



**T. C.  
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ  
KOORDİNASYON BİRİMİ (NKÜBAP)**

**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU**

**NKUBAP.00.24.AR.14.28 nolu proje**

**FARKLI BİYOKÜTLE SAPLARININ GAZLAŞTIRILMASI AMACIYLA  
LABORATUVAR TİPİ BİR GAZLAŞTIRICININ GELİŞTİRİLMESİ**

**Yürütücü: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ**

**Araştırmacılar: Yrd. Doç. Dr. İ. Savaş DALMIŞ  
Dr. Serkan TUĞ**

**2016**

## ÖNSÖZ

Tarımsal üretim sonucu ortaya çıkan biyokütle enerjisi yenilenebilir, çevre dostu, yerli ve yerel bir kaynak olarak gün geçtikçe daha büyük bir önem kazanmaktadır. Tarımsal üretimden kaynaklanan artık ve atıklar, biyokütle kaynağı olarak ülkemiz için küçümsenemeyecek bir enerji potansiyeline sahiptir.

Ülkemizde ve dünyada birçok kurum ve kuruluş bu konuya her geçen gün artan bir ilgiyle yaklaşmakta ve biyokütle enerjisi konusunun teknolojik ve bilimsel olarak geliştirilmesi ve araştırmaların yaygınlaştırılması için çalışmalar gerçekleştirmektedir. Gerek hayvansal kaynaklı gerekse bitkisel kaynaklı yüksek biyokütle varlığına sebebiyle ülkemizde modern biyokütle değerlendirme sistemlerinin hızlı bir şekilde geliştirilmesinin ve tanıtılmasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır.

Bölümümüzde; Biyokütle Laboratuvarında yürütülmüş olan bu proje kapsamında imal edilmiş olan prototip gazlaştırıcı sistemin ve proje çalışması sırasında bu sistemde kullanılan yöntemlerin, gerek bu konuda çalışacak olan araştırmacılar gerekse konuya ilgi duyan öğrencilerimize önemli bir imkan olacağını, farklı biyokütle ve atıkların değerlendirilmesi açısından bilime ve pratiğe önemli katkılar sağlayacağını umuyoruz.

Bu projede tasarlanarak imal edilen gazlaştırma sisteminin ölçüm ve kontrol sistemi için, Öğr. Gör. Dr. Figan DALMIŞ tarafından yürütülen NKUBAP.00.MB.AR.14.03 nolu proje ile geliştirilen ölçüm ve kontrol sistemi kullanılmıştır. Katkılarından dolayı kendisine teşekkür ederiz. Ayrıca bu projenin gerçekleşmesinde verdiği maddi destek nedeni ile **Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi'ne** teşekkürlerimizi sunarız.

Proje Yürütücüsü (Proje ekibi adına)

**Prof.Dr. Türkan AKTAŞ**

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	2
İÇİNDEKİLER.....	3
TABLO LİSTESİ.....	4
ŞEKİL LİSTESİ.....	5
ÖZET .....	6
ABSTRACT .....	7
1. GİRİŞ .....	8
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	14
3.1. Materyal.....	14
3.1.1.Sap parçalayıcı.....	14
3.1.2. Gazlaştırma ünitesi.....	14
3.1.3. Gaz kromatografi cihazı.....	19
3.1.4. Ölçüm ve kontrol donanımı.....	20
3.2. Yöntem .....	22
3.2.1. Peletleme işleminin gerçekleştirilmesi.....	22
3.2.2. Biyokütle yakıt örneklerinin proksimate (kısa) analizlerinin gerçekleştirilmesi .....	25
3.2.3. Gazlaştırma işlemi .....	26
3.2.4. Gaz bileşenlerinin analizi ve ısı değerlerinin hesaplanması .....	27
3.2.5. Optimum özgül gazlaşma hızının saptanması .....	28
3.2.6. Enerji dönüşüm verimliliğinin hesaplanması .....	29
3.2.7. İstatistik analizler.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	30
4.1. Biyokütle analiz sonuçları .....	30
4.2. Çeltik saplarının gazlaştırılmasına ilişkin sonuçlar .....	32
4.3. Kanola saplarının gazlaştırılmasına ilişkin sonuçlar .....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	40
6. KAYNAKLAR.....	41

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Ülkemizdeki bazı tarım ürünlerinin üretim ve atık miktarları (Acar, 2013)..8	
Tablo 3.1. Sap örneklerinin kısa analizleri için kullanılan standart metodlar .....	25
Tablo 4.1. Kullanılan çeltik sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri.....	30
Tablo 4.2. Parçalanmış çeltik sapı kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değeri.....	30
Tablo 4.3. Kullanılan kanola sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri.....	31
Tablo 4.4. Parçalanmış kanola sapı kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değeri.....	31
Tablo 4.5. Çeltik ve kanola sapsularının özelliklerine ilişkin varyans analiz tablosu.....	31
Tablo 4.6. Katkısız çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri .....	32
Tablo 4.7. Katkısız çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları.....	32
Tablo 4.8. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri.....	33
Tablo 4.9. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları.....	33
Tablo 4.10. Parçalanmış çeltik sapı gazlaştırma parametreleri.....	35
Tablo 4.11. Parçalanmış çeltik sapı sentez gazı analiz sonucu.....	35
Tablo 4.12. Katkısız kanola sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri.....	36
Tablo 4.13. Katkısız kanola sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları.....	36
Tablo 4.14. %15 kömür tozu katkılı kanola sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri.....	38
Tablo 4.15. %15 kömür tozu katkılı kanola sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları.....	38
Tablo 4.16. Parçalanmış kanola sapı gazlaştırma parametreleri.....	39
Tablo 4.17. Parçalanmış kanola sapı sentez gazı analiz sonucu .....	39

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. Sap parçalamada kullanılan parçalama makinası.....	14
Şekil 3.2. Gazlaştırma reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler.....	15
Şekil 3.3. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma reaktörü.....	15
Şekil 3.4. Gazlaştırma sisteminde karıştırıcı.....	16
Şekil 3.5. Gaz temizleme sistemi.....	16
Şekil 3.6. Filtrelerde kullanılan paslanmaz çelik talaşı.....	17
Şekil 3.7. Gazlaştırma sistemi akış şeması.....	18
Şekil 3.8. Tekerlekli altıgen şase ve platform.....	18
Şekil 3.9. GREENCO 2RB 210-7AH16 vakum blover.....	19
Şekil 3.10. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı.....	19
Şekil 3.11. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü.....	20
Şekil 3.12. NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje ile geliştirilen ölçüm ve kontrol sistemi.....	20
Şekil 3.13. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı.....	21
Şekil 3.14. Reaktör üzerinde termokupulların yerleşimi.....	22
Şekil 3.15. Kanola ve çeltik sapı pelet numuneleri: (a) %100 Kanola, (b) %15 kömür tozu karışımli kanola, (c) %100 çeltik sapı, (d) %15 kömür tozu karışımli çeltik sapı.....	23
Şekil 3.16. Peletleme işleminin gerçekleştirilmesi.....	24
Şekil 3.17. Kullanılan peletleme makinesi.....	24
Şekil 3.18. Gazlaştırma deneyinin başlaması (full yükleme) ve bitişi (korun üst kısımdan görünmesi) .....	26
Şekil 3.19. Agilant 7890B GC gaz kromatografi cihazı ile yapılan bir sentez gaz analizi raporu örneği.....	28
Şekil 4.1. Katkısız çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi.....	32
Şekil 4.2. Katkısız çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi.....	33
Şekil 4.3. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi.....	34
Şekil 4.4. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi.....	34
Şekil 4.5. Kanola peletleri ve reaktör iç görünümü.....	36
Şekil 4.6. Katkısız kanola sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi...37	37
Şekil 4.7. Katkısız kanola sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi.....	37
Şekil 4.8. %15 kömür tozu katkılı kanola sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı–verim değişimi.....	38
Şekil 4.9. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi.....	38
Şekil 4.10. Flare ünitesinde yakılan sentez gaz alevi.....	39

## ÖZET

Bu projede, bölgemizde yoğun olarak yetiştirilen çeltik ve kanola ürünlerinin hasattan sonra tarlada kalan saplarının gazlaştırılarak enerji içeriklerinin değerlendirilmesi için laboratuvar tipi bir gazlaştırıcı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Bölgeden toplanan çeltik ve kanola sapsarı peletlenerek biyokütle yakıt haline getirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Geliştirilen gazlaştırıcının denemeleri çeltik ve kanola sapından imal edilmiş peletler kullanılarak başarıyla gazlaştırılmıştır.

Gazlaştırma denemeleri sonucunda, kömür katkısının çeltik sapı peletleri için sentez gaz ısı değerini arttırdığı (3,686 MJ/Nm<sup>3</sup> değerinden 3,71 MJ/Nm<sup>3</sup> değerine) ancak özgül gazlaşma hızının da artmasıyla beraber verime etkisinin olumsuz olduğu gözlemlenmiştir (katkısız peletlerde maksimum %61,9, kömür katkılı peletlerde ise maksimum %57,41)

Kanola pelet örneklerinde kömür katkısı gazlaştırma parametreleri açısından olumlu etki yapmıştır (ısı değer 7,15 MJ/Nm<sup>3</sup> den 8,96 MJ/Nm<sup>3</sup> değerine, ısı etkinliği %68,85'den 81.51%'e yükselmiştir).

Çeltik sapı peletlerinde içerdiği yüksek silisyum sebebiyle 800°C ve yukarı sıcaklık değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Kanola sapı peletleri ile çeltik sapı peletleri arasındaki performans farkının bu kadar fazla olmasının ana sebebi budur.

Peletlenerek enerji yoğunluğu artırılmış biyokütlelerin gazlaştırılması için ise tasarım sorunsuz bir şekilde çalışmış fakat peletlenmemiş, saman halindeki çeltik ve kanola saplarının gazlaştırılması için reaktör konstrüksiyonunun mevcut şekliyle uygun olmadığı, uygun olması için sürekli biyokütle besleme donanımlarını ilave edilmesi ve ebatlarda değişiklik yapılması gerektiği görülmüştür.

Peletlenmemiş çeltik samanı için %37,14 gibi düşük bir verim elde edilirken, kanola samanında bu değer biraz daha yüksek elde edilerek %48,30 verime ulaşılmıştır. Aynı şekilde elde edilen singazın ısı değeride çeltik sapı için oldukça düşük (1.94 MJ/Nm<sup>3</sup>) bulunmuştur. Bu değer kanola samanı için 4,47 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak saptanmıştır.

Özgül gazlaşma hızı ile verim ilişkisini gösteren grafikler değerlendirildiğinde; gerek kömür katkılı gerekse kömür katkısız olarak kanola sapından hazırlanmış peletlerin gazlaştırılmasında çeltik peletlerine göre çok daha yüksek özgül gazlaşma hızı önerilebileceği saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyokütle, gazlaştırma, pelet, çeltik sapı, kanola sapı

## ABSTRACT

In this research, a laboratory scale gasifier was designed and manufactured for rice straw and canola straw to evaluate energy contents that collected from our region. Collected rice straw and canola straw from our region were prepared as biomass fuel by pelletizing and the pellets were analyzed. Experiments were realized by using rice straw and canola straw pellets and biomass samples were gasified successfully.

As a result of the gasification experiments, it was observed that adding of coal powder to paddy stalk pellets increased the heat value of obtained syngas (from 3,686 MJ / Nm<sup>3</sup> to 3.71 MJ / Nm<sup>3</sup>) while it has negative effect on the efficiency due to increasing of increasing specific gasification rate (maximum 61.9% for pellets without coal powder and maximum 57.41% for coal powder added pellets).

