gövdeye yandan çevresel olarak açılmış 7,8 mm çaplı 10 adet nozuldan sisteme giriş yapabilmektedir. Böylece sadece üstten, sadece nozullardan veya gerektiğinde ikisi beraber hava girişlerinin gazlaştırma prosesine etkilerinin karşılaştırılabileceği donanım sağlanmıştır.

**Üst ünite:** Bu ünite reaktör ana gövdesi üzerine monte edilmiştir. Üzerinde karıştırıcı, çelik kılıflar içerisine dikey olarak yerleştirilmiş 3 adet sıcaklık sensörü ve 1 basınçölçer ile 1 adet sürgülü vana kontrollü biyokütle (pelet) besleme ünitesi bulunmaktadır. Üstten hava girişi için gerektiğinde açılıp kapatılabilen bir hava girişi bırakılmıştır. Reaktör içerisinde yakıt ve hava dağılımını düzgün şekilde sağlamak ve aglomerasyonu (topaklaşma) önlemek amacıyla tasarlanan pozisyon ayarlı ve devir kontrollü mekanik karıştırıcı da üst üniteye monte edilmiştir (Şekil 3.8.).



**Şekil 3. 8.** Üst ünite (kapak, biyokütle besleme ve üst hava girişi, sıcaklık ve basınç sensörleri, mekanik karıştırıcı)

Mekanik karıştırıcının pozisyonu reaktör eksenini doğrultusunda ayarlanabilmektedir. Karıştırıcı mili 2'' çapında ve 690 mm boyunda olup üstten 0,55 kW elektrik motoruyla tahrik edilmektedir. Karıştırıcı bıçaklar reaktör içerisinde 300 mm çaplı bir alanı taramaktadır. Karıştırıcı bıçakların formu ve ölçüleri Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

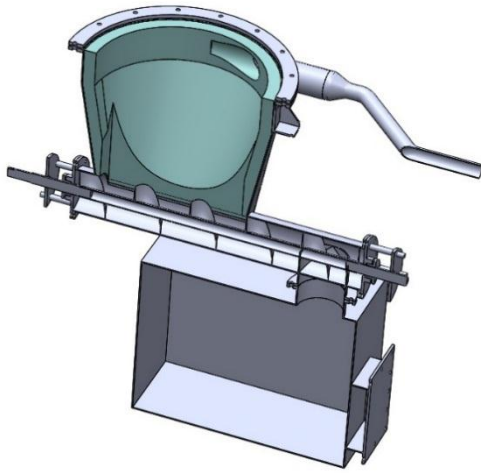


Şekil 3. 9. Üstten tahrikli mekanik karıştırıcı tasarımı şekil ve ölçüleri



**Alt ünite (gaz çıkış ve kül tahliye ünitesi):** Reaktör ana gövdesi altında gaz çıkışının gerçekleştiği ve külün birikerek tahliye edildiği gaz çıkış (kolektör) ünitesi bulunmaktadır. Bu kısım üzerinde kor bölgesi ve kül sıcaklığı ölçümü için iki adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Denemeler sırasında kül tahliyesini kolaylaştırmak amacıyla kül bölgesine bir helezonlu tahliye ünitesi eklenmiştir. Helezon tahrik motoru 0,55 kW gücündedir. Kül tahliye ünitesi, altına monte edilen kül tankına gazlaştırıcının yüksekliğini arttırdığından gazlaştırıcı bir platform üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.10.'da kolektör, helezon ve kül tankı gösterilmektedir.

Reaktör ana gövdesi, üst ünite ve alt ünitenin montajı Şekil 3.11.'de görülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 3. 10.** (a) Kolektör, helezon ve kül tankı kesiti (b) Gaz çıkış (kolektör) ünitesi, helezon ve kül tankı



**Şekil 3. 11.** Gazlaştırıcı reaktör montajı

### **3.2.2. Gaz temizleme ve soğutma üniteleri**

Reaktörden 2 noktada çekilen gaz çıkışta tek hatta düşürülerek siklona sevk edilmekte (Şekil 3.12.) burada içerdiği katı parçacıklardan arınarak gaz soğutma ünitesine girmektedir. Soğutma ünitesi 0,55 kW elektrik motoruyla çalışan bir fan ile 20 adet serpantinli borudan geçerek (Şekil 3.13.) hızı azalan gazdan ısı çekerek gazı soğutmaktadır. Bu kısımda gerçekleşen yoğuşma, soğutucunun alt kısmındaki yoğuşma kabında birikmekte ve gerektiğinde burada biriken su vana yardımıyla tahliye edilebilmektedir.

Reaktörden çıkışta gaz siklona girmeden önce gaz sıcaklığı  $T_6$  ve gaz basıncı  $P_2$  ölçülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 3. 12.** (a) Reaktör gaz çıkış hattı, (b) siklon bağlantısı



**Şekil 3. 13.** Gaz soğutma ünitesi genel ve alttan (serpantinli borular) görünüşleri

### 3.2.3. Vakum pompası ve yakma ünitesi

Sistemde, negatif basıncı sağlayan 1,5 kW gücü ve maksimum  $50 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  debi kapasiteli su halkalı vakum pompası kullanılmıştır. Pompada kullanılan su servis suyu deposundan sağlanmakta ve devir daim yapmaktadır. Sistemin emişi pompa devrinin otomasyon panosu üzerinden kumanda edilen invertör yardımıyla değiştirilerek kontrol edilmektedir (Şekil 3.14.).

Çekilen gaz servis suyu deposu üzerinden alınarak laboratuvar dışarısındaki yakma ünitesine gönderilmektedir (Şekil 3.15.). Analiz yapılacağı zaman çıkış hattı üzerinden analiz cihazına da gaz gönderilmektedir.



Şekil 3. 14. Vakum pompası, pompa servis suyu deposu ve çıkış hattı



Şekil 3. 15. Yakma ünitesi

### 3.2.4. Çeltik saplarının peletlenmesi

Balya halinde İpsala Kaymakamlığı tarafından temin edilen çeltik sapları, tarafımızdan temin edilen sap parçalama makinesi (Şekil 3.16.) ile parçalanarak pelet haline gelecek boyutlara düşürülmüştür (Şekil 3.17.). Saplar parçalandıktan sonra Tekirdağ ili Muratlı ilçesinde bulunan bir işletmede pelet yapım aşamasına geçilmiştir. Şekil 3.18.'de peletleme çalışmaları ve Şekil 3.19.'da kullanılan pelet makinesi görülmektedir.



Şekil 3. 16. Sap parçalama makinesi



Şekil 3. 17. Parçalanmış çeltik saplari

Sap parçalama işlemleri için kullanılan parçalama makinesi 15 kW gücündedir ve 100 kgh<sup>-1</sup> çalışma kapasitesine sahiptir.

Peletleme makinesi de yine 15 kW gücünde ve 150 kgh<sup>-1</sup> kapasitelidir. Dikey motor miline sahiptir ve kullanılan disk 6 mm delik çapına sahiptir.



Şekil 3. 18. Pelet üretim çalışmaları

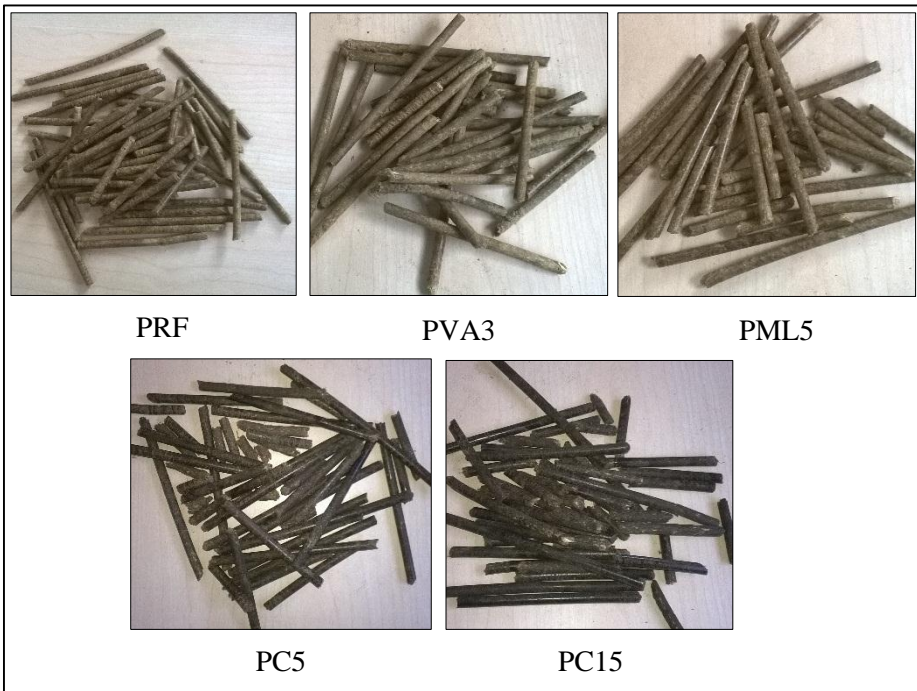


Şekil 3. 19. Kullanılan pelet makinesi

Peletler Çizelge 3.3.'de verilen 5 farklı bileşimde hazırlanmıştır. Şekil 3.20.'de pelet numuneleri bir arada görülmektedir.

**Çizelge 3.3.** Biyoyakıt olarak hazırlanan pelet bileşimleri

KOD	PELET BİLEŞİMİ
PRF	Katkı maddesi yok. Referans örnek
PVA3	Çeltik sapı + %3 PVA
PML5	Çeltik sapı + %5 melas
PC5	Çeltik sapı + %5 kömür tozu
PC15	Çeltik sapı + %15 kömür tozu



**Şekil 3. 20.** Hazırlanan 5 farklı bileşimdeki pelet numuneleri

Melas ve PVA, peletlemede yaygın olarak kullanılan bağlayıcılardır. Bu çalışmada bu bağlayıcılar, pelet özelliklerine ve gazlaştırma işlemine etkilerini görmek için kullanılmışlardır. Kömür tozu da pelet bileşimine kütlece %5 ve %15 oranlarında katılarak özellikle gazlaştırma performansına etkisini görmek üzere kullanılmıştır.

Melas, kamış ve pancar şekeri fabrikalarında, sakarozun kristal halde elde edilmesi için yapılan kademeli işlemlerin en sonunda geriye kalan ve koyu kahve renkli, ortalama % 50 şeker ihtiva eden, yüksek viskoziteli (kıvamlı) şuruba denmektedir (Anonim, 2015). Bu çalışmada pelet bileşimine ağırlıkça %5 oranında katılarak bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

PVA (polivinil asetat), beyaz tutkal olarak da bilinmektedir.  $(C_4H_6O_2)_n$  formülüyle verilen PVA, bu çalışmada pelet bileşimine ağırlıkça %3 oranında katılarak bağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Kömür tozu katkılı pelet bileşimlerinde Tekirdağ Süleymanpaşa'daki bir kömür ocağından alınan linyit kömürü kullanılmıştır. Alt ısı değeri orijinal numunede 3952 kcal, kuru numunede 5393 kcal verilmiştir (Şekil 3.21.)



	Analiz Tipleri	Orijinal Numunede	Havada Kuru Numunede	Kuru Numunede
Kısa Analiz (%)	Nem	24,24	10,04	
	Kül	14,04	16,67	18,53
	Uçucu Madde	30,61	36,35	40,41
Kükürt (%)	Sabit Karbon	31,11	36,94	41,06
	Toplam Kükürt	1,35	1,60	1,78
Isıl Değer (kcal/kg)	Alt Isıl Değer	3952	4796	5393
	Üst Isıl Değer	4250	5046	5610

1. Grup II ve ilçelerde - Köy ve Beldelerde

Şekil 3. 21. Kullanılan kömürün ambalajı ve özellikleri

### 3.2.5. Pelet örneklerinin elementel ve fiziksel özelliklerinin saptanması

Hazırlanan pelet numunelerinin gazlaştırma öncesindeki elementel özelliklerini saptanması için analizler TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde (MAM) gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla aşağıda Çizelge 3.4.'de belirtilen analizler yapılmıştır.



**Çizelge 3.4.** Pelet örneklerine yapılan analizler ve standartları

ANALİZ TÜRÜ	STANDART (ASTM D)	ANALİZ TÜRÜ	STANDART (ASTM D)
Nem	7582-12	O <sub>2</sub> (Oksijen)	3176-09
Kül	1755-01	Alt ısıl değer	5865-13
Uçucu madde	7582-12	Üst ısıl değer	5865-13
C (Sabit karbon)	3172-13	IDT (İlk deformasyon sıcaklığı)	1857/D1857
C (Karbon)	5373-14	ST (Yumuşama sıcaklığı)	1857/D1857
H (Hidrojen)	5373-14	HT (Yarıküre sıcaklığı)	1857/D1857
N (Azot)	5373-14	FT (Erime sıcaklığı)	1857/D1857
S (Sülfür)	4239-14	Kül analizleri	2795

Ayrıca peletlerin parça ve yığın yoğunluk ölçümleri de yapılmıştır. Parça yoğunluğu için pelet boyutlarının ölçülmesi (stereo metrik yöntem) yolu ile belirlenmiştir. Pelet parça yoğunluğunun belirlenmesi için her pelet örneğinden 40 adet pelet rastgele seçilmiş ve tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Daha sonra silindirik peletlerin çapı ve uzunluğu 0,01 mm hassasiyetli dijital kumpas yardımı ile ölçülmüş ve pelet hacmi hesaplanmıştır. Pelet parça yoğunluğu, pelet ağırlığının pelet hacmine bölünmesi ile kg.m<sup>-3</sup> olarak aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır (Adapa ve ark. 2006, McMullen ve ark. 2004).

$$V_u = \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (3.5)$$

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (3.6)$$

$V_u$  = Tek pelet hacmi (m<sup>3</sup>)

$d$  = pelet çapı (m)

$l$  = pelet uzunluğu (m)

$\rho_u$  = Pelet parça yoğunluğu (kg.m<sup>-3</sup>)

$m_u$  = Tek pelet kütlesi (kg)

Peletlerin hacim yoğunluğu ise EN 15103 (2009) standardına göre belirlenmiştir.

### 3.2.6. Gazlaştırıcının çalıştırılması

Reaktör ızgarası üzerine 5 kg çeltik sapı konularak ateşleme yapılmış ve vakum pompası çalıştırılmıştır. İlk tutuşmanın hızlı bir şekilde gerçekleşmesi için tutuşma sırasında hem üst hava girişi hem de nozullardan hava girişi serbest bırakılmıştır. Kor bölgesi üst kısma ulaştığında çeltik peletleri doldurularak gerekli hava debisi ayarlanmış ve deneme başlatılmıştır (Şekil 3.22.). Izgaranın kullanılmadığı deneylerde önceki denemelerden kalan char ve kül ızgara seviyesine kadar alt üniteye doldurularak yatak hazırlanmıştır.

Yakıt besleme ünitesi üzerindeki sürgülü vana üzerinden aralıklarla gözlem yaparak kor bölgesinin biyokütlenin üst seviyesine çıkıp çıkmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.23.). Deney başlangıcı ile korun üst seviyeden görülmesine kadar geçen süre deney süresi olarak alınmıştır. Denemeler sırasındaki çalışma Şekil 3.24.'de ve elde edilen gaz alevi Şekil 3.25.'te görülmektedir.