Adding of coal powder had a positive effect on the gasification parameters of the canola pellet samples (heat values increased from 7,15 MJ/Nm<sup>3</sup> to 8,96 MJ/Nm<sup>3</sup> while efficiency increased from 68,85% to 81.51%).

Due to the high silicon content in the paddy pellets of the paddy, the high gasification rates could not be achieved due to the risk of glass structure at temperatures of 800 °C and above. This is the main reason why the efficiency difference between canola stalk pellets and paddy stalk pellets is so high.

For gasification of pelleted biomass with increased energy density, designed reactor in this project worked smoothly. On the other hand, it has been determined that reactor construction is not suitable for the gasification of paddy and canola straws that were not pelleted and continuous biomass feeding systems should be included and changes in dimensions should be done.

Lower efficiency was found for unpelleted paddy straw as 37.14% while higher value was determined for unpelleted canola straw as 48.30%. As parallel to this lower efficiency values compared to values determined for pelleted straws, heat values of syngas for unpelleted paddy straw was determined rather low (1.94 MJ/Nm<sup>3</sup>) compared to value for unpelleted canola stalk as 4.47 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Graphs that showed that relationship between the specific gasification rate and the efficiency showed that higher specific gasification rate can be offered for gasification of both coal-added and without coal pellets prepared from canola straw compared to pellets prepared from paddy straws.

**Keywords:** Biomass, gasification, pellet, rice straw, canola straw

## 1. GİRİŞ

Yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan ve çevre dostu olan biyokütle özellikle gelişmekte olan ülkeler için uygulama alanı oldukça geniş olan enerji kaynağıdır. Tükenmez bir kaynak olması, her yerde yetiştirilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması gibi nedenlerle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak kabul edilen biyokütle modern dönüşüm süreçleri uygulandığında değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. En önemli biyokütle kaynaklarından olan bitkisel atıklardan enerji elde edilmesi günümüzde biyokütle ile ilgili yapılan çalışmalar içerisinde oldukça önemli yere sahiptir.

Son yıllarda tüm dünyada ve ülkemizde özellikle tarımsal üretimden kaynaklanan atık ve artıkların değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Öte yandan ülkemiz açısından önemli bir potansiyele sahip olan hububat ve yağlı bitkilere ait hasat sonu atıklar gibi biyokütle kaynakları, ne yazık ki etkin bir şekilde değerlendirilememektedir. Bu kaynaklar genellikle üretici tarafından çevreye de zarar verecek şekilde yakılmaktadır. Öte yandan, Türkiye’de, biyokütle enerji kaynağı olarak değerlendirilebilecek sadece tarla bitkilerinin ekim alanı, yaklaşık 15 milyon ha ve üretimi 38 milyon ton’dur. 38 milyon tonluk üretime karşılık bitkiler tarlada ve işlendikten sonra yaklaşık 45 milyon ton’luk atık bırakmaktadır. Tablo 1.1 incelendiğinde toprağa karıştırılması ve hayvan beslenmesinde kullanımı tercih edilmeyen iki önemli ürünün yani kanola ve çeltik ürünlerinin hasattan sonra tarlada kalan saplarının biyokütle potansiyelinin sırasıyla, 212.900 ve 139.200 ton ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Acar, 2013).

Tablo 1.1. Ülkemizdeki bazı tarım ürünlerinin üretim ve atık miktarları (Acar, 2013)

Ürün	Ekim Alanı (Da)	Üretim (ton)	Atık Miktarı (ton) Tahmin Edilen
Fındık Zurufu	337.498.943	661.614	297.726
Çay Tozu	761.360	1.121.206	112.000
Kanola (Kolza) Sapı	<b>312.496</b>	<b>106.450</b>	<b>212.900</b>
Buğday Sapı	85.738.019	20.159.394	20.159.394
Çeltik	<b>990.433</b>	<b>696.000</b>	<b>139.200</b>
Ayçiçeği	5.852.982	1.118.000	5.852.982
Mısır Sapı	5.282.838	3.811.000	4.573.200

Biyokütle enerji kaynakları incelendiğinde, bu kaynakların genellikle homojen olmayan bir yapıda, yüksek su ve oksijen içerikli, düşük yoğunluklu ve düşük ısı değerli oldukları anlaşılmaktadır. Tüm bu özellikler yakıt kalitesine olumsuz etki etmektedir. Biyokütlenin bu olumsuz özellikleri, çeşitli fiziksel süreçler (parçalama veya kırma-öğütme gibi işlemler kullanılarak boyut küçültme, kurutma, filtrasyon, ekstraksiyon, peletleme ve biriktirme vs.) ve dönüşüm süreçleri (biyokimyasal, termokimyasal (yakma, sıvılaştırma, gazlaştırma ve piroliz) ve esterleşme) ile ortadan kaldırılabilmektedir. Biyokütleye uygulanan çeşitli dönüşüm süreçleriyle, yakıt kalitesi yüksek, mevcut yakıtlara eşdeğer özelliklerde ve daha kullanışlı katı, sıvı ve gaz yakıtlar (kolay taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir) veya kimya endüstrisi için değerli ürünler elde edilebilmektedir (McKendry, 2002; Bridgwater, 2003).

En önemli termokimyasal çevrim yöntemlerinden birisi olan gazlaştırma yöntemi



genel olarak, çeşitli biyokütle kaynaklarının 850 °C'nin üzerinde bir sıcaklıkta az oksijenli ortamda kısmi olarak yakılması ile yanıcı gaza ya da karbon monoksit ve hidrojen açısından zengin gaz ürününe dönüşmesi olarak tarif edilmektedir. Gazlaştırma; kuruma, piroliz, yanma ve indirgeme aşamalarını içermektedir (Rasvanshi, 1986). Gazlaştırma yoluyla biyokütleden sentez (sentetik) gazı elde edilir. Sentez gazı biyokütle bileşimi ve gazlaştırma koşullarına göre farklı olmakla beraber temelde CO, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> 'den oluşmaktadır.

Gazlaştırma işleminin gerçekleştirildiği sistemler gazlaştırıcı olarak adlandırılmaktadır. Gazlaştırıcı sistemler sabit yataklı, akışkan yataklı, sürüklemeli yataklı ve plazma tipi gazlaştırıcılar olarak dört ana gruba ayrılmaktadırlar. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar genellikle büyük ölçekli enerji dönüşümleri için tercih edilmekteyken, sürüklemeli yataklı gazlaştırıcı sistemler ise genellikle kömür gazlaştırma için tercih edilmektedirler. Sabit yataklı gazlaştırıcıların ise hava akış yönüne göre aşağı akışlı, yukarı akışlı ve yatay akışlı tipleri bulunmaktadır ve biyokütle gazlaştırma için dünyada genelde kullanılan sistemler bu gruba girmektedir.

Biyokütlenin gazlaştırılması ile mekanik ve elektrik enerjisi üretmek mümkün olmaktadır. Tarihte küçük gaz üreteçleri ile mekanik güç üretimi yapılmış, büyük ölçekli gazlaştırıcılarla gaz üretildiğinde, bu gazı boru hatlarıyla nakledilip pişirme, ısıtma ve aydınlatma amaçlı kullanmak mümkün olmuştur. Küçük gaz üreteçlerinde üretilen gaz, ikinci dünya savaşında kamyon ve otobüslerde kullanılmıştır. Yukarı akışlı tipteki gazlaştırıcılardan elde edilen gaz yüksek miktarda katran ihtiva ettiğinden motor uygulamalarında kullanılamamaktadır. Çapraz akışlı gazlaştırıcılar daha hızlı tepki zamanına sahip olmalarına rağmen sadece düşük katrana sahip yakıtlar için uygundur. Aşağı akışlı gazlaştırıcılar ise daha hızlı reaksiyon zamanına sahip olup, katran oranı düşük temiz gaz ürettiği için motor uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilirler (Kaupp ve ark., 1984; Reed ve Das, 1996). Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda biyokütle yakıt girişi yukarıdan olup hava ise yakıtın içinden geçerek aşağıya akış yapmaktadır. Bu gazlaştırıcılarda kullanılan biyokütlenin boyutları, biçimleri ve biyokütle parçalarının nem içeriği belirlenmiş limitler içerisinde tutulmalıdır. Elde edilen sentetik gazın kalitesi genellikle iyidir ve 1MW ve daha az elektrik kapasiteli sistemler için daha uygundur. Bu tip gazlaştırıcılarda iyi bir gazlaştırma işlemi için biyokütle kurutularak nem içeriği %20'nin altına çekilmesi gerekmektedir. Üretilen gaz yüksek sıcaklıkta (700°C) gazlaştırıcıdan ayrılmaktadır. Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajı üretilen gaz içerisinde çok düşük miktarda katran bulunmasıdır.

Katran, kömür ve kül, üretilen gazdan arta kalan artıklar olarak bilinen yan ürünlerdir. Üretilen gazın içten yanmalı motorlarda yanabilmesi için katran ve partiküllerin temizlenmesi gerekir. Üretilen gazın yanabilen içeriği başlıca karbon monoksit, hidrojen ve hidrokarbon gazlar (hammaddeye bağlı) ve azotun değişik oranlarda karışımıdır. Gazlaştırma reaksiyonu ile üretilen gaz bileşimindeki diğer gazlara nazaran azot içerikli gazın ısıl değeri daha düşüktür (955 - 1435 kcal/m<sup>3</sup>) (www.eie.gov.tr). Bütün gazlaştırıcı tiplerinde CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'nun (su buharı) mümkün olduğunca CO, hidrojen ve metana indirgenmesi amaçlanmaktadır. CO, H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> sentez gazın temel bileşenleridir (Öngen 2011). Yakıt boyutu ve dağılımı gazlaştırıcı içinde basınç düşümü üzerine etki etmektedir. Sistem içindeki büyük basınç düşüşleri sıcaklıkta düşmeye ve yüksek katran oluşumuna neden olmaktadır. Büyük ve

düzensiz yakıt parçacıkları da prosesin başlamasını geciktirerek gaz kalitesini düşürmektedir.

Gazlaştırıcıya yüklenen yakıtın formu da gazlaştırma prosesi üzerine etki eden önemli bir faktördür. Burada yoğunluğu artırılmış biyokütle yakıtı daha fazla tercih edilmektedir. Bu nedenle biyokütle yakıtı, biriket veya pelet haline getirilerek hem yoğunluğu artırılır hem de homojen bir boyut kazandırılır. Bu işlemin ek bir enerji maliyeti getireceği de açıktır.

Yüksek uçucu madde içeren yakıtların katran, yağ ve çeşitli organik buharları piroliz bölgesinde açığa çıkar. Bu açığa çıkan bileşimler gaz türbini veya içten yanmalı motorlara zarar verir. Bu nedenle gaz temizleme çok önemli olmaktadır. Yakıtın sabit karbon miktarı ısı değeri etkiler. Yakma prosesi sonucu kalan maddeler kül olarak adlandırılır. Pratikte kül içerisinde bazı yanmamış yakıtta bulunabilmektedir. Kül miktarı ve bileşimi gazlaştırıcının problemsiz çalışması üzerine etki yapar. Külün gazlaştırıcı içinde ergimesi cüruflaşmaya ve gazlaştırıcı yüzeylerinde tabakalaşmaya neden olur. Bu da zaman içerisinde reaktörün tıkanmasına yol açar. Genelde %2'den daha düşük kül oranına sahip biyokütlenin gazlaştırılmasında bu problem fazla oluşmaz. Hava, oksijen ve buhar gibi gazlaştırma ajanları ve işletim sıcaklığı, basınç gibi faktörlerin yanı sıra ürün sentetik gazın kimyasal bileşimi, ısı değeri ve uygulama alanlarını etkileyen farklı unsurlar da bulunmaktadır. Biyokütlenin kompozisyonu, biyokütlenin partikül boyutu da ürün gaz kalitesi üzerinde etkili olan önemli unsurlardandır.

Günümüzde bazı ülkelerde buğday, çeltik, sorgum sapı gibi bazı ürünlere ait tarla atıkları kâğıt ve kâğıt hamuru üretiminde de kullanılmakla beraber, ülkemizde atıkların bu şekilde değerlendirilmesine yönelik endüstriyel bir uygulamaya rastlanmamıştır. Trakya Bölgesinde son yıllarda ekim alanı hızla artan çeltik ve kanola bitkileri içinde durum aynıdır. Öte yandan bu tür atıklardan oluşan biyokütle kaynaklarının termokimyasal yolla biyokömüre, değerli kimyasallara veya sentetik sıvı yakıt ve sentetik gaza dönüştürülmesi önemlidir. Proje önerisine konu olan gazlaştırma yöntemi; gaz ürün elde edilebilmesi açısından Dünya'da da kullanımı gün geçtikçe artan önemli termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden birisidir.

Bu proje kapsamında, öncelikle Dünya'daki çeşitli biyokütle kaynaklarının gazlaştırılması uygulamalarında da yoğun olarak kullanılmakta olan aşığı akışlı, sabit yataklı ve boşalsız olarak tasarlanmış olan laboratuvar tipi bir gazlaştırıcının imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen bu gazlaştırıcı kullanılarak, ülkemizde özellikle Trakya Bölgesinde üretim alanı yıldan yıla artış gösteren çeltik ve kanola bitkisinin hasattan sonra tarlada kalan ve bileşimlerine bağlı olarak parçalanarak toprağa karıştırılması tercih edilmeyen ve kullanım alanı olmayan sap atıkları değerlendirilmiştir. Bu sapsar kullanılarak farklı karışımlarda pelet yapımı ve gazlaştırma işlemi ile gaz yakıt elde etmek ve ürünün, beslenen hammadde formunun (direkt sap olarak veya farklı karışımda pelet olarak), pelet karışım oranlarının gaz kalitesi üzerine etkilerine yönelik somut veriler ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Gazlaştırma denemeleri sonucunda elde edilen gaz örneklerinin bileşimleri ve yakıt özelliklerinin biyokütle tipi ve pelet özelliklerine bağlı olarak değişimi incelenmiş her iki ürün ve bu ürünlerin değişik formları için optimum özgül gazlaşma parametreleri tespit edilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

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. Rasvanshi (1986), peletlenmiş çeltik kavuzundan, %16.1 CO, %9.6 H<sub>2</sub>, %0.95 CH<sub>4</sub> içeren ve ısıl değeri 3.25 MJ/m<sup>3</sup> olan sentez gazı elde edilebildiğini bildirmiştir. Gazın, reaktörden çıkış sıcaklığının da ortalama 300-400°C olduğunu ifade etmiştir.

Khater ve ark. (1992) yaptıkları araştırmada, 30 cm çaplı, 140 cm boyundaki gazlaştırıcılarında çeltik kavuzu gazlaştırarak, sentez gazı içerisindeki yanıcıların maksimizasyonuna çalışmışlardır, %13.67 CO, %5.13 H<sub>2</sub>, %2.42 CH<sub>4</sub> bileşiminde gaz üretmişlerdir.

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

Biyokütle yakıtların gazlaştırılmasında kimyasal içerik ve form gazlaştırma parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Tiangco ve ark. (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. Bu yüzden denenecek yakıtların özgül gazlaşma hızının tespit edilmesi sistemin verimliliği açısından hayati önem arz etmektedir.

Jain (2006), 15.2, 20.3, 24.4, 30.3 ve 34.3 cm 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 kg/m<sup>2</sup>h, özgül gaz üretim hızının da 420 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h 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 m<sup>3</sup> olarak alındığını ifade etmiştir.

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

iyileştirilmesi performansın artmasına ve katran oranının azalmasına yardımcı olmaktadır. Üstü açık boğazsız tip gazlaştırıcıların, yüksek kül içeriğine sahip küçük boydaki biyoküteller için uygun olduğu da saptanmıştır.

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

Thamavithya ve Dutta (2008) çalışmalarında Bangkok'da evsel atık depolama tesisinden aldıkları numuneler üzerinde gazlaştırma çalışmaları yürütmüşlerdir. Bölgede evsel atığın yanı sıra endüstriyel atıklarında depolandığı saptanmıştır. Çalışmada akışkan yataklı tip bir gazlaştırıcı kullanılmış ve oksijen/hava eşdeğer oranını (air of equivalence ratio-ER) değiştirerek gaz özellikleri üzerine ER etkisini belirlemişlerdir. Ayrıca ikincil hava ilavesi ve reaksiyon sonucunda oluşan kalıntıların tekrar reaktöre beslenmesi koşullarını da incelemişlerdir. ER oranlarını sırasıyla, %35, %30, %25, %20 ve %15 olarak değiştirmişlerdir. Yürütülen gazlaştırma denemeleri sonucunda ER(%) değeri 35' den 15'e azaldıkça oluşan sentez gazın ısı değerinin arttığı gözlenmiştir. Aynı durumda reaktör içerisinde tar oluşumunda da artış gözlenmiştir. Saptanan bu sonuçlara göre ER'nin artmasıyla birlikte ortamda O<sub>2</sub> artışının ve reaksiyonlar sonucunda CO<sub>2</sub> oluşumunun da artışının olduğu söylenebilir. Isıl değer azalmasında ise CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun artışının önemli etkisi olduğu belirlenmiştir.

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

Tarımsal atıklardan çeltik ve kanola gibi ürünlerin sapının enerji içeriği ve yoğunluğu az, özellikle çeltik sapının bazı alkali ve alkaline bileşimleri fazladır. Bu durum sapların toplanması, taşınması ve depolanması işlemlerini güçleştirmektedir. Ancak, bu saplara bazı ön işlemler uygulanarak bu sakıncalar giderilebilmektedir. Bu işlemler parçalama yoluyla yeniden boyutlandırma, balyalama ve peletleme olarak sıralanabilir. Bu işlemlerle sapın fiziko-kimyasal özellikleri değiştirilebilir ve enerji içeriği artırılabilir. Böylece saptan enerji sağlamak daha ekonomik hale getirilebilmektedir (Kargbo ve ark., 2009).

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>

emisyununun %27 oranında düşeceğini belirtmişlerdir.

Öngen (2011) termokimyasal işlemler ile organize deri sanayi atık su arıtma tesisinden toplanan arıtma çamurlarından sentez gaz üretimi ile çamur hacim azaltımı konusunu incelemiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, kuru hava debisi 0.5 L/dk olarak yürütülen deneylerde ortaya çıkan her bir sentez gaza ait hesaplanan ısı değerlerin 1000 kcal/m<sup>3</sup> düzeyine erişemediği gözlenirken, 0.1-0.2 L/dk kuru hava debisi aralığında yürütülen deneylerde en yüksek ısı değere sahip gaz kompozisyonu elde edilmiştir. Kuru hava debisinin optimum değer olan 0.2 L/dk üzerine çıkmasıyla birlikte sentez gazları H<sub>2</sub>, CO ve CH<sub>4</sub> gazlarının yüzdesel hacimlerindeki net azalma doğrulanmaktadır. Bu durum, kuru hava debisinin sentez gaz üretiminde etkin rolünü açıkça göstermiştir. Maksimum ısı değerinin 2500-3275 kcal/m<sup>3</sup> aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca saf O<sub>2</sub> ile yürütülen deneylerde elde edilen ortalama ısı değerinin, kuru hava ile yürütülen gazlaştırma deneylerinde tespit edilen ısı değerlerine göre daha yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Sap parçalayıcı

Sap örneklerinin gazlaştırma amacıyla parçalanması için N.K.Ü. Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan 3 kW güce sahip elektrik motoru olan bıçaklı tip parçalayıcı kullanılmıştır (Şekil 3.1). Saplar pelet hazırlanmasında kullanılan ortalama 3.5 mm parçacık boyutuna indirgenmiştir. Proje önerisinde denenmesi planlanmış olan 10 mm parçacık boyutu ise ön denemelerde karşılaşılan reaktörün tıkanma sorunundan dolayı iptal edilmiş ve pelet haline getirilmemiş sap denemeleri sadece 3.5 mm parçacık boyutuna sahip sap örnekleri ile gerçekleştirmiştir.



Şekil 3.1. Sap parçalamada kullanılan parçalama makinası

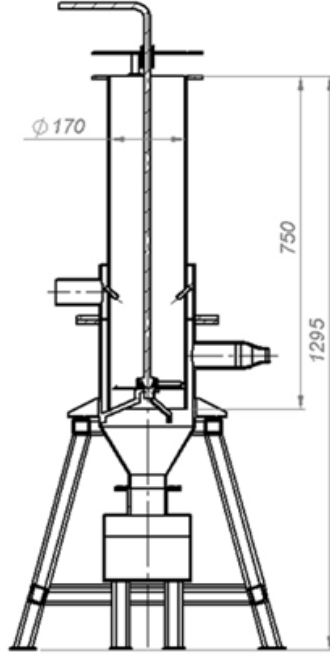
##### 3.1.2. Gazlaştırma Ünitesi

Tasarlanan gazlaştırıcı aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız tiptedir (Şekil 3.2.). Bu tip gazlaştırıcılar için kritik parametre reaktör kesitidir ve bu tasarımda reaktör çapı 170 mm ve boyu 750 mm olarak alınmıştır. Izgara, reaktör gövdesi alt kısmından 50 mm yüksekliktedir ve bu durumda reaktör efektif yüksekliği 700 mm olarak alınmıştır.

Biyokütle gazlaştırıcılarda gazlaştırıcı kapasitesi ve gücü, kullanılacak yakıt ve reaktör kesit alanına bağlıdır. Çeltik ürünleri için optimum özgül gazlaştırma hızı (SGR) 200 kg/m<sup>2</sup>h olarak önerilmekte (Jain 2006) ve bu değer esas alındığında yakıt tüketim hızı 4,5 kg/h olmaktadır. 1 kg biyokütleden yaklaşık 2 m<sup>3</sup> sentez gazı elde edileceği düşünüldüğünde ve sentez gaz ısıl değeri 5 MJ/kg alındığında elde edilecek gazın ısıl gücü 12,5 kW olması beklenmektedir.

Reaktör silindiri yüksek sıcaklık ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten (AISI310S) 5 mm kalınlıkta imal edilmiştir. Diğer üniteler ise imalat çeliğinden (St37) imal edilmiş ve kalınlık olarak 3 mm alınmıştır. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma sistemi Şekil 3.3.'te görülmektedir.