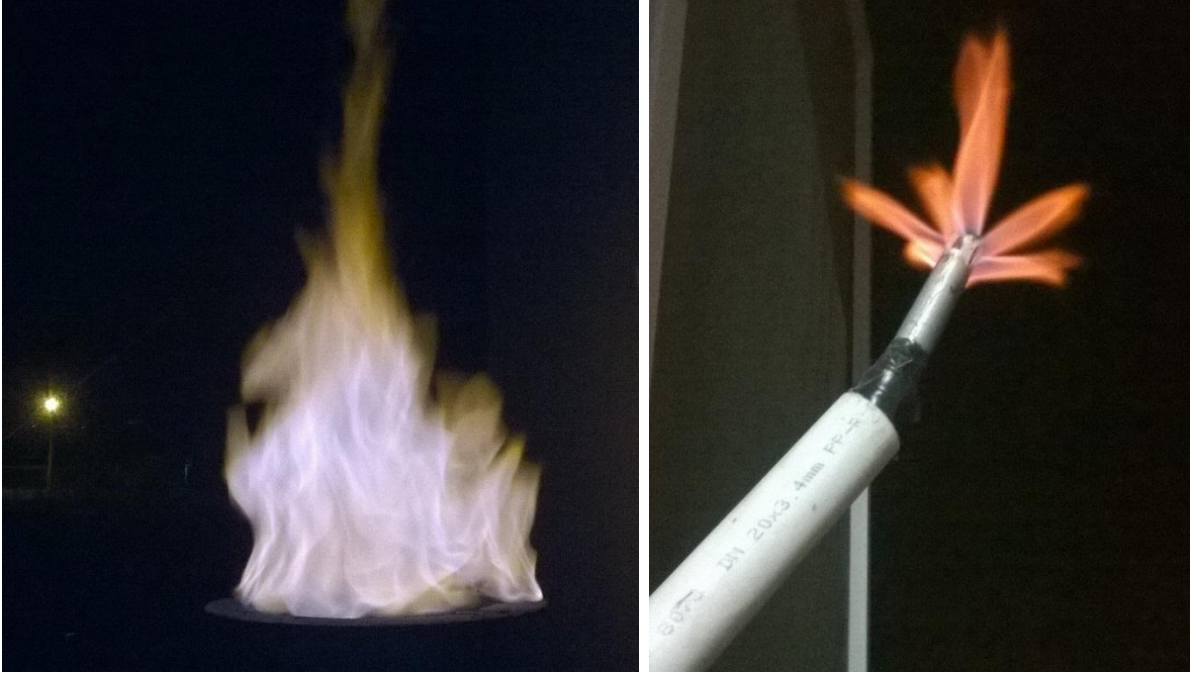
Şekil 3. 22. Reaktörün yüklenmesi (deneme başlangıcı)



**Şekil 3. 23.** Deneme sonu (Kor biyokütle yakıtın üst seviyesine ulaşmış)



**Şekil 3. 24.** Denemeler sırasında sistem çalışırken

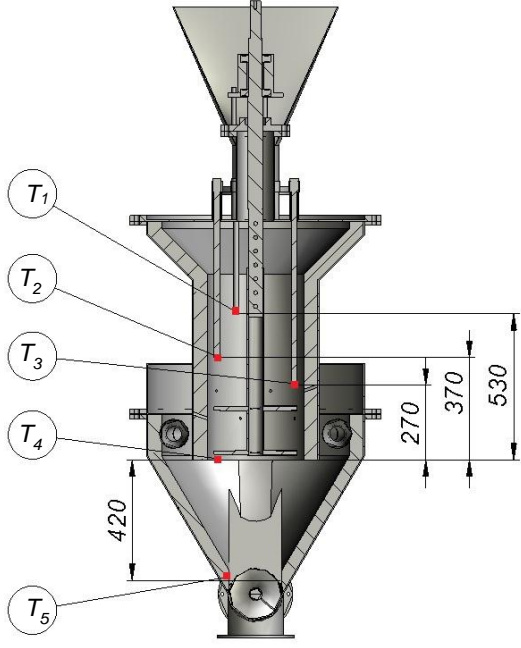


**Şekil 3. 25.** Elde edilen sentez gazı alevi

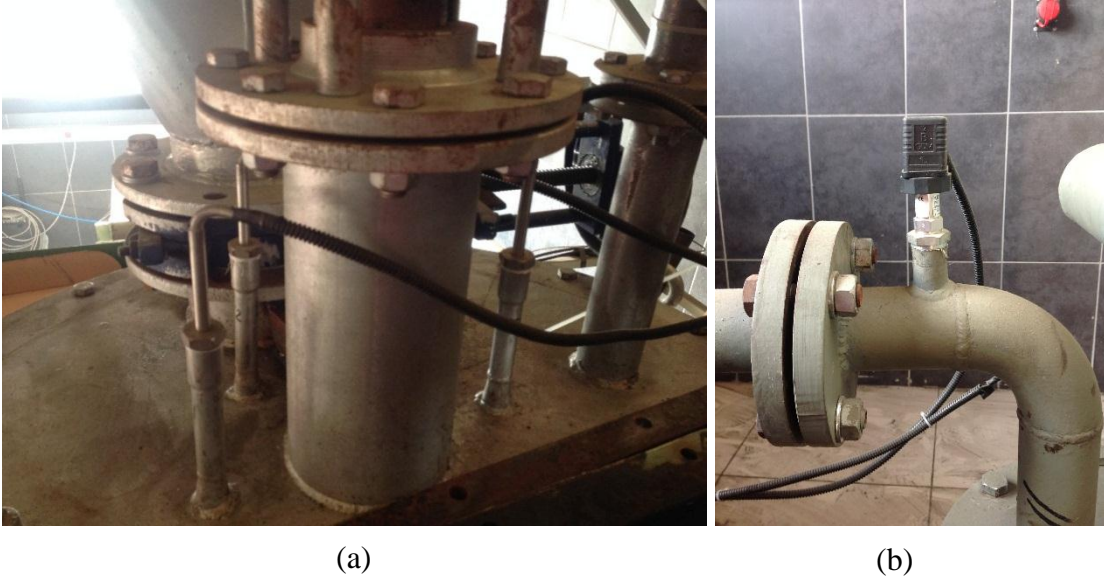
### **3.2.7. Sıcaklık ve basınç ölçümleri**

Reaktör üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 3.26.'de verilmiştir. Sistemde sıcaklık ölçümleri için K tipi (Krom-Nikel) sensör kullanılmıştır (Jain 2006) (Şekil 3.25.). Sensörler reaktör yüksekliği boyunca 5 ayrı noktaya yerleştirilmiş, ölçümler otomasyon sistemi üzerinden USB yardımıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Ayrıca gazın reaktörden çıkış sıcaklığı ( $T_6$ ) ve soğutma ünitesinden çıkış sıcaklığı ( $T_7$ ) için de 2 adet sensör kullanılmıştır. Şekil 3.27.'de bazı sıcaklık ve basınç sensörleri gösterilmiştir. Reaktör ağzı ve gaz çıkış basınç farklarını ölçmek için de 2 adet basınç sensörü yerleştirilmiştir ( $P_1$  ve  $P_2$ ). Soğutucudan çıkışta da  $P_3$  basıncı ölçülmektedir.

Mekanik karıştırıcının, yakıtın ve havanın reaktör içerisindeki düzgün dağılımının sağlanmasına katkıda bulunacağı ve karıştırma işleminin yükseklik boyunca yanmayı önleyerek reaktör içerisindeki sıcaklığın kontrolünde önemli rol oynayacağı düşünülmüştür (Recepoğlu 1972). Bunun yanı sıra, gazlaştırma ünitesi iç sıcaklıkları hava fazlalık katsayısına ve dolayısıyla reaktör kesitinden geçen hava debisine de bağlıdır. Hava debisinin değişimi de vakum pompasının devrinin değiştirilmesi ile sağlanmıştır.



Şekil 3. 26. Reaktör üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları



Şekil 3. 27. (a) T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ve T<sub>3</sub> sıcaklık sensörleri, (b) P<sub>3</sub> basınç sensörü

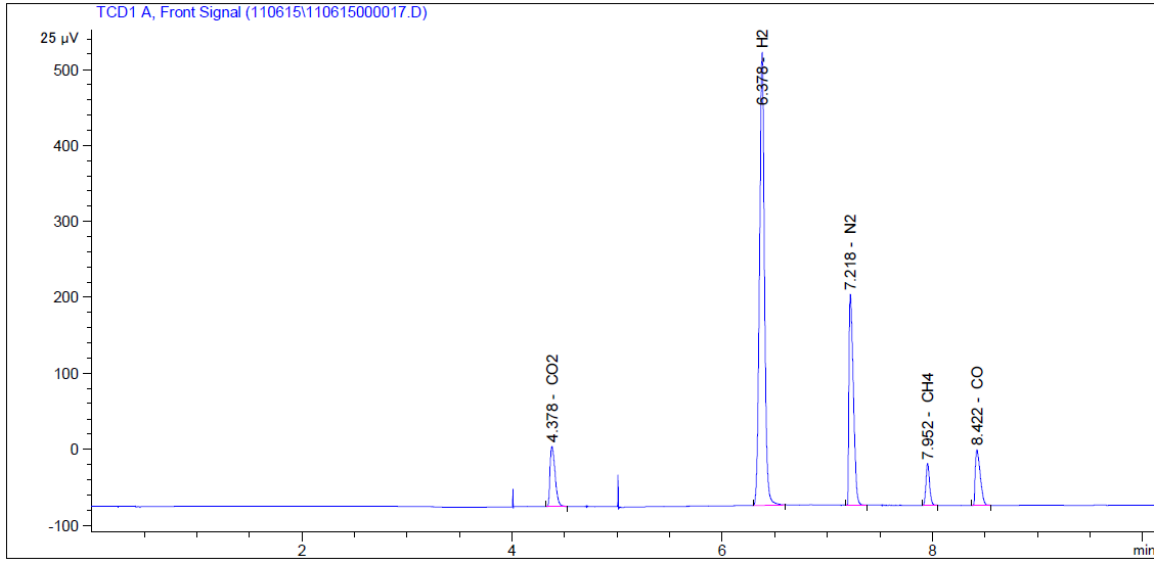
### 3.2.8. Gaz analizleri

Ana gaz çıkış hattında debi ölçümünden sonra bir hat yardımıyla gaz örneği alınmıştır. Örnekleme hattındaki basıncın ayarlanabilmesi için çıkış hattı üzerindeki kısma vanası kullanılmıştır. Alınan gaz örneği Agilent 7890B GC gaz kromatografi cihazı ile analiz edilmiş ve CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, ve N<sub>2</sub> oranları cihaza ait yazılım kullanılarak kaydedilmiştir. GC ölçümleri için taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta Argon, cihaz üzerindeki pnömatik valflerin sağlıklı çalışabilmesi için de kuru hava tüpü kullanılmıştır. Cihazın ölçüm metodu oluşturularak kalibre edilmesi için kullanılan referans gaz tüpü, kuru hava ve argon tüpleri Şekil 3.28.'de görülmektedir.

Şekil 3.29.'da GC'den alınan örnek bir analiz raporu görülmektedir.



Şekil 3. 28. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü



Normalized Percent Report

Sorted By : Signal  
 Calib. Data Modified : Thursday, June 11, 2015 6:06:11 PM  
 Multiplier : 1.0000  
 Dilution : 1.0000  
 Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: TCD1 A, Front Signal

RetTime [min]	Type	Area [25 µV*s]	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
4.378	BB	265.25989	4.74686e-2	12.910073		CO2
6.378	BB	1975.87146	7.49708e-3	15.188013		H2
7.218	BB	804.56122	6.45489e-2	53.247374		N2
7.952	BB	132.64458	1.61948e-2	2.202504		CH4
8.422	BB	238.30382	6.73346e-2	16.452036		CO

Şekil 3. 29. GC'den alınan örnek bir gaz analiz raporu

### 3.2.9. Gaz ve Hava Debilerinin Ölçümleri

Gaz debisi ölçümü gaz hattında gaz numunesi alınmadan önce yerleştirilmiş bir orifis tipi debimetre ile yapılmıştır. Hava girişlerindeki debi de yine orifis plakası ve fark basınçölçerle ölçülmüştür. (Şekil 3.30.) Orifis debimetrelerle debi ölçümü EN ISO 5167-2 (2003) standardına göre yapılmıştır.

### 3.2.10. Stokiyometrik hava miktarının hesaplanması

Tam yanma için gerekli oran stokiyometrik hava miktarı, biyokütlenin kimyasal analiz sonuçlarına göre hesaplanmıştır (Zhu ve Venderbosch 2005);

$$SR = \left( \frac{C_C}{12} + \frac{C_H}{4} - \frac{C_O}{32} \right) \left( 1 + \frac{79}{21} \right) \left( 1 - \frac{C_A}{100} \right) \frac{28,84}{100} \quad (3.7)$$

Burada  $C_C$ ,  $C_H$  ve  $C_O$  biyokütle içerisindeki karbon, hidrojen ve oksijen yüzdelerini,  $C_A$  ise kül yüzdesini ifade etmektedir. SR ise 1 kg biyokütlenin tam yanması için gereken hava kütlesini vermektedir.

Hesaplanan hava kütlesi 25 °C sıcaklıktaki hacimlerine dönüştürülerek ifade edilmiştir ( $SR_v$ ).



Şekil 3. 30. Sentez gazı çıkış ve hava giriş debilerinin ölçülmesi için orifis debimetreler



### 3.2.11. Hava fazlalık katsayısının hesaplanması

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

$$ER = \frac{\left(\frac{AFR}{FCR}\right)}{SR_v} \quad (3.8)$$

Burada, ER hava fazlalık katsayısı; AFR ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) ortama verilen havanın debisi; FCR ( $kg \cdot h^{-1}$ ) biyokütle yakıt tüketim hızı ve  $SR_v$  ( $m^3 \cdot kg^{-1}$ ) ise 1 kg biyokütle yakıtın yanması için gereken stokiometrik havanın hacimsel debisidir.

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

### 3.2.12. Özgül gazlaştırma oranının (SGR) hesaplanması

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

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

$$FCR = \frac{m_b}{t} \quad (3.9)$$

Burada; FCR ( $kg \cdot h^{-1}$ ) biyokütle tüketim oranı,  $m_b$  (kg) bir operasyon boyunca tüketilen biyokütle miktarı, t (h) operasyon süresidir.

Daha sonra aşağıdaki bağıntı yardımıyla özgül gazlaştırma oranı bulunmuştur.

$$SGR = \frac{FCR}{A_r} \quad (3.10)$$

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

### 3.2.13. Özgül gaz üretim oranının (SGPR) hesaplanması

Gazlaştırma süresince birim zamanda üretilen gaz miktarının (GFR) reaktör kesit alanına oranlanmasıyla bulunmuştur. Burada üretilen gaz debisi 1 atm basınç ve 0°C şartlarındaki miktardır ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

$$SGPR = \frac{GFR}{A_r} \quad (3.11)$$

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

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

### 3.2.14. Birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarının saptanması

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

$$GM_b = \frac{SGPR}{SGR} \quad (3.12)$$

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

### 3.2.15. Gazlaştırma veriminin hesaplanması

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

Biyokütlenin ısıl gücü aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$P_b = \frac{FCR \cdot LHV_b}{3600} \quad (3.13)$$

Burada;  $P_b$  (kW) biyokütlenin ısıl gücü ve  $LHV_b$  ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) alt ısıl değeridir.

Elde edilen gazın ısıl gücü de aşağıdaki bağıntı yardımıyla bulunmuştur;

$$P_g = \frac{GFR \cdot LHV_g}{3600} \quad (3.14)$$

Burada; elde edilen gazın ısı gücü  $P_g$  (kW), debisi  $GFR$  ( $\text{Nm}^3\text{h}^{-1}$ ) ve alt ısı değeri  $LHV_g$  ( $\text{kJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ) olarak verilmiştir. Gazın alt ısı değeri üretilen gazın birim kütledeki bileşenlerin oranları ve enerji içerikleri dikkate alınarak bulunmuştur (Walheim ve Nilsson 2001).