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



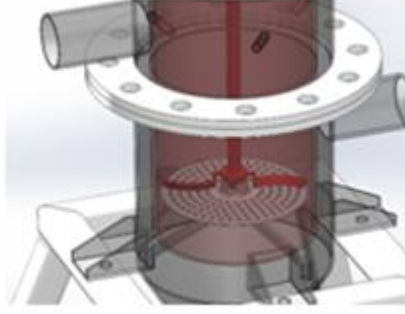
Şekil 3.2. Gazlaştırma reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler



Şekil 3.3. İmalatı tamamlanmış gazlaştırma reaktörü

Reaktör alt kısmından 50 mm yukarıda sabit ızgara bulunmaktadır. Iızgara, gaz ve kül toplama ünitesi üzerinde bulunan ayaklar tarafından desteklenmektedir. Kül

manipülasyonu, ızgara üzerine oturtulan ve manuel olarak tahrik edilen bir karıştırıcı ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Gazlaştırma sisteminde karıştırıcı

Gaz çıkışında bulunan siklon gaz temizlemenin ilk aşamasını gerçekleştirmektedir. Siklondan sonra sentez gazı, tutucu malzeme olarak paslanmaz çelik talaşlarının kullanıldığı filtreden geçerek soğutma ünitesine geçmektedir. Soğutma ünitesinden sonra ikinci bir filtre gaz temizleme prosesinin son adımını da tamamlamaktadır (Şekil 3.5.). Sistemdeki yoğuşma siklon altından ve birinci soğutma ünitesinin altından tahliye edilmektedir. Buralarda aynı zamanda su kilidi uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3.5. Gaz temizleme sistemi

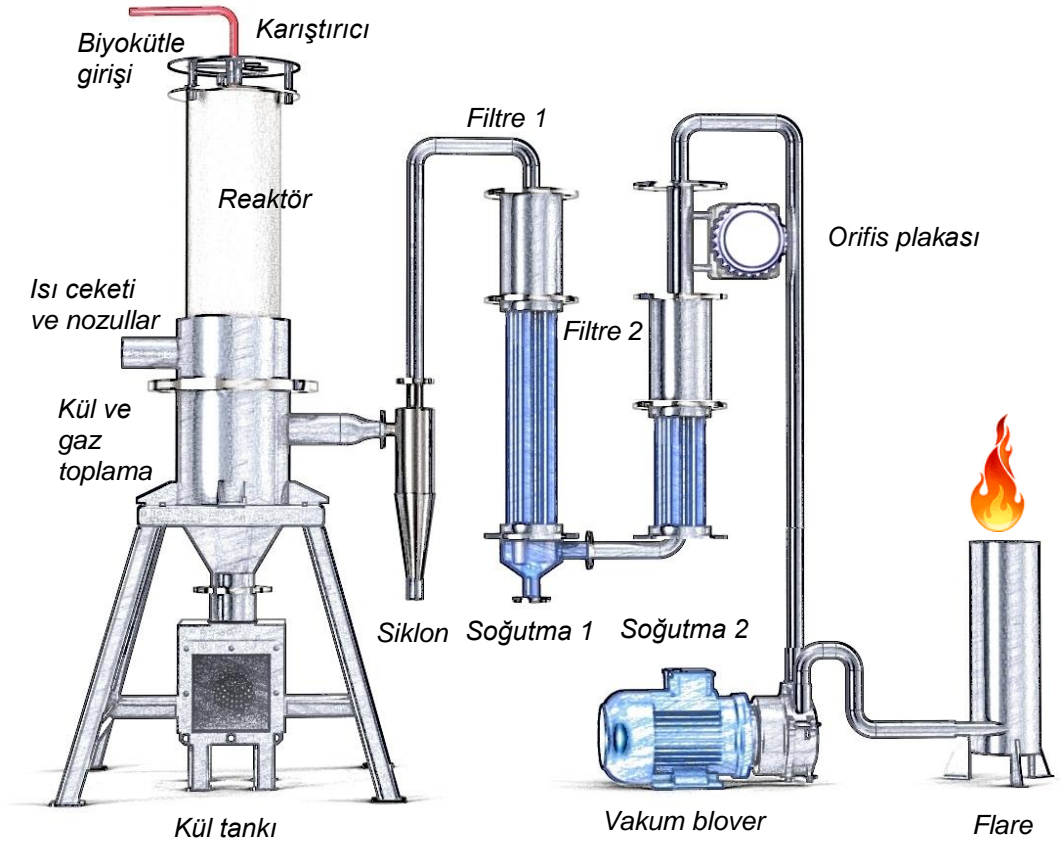
Filtre malzemesi olarak kullanılan paslanmaz çelik talaşı Şekil 3.6.'te görülmektedir.





Şekil 3.6. Filtrelerde kullanılan paslanmaz çelik talaşı

Elde edilen gazın debisi orifis plakası ve fark basınç ölçer yardımıyla ölçülmektedir. Sistem içerisinde gazın emişi devir kontrollü bir vakum fanı tarafından sağlanmaktadır. Vakum fanından çıkan sentez gazı yakma ünitesinde (flare) yakılmaktadır. Sisteme ait akış şeması Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Gazlaştırma sistemi akış şeması

Gazlaştırma sistemi tümüyle mobil olabilmesi ve çalışma kolaylığı için altıgen bir platform üzerine yerleştirilmiş ve bu platform da yine aynı ölçülerde bir altıgen şase üzerine yük hücreleri üzerinde monte edilmiştir (Şekil 3.8.).



Şekil 3.8. Tekerlekli altıgen şase ve platform

Sistemden gaz emişini bir vakum blower sağlamaktadır. Vakum blower olarak GREENCO 2RB 210-7AH16 modeli bir blower (Şekil 3.9) kullanılmıştır. Bu vakum blower tek fazlı ve iki kutupludur. 50Hz ve 60Hz frekanslarında çalışabilmekte ve 50

Hz frekansında basınç 13 kPa ve maksimum hava akışı 80m<sup>3</sup>/h, 60 Hz frekansında ise basınç 11 kPa ve maksimum hava akışı 98 m<sup>3</sup>/h'dir.



Şekil 3.9. GREENCO 2RB 210-7AH16 vakum blower

### 3.1.3. Gaz kromatografi cihazı

Gazlaştırma işleminde üretilen 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 (Şekil 3.10.) gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır.

GC ölçümleri için taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta Argon, cihaz üzerindeki pnömatik valflerin sağlıklı çalışabilmesi için de kuru hava tüpü kullanılmıştır. Cihazın ölçüm metodu oluşturarak kalibre edilmesi için kullanılan referans gaz tüpü, kuru hava ve argon tüpleri Şekil 3.12.'de görülmektedir.



Şekil 3.10. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı



Şekil 3.11. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü

### 3.1.4. Ölçüm ve kontrol donanımı

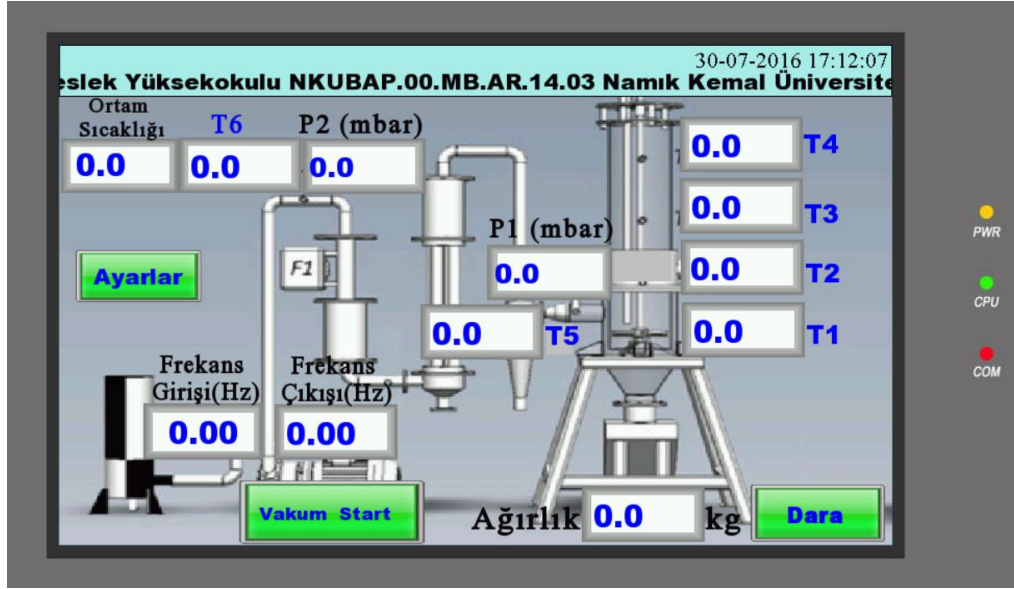
Gazlaştırma sisteminin proses şartlarını kontrol etmek ve elde edilecek verileri görüntüleyerek kaydetmek üzere NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje desteği ile geliştirilen PLC kontrollü ölçüm, kontrol ve otomasyon cihaz ve donanımları kullanılmıştır. Sistem yapısal olarak genişletilmeye uygun analog ve dijital giriş/çıkış kanalları ile donatılmıştır. Geliştirilen sistemin reaktör üzerine monte edilmiş hali Şekil 3.12. de verilmiştir.



Şekil 3.12. NKUBAP.00.MB.AR.14.03 no'lu proje ile geliştirilen ölçüm ve kontrol sistemi

Geliştirilen bu sistemde Şekil 3.13'de görüldüğü gibi ortam sıcaklığı dahil 7 ayrı sıcaklık ölçümü, 2 basınç ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca sistemin toplam ağırlığında proses sırasında meydana gelecek ağırlık değişimleri de altıgen şase üzerine

yerleştirilen 3 ayrı yük hücresi tarafından algılanarak ekranda görüntülenmektedir. Vakum bloverin devir kontrolü de inverter yardımıyla HMI pano üzerinden kontrol edilebilmektedir. Ölçülen değerler USB bağlantısı ile herhangi bir bilgisayar bağlantısı olmaksızın kaydedilebilmektedir. Değerler sistem üzerinde 7" TFT ekran üzerinden görüntülenmektedir. Şekil 3.13.'de kontrol ve görüntüleme ekranı görülmektedir.



Şekil 3.13. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı

Sıcaklık ölçümü için K tipi termokupllar kullanılmıştır. Nikel ve krom alaşımli bu termokupllar 1200°C'ye kadar kullanılabilir. Kor bölgesi T1 olmak üzere T2, T3 ve T4 nolu termokupllar 150mm aralıklarla reaktör gövdesi boyunca yerleştirilmişlerdir. Reaktör çıkış sıcaklığı T5 ve soğutma grubu çıkış sıcaklığı da T6 olmaktadır. Ayrıca ortam sıcaklığı da ölçülmekte ve görüntülenmektedir. Reaktör üzerinde termokuplların yerleşimi Şekil 3.14.'te görülmektedir.

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



Şekil 3.14. Reaktör üzerinde termokuplların yerleşimi

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Peletleme işleminin gerçekleştirilmesi

Peletleme işlemi istenen boyutlarda parçalanmış biyokütlenin sıkıştırılarak pelet haline getirilmesi işlemidir. Biyokütlenin partikül boyutlarının küçülmesi oranında peletleme işlemi kolaylaşmakla beraber; piyasada kullanılan peletleme makinaları incelendiğinde peletleme için genel olarak 3-3.5 mm parçacık büyüklüğünün kullanıldığı saptanmıştır. Bu ölçüye uygun olarak gazlaştırma denemelerinde kullanılacak olan peletler bu boyutta parçalanmış biyokütle kullanılarak hazırlanmıştır. Önceden de belirtildiği gibi pelet yapılmamış sap örnekleri ile gerçekleştirilen gazlaştırma denemelerinde sadece 3.5 mm partikül boyutu kullanılmış olup 10 mm boyutla yapılması planlanan gazlaştırma işlemleri ön denemeler sırasında karşılaşılan reaktörde tıkanma problemleri oluşumu sebebiyle iptal edilmiştir.

Peletler Tekirdağ'ın Muratlı ilçesinde bulunan bir peletleme firmasına bedelsiz olarak yaptırılmıştır. Araştırmada hiçbir bağlayıcı madde kullanılmadan hazırlanacak peletlerin yanı sıra (%100 sap), %15 oranında kömür tozu katılmış 2 farklı karışımda aşağıda gösterildiği şekilde pelet yapılmıştır (Şekil 3.15). Proje önerisinde belirtilmiş olan %10 kömür tozu karışım oranının; sadece saptan elde edilen peletler ile kömür tozu karıştırılmış peletlerin farkının daha açık belirlenebilmesi amacıyla biraz daha artırılarak %15'e çıkarılmasına karar verilmiştir.

- a) Kanola Sapı (%100)
- b) Kanola Sapı (%85) + Kömür Tozu (%15)
- c) Çeltik Sapı (%100)

d) Çeltik Sapı (%85) + Kömür Tozu (%15)



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.15. Kanola ve çeltik sapı pelet numuneleri: (a) %100 Kanola, (b) %15 kömür tozu karışımli kanola, (c) %100 çeltik sapı, (d) %15 kömür tozu karışımli çeltik sapı

Şekil 3.16'da peletleme işleminin gerçekleştiği işletmede peletlerin yapılması görülmektedir. Kullanılan peletleme makinası 45 kW güçte ve 1250 kg/h kapasitelidir. Pelet makinesinin görünümü Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16. Peletleme işleminin gerçekleştirilmesi



Şekil 3.17. Kullanılan peletleme makinesi



### 3.2.2. Biyokütle yakıt örneklerinin proksimate (kısa) analizlerinin gerçekleştirilmesi

Biyokütlenin dönüşüm işleminde yakıt özelliklerine etkili olan en önemli kimyasal özelliklerinden bazıları kısa analizler (proksimate) ile belirlenen nem, kül, sabit karbon, uçucu madde ve yüksek ısıl içerik değerleridir (Telmo vd., 2010; García vd., 2012). Ortalama 3.5 mm boyutta parçalanmış sap örneklerinin ve 2 farklı şekilde hazırlanmış olan peletlerin yakıt özelliklerine etkili olan bu özelliklerini saptamak amacıyla kullanılan standart metodlar Tablo 3.1’ de özetlenmiştir (Akçay ve Aktaş, 2014). Örneklerin nem içeriklerinin saptanmasında Biyosistem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Nüve marka etüv kullanılmıştır. Kül, sabit karbon ve uçucu madde tayininde ise; bu proje kapsamında alınması planlanan standartlara uygun şekilde kül ve sabit karbon tayinine olanak verecek şekilde programlanabilen (sıcaklık yükselme hızı, istene sürede istenen sıcaklıkta bekleme özelliği) olan 1100 °C sıcaklığa kadar çıkabilen Nüve marka kül fırını kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Sap örneklerinin kısa analizleri için kullanılan standart metodlar

Özellik	Standart metod
Nem	ASTM E871-82(2006), D4442-07
Kül	ASTM E830-87(2004), E1755-01(2007)
Uçucu madde	ASTM E872-82(2006), E897-88(2004)
Sabit karbon	Fark ile

Nem içeriğinin saptanması için yaklaşık 5 g örnek 3 tekerrürlü olarak tartılmış ve 103 ± 2°C sabit sıcaklıktaki etüvde 24 saat tutulmuştur. Nem içeriği kurutmadan önceki ve kurutmadan sonraki örnek ağırlığına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Aktaş ve Öztop, 2012).

$$N_i = \frac{M_{top} - M_{kuru}}{M_{top}} \times 100$$

Burada;

- $N_i$  : Materyalin Nem İçeriği (%)  
 $M_{top}$  : Materyalin başlangıçtaki Kütlesi (su+kuru madde, kg)  
 $M_{kuru}$  : Materyalin Kuru Kütlesidir (kg).

Kül içeriğinin saptanması amacıyla programlanabilir kül fırınında yaklaşık 2.5 g kuru örnek 10 °C/dk sıcaklık artışıyla 250°'ye kadar ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 3 saat bekletildikten sonra sıcaklık 575 °C' ye yükseltilerek örnekler bu sıcaklıkta da 3 saat daha bekletilmiştir. Daha sonra kademeli olarak soğuyan fırından alınan kül örneklerin desikatörde oda sıcaklığına ulaşmaları sağlanarak, kül miktarları tartılmış ve aşağıdaki formülde verildiği gibi sonuç % değerine çevrilmiştir (Aktaş ve Öztop, 2012).

$$K_i = \frac{M_k}{M_t} \times 100$$

Burada;

- $K_i$  : Kül İçeriği (%)  
 $M_t$  : Biyokütlenin yakma öncesi kütlesi (g)  
 $M_k$  : Biyokütlenin yakma sonrası kütlesi (g)

Uçucu madde ve sabit karbon yüzdelerini saptamak amacıyla örnekler 24 saat 105 °C' de kurutulmuştur. 0.8-1 g ağırlığında hazırlanmış olan örnekler seramik kaplara koyularak 600±50 °C'de 6 dakika ve hemen arkasından 950±20 °C'de 6 dakika kül fırınında tutulmuştur. Bu ısıl uygulamalardan sonra elde edilen örnekler tartılmış ve uçucu madde miktarı ilk ve son örnek ağırlıklarının farkından hesaplanmıştır (Akçay ve Aktaş, 2014).

Sabit karbon yüzdesi (%SK) ise kül (%K) ve uçucu madde yüzdesine (%UM) bağlı olarak aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır (Akçay ve Aktaş, 2014). Analizler öncesi örnek nemi uzaklaştırılmazsa bu durumda kül (%K) ve uçucu madde yüzdesine (%UM) nem içeriğide (%N) eklenmelidir.

$$\% SK = 100 - (\% K + \% UM)$$

### 3.2.3. Gazlaştırma işlemi

Pelet örneklerinin gazlaştırılması işlemleri materyal bölümünde detayları verilmiş olan ve bu proje kapsamında imal edilmiş olan laboratuvar tipi aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız olarak tasarlanan gazlaştırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Izgara üzerine yaklaşık 1 kg numune tutuşturulmak üzere konmuş ve korun üst bölgeye ulaşması beklenmiştir. Ardından reaktör üst kısmına kadar yüklenmiştir. Yükleme yapılması deney başlangıcı olarak alınmış, 1 saat sonra biyokütle miktarındaki azalma tamamlanarak eklenen miktar ölçülmüştür. Bu değer yakıt tüketim hızı FCR (kg/h) olarak kaydedilmiştir (Fuel consumption rate) (Singh ve ark., 2006). Şekil 3.18'de deneyin başlama (tam yükleme yapılması) ve bitişi (korun üst reaktör üzerinden görülmesi) anları görülmektedir.



Şekil 3.18. Gazlaştırma deneyinin başlaması (full yükleme) ve bitişi (korun üst kısımdan görünmesi)

### 3.2.4. Gaz bileşenlerinin analizi ve ısı değerlerinin hesaplanması

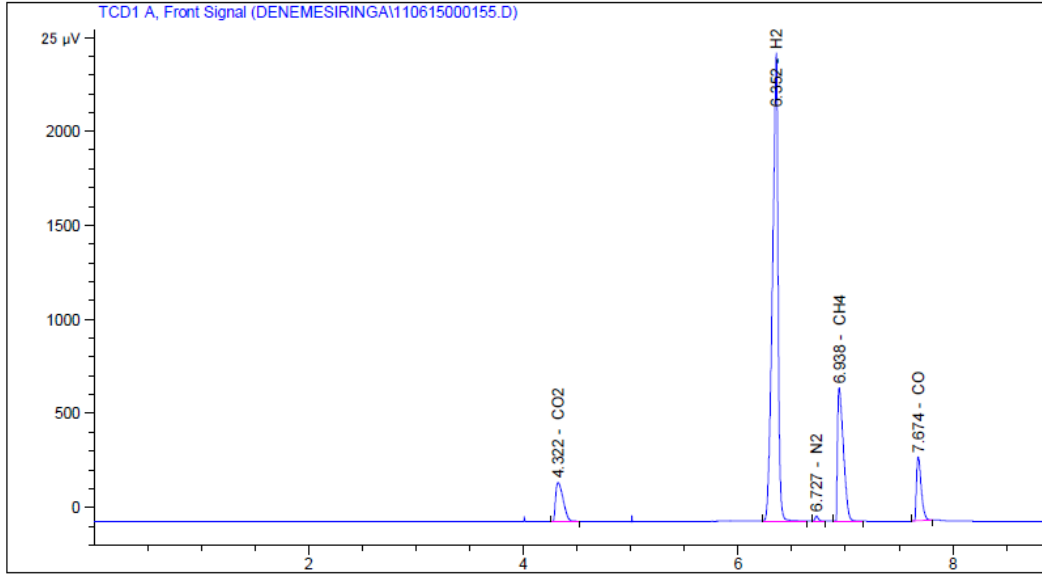
Ana gaz hattından debi ölçümünden sonra bir şırınga sistemi kullanılarak gaz numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler Agilant 7890B GC gaz kromatografi cihazına şarj edilerek analiz edilmiştir. Elde edilen gazın CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, ve N<sub>2</sub> oranları GC cihazına ait yazılım kullanılarak kaydedilmiştir. Şekil 3.19. yapılan bir gaz analizi raporu örneğini göstermektedir.

Gazın alt ısı değeri üretilen gazın birim kütlesindeki bileşenlerin oranları ve enerji içerikleri dikkate alınarak bulunmuştur (Walheim ve Nilsson 2001). Sentez gaz ısı değeri aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır:

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

Burada LHV<sub>g</sub> (MJ.Nm<sup>-3</sup>) 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°C sıcaklık için aşağıda verilmiştir (Walheim ve Nilsson 2001):

H <sub>2</sub>	:10,8 MJ.Nm <sup>-3</sup>
CH <sub>4</sub>	: 35,8 MJ.Nm <sup>-3</sup>
CO	: 12,63 MJ.Nm <sup>-3</sup>



### Normalized Percent Report

Sorted By : Signal  
 Calib. Data Modified : Thursday, October 20, 2016 2:01:25 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
4.356	BV	991.01630	7.43356e-3	13.538354		CO2
6.403	BB	4485.85010	1.81113e-3	14.930749		H2
6.830	BB	67.89848	3.83097e-1	47.803142		N2
7.085	BB	3252.07739	2.01729e-3	12.056398		CH4
7.877	BV	405.06570	1.56786e-2	11.671358		CO

Şekil 3.19. Agilant 7890B GC gaz kromatografi cihazı ile yapılan bir sentez gaz analizi raporu örneği

### 3.2.5. Optimum özgül gazlaşma hızının saptanması

Deney süresince sıcaklık, basınç, debi ölçüm ve kontrol donanımı üzerinden takip edilmektedir. Vakum bloverın devri kademeli olarak artırılarak, alınan ölçümler değerlendirilmiş ve kullanılan biyokütlelerin sistem için en uygun gazlaşma hızları tespit edilmiştir.