Sentez gaz ısı değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$LHV_g = 10,8 \cdot \%H_2 + 12,63 \cdot \%CO + 35,8 \cdot \%CH_4 \quad (3.15)$$

Burada  $LHV_g$  ( $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ) sentez gazın alt ısı değeridir. Sentez gazı içerisindeki yanıcı gazların kütleli yüzdeleri  $GC$  ile ölçülmektedir. Bu bileşenlerin enerji değerleri de 1 atm basınç ve  $0^\circ\text{C}$  sıcaklık için aşağıda verilmiştir (Walheim ve Nilsson 2001):

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

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

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

Biyokütle ve gazın ısı güçleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki bağıntıyla gazlaştırma verimleri bulunmuştur;

$$\eta_G = \frac{P_g}{P_b} \cdot 100 \quad (3.16)$$

### 3.2.16. Reaksiyon sıcaklığının gazlaştırma üzerine etkisinin saptanması:

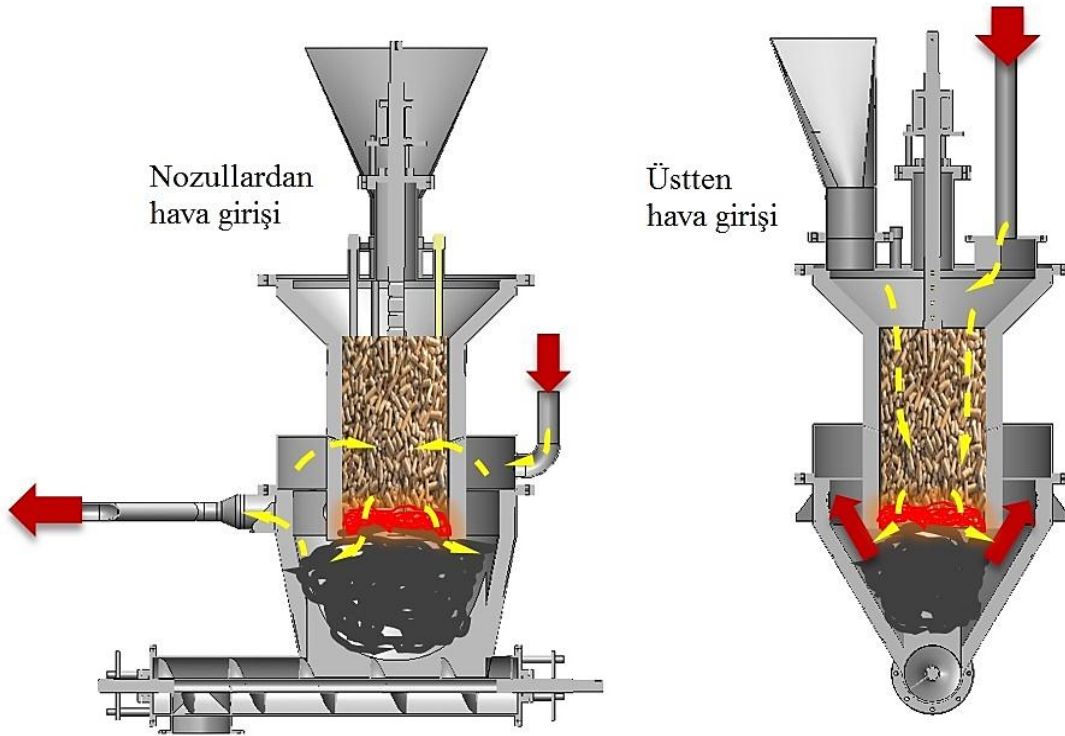
Referans pelet örnekleriyle (PRF) gazlaştırma işlemi sırasında kor bölgesindeki sıcaklık değişimleri takip edilmiştir. Her iki hava giriş şekli için de her bir hava fazlalık katsayısında reaktör yüksekliği boyunca sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Denemelerin sonunda sistem kapatılarak malzeme helezon yardımıyla tamamen kül ve char tankına indirilmiş ve kül ve char tankı açılarak malzeme içerisinde meydana gelen aglomerasyon ve camlaşma olayı kontrol edilmiştir.

### 3.2.17. En uygun hava fazlalık katsayısının (ER) ve hava giriş yönünün saptanması

Bu testler katkısız (referans) pelet örneğinde (PRF) gerçekleştirilmiştir.

Denemeler sırasında reaktöre hava girişi iki farklı şekilde ele alınmıştır. (Şekil 3.31.) Birincisi, havanın, tamamen nozullar üzerinden giriş yapmasıdır. Nozullar ızgara seviyesinin 15 cm üzerinde ve 25 cm üzerinde 5'er adet olmak üzere toplam 10 adettir. Gazlaştırma ajanı olarak kullanılan hava, üzerinde kısma vanası ve orifis plakası bulunan 2'' borudan geçerek önce reaktör çevresinde nozulların etrafını saran hava ceketine girmekte, buradan nozullara akarak sisteme giriş yapmaktadır. Hava bu şekilde önce kor bölgesine sonra da kül bölgelerinden geçerek reaktör çıkışına akmaktadır.

Bir diğer hava giriş şekli de nozulların tamamen kapatılıp, havanın reaktör üst kapağı üzerinden verilmesidir. Hava yine üzerinde orifis plakası bulunan 2'' borudan geçerek sisteme giriş yapmakta, biyokütle yatağını yukarıdan aşağıya boydan boya katederek kor bölgesine ulaşmakta, sentez gazına dönüşerek reaktörü terk etmektedir.



Şekil 3. 31. Denemelerde kullanılan hava giriş şekilleri

Denemeler, verilecek hava debisine, stokiyometrik hava oranına ve ölçülecek biyokütle yakıt tüketim hızına bağlı olarak belirlenen hava fazlalık katsayısı esas alınarak yapılmıştır. Denemelerde kullanılan hava fazlalık katsayıları 0,15 – 0,20 – 0,25 – 0,30 ve 0,35 olarak

belirlenmiş ve  $\pm 0,02$  toleransla ele alınmıştır. Hava debisi kademeli olarak değiştirilerek, yukarıda bahsedilen her iki çalışma şekli için de hava fazlalık katsayıları hesaplanmış, bunlara karşılık gelen hava debileri belirlenmiştir.

Referans peletle yapılan denemelerde elde edilen sentez gazının analizi sonucu, gazın bileşiminde bulunan  $H_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$  ve  $CO_2$  miktarlarıyla elde edilen enerji içeriklerine bağlı olarak, verim ve hava fazlalık katsayısı arasındaki ilişkiler ortaya konmuştur. Üçer tekrarlı olarak yapılan denemeler sonucunda en uygun ER değeri ve hava giriş şekli saptanmış ve bir sonraki testler bu değere göre yapılmıştır. Bu aşamada gerek duyulmadıkça karıştırma işlemi yapılmamıştır.

### **3.2.18. Karıştırma etkisinin saptanması**

En uygun ER ve hava giriş şekli saptandıktan sonra, karıştırma işleminin etkisini saptamak amacıyla, 3 farklı karıştırma yöntemi denenmiştir. Bunlar 5, 10 ve 15 dakikada bir karıştırma işlemidir. Yapılan gaz analizlerinde en uygun karıştırma aralığı saptandıktan sonra bir sonraki aşamaya geçilmesi planlanmıştır.

### **3.2.19. Pelet örneklerinin gazlaşma özelliklerinin saptanması**

Referans pelet örneği (PRF) ile yapılan testler sonuç belirlenen en uygun koşullarda diğer pelet örneklerinin gazlaştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir örneğin özgül gazlaştırma oranı (SGR), özgül gaz üretim oranı (SGPR), birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarları, gazlaştırma verimleri, gaz analizleri sonucu elde edilen ısı değerleri saptanmıştır.

### **3.2.20. Biyokütle yakıt hazırlama maliyetinin hesaplanması**

Biyokütle yakıt hazırlama maliyetleri sap parçalama maliyetleri ve peletleme maliyetleri olarak ele alınmıştır.

#### **3.2.20.1. Sap parçalama işleminin maliyetinin hesaplanması**

Sap parçalama işleminin enerji maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$EM_{sp} = ET_{sp} \cdot EB \quad (3.17)$$

Burada;  $EM_{sp}$  (TL·h<sup>-1</sup>) sap parçalama işleminde tüketilen enerjinin maliyeti;  $ET_{sp}$  (kW) sap parçalama makinesinin kurulu gücü,  $EB$  [TL·(kWh)<sup>-1</sup>] elektrik enerjisi tüketim bedelidir.

Sap parçalama işleminin işçilik maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$IM_{sp} = n \cdot IB \quad (3.18)$$

Burada;  $IM_{sp}$  (TL·h<sup>-1</sup>) sap parçalama işleminin işçilik maliyeti,  $n$  sap parçalama işleminde çalışan işçi sayısı,  $IB$  (TL·h<sup>-1</sup>-kişi) işçilik bedelidir.

Toplam sap parçalama maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$TM_{sp} = TM_{sp} + IM_{sp} \quad (3.19)$$

Burada;  $TM_{sp}$  (TL·h<sup>-1</sup>) sap parçalama işleminin saatlik toplam maliyetidir.

Birim biyokütle başına sap parçalama maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur.

$$BKM_{sp} = \frac{TM_{sp}}{KP_{sp}} \quad (3.20)$$

Burada;  $BKM_{sp}$  (TL·kg<sup>-1</sup>) sap parçalama işleminde birim kütle maliyeti,  $KP_{sp}$  (kg·h<sup>-1</sup>) sap parçalama makinesinin kapasitesidir.

### 3.2.20.2. Peletleme işleminin maliyetinin hesaplanması

Peletleme işleminin saatlik maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$EM_{pl} = ET_{pl} \cdot EB \quad (3.21)$$

Burada;  $EM_{pl}$  (TL·h<sup>-1</sup>) peletleme işleminde tüketilen enerjinin maliyeti;  $ET_{pl}$  (kW) peletleme makinesinin kurulu gücü,  $EB$  [TL·(kWh)<sup>-1</sup>] elektrik enerjisi tüketim bedelidir.

Peletleme işleminin işçilik maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$IM_{pl} = n \cdot IB \quad (3.22)$$

Burada;  $IM_{pl}$  (TL·h<sup>-1</sup>) peletleme işleminin işçilik maliyeti,  $n$  peletleme işleminde çalışan işçi sayısı,  $IB$  (TL·h<sup>-1</sup>-kişi) işçilik bedelidir.

Toplam peletleme maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$TM_{pl} = EM_{pl} + IM_{pl} \quad (3.23)$$

Burada;  $TM_{pl}$  (TL·h<sup>-1</sup>) peletleme işleminin saatlik toplam maliyetidir.

Birim biyokütle başına peletleme maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur.

$$BKM_{pl} = \frac{TM_{pl}}{KP_{pl}} \quad (3.24)$$

Burada;  $BKM_{pl}$  (TL·kg<sup>-1</sup>) peletleme işleminde birim kütle maliyeti,  $KP_{pl}$  (kg·h<sup>-1</sup>) peletleme makinesinin kapasitesidir.

Birim kütle başına toplam yakıt hazırlama maliyeti aşağıda verilmiştir;

$$BKM_T = BKM_{sp} + BKM_{pl} \quad (3.25)$$

Burada;  $BKM_T$  (TL·kg<sup>-1</sup>) biyokütle yakıt hazırlama işleminde birim kütle maliyetidir.

Gazlaştırma işleminde saatlik biyokütle tüketim maliyeti aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$YM_{bk} = FCR \cdot BKM_T \quad (3.26)$$

Burada;  $YM_{bk}$  (TL·h<sup>-1</sup>) biyokütlenin gazlaştırma işlemindeki saatlik maliyeti ve  $FCR$  (kg·h<sup>-1</sup>) gazlaştırma ünitesinin biyokütle yakıt tüketim hızıdır.

### 3.2.21. Gazlaştırıcı sistemin işletme maliyetinin hesaplanması

Gazlaştırıcı sistemde kullanılan elektrik motorlarının enerji maliyetleri ve sistemin işletmesinde çalışanların işçilik bedelleri esas alınarak gazlaştırıcı işletme maliyeti hesaplanmıştır.

Sistemde çalışan vakum pompası motorunun enerji maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$EM_{vp} = KG_{vp} \cdot EB \quad (3.27)$$

Burada  $EM_{vp}$  (TL·h<sup>-1</sup>) vakum pompası saatlik enerji maliyeti,  $KG_{vp}$  (kW) vakum pompası kurulu gücü ve  $EB$  [TL·(kWh)<sup>-1</sup>] birim elektrik enerjisi maliyetidir.

Soğutma fanı motorunun enerji maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$EM_{sf} = KG_{sf} \cdot EB \quad (3.28)$$

Burada  $EM_{sf}$  (TL·h<sup>-1</sup>) soğutma fanı saatlik enerji maliyeti,  $KG_{sf}$  (kW) soğutma fanı kurulu gücü ve  $EB$  [TL·kWh<sup>-1</sup>] birim elektrik enerjisi maliyetidir.

Boşaltma helezonunun enerji maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$EM_{bh} = KG_{bh} \cdot EB \cdot k \quad (3.29)$$

Burada; Burada  $EM_{bh}$  (TL·h<sup>-1</sup>) boşaltma helezonu saatlik enerji maliyeti,  $KG_{bh}$  (kW) boşaltma helezonu kurulu gücü ve  $k$  kül boşaltma helezonun çalışma süresinin toplam çalışma süresine oranıdır.

Gazlaştırma ünitesinin çalıştırılmasında işçilik maliyeti aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

$$IM_g = n \cdot IB \quad (3.30)$$

Burada  $IM_g$  (TL·h<sup>-1</sup>) gazlaştırıcı saatlik toplam işçilik maliyeti,  $n$  işçi sayısı ve  $IB$  (TL·h<sup>-1</sup>) saatlik birim işçilik bedeli olarak verilmiştir.

Gazlaştırma işleminin saatlik maliyeti  $BIM_T$  (TL·h<sup>-1</sup>) olmak üzere aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$BIM_T = EM_{vp} + EM_{sf} + EM_{bh} + IM_g \quad (3.31)$$

Biyokütle yakıt hazırlama ve gazlaştırma işlemi saatlik maliyetlerinin toplamı  $TM$  (TL·h<sup>-1</sup>) aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır;



$$TM = YM_{bk} + BIM_T \quad (3.32)$$

Birim gaz maliyeti  $BGM$  aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$BGM = \frac{TM}{GFR} \quad (3.33)$$

Burada;  $GFR$  ( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) gazlaştırıcı ünitenin gaz üretim hızıdır.

Elde edilen sentez gazın birim enerji maliyeti; aşağıdaki bağıntıyla bulunmuştur;

$$GEM = \frac{3,6 \cdot BGM}{LHV_g} \quad (3.34)$$

Burada;  $GEM$  [ $\text{TL} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ ] birim gaz enerji maliyeti,  $LHV_g$  ( $\text{MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ) gazın alt ısı değeri,  $BGM$  ( $\text{TL} \cdot \text{Nm}^{-3}$ ) birim gaz maliyetidir.

### 3.2.22. Uygulanan istatistik yöntemleri

Testler sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi için SPSS Ver.18 istatistik paket programı kullanılmıştır. Araştırmada örnekler arasındaki farklılıkları belirlemek için tek yönlü Varyans Analizleri yapılmıştır. Önemli bulunan ortalamaların gruplandırılmaları %5 önem seviyesinde DUNCAN testiyle yapılmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Pelet Örneklerinin Kimyasal ve Fiziksel Analiz Sonuçları

Yöntemde belirtildiği gibi 5 farklı içerikte hazırlanmış olan peletlerin analiz sonuçları çizelgeler halinde verilmiştir.

Peletlerin nem içerikleri %7,01 ile %8,94 arasında değişmiştir. Kömür tozu katkılı peletlerde nem içeriklerinin biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu kömür tozunun nem içeriğinin biyokütlenin nem içeriğinden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kül miktarları da kömür tozu katkılı peletlerde biraz daha fazla olmuştur. Uçucu madde miktarı katkısız pelet (PRF) örneğinde daha yüksek bulunmuştur (Çizelge 4.1.). Pelet örneklerinin sabit karbon oranı yaş bazda %13,92 ile %15,91; kuru bazda %15,02 ile %17,36; karbon oranı %39,10 ile %40,16; hidrojen oranı %4,79 ile %5,05; azot oranı %1,24 ile %1,69; kükürt oranı %0,17 ile %0,32 ve oksijen oranı %32,32 ile %35,71 arasında değişmiştir (Çizelge 4.2.). Kimyasal analiz sonuçları daha önceki çalışmalarla uyumluluk göstermektedir (Jenkins ve ark.1998).