Özgül gazlaşma hızı SGR (special gasification rate)  $\text{kg/m}^2\text{h}$ , yakıt tüketim hızı FCR'nin reaktör kesit alanına ( $A_R$ ) bölünmesiyle bulunmaktadır.

$$SGR = \frac{FCR}{A_R}$$

### 3.2.6. Enerji dönüşüm verimliliğinin hesaplanması

Sistemin ısı verimliliğinin hesabı için elde edilen sentez gazının ısı gücü, tüketilen biyokütlenin alt ısı gücüne oranı olarak bulunmaktadır.

$$\eta_{th} = \frac{GFR \cdot LHV_g}{FCR \cdot LHV_b}$$

Burada;

GFR (Nm <sup>3</sup> /h)	: Sentez gaz debisi
FCR (kg/h)	: Yakıt tüketim hızı
LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	: Sentez gaz alt ısı değeri
LHV <sub>b</sub> (MJ/kg)	: Biyokütle alt ısı değeri

### 3.2.7. İstatistik analizler

Hammade analizleri ve gazlaştırma işlemleri sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla SPSS Ver.18 İstatistik Paket programından yararlanılmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Biyokütle analiz sonuçları

Denemelerde kullanılan çeltik sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri Tablo 4.1’de, çeltik sapı samanının kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri de Tablo 4.2 ‘de verilmiştir.

Denemelerde kullanılan kanola sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri Tablo 4.3’de, parçalanmış kanola sapı samanı için kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri de verilmiştir.

Bu tablolardaki değerler incelendiğinde peletlerde %15 kömür tozu katkısının; kül, sabit karbon ve kükürt içeriğini arttırdığı ve uçucu madde içeriğini azalttığı görülmektedir.

Çeltik örneklerinin nem içerikleri 7.01 ile 11.02 % arasında değişirken kanola örneklerinin nem içeriği ise 7.65-16.65 % arasında değişmektedir. İzin verilen maksimum nem içeriği; aşağı akışlı gazlaştırıcı sistemler için %35 ve yukarı akışlı gazlaştırma sistemlerinde ise %60 olarak bildirilmiştir (Bridgwater, 2003; Svoboda, 2009). Bu değerlere göre proje kapsamında kullanılmış olan örneklerin nem içerikleri kullandığımız gazlaştırıcı için bir sorun teşkil etmemektedir ve gazlaştırma işlemi öncesinde örnekler için bir kurutma işlemine gerek olmadığı anlaşılmıştır.

Tablo 4.1. Kullanılan çeltik sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri

	Katkısız çeltik sapı peleti		%15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti	
	Orijinal	Kuru baz	orjinal	Kuru baz
Nem	7.01	-	8.39	-
Kül	17.21	18.50	19.16	20.91
Uçucu madde	61.61	66.25	56.55	61.73
Sabit karbon	14.18	15.24	15.91	17.36
Toplam kükürt	0.18	0.20	0.29	0.32
Alt ısıl değer (MJ/kg)	12.765	13.903	12.916	14.309

Tablo 4.2. Parçalanmış çeltik sapı kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değeri

	Parçalanmış çeltik sapı
	Orijinal baz
Nem	11.02
Kül	13.42
Uçucu madde	61.49
Sabit karbon	14.07
Toplam kükürt	0.1
Alt ısıl değer (MJ/kg)	12.975

Tablo 4.3. Kullanılan kanola sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri

	Katkısız kanola sapı peleti		%15 kömür tozu katkılı kanola sapı peleti	
	Orijinal	Kuru baz	Orijinal	Kuru baz
Nem	9.03	-	7.65	-
Kül	11.44	12.21	15.07	16.01
Uçucu madde	61.20	63.13	58.12	60.07
Sabit karbon	18.33	17.11	19.16	18.2
Toplam kükürt	0.19	0.21	0.34	0.37
Alt ısıl değer	13.77	14.91	13.90	14.99

Tablo 4.4. Parçalanmış kanola sapı kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değeri

	Parçalanmış kanola sapı
	Orijinal baz
Nem	16.65
Kül	7.34
Uçucu madde	60.28
Sabit karbon	15.73
Toplam kükürt	0.33
Alt ısıl değer (MJ/kg)	13.318

Kısa analiz ve ısıl değerlere ilişkin varyans analiz sonuçlarına göre tüm özellikler arasındaki farklılıkların 0,01 seviyesinde önemli olduğu bulunmuştur (Tablo 4.5). Öte yandan LSD testine göre gruplar arasındaki farklılıklar incelendiğinde, nem ve kül özellikleri arasındaki farklılıklar tüm örneklerde önemli iken, uçucu madde içeriği açısından çeltik sap ve %100 çeltik sapı peletinin özellikleri arasındaki fark önemsiz bulunmuştur ( $P>0,01$ ).

Tablo 4.5. Çeltik ve kanola sapsularının özelliklerine ilişkin varyans analiz tablosu

		Kareler toplamı	df	Kareler ort.,	F	Önemlilik
<b>Nem</b>	Gruplar arası	189,900	5	37,980	28724,424	0,000
	Gruplar içi	0,016	12	0,001		
	Toplam	189,916	17			
<b>Kül</b>	Gruplar arası	267,818	5	53,564	6052,390	0,000
	Gruplar içi	0,106	12	,009		
	Toplam	267,924	17			
<b>Uçucu madde</b>	Gruplar arası	64,665	5	12,933	1019,680	0,000
	Gruplar içi	0,152	12	,013		
	Toplam	64,817	17			
<b>Sabit karbon</b>	Gruplar arası	25,822	5	5,164	274,860	0,000
	Gruplar içi	0,225	12	0,019		
	Toplam	26,047	17			
<b>Kükürt</b>	Gruplar arası	0,131	5	0,026	85,833	0,000
	Gruplar içi	0,004	12	0,000		
	Toplam	0,135	17			
<b>Isıl değer</b>	Gruplar arası	3,302	5	0,660	17,069	0,000
	Gruplar içi	0,464	12	0,039		
	Toplam	3,766	17			

## 4.2. Çeltik saplarının gazlaştırılmasına ilişkin sonuçlar

Çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma işleminde sistemdeki vakum kademeli olarak artırılarak 3 kademede denemeler yapılmış ve her bir kademedeki yakıt tüketim hızları ölçülmüş, özgül gazlaşma hızları hesaplanmıştır. Vakum kademeleri ise 1.kademe: 0.6 mbar, 2. kademe: 1.6 mbar ve 3. kademe: 2.6 mbar olarak ayarlanmıştır. Bu değerler Tablo 4.6' da verilmiştir. Elde edilen sentez gazı analiz sonuçları değerlendirilerek sentez gaz alt ısıl değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

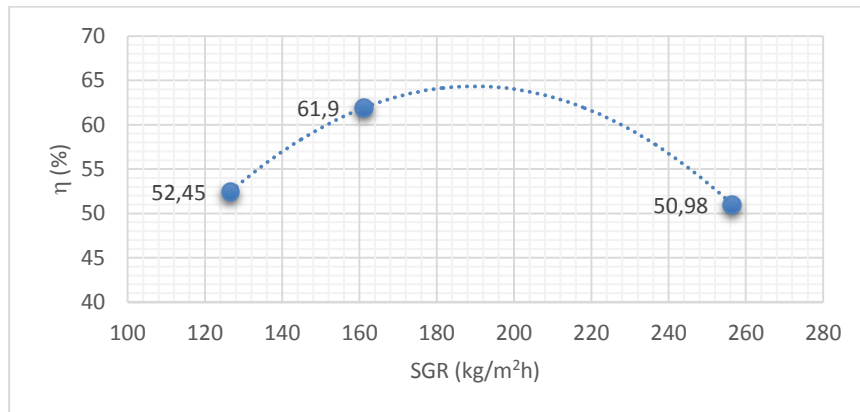
Buna göre soğuk gaz verimi ile en yüksek olan (%61,9) denemede 3.6 kg/h yakıt tüketim hızı ve buna karşılık gelen 161.1 kg/m<sup>2</sup>h özgül gazlaşma hızı ve sentez gaz alt ısıl değeri 3.439 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Sentez gaz ısıl değeri açısından 1 nolu deneme daha tercih edilebilir görünmekle birlikte ısıl verim ( $\eta$ ) açısından 2 nolu vakum kademesi daha uygun bulunmuştur. Şekil 4.1 ile verilen grafik incelendiğinde ise SGR'nin 180-200 kg/m<sup>2</sup>h aralığında verim açısından maksimum değere ulaşacağı öngörülebilmektedir. Özgül gazlaşma hızı değişimiyle birlikte sentez gazı içerisindeki yanıcı gaz bileşenleri olan H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve CO yüzdelerindeki değişim de Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Katkısız çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	$\eta$ %
1.kademe	2.9	126.6	5.22	1.82	10.19	5.35	52.45
2.kademe	3.6	161.1	8.40	2.30	12.97	8.03	61.90
3.kademe	5.8	256.5	10.76	1.85	20.66	10.53	50.98

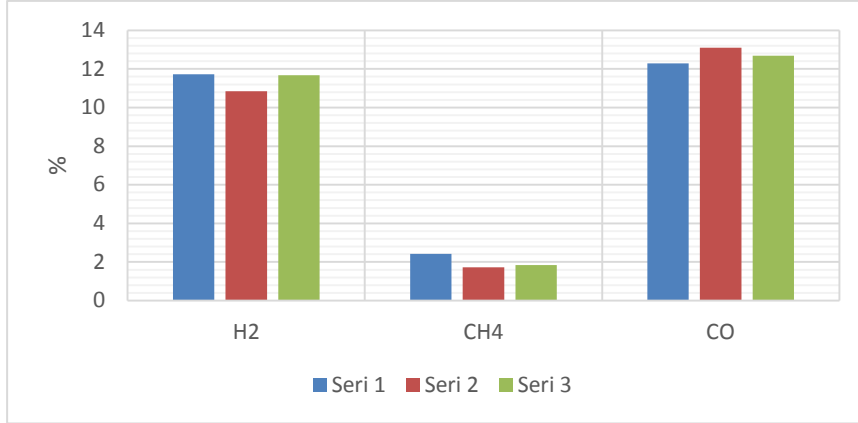
Tablo 4.7. Katkısız çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1.kademe	16.08	11.73	57.47	2.42	12.29	3.686
2.kademe	14.59	10.84	59.76	1.72	13.10	3.439
3.kademe	14.96	11.68	58.83	1.84	12.69	3.523



Şekil 4.1. Katkısız çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi





Şekil 4.2. Katkısız çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi

%15 kömür tozu içeren peletler için de sade peletlerle aynı vakum değerleri 3 kademe olarak uygulanmış ve Tablo 4.8 ile verilen değerler elde edilmiştir. Elde edilen sentez gaz analizi de Tablo 4.9. ile verilmiştir.