**Çizelge 4.1.** Pelet örneklerinin nem, kül ve uçucu madde içerikleri (% ağırlık)

Pelet Örnekleri	Nem	Kül		Uçucu Madde		C (Sabit Karbon)	
		Orijinal Baz	Kuru Baz	Orijinal Baz	Kuru Baz	Orijinal Baz	Kuru Baz
PRF	7,01	17,21	18,50	61,61	66,25	14,18	15,24
PVA3	7,38	17,62	19,02	61,09	65,96	13,92	15,02
PML5	6,84	17,03	18,27	61,18	65,66	14,97	16,06
PC5	8,94	17,86	19,61	58,38	64,11	14,83	16,29
PC15	8,39	19,16	20,91	56,55	61,73	15,91	17,36

**Çizelge 4.2.** Pelet örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (% ağırlık)

Pelet Örnekleri	C	H	N	S	O
PRF	39,90	4,89	1,24	0,20	35,27
PVA3	39,42	4,95	1,32	0,17	35,12
PML5	39,10	5,05	1,69	0,18	35,71
PC5	39,37	4,80	1,60	0,24	34,38
PC15	40,16	4,79	1,50	0,32	32,32

Pelet örneklerinde yapılan fiziksel analiz sonuçları Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Pelet örneklerinin alt ısıl değerleri kömür tozu katkılı peletlerde biraz fazla olsa da bir birine yakın değerler göstermiş ve  $12,45 \text{ MJkg}^{-1}$  ile  $12,93 \text{ MJkg}^{-1}$  arasında değişmiştir. Peletlerin alt ısıl değerleri daha önceki çalışmalarda belirtilen değerlerden daha düşük olmuştur. Jenkins ve ark. 1998, çeltik sapının ısıl değerinin  $15 \text{ MJkg}^{-1}$  civarında olduğunu belirtmişlerdir. Çeltik sapındaki silisyum oranından dolayı camlaşma olayını etkileyen en önemli parametre ilk deformasyon sıcaklığıdır (IDT). Bu değer  $948^\circ\text{C}$  ile  $1045^\circ\text{C}$  arasında olmuştur.

Peletlerin kül içerikleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Yalnızca çeltik sapının kullanıldığı pelet örneğinin kül içeriği daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Jenkins ve ark. 1998, kül içeriğindeki  $\text{SiO}_2$  oranının  $\%74,67$  olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada kül içeriğindeki  $\text{SiO}_2$  oranı  $\%65,9$  olarak belirtilen değerden daha düşük bulunmuştur. Diğer değerler önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

Peletlerin parça ve hacim yoğunluklarına ait sonuçlar da Çizelge 4.5.'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Pelet örneklerinin fiziksel analiz sonuçları

Pelet Örnekleri	Alt ısıl Değeri, (LHV <sub>b</sub> ) (MJ·kg <sup>-1</sup> )	İlk Deformasyon Sıcaklığı (IDT) (°C)	Yumuşama Sıcaklığı (ST) (°C)	Yarıküre Sıcaklığı (HT) (°C)	Erime Sıcaklığı (FT) (°C)
PRF	12,77	1045	1239	1436	1436<FT<1500
PVA3	12,71	951	1066	1305	1305<FT<1500
PML5	12,78	944	1078	1275	1275<FT<1500
PC5	12,45	971	1109	1284	1284<FT<1500
PC15	12,93	1018	1127	1262	1262<FT<1500

**Çizelge 4.4.** Pelet örneklerinin kül içerik analiz sonuçları (% ağırlık)

Pelet Örnekleri	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>
PRF	0,9	12,7	4,2	65,9
PVA3	1,4	11,6	3,9	63,8
PML5	1,5	12,1	4,1	63,6
PC5	3,2	10,8	3,3	59,6
PC15	5,3	9,5	3,2	65,8

**Çizelge 4.5.** Peletlerin hacim ve parça yoğunluk, çap, uzunluk ve ağırlık değerleri

Pelet	Pelet Hacim Yoğunluğu (kg·m <sup>-3</sup> )	Pelet Parça Yoğunluğu (kg·m <sup>-3</sup> )	Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Birim Pelet Ağırlığı (g)
PRF	562,326	1226,42	6,16	53,61	1,95
PVA3	606,013	1236,01	6,08	55,69	2,00
PML5	559,769	1326,67	6,07	56,67	2,17
PC5	494,569	1176,46	6,03	52,80	1,90
PC15	555,070	1284,17	6,12	51,47	1,94

#### 4.2. Stokiyometrik Hava Miktarları

Hava fazlalık katsayısının (ER) hesaplanması için gerekli olan bu değerler, her bir pelet örneğinde hesaplanarak Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Örneklerin stokiyometrik hava miktarlarının birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.6.** Stokiyometrik hava miktarları

Pelet Örnekleri	SR (kg-hava/kg-biyokütle)	SR <sub>v</sub> [25°C] (m <sup>3</sup> -hava/kg-biyokütle)
PRF	3,856	3,257
PVA3	3,809	3,217
PML5	3,822	3,228
PC5	3,761	3,176
PC15	3,839	3,242

#### 4.3. Hava debilerinin tespiti

Her iki hava giriş şeklinde de sisteme verilen hava kademeli olarak değiştirilerek verilen ortalama hava debisine karşılık hava fazlalık katsayıları hesaplanmıştır. Çizelge 4.7.'de, denemeler için seçilen hava fazlalık katsayıları ve karşılık gelen ortalama hava debileri verilmiştir. Bu denemelerde referans pelet kullanılmış ve stokiyometrik hava miktarı olarak 3,257 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> alınmıştır.

**Çizelge 4.7.** Hava fazlalık katsayıları ve ortalama hava debileri

ER	Nozullardan hava girişi AFR (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Üstten hava girişi AFR (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )
0,15	10,0	11
0,20	13,5	14
0,25	15,5	17
0,30	19,0	20
0,35	21,3	23

#### 4.4. Reaksiyon sıcaklığının gazlaştırma işlemi üzerindeki etkisi

Reaksiyon sıcaklığının gazlaşma üzerindeki etkisini tespit etmek ve çalışma aralığını tespit etmek amacıyla yapılan testlerde otomasyon sistemi üzerinden hava giriş debisini değiştirerek elde edilen sıcaklıklar ve gazlaştırma sırasında reaktör içerisinde kor bölgesinde gelişen olaylar izlenmiştir. Denemelerde katkısız referans pelet (PRF) kullanılmıştır.

Öncelikle üst hava girişi tamamen kapatılarak reaktöre sadece nozullardan hava girişine izin verilmiş ve reaktör yüksekliği boyunca Çizelge 4.8.'de verilen ortalama sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.

Sadece üstten hava verilerek yapılan denemelerde elde edilen sıcaklık değerleri de Çizelge 4.9.'de verilmiştir.

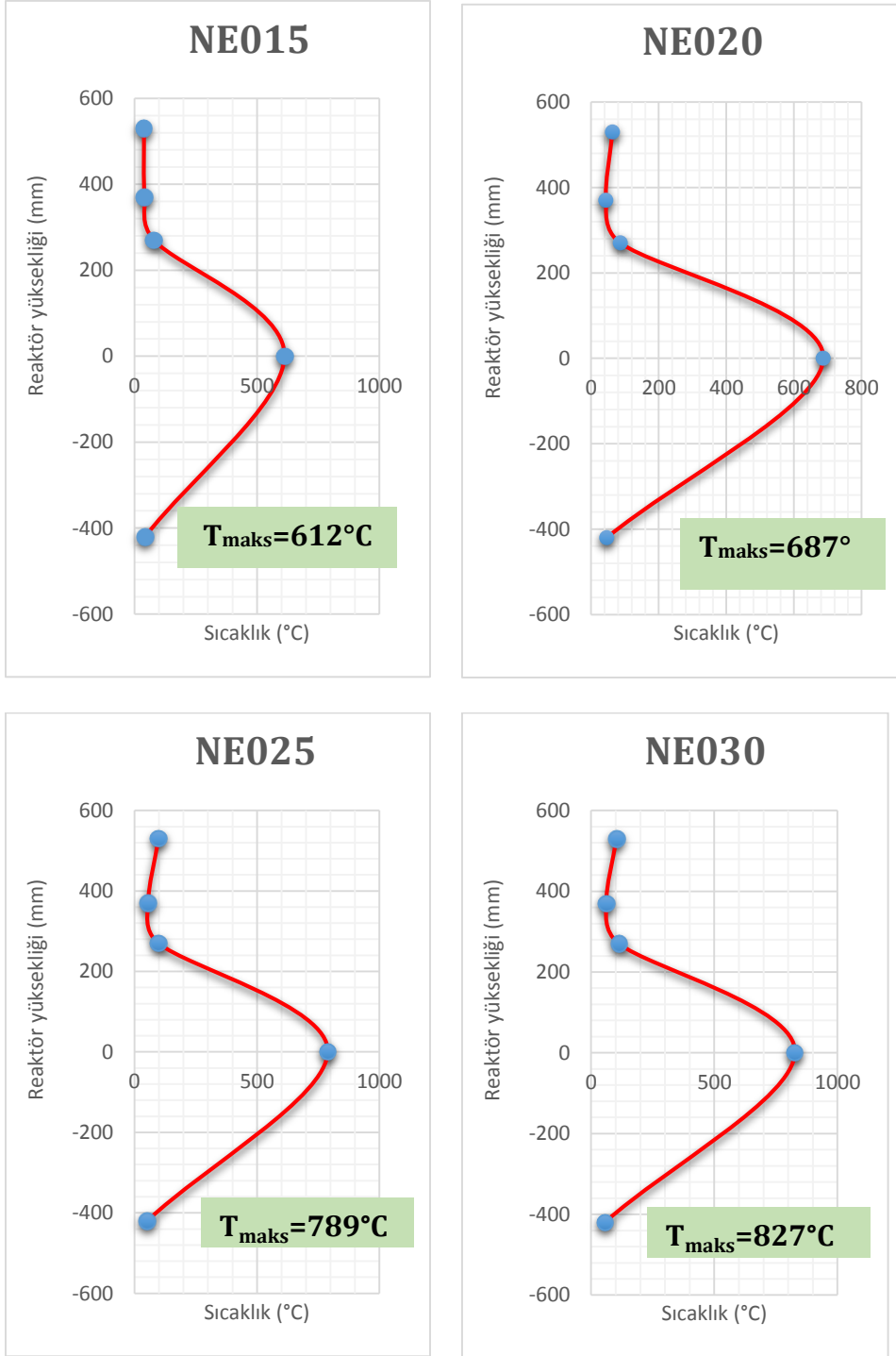
**Çizelge 4.8.** Nozullardan hava girişlerinde elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları

	NE015	NE020	NE025	NE030	NE035
T1 (°C)	38	63	98	103	105
T2 (°C)	41	44	56	62	65
T3 (°C)	79	87	98	113	132
T4 (°C)	612	687	789	827	857
T5 (°C)	43	46	52	56	66

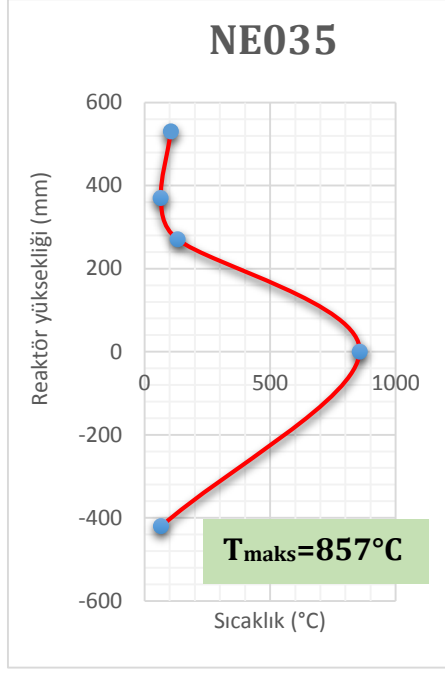
**Çizelge 4.9.** Üstten hava girişlerinde elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları

	ÜE015	ÜE020	ÜE025	ÜE030	ÜE035
T1 (°C)	40	41	45	48	52
T2 (°C)	43	44	46	50	55
T3 (°C)	69	73	81	97	109
T4 (°C)	695	705	727	735	756
T5 (°C)	65	66	64	62	72

Nozullardan hava girişine ait reaktör yüksekliği boyunca sıcaklık dağılımlarının grafikleri (ER=0,15-0,20-0,25-0,30 için sırasıyla NE015-NE020-NE025-NE030 koduyla) Şekil 4.1.'de verilmiştir. Reaktör yüksekliği için reaktör ana gövdesi alt kısmı (ızgara seviyesi) “sıfır” olarak düşünülmüştür.



Şekil 4. 1. ER=0,15-0,20-0,25-0,30 için nozullardan hava girişinde sıcaklık dağılımı

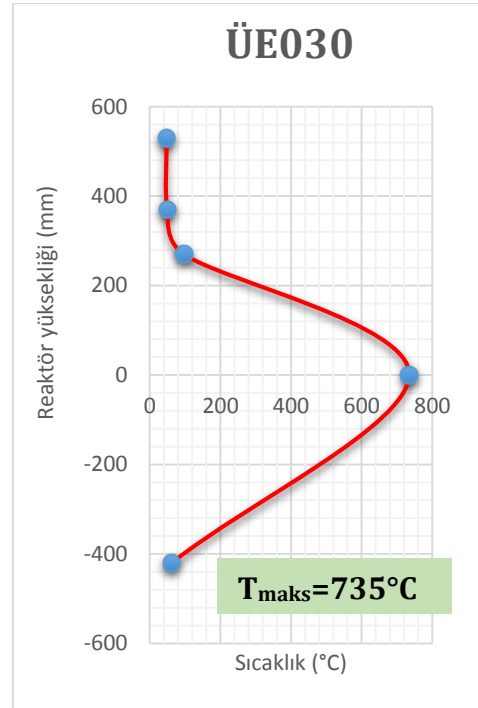
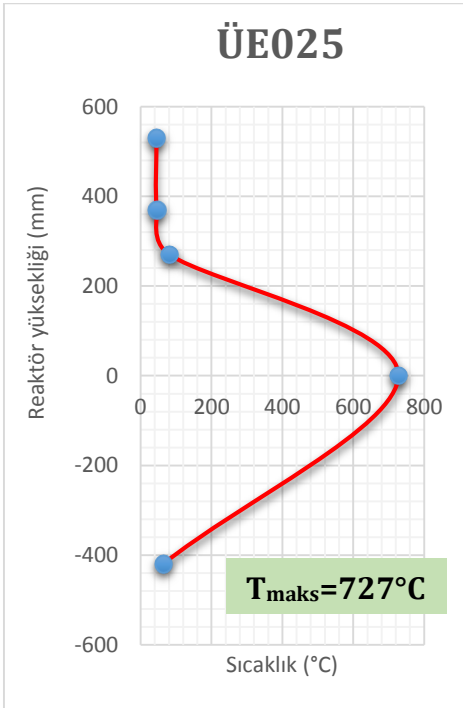
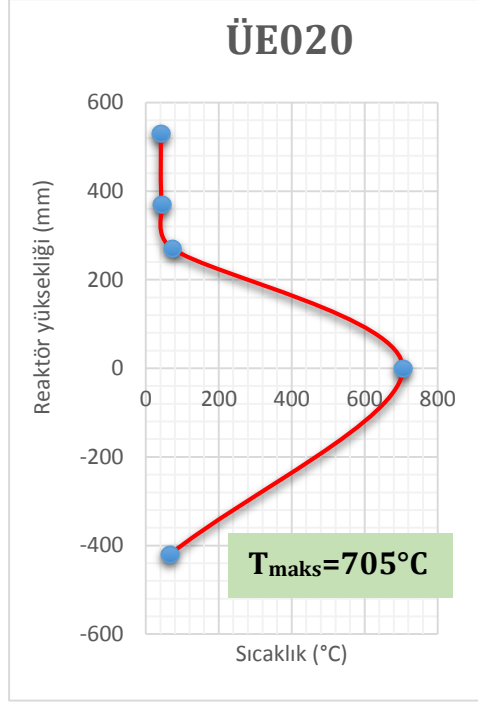
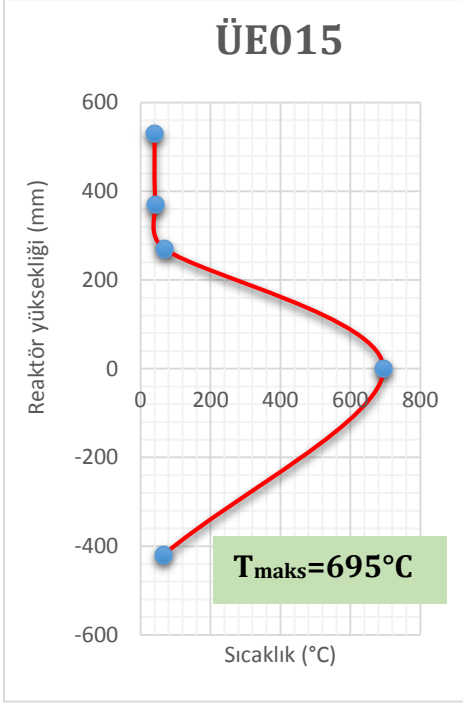


**Şekil 4. 2.** ER=0,35 için nozullardan hava girişinde sıcaklık dağılımı

Her hava fazlalık katsayısı için reaktör içi maksimum sıcaklık  $T_4$  sıcaklığı olarak görülmektedir ve ER değerinin artışıyla en çok etkilenen sıcaklık yine  $T_4$  olmuştur. Bunu  $T_3$  deki değişim takip etmiştir.  $T_2$  ve  $T_5$  değerleri ER değişiminden en az etkilenen değerler olarak görülmektedir. Burada dikkat çekici olan bir husus  $T_1$  değerinin kor bölgesinden en uzakta olmasına rağmen  $T_2$  ve  $T_5$ 'den daha fazla etkilenmiş olmasıdır. Bunun sebebi olarak, karıştırıcının bıçaklarının nozul bölgesinde olmasından dolayı buradaki ısıyı ısı köprüsü oluşturarak üst kapağa iletmesi ve biyokütle yatağı üzerindeki havayı ısıtması olduğu düşünülmüştür.

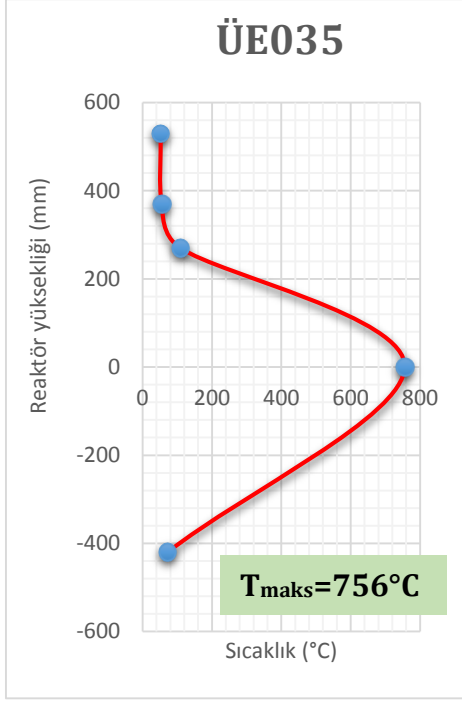
Ayrıca reaktör içi maksimum sıcaklık  $800^{\circ}C$ 'nin üzerine çıktığında (NE030 ve NE035) aglomerasyon belirgin şekilde artmış ve camsı yapı oluşumları gözlemlenmiştir. Nozullardan hava girişi denemelerinde ER035'den daha yüksek hava oranlarında yapılan denemeler camlaşma nedeniyle malzeme akışının bloklanması nedeniyle başarısız olmuştur.

Üstten hava girişine ait reaktör yüksekliği boyunca sıcaklık dağılımlarının grafikleri (ER=0,15-0,20-0,25-0,30 için sırasıyla ÜE015-ÜE020-ÜE025-ÜE030 koduyla) Şekil 4.3.'de ve ER=0,35 için ÜE035 koduyla Şekil 4.4.'te verilmiştir.



**Şekil 4. 3.** ER=0,15-0,20-0,25-0,30 için üstten hava girişinde sıcaklık dağılımı





**Şekil 4. 4.** ER=0,35 için üstten hava girişinde sıcaklık dağılımı

Üstten hava girişinde ER değerindeki artışla beraber sıcaklıkların genelinde bir artış görülmüştür. Nozullardan hava girişinde de bu durum benzerlik göstermektedir ancak maksimum sıcaklıklar daha düşük seyretmiştir. ER değerindeki artış burada da yine en fazla  $T_4$  değerini etkilemiştir. Bunu  $T_3$  ve arkasından  $T_5$  takip etmiştir.  $T_1$  ve  $T_2$  değerleri ise artıştan çok az etkilenmişlerdir. Özellikle  $T_1$  nozullardan giriş şeklinde elde edilen  $T_1$  değerlerine göre belirgin bir şekilde düşüktür. Bu durum, olarak karıştırıcı milinin kor bölgesinden alarak üst kapak bölgesine ilettiği ısının burada taze hava girişiyle soğuduğu ve  $T_1$  sıcaklığını daha aşağı seviyelere çektiği şeklinde yorumlanmıştır.

Üstten hava girişiyle yapılan bu denemelerde sıcaklıkların en fazla ER=0,35 değerinde elde edilmiş ( $T_4=756^\circ\text{C}$ ) ve sistemin çalışmasını engelleyecek bir camlaşma görülmemiştir.

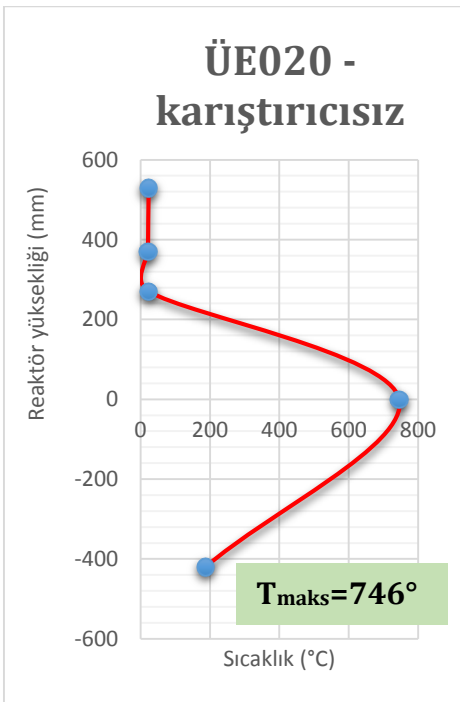
Karıştırıcıyı sistemden ayırarak yapılan bir diğer denemede ise Çizelge 4.10.'da verilen sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bu değerler de Şekil 4.5.'te grafik olarak verilmiştir.

Karıştırıcının reaktörden ayrılması reaktördeki genel sıcaklık değerlerini ÜE020 ile verilen değerlerden daha aşağılara çekmiş, özellikle  $T_1$  ve  $T_2$  oldukça düşük olmuştur. Deney dış ortam sıcaklığının yaklaşık  $15^\circ\text{C}$  civarında olduğu bir durumda yapılmıştır. Maksimum sıcaklık,  $746^\circ\text{C}$  olarak yine  $T_4$ 'te okunmuştur. Burada dikkat çekici olan durum  $T_5$  değerinin  $187^\circ\text{C}$  olmasıdır. Bu diğer denemelerdeki  $T_5$  değerlerinden daha yüksektir. Bunun nedeninin,

karıştırıcının olmaması sebebiyle reaktör içerisindeki ısının üst kısımlara iletilmeden aşağılara kül yatağı bölgesine kayması olduğu düşünülmektedir.

**Çizelge 4.10.** ER=0,20 için üstten hava girişiyle elde edilen ortalama sıcaklık dağılımları (karıştırıcısız)

	ÜE020 - karıştırıcısız
T1 (°C)	23
T2 (°C)	21
T3 (°C)	23
T4 (°C)	746
T5 (°C)	187



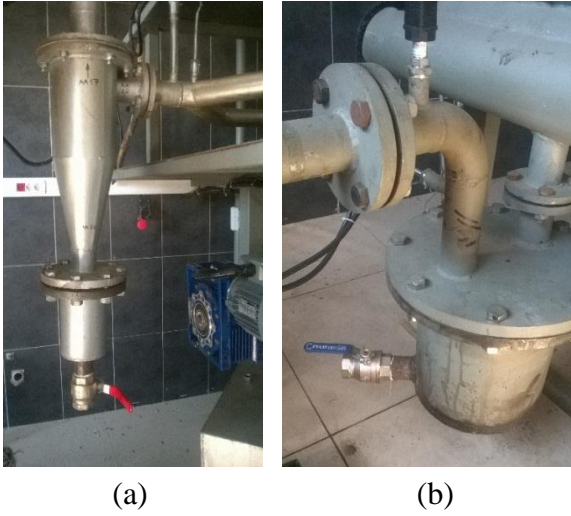
**Şekil 4. 5.** ER=0,20 için üstten hava girişiyle karıştırıcısız elde edilen sıcaklık dağılımı

Gazlaştırıcının ilk çalıştırılması sırasında sistemin, özellikle de refrakterin ısınarak rejime girmesine kadar geçen süre zarfında elde edilen sentez gazı sürekli ve düzgün bir yanma gösterememektedir. Ayrıca, sistemdeki hava ve biyokütlenin içerdiği nem soğuk bölgelerde yoğunlaşarak birikmektedir. Yoğuşma özellikle gaz hızının azaldığı bölgelerde ve reaktörden uzaklaştıkça gerçekleşmektedir. Siklon altında ve soğutucu yoğuşma haznesinde birer adet tahliye vanası bulunmaktadır. Yoğuşan nem bu iki noktadan tahliye edilmektedir (Şekil 4.6.). Ayrıca bu noktalardan alınan suyun kirliliği gazdaki katran durumu hakkında da fikir

vermektedir. Düşük sıcaklıklarda uzun süreler çalışılması durumunda sistem elemanları oldukça kirlenmekte ve temizlikleri de zor olmaktadır (Şekil 4.7.).

Kor bölgesi sıcaklığı  $T_4$ , genel olarak  $700^{\circ}\text{C}$  civarında seyretme eğilimindedir. Bu sıcaklık düzeyi yakalanmadan yapılan yüklemelerde sürekli yanan düzgün bir gaz debisi elde etmek daha gecikmektedir. Bu yüzden denemelerden önce sistem ön denemeler yapılarak ısıtılmış bunun için de  $T_4$  seviyesinin en az  $600^{\circ}\text{C}$  civarında olması denemeler sırasında referans alınmıştır.

Düşük sıcaklıklarda yapılan gazlaştırma işleminde katran miktarının fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kor bölgesinde sıcaklık arttıkça katran azalmakta ancak  $800^{\circ}\text{C}$ 'den sonra peletler içerisinde bulunan silisyumun eriyerek camlaşma olayına neden olmaya başladığı saptanmıştır (Şekil 4.8.). Rasvanshi (1986) gazlaştırma için  $850^{\circ}\text{C}$  üzerindeki sıcaklıkları işaret etmektedir, ancak çeltik sapı peletleri için bu değerin fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 6. (a) Siklon yoğuşma tahliye vanası, (b) soğutucu yoğuşma tahliye vanası



Şekil 4. 7. Düşük sıcaklıklarda yoğuşma ve katran oluşumunun sistem elemanları üzerinde yarattığı kirlilik



Şekil 4. 8. Deney sonunda içinde camsı yapı görülen aglomerasyon (topaklaşma) oluşumu

Çeltik sapının yapısındaki  $K_2O$  gibi alkaliler  $SiO_2$  bağlarını kırarak 700-800°C sıcaklıklarda ergiyen ötektik yapılar oluşturmaktadır (Wang ve ark. 2007). Bu ötektik yapılar ergidiklerinde çeltik sapının içeriğindeki karbon dönüşümünü kısıtlamakta, aglomerasyona neden olmaktadır (Rozainee ve ark. 2008). 800°C'nin üzerinde aglomerasyonun arttığı ve malzeme akışını engelleyecek, yanmayı ve hava akışını dengesizleştirecek köprüler oluşturduğu görülmüş hatta 900°C'ye yaklaştıkça oluşan camsı yapıların hava ve malzeme akışını bloke edebildiği tespit edilmiştir (Şekil 4.9.).

Testler sonucunda elde edilen bulgulara göre, önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi kor bölgesinde reaksiyon sıcaklığının 800°C civarında tutulması gerektiği görülmüştür. Bunun üstüne çıkıldığında gazlaştırma işlemi riske girmektedir.



Şekil 4. 9. Reaktör içinde bloklanma

#### 4.5. Hava fazlalık katsayısı (ER) ve giriş şeklinin gazlaştırmaya etkisi

Üstten ve nozullardan yapılan her iki hava giriş şekliyle de sisteme verilen hava oranı kademeli olarak arttırılmıştır. Denemelerde referans pelet kullanılmıştır ve hesaplanan hava fazlalık katsayıları (ER)  $\pm 0,02$  hassasiyetle ele alınmıştır. Yapılan denemelerde ölçülen biyokütle tüketim hızları (FCR) ve ölçülen sentez gaz debileri (GFR) ile hesaplanan özgül gazlaştırma hızları (SGR), özgül gaz üretim hızları (SGPR) ve birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarları ( $GM_b$ ) Çizelge 4.11.'de verilmiştir.

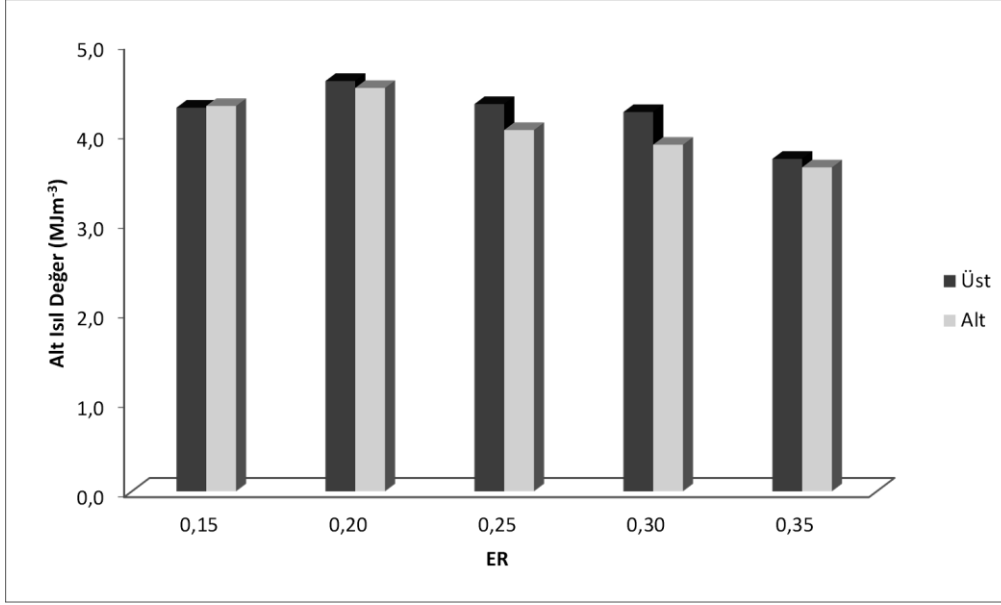
**Çizelge 4.11.** Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre ölçülen FCR, GFR ve hesaplanan SGR, SGPR ve  $GM_b$  değerleri

Hava giriş yönü	ER	FCR ( $kg\ h^{-1}$ )	GFR ( $Nm^3\ h^{-1}$ )	SGR ( $kg\ h^{-1}\ m^{-2}$ )	SGPR ( $Nm^3\ h^{-1}\ m^{-2}$ )	$GM_b$ ( $Nm^3\ kg^{-1}$ )
Üstten	0,15	19,5	35,1	202,3	364,8	1,80
	0,20	19,8	36,1	206,1	375,4	1,82
	0,25	20,5	38,7	213,1	402,1	1,89
	0,30	21,4	40,4	222,2	419,4	1,89
	0,35	21,7	44,9	225,4	466,3	2,07
Altan (Nozul)	0,15	18,3	31,9	189,9	331,9	1,75
	0,20	18,8	33,5	195,8	347,9	1,78
	0,25	18,9	36,7	196,4	381,9	1,94
	0,30	19,9	39,6	206,4	411,6	1,99
	0,35	20,1	42,8	209,0	444,5	2,13

Beş farklı hava fazlalık katsayısı (ER) ve iki farklı hava giriş yöntemiyle yapılan gazlaştırma işlemlerinde elde edilen sentez gazların kimyasal analiz sonuçları ve hesaplanan alt ısıl değerleri Çizelge 4.12.'de, hava giriş yönüne bağlı olarak ısıl değerlerin grafiği Şekil 4.10.'da verilmiştir. Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi her iki hava girişi yönünde de ER=0,20 değerinde ısıl değerler diğerlerine nispeten daha yüksek olmuştur.