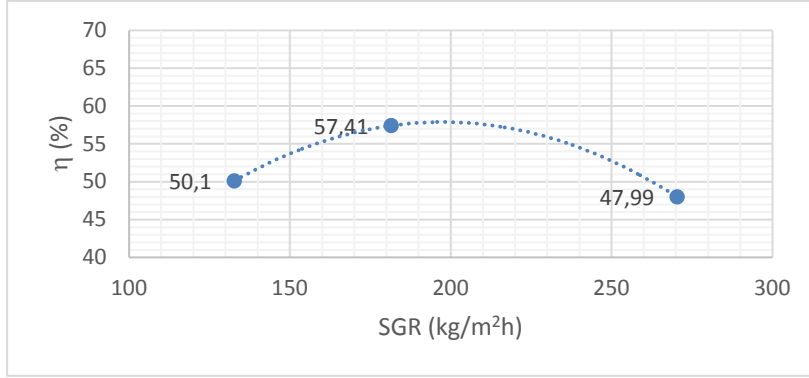
Tablo 4.8. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	η %
1.kademe	3.0	132.7	5.26	1.74	10.81	5.42	50.10
2.kademe	4.1	181.5	8.44	2.05	14.79	8.49	57.41
3.kademe	6.1	270.4	10.75	1.75	22.03	10.57	47.99

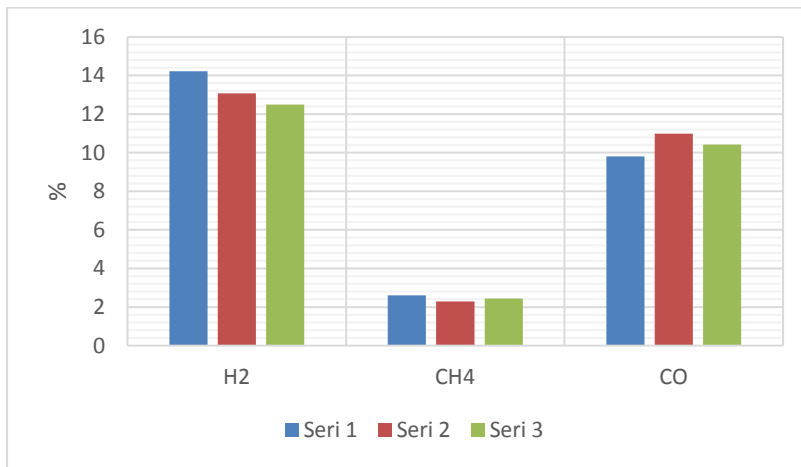
Tablo 4.9. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1.kademe	17.38	14.22	55.98	2.61	9.81	3.71
2.kademe	15.84	13.07	57.81	2.29	10.99	3.62
3.kademe	16.73	12.50	57.91	2.44	10.42	3.54

%15 kömür tozu içeren çeltik sapı peletleriyle yapılan denemelerde en yüksek sentez gaz alt ısıl değeri 1 nolu denemede elde edilmiştir (3.71 MJ/Nm<sup>3</sup>). Ancak sistemden çekilen gaz debisi artırılınca, özgül gazlaşma hızı 181.5 kg/m<sup>2</sup>h değerine ulaşmış ve bu denemede en yüksek ısıl verim (%57.41) bulunmuştur. Özgül gazlaşma hızı ile verimin değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir. Bu grafik SGR için 200 kg/m<sup>2</sup>h değerinde maksimum verim alınacağını öngörmektedir.



Şekil 4.3. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi



Şekil 4.4. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi

Peletlenmiş çeltik sap örneklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde çeltik sap peletlerinin kömür katkılı veya kömür katkısız olarak gazlaştırılması işleminin elde edilen ısıl verim ve sentez gazın ısıl değeri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu saptanmıştır ( $P < 0,01$ ). Isıl verim açısından 2. kademede elde edilen sonuçlar, gaz ısıl değeri açısından 1. kademede elde edilen sonuçların diğer kademelerde elde edilen sonuçlardan farkı önemli bulunmuştur ( $P < 0,01$ ).

Peletlenmemiş, parçalanmış çeltik sapını saman halinde gazlaştırma denemelerinde yanıcı sentez gazı elde edilmekle beraber, biyokütlenin bu formuyla enerji yoğunluğu düşük olduğundan mevcut gazlaştırma sistemiyle yapılan gazlaştırma denemelerinde bir süreklilik sağlanamamış ve gerek ısıl verimlilik gerekse elde edilen singazın ısıl değeri pelet örnekleri ile yapılan gazlaştırma sonucunda elde edilen sonuçlara göre oldukça düşük çıkmıştır. Bu sebeple denemeler sadece tek bir kademede uygulanmıştır (0.6 mbar). Tablo 4.10'da çeltik samanının gazlaştırılma parametreleri ve 4.11'de elde edilen singazın özellikleri verilmiştir. Bunun neticesinde mevcut gazlaştırma sisteminin konstrüktif açıdan saman halindeki biyokütlenin gazlaştırılması için verimli olmadığı görülmüştür. Kargbo ve ark., 2009'da peletleme gibi işlemler ile sapların enerji içerikleri arttırılabildiği ve böylece saptan enerji sağlamanın daha ekonomik hale getirilebildiğini belirtmişlerdir.

Tablo 4.10. Parçalanmış çeltik sapı gazlaştırma parametreleri

Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	η %
1	2.1	93.4	5.273	2.49	7.64	2.84	37.14

Tablo 4.11. Parçalanmış çeltik sapı sentez gazı analiz sonucu

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1	19.08	3.55	68.67	1.96	6.74	1.94

### 4.3. Kanola sapsularının gazlaştırılmasına ilişkin sonuçlar

Kanola sapı peletlerinin gazlaştırma işleminde de sistemdeki vakum kademeli olarak artırılarak 3 kademede denemeler yapılmış ve her bir kademedeki yakıt tüketim hızları ölçülmüş, özgül gazlaşma hızları hesaplanmıştır. Vakum kademeleri; 1.kademe: 2 mbar, 2. kademe: 2.6 mbar ve 3. kademe: 3.4 mbar olarak ayarlanmıştır. Bu değerler Tablo 4.12'de verilmiştir. Kanola sapı peletleri ve gazlaştırıcı reaktör iç görünümü Şekil 4.5'te verilmiştir. Elde edilen sentez gazı analiz sonuçları değerlendirilerek sentez gaz alt ısı değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 4.13 ile verilmiştir.

Buna göre soğuk gaz verimi %68,85 ile en yüksek olan denemede yakıt tüketim hızı 6.52 kg/h bulunmuş ve buna karşılık 287.2 kg/m<sup>2</sup>h özgül gazlaşma hızı ve 7.15 MJ/Nm<sup>3</sup> sentez gaz alt ısı değeri elde edilmiştir. Hem gaz ısı değeri ve hem de verimlilik açısından 2 nolu deneme (287.2 kg/m<sup>2</sup>h özgül gazlaşma hızı) daha uygun bulunmuştur. Şekil 4.6 ile verilen SGR ile verim değişimi eğrisine bakıldığında da 2 nolu deneme parametrelerinin verim eğrisinin tepe noktasına çok yakın olduğu görülmektedir; yani SGR 280-290 kg/m<sup>2</sup>h aralığının verim açısından uygun bir aralık olduğu söylenebilir. Ayrıca bu denemede elde edilen sentez gazı, hidrojen ve metan açısından da daha zengindir (Şekil 4.7).



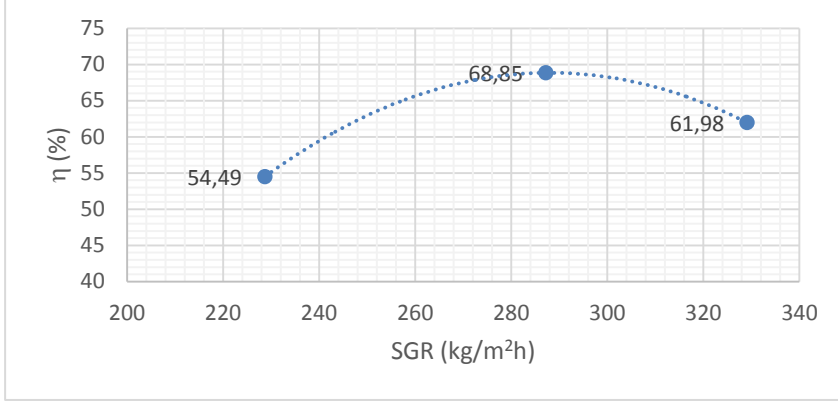
Şekil 4.5. Kanola peletleri ve reaktör iç görünümü

Tablo 4.12. Katkısız kanola sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

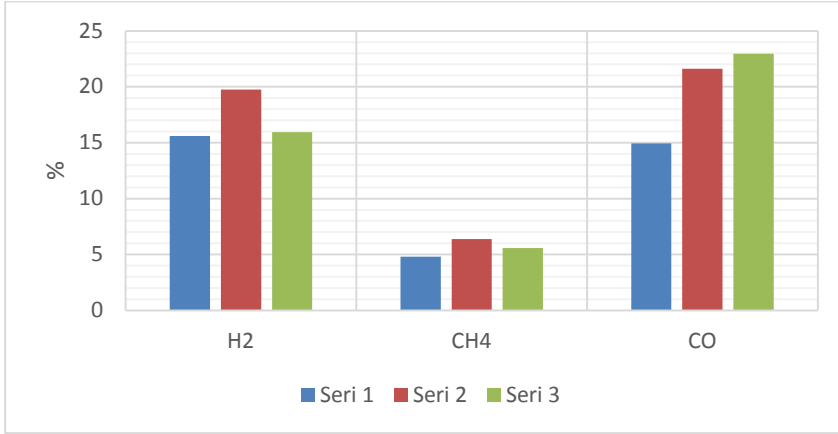
Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	η %
1	5.19	228.7	9.84	1.90	26.01	14.17	54.49
2	6.52	287.2	11.33	1.74	32.67	22.50	68.85
3	7.47	329.1	12.62	1.69	37.43	23.20	61.98

Tablo 4.13. Katkısız kanola sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1	9.12	15.60	56.54	4.82	14.93	5.17
2	12.22	19.76	40.04	6.37	21.61	7.15
3	11.37	15.93	44.16	5.57	22.96	6.62



Şekil 4.6. Katkısız kanola sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi



Şekil 4.7. Katkısız kanola sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi

%15 kömür tozu içeren kanola sapı peletleri için de 3 kademe uygulanmış ve Tablo 4.14 ile verilen değerler elde edilmiştir. Vakum kademeleri; 1.kademe: 1.6 mbar, 2. kademe: 2.6 mbar ve 3. kademe: 3.4 mbar olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sentez gaz analizi de Tablo 4.15'de verilmiştir.

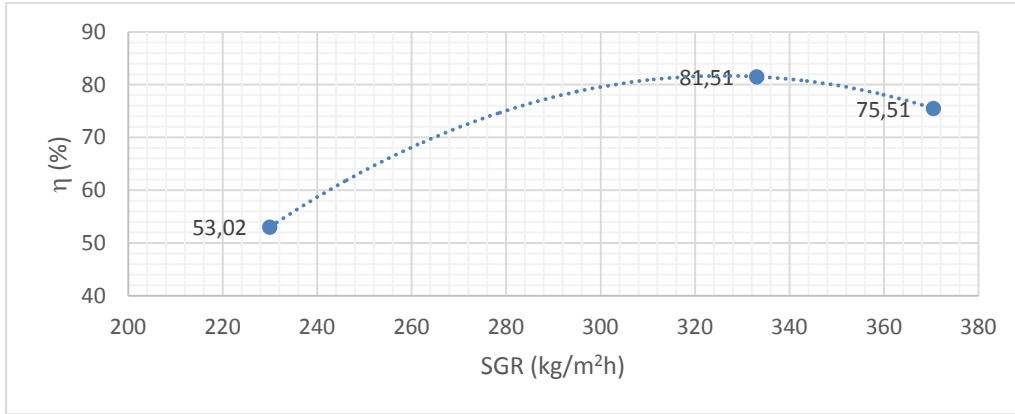
Bu verilere göre yapılan denemelerde de en yüksek sentez gaz alt ısıl değeri ( $8.96 \text{ MJ/Nm}^3$ ) 2 nolu denemede elde edilmiştir ve maksimum verime ulaşılmıştır (%81,51). Bu değer katkısız kanola peletleriyle elde edilen verimlerden de yüksektir. Buna göre, kömür tozu katkısının kanola peleti gazlaştırılması açısından olumlu sonuç verdiğini söylemek mümkündür. 310-330  $\text{kg/m}^2\text{h}$  özgül gazlaşma hızı verim açısından uygun görünmektedir (Şekil 4.8.).Yanıcı gaz bileşenleri açısından bakıldığında da (Şekil 4.9.) bu koşullarda elde edilen sentez gazının  $\text{H}_2$  ve CO yüzdesi olarak daha zengin olduğu görülmektedir.