**Çizelge 4.12.** Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre elde edilen gazların analiz sonuçları

Hava Giriş Yönü	ER	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	CH <sub>4</sub> (%)	CO (%)	Alt Isıl Değeri, $LHV_g$ ( $MJ.Nm^{-3}$ )
Üstten	0,15	13,50	17,14	53,10	1,65	14,61	4,287
	0,20	15,67	18,25	50,24	2,65	13,18	4,585
	0,25	15,91	14,00	52,77	2,71	14,61	4,327
	0,30	15,84	13,25	54,02	2,91	13,98	4,238
	0,35	19,56	9,20	55,70	3,28	12,27	3,715
Altan (Nozul)	0,15	12,75	16,32	53,89	1,69	15,35	4,306
	0,20	12,91	15,19	53,25	2,20	16,45	4,507
	0,25	10,66	13,66	57,52	1,15	17,02	4,037
	0,30	10,41	12,61	58,76	0,91	17,31	3,873
	0,35	10,59	11,54	60,50	0,78	16,60	3,620



**Şekil 4. 10.** Hava giriş yönü ve fazlalık katsayısına göre elde edilen gazların alt ısıl değerleri

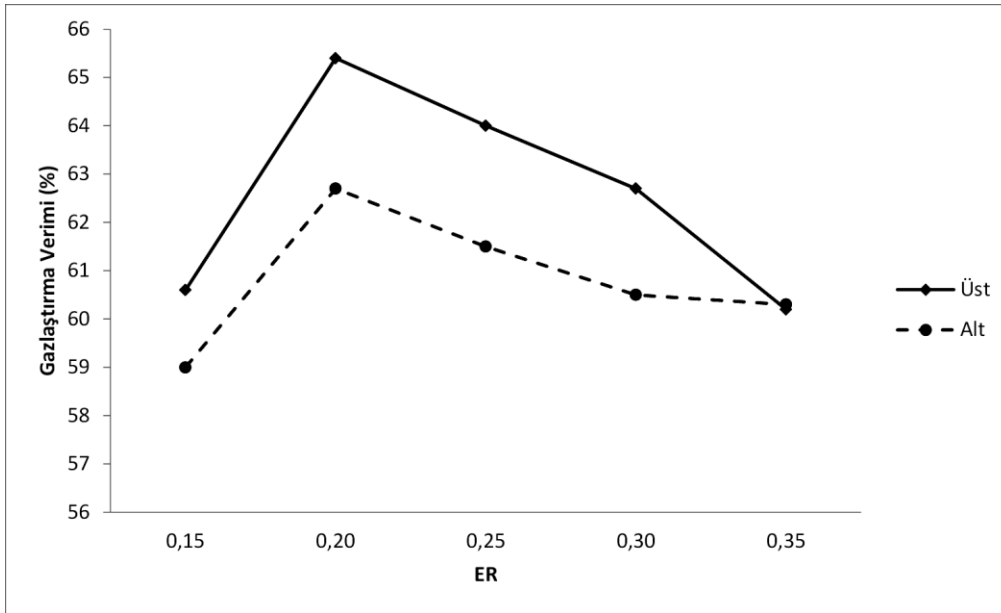
Genel olarak üstten hava girişinde elde edilen gazların ısıl değerleri daha yüksek olmuştur. Ancak, ısıl değerlerin biyokütle besleme ve gaz çıkış oranına bağlı olarak verim üzerindeki etkisi olduğundan, bu farklılıkların istatistiki olarak varyans analizleri ile karşılaştırılmaları gazlaştırma verimleri üzerinden yapılmıştır.

Gazlaştırma işleminin hava fazlalık katsayısı (ER) ve hava giriş yönüne bağlı olarak elde edilen gazlaştırma verimleri Çizelge 4.13. ve Şekil 4.11.'de verilmiştir. Şekil 4.11.'de hava fazlalık katsayısına bağlı olarak ER=0,20 civarında gazlaştırma veriminin pik yaptığı ve daha sonra azalmaya başladığı saptanmıştır.

Sheth ve Babu (2009), odun atıklarının gazlaştırılması için yaptıkları çalışmada, aşağı akışlı gazlaştırıcılarda optimum hava fazlalık katsayısının ER=0,205 civarında olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da bu değere yakın bir değerde en yüksek gazlaştırma verimi elde edilmiştir.

**Çizelge 4.13.** Hava fazlalık katsayısı (ER) ve hava giriş şekline göre gazlaştırma verimleri

ER	Hava Giriş Yönü					
	Üstten			Alttan (Nozul)		
	P <sub>b</sub> (kW)	P <sub>g</sub> (kW)	η <sub>g</sub> (%)	P <sub>b</sub> (kW)	P <sub>g</sub> (kW)	η <sub>g</sub> (%)
0,15	69,0	41,8	60,6	64,8	38,2	59,0
0,20	70,3	46,0	65,4	66,8	41,9	62,7
0,25	72,7	46,5	64,0	67,0	41,2	61,5
0,30	75,8	47,5	62,7	70,4	42,6	60,5
0,35	76,9	46,3	60,2	71,3	43,0	60,3
Ortalama	72,9	45,7	62,6	68,1	41,4	60,8



**Şekil 4. 11.** Hava fazlalık katsayısı (ER) ve hava giriş şekline bağlı olarak gazlaştırma verimleri

Üstten hava girişinde gazlaştırma verimi ortalaması %62,573; nozullardan hava girişinde %60,787 olmuştur. Yapılan tek yönlü varyans analizinde (Çizelge 4.14.) hava giriş şeklinin gazlaştırma verimi üzerindeki etkisi önemli bulunmuştur ( $F=6,700^*$ ;  $p<0.05$ ). Varyans analizi sonucuna göre gazlaştırma işleminde üstten hava girişi daha olumlu sonuç vermektedir. Bu sonuçlara göre çeltik peletlerinin boğazsız tip reaktörle gazlaştırılmasında üstten hava girişinin kullanılmasının uygun olacağını söylemek mümkündür.

Üstten hava girişi yöntemiyle yapılan gazlaştırmalarda reaktör yüksekliği boyunca hava taşınımının daha üniform olması ve akışın reaktörün tüm kesiti içerisinde akmasından dolayı akış hızı düşüktür. Nozullardan hava girişi yapıldığında ise dar kesitlerden yüksek hızlarda



reaktöre akan hava sebebiyle hareketli oksijeni doğrudan gören sıcak kor bölgesinin yakıtı camlaşmaya çok daha meyilli hale getirdiği tespit edilmiştir. Oksijenli ortamı doğrudan gören kor halindeki peletlerin çok kısa sürede camsı yapılar oluşturdukları gözlenmiştir. Yalçın ve Sevinç (2000), Trakya Bölgesi çeltik kavuzu için silika içeriğinin sıcaklıkla arttığını, en yüksek silika içeriğinin de hareketli oksijen ortamında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Yürütülen çalışma, bu tespiti doğrular niteliktedir.

**Çizelge 4.14.** Hava giriş şeklinin gazlaştırma verimine etkisinin Tek Yönlü “Varyans Analiz Tablosu” (VAT)

KAYNAK	KT	SD	KO	F	p
Gruplar arası	23,941	1	23,941	6,700*	,015
Gruplar içi	100,047	28	3,573		
Toplam	123,988	29			

Hava fazlalık katsayısının (ER) gazlaştırma verimine etkisini belirlemek amacıyla, 3 tekrarlı yapılan tüm gazlaştırma denemeleri tek yönlü varyans analizine tabi tutulmuştur. Ortalamaların farkları Duncan aralık testiyle belirlenmiştir. Yapılan varyans analizi sonucunda (Çizelge 4.15.) hava fazlalık katsayısının (ER) gazlaştırma verimi üzerindeki etkisi önemli bulunmuştur ( $F=14,011^{**}$ ;  $p<0,05$ ). Duncan testi sonucunda ortalamaların 5 grupta toplandığı görülmüştür (Çizelge 4.16.). En düşük gazlaştırma verimi %58,967 değeri ile 0,15 hava fazlalık katsayısıyla nozuldan hava girişinde (NE015) elde edilmiştir. Bunu %60,167 değeri ile üstten hava girişinde 0,35 hava fazlalık katsayısındaki gazlaştırma işlemi (ÜE035) takip etmiştir. En yüksek gazlaştırma verimi ise %65,4 değeri ile 0,20 hava fazlalık katsayısıyla üstten hava girişinde (ÜE020) elde edilmiştir. 0,25 hava fazlalık katsayısıyla üstten hava girişiyle yapılan gazlaştırma işlemi (ÜE025) %64,0 ile bu değeri izleyen ikinci en yüksek verim değeri olmuştur.

Yapılan istatistikî analizlerin sonucuna göre en iyi sonuç 0,20 hava fazlalık katsayısı ile üstten hava girişinin olduğu (ÜE020) gazlaştırma işleminde elde edilmiştir. Bu değerden sonra gazlaştırma verimlerinin düşmeye başladığı gözlemlenmiştir.

Pathak (1985) ve Bhatnagar (1990) da yaptıkları çalışmalarda, çeltik kavuzunun boğazlı tip gazlaştırıcılarda malzeme akışı problemlerinden dolayı yakıt olarak uygun olmadığını belirtmişlerdir. Çeltik sapı peletleri için de boğazsız gazlaştırıcı kullanılması sıcaklık ve hava oranları kontrol edilerek camlaşma sebebiyle köprüleme veya bloklanma gibi problemler yaşanmadığı sürece malzeme akışı açısından sorun yaratmamıştır.

**Çizelge 4.15.** Hava fazlalık katsayısının gazlaştırma verimine etkisinin “Tek Yönlü Varyans Analiz Tablosu” (VAT)

KAYNAK	KT	SD	KO	F	p
Gruplar arası	107,015	9	11,891	14,011**	0,000
Gruplar içi	16,973	20	0,849		
Toplam	123,988	29			

**Çizelge 4.16.** Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak çoklu karşılaştırma (Duncan) testi sonuçları

ER	N	Grup Sayısı (p<0.05)				
		1	2	3	4	5
NE015	3	58,967				
ÜE035	3	60,167	60,167			
NE035	3	60,300	60,300			
NE030	3	60,467	60,467			
ÜE015	3	60,567	60,567			
NE25	3		61,500	61,500		
NE20	3			62,700	62,700	
ÜE30	3			62,733	62,733	
ÜE25	3				64,000	64,000
ÜE20	3					65,400

#### 4.6. Karıştırma işleminin gazlaştırmaya etkisi

Gazlaştırma esnasında reaktör içindeki karıştırma işleminin gazlaştırmaya etkisini saptamak için 5, 10 ve 15 dakikada bir karıştırma işlemi uygulanan üç farklı yöntem denenmiştir. Ancak, özellikle karıştırma işleminin daha kısa aralıklarla yapıldığı 5 ve 10 dakika aralıklarda kor bölgesinde karıştırıcının kanatları etrafında kor köprüleri oluşmuş ve materyalin aşağı akmasına engel olmuştur. Bu nedenle deneme yarıda kesilmiştir. 15 dakika aralıklarla karıştırma işleminde diğerlerine göre fazla olmasa da buna benzer sorunlar yaşanmıştır. Materyalin özelliğinden kaynaklanan bu sorun nedeniyle çeltik peletlerinin gazlaştırılması işleminde karıştırma işleminin teknik olarak uygun olmadığı kanaatine varılmıştır. Ayrıca karıştırıcı milinin kor bölgesinden üst kısımlara doğru ısı köprüsü oluşturması dengesiz yanmalara sebep vermiştir.

#### 4.7. Pelet örneklerinin gazlaştırma performansları

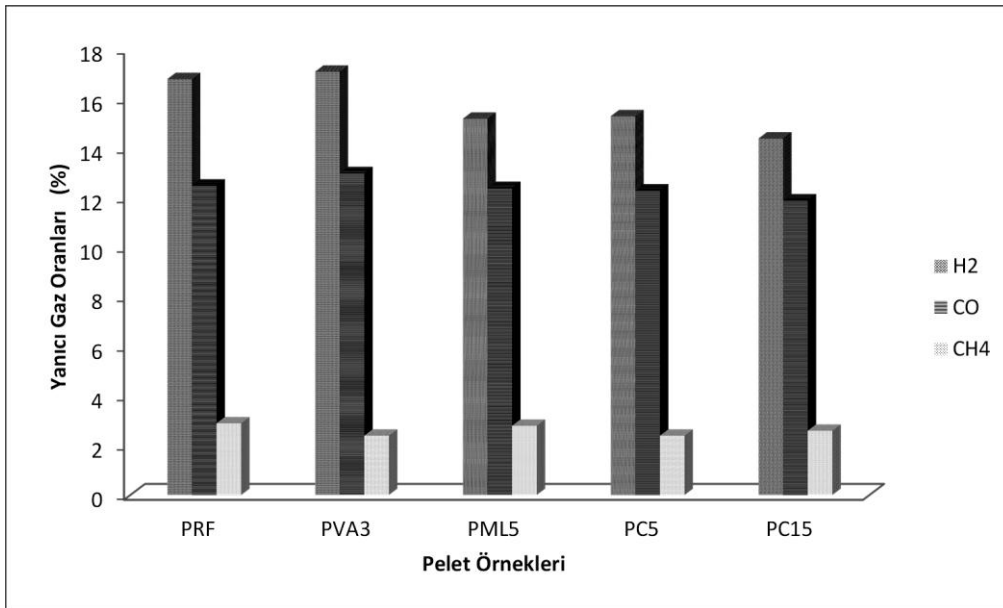
Yapılan gazlaştırma denemeleri ve istatistiksel analizler sonucunda en uygun hava fazlalık katsayısı olan 0,20 değerinde, karıştırma olmadan üstten hava verilerek yapılan gazlaştırma

işleminde en yüksek verim elde edilmiştir. Bu nedenle bütün pelet örnekleri belirtilen koşullarda gazlaştırılarak, gazlaştırma performansları saptanmıştır. Elde edilen sentez gazların kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.17.'de verilmiştir. Ayrıca, sentez gaz içindeki yanabilen gazların oranları Şekil 4.12.'de verilmiştir. Sentez gaz içerisinde en yüksek oranda hidrojen ( $H_2$ ) bulunurken, bunu karbon monoksit ( $CO$ ) ve metan ( $CH_4$ ) gazları izlemiştir.

En yüksek ısıl değer  $4,430 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$  ile yalnızca çeltik sapı kullanılan (PRF) peletlerle, en düşük ısıl değer  $3,899 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$  ile %15 kömür tozunun kullanıldığı (PC15) peletlerle yapılan gazlaştırma işleminde elde edilmiştir.

**Çizelge 4.17.** Pelet örneklerinin gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazların kimyasal analiz sonuçları

Pelet Örnekleri	$CO_2$ (%)	$H_2$ (%)	$N_2$ (%)	$CH_4$ (%)	$CO$ (%)	Alt Isıl Değeri, $LHV_g$ ( $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ )
PRF	15,5	16,8	52,3	2,9	12,5	4,430
PVA3	15,7	17,1	51,8	2,4	13,0	4,348
PML5	15,8	15,2	53,8	2,8	12,4	4,210
PC5	16,5	15,3	53,5	2,4	12,3	4,065
PC15	16,2	14,4	54,9	2,6	11,9	3,989



**Şekil 4. 12.** Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazların yanıcı gaz yüzdeleri

Elde edilen ısı değerlerinin ortalamaları tek yönlü varyans analizi ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.18.). Analiz sonuçlarına göre 5 farklı tip peletle elde edilen gazların ısı değerleri arasında istatistik olarak önemli farklar olduğu gözlenmiştir ( $F=22,559^{***}$ ;  $p<0,05$ ). Yapılan aralık testinde (Duncan) en yüksek ısı değere sahip PRF ve PVA3 pelet karışımlarından elde edilen sentez gazları aynı gruba, en düşük ısı değere sahip PC15 ve PC5 peletler de aynı gruba girmiştir. PML5 pelet örneği bu iki gruptan ayrı tek başına bir gruba girmiştir (Çizelge 4.19.).

**Çizelge 4.18.** Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazının ısı değerlerinin Tek Yönlü “Varyans Analizi Tablosu” (VAT)

KAYNAK	KT	SD	KO	F	p
Gruplar arası	0,412	4	0,103	22,559***	0,000
Gruplar içi	0,046	10	0,005		
Toplam	0,458	14			

**Çizelge 4.19.** Sentez gaz ısı değerlerinin Duncan aralık testi sonucu

PELET	N	Grup Sayısı		
		1	2	3
PC15	3	3,989		
PC5	3	4,065		
PML5	3		4,210	
PVA3	3			4,348
PRF	3			4,430

Pelet örneklerinin gazlaştırma esnasında biyokütle besleme (FCR), özgül gazlaştırma hızı (SGR), gaz üretim ve özgül gaz üretim hızları ile birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarları ( $GM_b$ ) Çizelge 4.20.’de verilmiştir. Birim biyokütlenin ürettiği gaz miktarı bakımından %15 kömür tozu katkılı (PC15) pelet  $1,93 \text{ Nm}^3\text{kg}^{-1}$  değeri ile ilk sırada yer almıştır. Katkısız (PRF) ve %3 PVA katkılı (PVA3) pelet  $1,78 \text{ Nm}^3\text{kg}^{-1}$  ile en az gaz üreten peletler olmuştur.

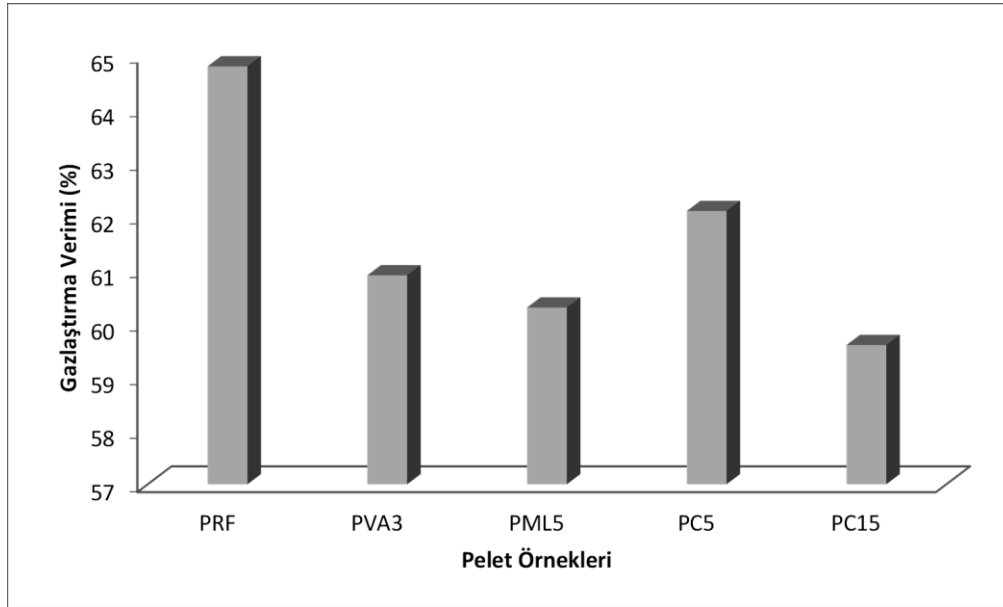
**Çizelge 4.20.** Gazlaştırma esnasında biyokütle besleme ve gaz çıkış oranları

Pelet Örnekleri	FCR ( $\text{kg h}^{-1}$ )	SGR ( $\text{kg h}^{-1}\text{m}^{-2}$ )	GFR ( $\text{Nm}^3\text{h}^{-1}$ )	SGPR ( $\text{Nm}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$ )	$GM_b$ ( $\text{Nm}^3\text{kg}^{-1}$ )
PRF	20,4	204,8	35,1	364,8	1,78
PVA3	19,2	199,6	34,2	355,5	1,78
PML5	20,4	212,0	37,4	388,7	1,83
PC5	19,1	198,5	36,4	378,3	1,90
PC15	20,0	207,9	38,5	400,2	1,93

Peletlerin gazlaşma verimleri Çizelge 4.21.'de verilmiştir. En yüksek gazlaştırma verimi katkısız pelet (PRF) örneklerinde %64,8 değeri ile elde edilmiştir. En düşük gazlaştırma verimi %59,6 ile %15 kömür karışımında olmuştur.

**Çizelge 4.21.** Pelet örneklerinden elde edilen sentez gazın gazlaştırma verimleri

Pelet Örnekleri	$P_m$ (kW)	$P_g$ (kW)	$\eta_g$ (%)
PRF	66,7	43,2	64,8
PVA3	67,8	41,3	60,9
PML5	72,5	43,7	60,3
PC5	66,2	41,1	62,1
PC15	71,7	42,7	59,6



**Şekil 4. 13.** Pelet örneklerinin gazlaştırma verimleri

Gazlaştırma verimi ortalamalarının tek yönlü varyans analizleri yapılmıştır (Çizelge 4.22.). Örnekler gazlaştırma verimi açısından istatistiki olarak önemli farklılık göstermiştir ( $F=10,674^{****}$ ;  $p<0,05$ ). Yapılan çoklu karşılaştırma (Duncan) testinde en yüksek gazlaştırma verimine sahip katkısız pelet (PRF) tek başına ayrı bir grup oluşturmuştur (Çizelge 4.23.). Bu örneğin gaz çıkış oranının diğerlerine göre düşük olmasına rağmen gazlaştırma veriminin yüksek olması, elde edilen sentez gazın ısıl değerinin yüksek olmasından kaynaklanmıştır. Bu sonuca göre uygun teknolojilerle peletleme yapıldığında çeltik sapını peletlerken herhangi bir katkı maddesi kullanmaya gerek yoktur.

**Çizelge 4.22.** Pelet örneklerinin gazlaştırma verimlerinin Tek Yönlü “Varyans Analiz Tablosu” (VAT)

KAYNAK	KT	SD	KO	F	p
Gruplar arası	49,956	4	12,489	10,674*****	0,001
Gruplar içi	11,700	10	1,170		
Toplam	61,656	14			

**Çizelge 4.23.** Pelet örneklerinin sentez gaz verimlerinin çoklu karşılaştırma testi (Duncan) sonuçları

PELET	N	Grup Sayısı		
		1	2	3
PC15	3	59,6		
PML5	3	60,3	60,3	
PVA3	3	60,9	60,9	
PC5	3		62,1	
PRF	3			64,8

#### 4.8. Ekonomik analiz

Yapılan çalışmanın ekonomik analizi, biyokütle yakıt hazırlama maliyetleri ve gazlaştırma tesis işletme maliyetleri esas alınarak yapılmıştır. Hasat yerinin durumu ve biyokütle hazırlama tesisinin konumu değişiklik göstereceğinden bu analizde çeltik sapı hasadı ve nakliyesine ait maliyetler hesaba katılmamıştır. Ekonomik analizler araştırmada en iyi sonucu veren boğazsız tip reaktörde üstten hava akışının olduğu ER=0,2 değerinde katkısız pelet örnekleriyle gazlaştırma işleminde yapılmıştır.

Bu koşullarda ortalama biyokütle tüketim hızı  $FCR=20,4 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  ve sentez gaz üretim debisi  $GFR=35,1 \text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$  olarak kabul edilmiştir.

##### 4.8.1. Biyokütle yakıt hazırlama maliyetleri

Biyokütle yakıt hazırlama maliyetleri sap parçalama maliyetleri ve peletleme maliyetleri olarak ele alınmıştır.

##### **Sap parçalama işleminin maliyeti**

Sap parçalama işleminin enerji maliyeti (3.17) nolu bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$EM_{sp} = ET_{sp} \cdot EB = 15 \cdot 0,191571 = 2,87 \text{ TL} \cdot \text{h}^{-1}$$

Sap parçalamaya için kullanılan parçalayıcının kurulu gücü 15 kW, kapasitesi ortalama 100 kg·h<sup>-1</sup> civarındadır.

Hesaplamalarda sanayi elektriği bedeli kullanılmıştır. Bu değer yapılan piyasa araştırmasında 19,1571 krş·(kWh)<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir

Sap parçalamaya işleminin işçilik maliyeti (3.18) nolu bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$IM_{sp} = n \cdot IB = 2 \cdot 10 = 20 \text{ TL} \cdot h^{-1}$$

Parçalamaya işleminde 2 işçi çalışmıştır ve bir işçinin maliyeti 10 TL·h<sup>-1</sup>-kişi olarak alınmıştır.

Toplam sap parçalamaya maliyeti (3.19) nolu bağıntıyla bulunmuştur;

$$TM_{sp} = EM_{sp} + IM_{sp} = 2,87 + 20 = 22,87 \text{ TL} \cdot h^{-1}$$

Birim biyokütle başına sap parçalamaya maliyeti (3.20) nolu bağıntıyla bulunmuştur.

$$BKM_{sp} = \frac{TM_{sp}}{KP_{sp}} = \frac{22,87}{100} = 0,23 \text{ TL} \cdot kg^{-1}$$

### **Peletleme işleminin maliyeti**

Peletleme işleminin saatlik maliyeti aşağıdaki (3.21) nolu bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$EM_{pl} = ET_{pl} \cdot EB = 15 \cdot 0,191571 = 2,87 \text{ TL} \cdot h^{-1}$$

Peletleme makinesinin kurulu gücü 15kW, kapasitesi 150 kg·h<sup>-1</sup>'dir.

Peletleme işleminin işçilik maliyeti aşağıdaki (3.22) nolu bağıntıyla bulunmuştur;

$$IM_{pl} = n \cdot IB = 2 \cdot 10 = 20 \text{ TL} \cdot h^{-1}$$

Peletleme işleminde 2 işçi çalışmıştır.

Toplam peletleme maliyeti aşağıdaki (3.23) nolu bağıntıyla bulunmuştur;

$$TM_{pl} = EM_{pl} + IM_{pl} = 2,87 + 20 = 22,87 \text{ TL} \cdot h^{-1}$$

Birim biyokütle başına peletleme maliyeti (3.24) nolu bağıntıyla bulunmuştur.

$$BKM_{pl} = \frac{TM_{pl}}{KP_{pl}} = \frac{22.87}{150} = 0,15 \text{ TL} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Birim kütle başına toplam yakıt hazırlama maliyeti (3.25) nolu bağıntıyla hesaplanarak verilmiştir:

$$BKM_T = BKM_{sp} + BKM_{pl} = 0,23 + 0,15 = 0,38 \text{ TL} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Gazlaştırma işleminde saatlik biyokütle tüketim maliyeti (3.26) nolu bağıntıyla bulunmuştur;

$$YM_{bk} = FCR \cdot BKM_T = 20,4 \cdot 0,38 = 7,75 \text{ TL} \cdot \text{h}^{-1}$$

#### 4.8.2. Gazlaştırıcı sistemin işletme giderleri

Gazlaştırıcı ünitenin enerji maliyetinin sistemde kullanılan elektrik motorlarının enerji tüketimleri belirlenerek hesaplanmıştır. Sistemde Çizelge 4.23.'de kurulu güçleri verilen elektrik motorları kullanılmıştır.

**Çizelge 4.23.** Gazlaştırıcı ünite de kullanılan elektrik motorları

<b>Kullanım Yeri</b>	<b>Kurulu Gücü</b>
Vakum Pompası motoru	1,50 KW
Soğutma Fanı Motoru	0,55 KW
Kül Alma Helezonu Motoru	0,55 KW

Kül alma helezonu motoru toplam çalışma süresinin en fazla %20'sinde devreye girmektedir. Hesaplamalarda bu durum dikkate alınmıştır.

Vakum pompası motorunun enerji maliyeti (3.27) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$EM_{vp} = KG_{vp} \cdot EB = 1,5 \cdot 0,191571 = 0,29 \text{ TL} \cdot \text{h}^{-1}$$



Soğutma fanı motorunun enerji maliyeti (3.28) no'lu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$EM_{sf} = KG_{sf} \cdot EB = 0,55 \cdot 0,191571 = 0,11 TL \cdot h^{-1}$$

Boşaltma helezonunun enerji maliyeti (3.29) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$EM_{bh} = KG_{bh} \cdot EB \cdot k = 0,55 \cdot 0,191571 \cdot 0,20 = 0,02 TL \cdot h^{-1}$$

Burada;  $k$  kül boşaltma helezonun çalışma süresinin toplam çalışma süresine oranıdır (Yaklaşık 0,20 olarak alınmıştır).

Gazlaştırma ünitesinin çalıştırılmasında işçilik maliyeti (3.30) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır;

$$IM_g = n \cdot IB = 1 \cdot 10 = 10 TL \cdot h^{-1}$$

Gazlaştırma ünitesinin çalıştırılması esnasında 1 işçi yeterli olmaktadır.

Gazlaştırma işleminin birim zamandaki maliyeti (3.31) nolu bağıntıyla hesaplanmıştır;

$$BIM_T = 0,29 + 0,11 + 0,02 + 10 = 10,42 TL \cdot h^{-1}$$

Biyokütle yakıt hazırlama ve gazlaştırma işlemi birim zamandaki maliyetlerinin toplamı (3.32) nolu bağıntıyla aşağıda hesaplanmıştır;

$$TM = YM_{bk} + BIM_T = 7,75 + 10,41 = 18,16 TL \cdot h^{-1}$$

Birim gaz maliyeti (3.33) nolu bağıntıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$BGM = \frac{TM}{GFR} = \frac{18,16}{35,1} = 0,52 TL/Nm^3$$

Maliyet hesapları yapılan gazlaştırma işleminde  $GFR$  ortalama  $35,1 Nm^3 \cdot h^{-1}$  civarında olmuştur.

Elde edilen sentez gazın birim enerji maliyeti; (3.34) nolu bağıntıyla bulunmuştur;

$$GEM = \frac{3,6 \cdot BGM}{LHV_g} = \frac{3,6 \cdot 0,52}{4,43} = 0,422 \text{ TL} \cdot (\text{kWh})^{-1}$$

Belirtilen koşullarda elde edilen gazın alt ısıl değeri 4,43 MJ·Nm<sup>-3</sup> olarak hesaplanmıştır.

Yapılan ekonomik analiz sonucunda elde edilen gazın birim enerji maliyeti 0,422 TL·(kWh)<sup>-1</sup> olarak yani 42,2 krş·(kWh)<sup>-1</sup> olarak bulunmuştur. Meskenlerde kullanılan elektrik enerjisi maliyeti 39,0 krş·(kWh)<sup>-1</sup> civarındadır.

Trakya B6lgesi için doğal gaz satış birim fiyatı 0,097 TL·(kWh)<sup>-1</sup> olarak bildirilmektedir (Anonim, 2016). Doğal gaza kıyasla sentez gazımızın maliyeti 4,35 kat daha fazla olduğu g6r6lmektedir.

Araştırmada kullanılan parçalama, peletleme ve gazlaştırma 6nitesi deneysel 6lekli k66k kapasiteli sistemler olduğundan birim gaz maliyeti biraz y6ksek olmuştur. Ticari amaçlı kurulacak b6y6k işletmelerde bu maliyet enerjinin piyasa maliyetine yaklaşacak, hatta altına bile d6şecektir. Bundan sonraki aşamada sonuç kısmında da belirtildiği, gibi daha b6y6k 6lekli gazlaştırma tesisinin yapılması için İpsala y6resindeki ifti birlikleri ile işbirliği yolları aranacaktır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çeltik sapından farklı karışım materyalleri kullanılarak üretilen peletlerin, tasarlanan gazlaştırıcı sistemle gazlaştırılması üzerine yapılan bu araştırmada elde edilen sonuçları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

Herhangi bir katkı maddesi olmadan yapılan peletleme işleminde de bir sıkıntı yaşanmamıştır. Uygun peletleme tekniği kullanıldığında çeltik sapının peletlenmesi için katkı maddesi kullanılmasına gerek yoktur.

Farklı karışımlarla elde edilen pelet örneklerinin yapılan kimyasal ve fiziksel analizleri arasında çok büyük farklılık görülmemiştir. Ancak, peletlerin ısı değerleri literatürlerde bildirilen değerlerden biraz daha düşük olmuştur.

Reaktör içinde camlaşma ve aglomerasyon oluşumunu engellemek için çeltik sapı peletlerinin gazlaştırılması işleminde kor bölgesinin sıcaklığını 800°C'nin üzerine çıkartmamak için kontrollü koşullarda gazlaştırma işleminin yapılması gerekmektedir. Otomasyon sisteminde hava akış ve besleme oranını sürekli kontrol ederek bu ayarlama yapılmalıdır.

Çeltik sapı peleti gazlaştırma işleminde boğazsız tip reaktör kullanılmasının malzeme akışı bakımından olumlu olduğu saptanmıştır.

Çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma işleminde hava fazlalık katsayısının  $ER=0,20$  civarında olması gerekmektedir. Bu değer 0,25'i aştığında gazlaştırma verimi önemli oranda düşmektedir.

Gazlaştırma esnasında karıştırma işlemi çeltik peletleri için uygun olmamıştır. Kor bölgesinde karıştırıcı kanatlar etrafında oluşan kor köprüleri kanatlara yapışarak materyalin akışına ve havanın bölgeye ulaşmasına engel olmaktadır. Cidarlarda ise belirgin bir yapışma gözlemlenmediğinden refrakter tabakasının bu açıdan pozitif bir katkı sağladığı söylenebilir.

Reaktör ana gövdesinin refrakter kaplaması sistemin ısı rejime girme sürecini uzatmakta bu süre zarfında elde edilen gaz içeriğindeki katran yoğunluğu gaz hattında yoğunlaşarak kirliliğe neden olmaktadır. Sürekli çalışacak sistemlerde kirliliğin ve temizlik gereksiniminin azaltılması için refrakterin bir ön ısıtma prosesine tabi tutulması önerilir. Refrakter ısınıp, ısı rejim sağlandıktan sonra ise rejimin korunması açısından avantaj sağlamaktadır. Gaz temizleme için gaz yıkama ve kuru filtreler gibi ek donanımlar kullanılması da gaz temizliği ve sistemin daha uzun süre temiz kalması açısından avantaj sağlayabilir. Ayrıca

reaktör gövdesinde belirgin bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Refrakter kullanımı ısı gerilmelerin metal gövde üzerindeki etkileri açısından da olumlu olmuştur. Bu açıdan, büyük ölçekli ve özellikle sürekli sistemlerde refrakter kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Yapılan tüm denemeler sonucunda üstten hava girişiyle karıştırmasız ve ER=0,20 civarında olan işlemin gazlaştırma performansı açısından en iyi sonuçları verdiğini söylemek mümkündür.

Yukarıda belirtilen koşullarda pelet örneklerinin gazlaştırılması ile en yüksek gazlaştırma verimi katkısız pelet örneğinde (PRF), en düşük gazlaştırma verimi %15 kömür tozu karıştırılmış pelet örneğinde (PC15) elde edilmiştir. Bu sonuç çeltik sapının herhangi bir katkı maddesi olmaksızın rahatlıkla peletlenip gazlaştırma işlemi yapılabileceğini göstermektedir.

Biyokütleden elde edilen gazın birim enerji maliyeti  $42,2 \text{ krş} \cdot (\text{kWh})^{-1}$  olarak bulunmuştur. Biyokütle hazırlama maliyetlerinin en önemli kısmını işçilik bedeli oluşturmaktadır. Sap parçalama ve peletleme işlemlerinde 2'şer işçi çalışmıştır. Biyokütle hazırlama üniteleri kombine ve otomasyon donanımlı olması halinde birim kütle başına işçilik maliyetleri çok önemli oranda düşecektir. Otomasyon kontrollü bir kombine sistemde tek personel çalıştırılmak suretiyle de yakıt hazırlama süreçlerinin kontrollü bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlamak mümkün olabilir.

Tasarlanan sistem mevcut haliyle temiz gaz elde edilmesine ve ısıtma amaçlı kullanıma olanak vermektedir. Sistem aşağı akışlı olarak tasarlanmış ve negatif basınç altında vakum pompası kullanılarak çalıştırılmıştır. Vakum pompasının sağlıklı çalışabilmesi için de sentez gazı sıcaklığını pompanın çalışma aralığında tutmak üzere soğutucu fan devreye alınmıştır. Üretilen gazın sadece ısıtma amaçlı kullanılması söz konusu olduğunda sistem yukarı akışlı (updraft) olarak da tasarlanabilir. Bu durumda sistem pozitif basınç altında çalışacak ve gazın soğutulmasına gerek kalmayacaktır; dolayısıyla soğutucu fan devre dışı kalarak işletme enerji maliyetleri de azaltılabilecektir.

Çalışmanın sonucunda çeltik saplarının uygun teknolojiler kullanıldığında rahatlıkla peletlenip gazlaştırılabilmesi ortaya çıkmıştır. Bölgemizde her yıl tarlada kalan ve yakılan 300.000 tonun üzerindeki çeltik sapının mümkün olan en fazla kısmının bu şekilde değerlendirilmesi, ülke ekonomisine büyük yarar sağlayacaktır. Bir diğer olumlu yanı da biyokütle kaynağı olarak hammaddenin bol miktarda olması ve ekonomik olarak, hatta ücretsiz

temin edilebilmesidir. Kurulacak gazlaştırma tesislerinin iç enerji gereksinimlerinin de elde edilecek sentez gazdan karşılanması mümkündür. Elde edilecek gazın elektrik enerjisine dönüştürülmesi ya da doğrudan yakılarak çeltik kurutma işleminde kullanılmasının yöre çiftçilerine getireceği ekonomik faydanın ve çevresel faktörlerdeki iyileşmenin iyi anlatılması durumunda, bu tür tesislerin yaygınlaşabileceği düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Akpınar N (2006). Kentsel Katı Atıklardan Enerji Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü Enerji Bilimi ve Teknolojileri A.B.D.
- Anonim (2014). Türkiye İstatistik Kurumu Bitkisel Üretim İstatistikleri Veri Tabanı. <http://www.tuik.gov.tr/bitkiselapp/bitkisel.zul> Erişim 28.08.2015
- Anonim (2015). <http://www.turkseker.gov.tr/Urunler.aspx?KOD=01.02> Erişim Tarihi: 30.11.2015
- Anonim (2016). Gazdaş Satış Tarifesi. <http://www.gazdas.com/web/Navigationt?p=ec7264ecbd3177ea1ffee2009da841ddRFC&page=> Erişim Tarihi: 01.01.2016
- Anonim (2016). <http://www.allpowerlabs.org/gasification/resources/index.html> Erişim Tarihi: 10.12.2015
- Asadullah M, Miyazawa T, Ito S, Kunimori K, Koyama S, Tomishige K (2004). A Comparison of Rh/CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Catalysts with Steam Reforming Catalysis, Dolomite and Inert Materials As Bed Materials in Low Throughput Fluidized Bed Gasification Systems. *Biomass and Energy* 26, 269-279.
- Baratieri M, Pieratti E, Nordgreen T, Grigianti M (2010). Biomass Gasification with Dolomite as Catalyst in A Small Fluidized Bed Experimental and Modelling Analysis. *Waste Biomass Valor*, 1, 283-291.
- Buzarovska A, Bogoeva-Gaceva G, Grozdanov A, (2008). Potential Use of Rice Straw as Filler in Eco-Composite Materials. *Australian Journal of Crop Science*. 1(2): pgs 37-42
- Calvo LF (2004). Heating Process Characteristics and Kinetics of Rice Straw in Different Atmospheres. *Fuel Processing Technology*, 85, 279-291.
- Chopra S, Jain AK (2007). A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Invited Overview, No.5. Vol.IX.*, 150-158.
- Delivand MK, Barz M, Garivait S (2011). Overall Analyses of Using Rice Straw Residues for Power Generation in Thailand- Project Feasibility and Environmental HG Impacts. *Assessment Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue*, 39-46.
- Erlich C, Fransson TH (2011). Downdraft Gasification of Pellets Made of Wood, Palm-Oil Residues Respective Bagasse: Experimental Study. *Applied Energy*, 88, 899-908
- Hacıoğlu K (2007). Biyokütlenin Kullanıldığı Termokimyasal Dönüşüm Proseslerinin Modellenmesi ve Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği A.B.D.
- İşbilir B, Subaşı S, Ercan İ (2010). Piriç Kabuğu Külünün Beton Durabilitesine Etkisi. Düzce Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü. *International Sustainable Buildings Symposium 2010*.
- Jain AK (2006). Design Parameters for A Rice Husk Throatless Gasifier. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Manuscript EE 05 012, Vol VIII*, 45-49.
- Jain AK, Goss JR (2000). Determination of Reactor Scaling Factors for Throatless Rice Husk Gasifer. *Biomass and Energy* 18, 249 – 256

- Javed SH, Naveed S, Feroze N, Kazmi M. (2008). Extracting Silica From Rice Husk Treated with Potassium Permanganate. *Pak. J. Agri. Sci.*, Vol.45 (4), 261-267.
- Jenkins BM, Baxter LL, Miles TR (1998). Combustion Properties of Biomass. *Fuel Processing Technology*. 54 (1998) pgs.17-46
- Kargbo FR, Xing J, Zhang Y, (2010). Property Analysis and Pretreatment of Rice Straw for Energy Use In Grain Drying: A Review. *Agricultural and Biology Journal of North America*. ISSN Print: 2151-7517, ISS Online: 2151-7525
- Kargbo FR, Xing J, Zhang Y. (2009). Pretreatment for Energy Use of Rice Straw: A Review. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 4 (13), 1560-1565.
- Kayıoğlu B, Aktaş T, Tuğ S (2012). Trakya Bölgesinde Çeltik Saplarının Gazlaştırılma Potansiyeli ve Gazlaştırıcılar. *Enerji Tarımı ve Biyoyakıtları 2. Ulusal Çalıştayı*. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Keijsers E R P (2009). Sustainable Building Materials from Rice Straw. Wageningen UR-AFSG. Biobased Products Division.
- Khater EM (1992). Gasification of Rice Hulls. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 3, No. 5, 329-333.
- Kirubakaran V (2009). A Review on Gasification of Biomass. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 13, 179-186.
- Krishnarao RV, Subrahmanyam J, Jagadish Kumar T (2001). Studies on the Formation of Black Particles in Rice Husk Silica Ash. *Journal of the European Ceramic Society*, 21, 99-104.
- Liu X, Liu Z, Fei B, Cai Z, Jiang Z, Liu X (2013). Comparative Properties of Bamboo and Rice Straw Pellets. *BioResources* 8 (1), 638-647
- Matsumura, Y, Minowa T, Yamamoto H (2005). Amount, Availability and Potential Use of Rice Straw (Agricultural Residue) Biomass as An Energy Resource in Japan. *Biomass and Bioenergy*, 29, 347-354.
- NAS-NAE (1983). *Producer Gas: Another Fuel for Motor Transport*. National Academy Press, Washington D.C., 18, 40.
- Pedroso DN, Machin EB, Silverira JL, Nemoto Y, 2013. Experimental Study of Bottom Feed Updraft Gasifier. *Renewable Energy* 57, 311-316
- Rajvanshi AK, (1986). *Alternative Energy in Agriculture*. CRC Press, Vol II, Chapter No:4, 83-102.
- Recepoğlu AO (1972). Düşük Değerli Yakıtların Gazlaştırılması. *İ.T.Ü. Matbaası Sayı: 917*, 88-95.
- Reed TB, Das A (1988). Chapter 5: Gasifier Designs. Chapter 6: Gasifier Fabrication and Manufacture. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Solar Technical Information Program Operated for U.S. Energy Department. Colorado, USA, 38-47, 48-50.
- Rozainee M, Ngo SP, Salema AA, Tan KG, Ariffin M, Zainura ZN. (2008). Effect of Fluidizing Velocity on the Combustion of Rice Husk in Bench Scale Fluidized Bed Combustor for the Production of Amorphous Rice Husk Ash. *Bioresource Energy*, 99, 703-713.
- Rozainee M, Ngo SP, Salema Arshad A, Tan KG (2008). Fluidized Bed Combustion of Rice Husk to Produce Amorphous Siliceous Ash. *Energy for Sustainable Development*, Volume XII, 1, 652-658.

- Ruark MD, Linquist BA, Hill JE, Greer CA, Mutters RG, Six J, Van Kessel C. (2007). Rice Straw Management and Water Quality in Northern California. University of California, Davis.
- Sheth P.N., Babu B.V. 2009. "Experimental Studies on Producer Gas Generation from Wood Waste in A Downdraft Biomass Gasifier", *Bioresource Technology*, 100, 3127-3133.
- Striugas N, Zakarauskas K, Dziugys A, Navakas R (2014). An Evaluation of Performance of Automatically Operated Multi-Fuel Downdraft Gasifier for Energy Production, *Applied Thermal Engineering*, 73, 1149-1157
- Sürek H (2007). Ülkemizde Çeltik Anızı Sorunu ve Çözüm Önerileri, *Hasad Bitkisel Üretim*, Yıl : 23, Sayı : 270, Sayfa : 58-61.
- Tiangco VM, Jenkins BM, Goss JR (1996). Optimum Specific Gasification Rate for Static Bed Rice Hull Gasifiers, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 11, No. 1, pp. 51-62
- Tomishige K, Asadullah M, Kunimori K (2003). Novel Catalysts for Gasification of Biomass with High Conversion Efficiency. *Catalysis Surveys from Asia*, Vol. 7, No. 4.
- Tu W, Shie J, Chang C, Lin C, Yang S, Kuo JT, Shaw D, You Y, Lee D (2009). Products and Bioenergy from the Pyrolysis of Rice Straw Via Radio Frequency Plasma And Its Kinetics. *Bioresource Technology*, 100, 2052–2061.
- Volakova P, Mika M, Verner V, Klapste B, Jankovsky O (2012). Successful Straw Combustion Technology in Zluticka Heating Plant. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 64, 425-431.
- Waldheim L, Nilsson T (2001). Heating Value of Gases From Biomass Gasification. Report prepared for: IEA Bioenergy Agreement, Task 20 – Thermal Gasification Process. Report no TPS-01/16 TPS Termiska Processer AB, Studsvik, 611 82 Nyköping (<http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/file/publications/HeatingValue.pdf>)
- Wang L, Weller CL, Jones D, Hanna MA (2007). Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and Its Application to Electricity and Fuel Production, *Biomass & Energy*, 32, 573-581.
- Yalçın N, Sevinç V (2001). Studies on Silica Obtained from Rice Husk. *Ceramics International*, 27, 219-224.
- Yinesor G (2008). Design and Operation of A Bench Scale Fixed Bed Gasification System. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Müh. Programı
- Yong L, Chaoguang G (2003). A New Type of Straw Gasification-Heating Set. International Conference on Bioenergy Utilization and Environment Protection 6th LAMNET Workshop – Dalian, China.
- Zhu X, Venderbosch R (2003). A Correlation Between Stoichiometrical Ratio of Fuel and Its Higher Heating Value. *Fuel*, 84, 1007-1010.



## ÖZGEÇMİŞ

1972 Tekirdağ doğumlu. İlkokulu Tekirdağ Merkez Aydoğdu İlkokulu'nda okudu. Ortaokul ve liseyi de Tekirdağ Merkez Namık Kemal Lisesi'nde birincilikle tamamladı. 1997'de İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği'nden mezun oldu ve aynı yıl Bosch Siemens Profilo A.Ş. Çerkezköy fabrikasında soğutucu fabrikası geliştirme departmanında WTS (*Worldwide Technical Standardisation*) proje grubunda geliştirme mühendisi olarak meslek hayatına başladı. Bu görevde 6 ay süreyle çalıştı ve askerlik hizmeti dolayısıyla işinden ayrılarak askerliğini yaptı. Askerliğini tamamladıktan sonra yine aynı iş yerinde bu kez proje mühendisi olarak işe başladı. Bu süre içinde uluslararası bazı projelerde görev aldı, şirket içi çeşitli eğitim ve seminerlere katıldı. Ağustos 2001'de görevinden ayrılarak Trakya Üniversitesi Çorlu Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çorlu Makine Mühendisliği ABD'da başladığı yüksek lisansını "Polistren enjeksiyonunda çevrim zamanı optimizasyonu" teziyle 2005 yılında tamamladı. Şu anda Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır, Tekirdağ'da ikamet etmektedir.