Tablo 4.14. %15 kömür tozu katkıli kanola sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

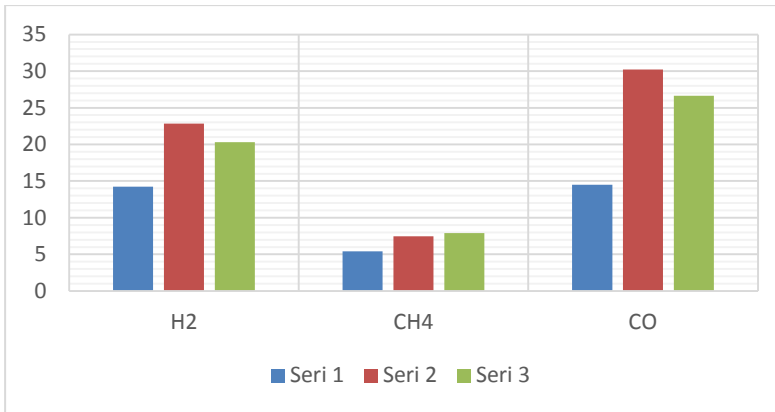
Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	η %
1	5.2	230.0	8.826	1.69	24.58	13.03	53.02
2	7.56	333.1	11.66	1.54	35.60	29.01	81.51
3	8.41	370.5	12.82	1.52	39.60	29.90	75.51

Tablo 4.15. %15 kömür tozu katkıli kanola sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1	8.21	14.25	57.61	5.43	14.50	5.32
2	10.95	22.84	28.52	7.47	30.21	8.96
3	14.01	20.31	31.10	7.92	26.66	8.40



Şekil 4.8. %15 kömür tozu katkıli kanola sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı – verim değişimi



Şekil 4.9. %15 kömür tozu katkıli çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi

Peletlenmiş kanola sap örneklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde kanola sap peletlerinin kömür katkıli veya kömür katkısiz olarak gazlaştırılması işleminin elde edilen ısıl verim ve sentez gazın ısıl değeri üzerine etkisinin istatistiksel olarak önemli olduğu saptanmıştır ( $P < 0,01$ ). Isıl verim ve gaz ısıl değeri açısından da 1. kademede

elde edilen sonuçların diğer kademelerde elde edilen sonuçlardan farkı önemli bulunmuştur ( $P<0,01$ ).

Peletlenmemiş, parçalanmış kanola sapını saman halinde gazlaştırma denemelerinde yanıcı sentez gazı elde edilmekle beraber, parçalanmış çeltik sapında olduğu gibi, enerji yoğunluğu düşük olduğundan mevcut gazlaştırma sistemiyle süreklilik sağlanamamıştır. Parçalanmamış çeltik sapı deneme sonuçlarına benzer şekilde gerek ısıl verimlilik gerekse elde edilen singazın ısıl değeri pelet örnekleri ile yapılan gazlaştırma sonucunda elde edilen sonuçlara göre oldukça düşük çıkmıştır. Bu sebeple kanola sapı denemeleri de sadece tek bir kademede uygulanmıştır (0.6 mbar). Ancak kanola samanı ile çeltik samanına göre çok daha iyi verim sağlanmıştır (Tablo 4.16). Kanola sapının direkt pelet yapılmadan gazlaştırılması sonucunda elde edilen singazın daha düşük oranlarda yanıcı gazlara sahip olduğu ve buna bağlı olarak ısıl değerinin daha düşük değerde olduğu Tablo 4.17'de görülmektedir.

Tablo 4.16. Parçalanmış kanola sapı gazlaştırma parametreleri

Gazlaştırma	FCR kg/h	SGR kg/m <sup>2</sup> h	GFR Nm <sup>3</sup> /h	G/F -	Pb kW	Pg kW	η %
1	2.63	115.9	5.0	1.90	12.85	6.21	48.30

Tablo 4.17. Parçalanmış kanola sapı sentez gazı analiz sonucu

	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1	14.46	13.72	53.44	2.88	15.50	4.47

Genel olarak çeltik ve kanola peletleri; ısıl verim ve elde edilmiş olan singazın ısıl değeri açısından karşılaştırıldığında; çeltik peletleri ile kanola peletleri arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu saptanmıştır ( $P<0,01$ ). Orijinal bazda (yaş bazda) verilmiş olan alt ısıl değerler incelendiğinde gerek çeltik pelet örneklerinde gerekse kanola pelet örneklerinde kömür katkısının ısıl değeri arttırdığı fakat bu artışın istatistiksel olarak önemli olmadığı anlaşılmaktadır ( $P>0,01$ ).

Isıl değer açısından incelendiğinde kanola kömür katkılı ve kömür katkısız peletlerin sonuçları arasındaki farkta önemli bulunmuştur ( $P<0,01$ ).

Şekil 4.10.'da gazlaştırma sırasında elde edilen flare ünitesinde yanmakta olan sentez gazı alevi görülmektedir.



Şekil 4.10. Flare ünitesinde yakılan sentez gaz alevi

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje kapsamındaki gazlaştırma denemelerinde kullanılmak üzere aşağı akışlı sabit yataklı 170 mm reaktör çaplı ve 700 mm efektif yüksekliği olan bir biyokütle gazlaştırıcı tasarlanarak imal edilmiş ve denemelerde etkin ve başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Katkısız çeltik sapı peletinden elde edilen sentez gaz alt ısı değeri, yapılan denemelerde en fazla 3,686 MJ/Nm<sup>3</sup> olurken kömür katkısı yapıldığında 3,71 MJ/Nm<sup>3</sup> olmuştur. Ancak katkısız peletlerde gazlaştırma veriminde %61,9 değerine ulaşılırken, kömür katkılı peletlerde en fazla %57,41 verim elde edilebilmiştir. Bu denemeler sonucunda, kömür katkısının çeltik sapı peletleri için sentez gaz ısı değerini arttırdığı ancak özgül gazlaşma hızının da artmasıyla beraber verime etkisinin olumsuz olduğu gözlemlenmiştir.

Katkısız kanola sapı peletlerinde sentez gaz alt ısı değeri en fazla 7,15 MJ/Nm<sup>3</sup> olmuş ve verim olarak %68,85 elde edilmiştir. Kömür katkılı kanola sapı peletlerinde ise alt ısı değeri 8,96 MJ/Nm<sup>3</sup> ve verim de %81,51 değerine ulaşmıştır. Bu değerler, kömür katkısının kanola peletlerinin gazlaştırma parametreleri açısından olumlu etki yaptığı şeklinde yorumlanmıştır. Kanola sapının pelet olarak veya direkt sap olarak gazlaştırılması sonucunda çeltik sapına göre daha yüksek ısı etkinliği sağlanmış ve ısı değeri daha yüksek olan singaz elde edilmiştir.

Çeltik sapı peletlerinde içerdiği yüksek silisyum sebebiyle 800°C ve yukarı sıcaklık değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Kanola sapı peletleri ile çeltik sapı peletleri arasındaki performans farkının bu kadar fazla olmasının ana sebebi budur.

Peletlenmemiş, saman halindeki çeltik ve kanola saplarının gazlaştırılması için reaktör konstrüksiyonunun mevcut şekliyle uygun olmadığı, uygun olması için sürekli biyokütle besleme donanımlarını ilave edilmesi ve ebatlarda değişiklik yapılarak konstrüksiyonun bu yönde yeniden yapılandırılması gerektiği görülmüştür. Peletlenerek enerji yoğunluğu artırılmış biyokütlelerin gazlaştırılması için ise tasarım sorunsuz bir şekilde çalışmıştır.

Peletlenmemiş çeltik samanı için %37,14 gibi düşük bir verim elde edilirken, kanola samanında bu değer biraz daha yüksek elde edilerek %48,30 verime ulaşılmıştır.

Özgül gazlaşma hızı ile verim ilişkisini gösteren grafikler değerlendirildiğinde; özgül gazlaşma hızı olarak:

- Katkısız çeltik peleti için 180-200 kg/m<sup>2</sup>h
  - %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti için 190-210 kg/m<sup>2</sup>h
  - Katkısız kanola peleti için 280-300 kg/m<sup>2</sup>h
  - %15 kömür tozu katkılı kanola sapı peleti için 310-330 kg/m<sup>2</sup>h
- önerilebileceği görülmektedir.



## 6. KAYNAKLAR

1. Acar, M., 2013. Enerji Tarımı. KTAE-Samsun, T.C.Gıda Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Antalya, <http://www.usf.org.tr/TR/dosya/1-1138/h/mustafa-acar--antalya-tusaf.pdf>, s.33. Erişim tarihi: 20.10.2014.
2. Akçay T., Aktas T., 2014. Estimation of Biomass Potential, Energy Values, and Characterization of Field Wastes: Example of Paddy Wastes in Tekirdag City. 12<sup>th</sup> International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture. Pp: 149-154.
3. Aktaş T., Öztop M.H., 2012. Üzüm Posası ve Bileşenlerinin Bazı Termokimyasal Özellikleri ve İzotermal Olmayan Şartlarda Piroliz Kinetikleri. 27. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, s: 509-517, 5-7 Eylül 2012, Samsun.
4. Bridgwater A.V., “Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass”, Chemical Engineering Journal, Cilt 91, 87-102, 2003.
5. Jain A.K., 2006. Design Parameters for a Rice Husk Throatless Gasifier, Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Manuscript EE 05 012. Vol VIII.
6. Kargbo F.R., Xing J., Zhang Y., Pretreatment for energy use of rice straw: A review. African Journal of Agricultural Research, 4 (13), 1560-1565, (2009).
7. Kaupp, A., Goss, R., 1984. Small scale gas producer engine systems, , Friedr. Vieweng and Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
8. Khater E.M., 1992. Gasification of rice hulls, Biomass and Bioenergy, Vol. 3, No. 5, pp. 329-333.
9. McKendry P., 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology, 83:47-54.
10. Öngen A., 2011. Endüstriyel Atıklardan Gazlaştırma ile Sentez Gaz Üretimi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
11. Rajvanshi A.K., 1986, Alternative Energy in Agriculture, Bölüm 4, Vol. II, Nimbkar Agricultural Research Institute, PHALTAN-415523, Maharashtra, India CRC Press, pgs. 83-102.
12. Reed, B.T., Das, A., 1996. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems, The Biomass Energy Foundation Press.
13. Rozainee M., Ngo S.P., Salema A.A., Tan K.G., Ariffin M., Zainura Z.N., 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.
14. Singh R. N., Jena U., Patel J. B., Sharma A. M., 2006. Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock. Renewable Energy. 31: 481-487.

15. Svoboda, K., J. Martinec, M. Pohorely, and D. Baxter, 2009. Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimization of emissions of organic compounds. *Chemical Papers*. 63(1): 15-25.
16. Thamavithya M., Dutta A., 2008, An Investigation of Msw Gasification in A Spout-Fluid Bed Reactor, *Fuel Processing Technology*, doi:10.1016/j.fuproc.2008.03.003.
17. Tiangco V.M., Jenkins B.M., Goss J.R., 1996. Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 11, No. 1, pp. 51-62
18. Tinaut F.V., Melgar A., Perez J.F., Horrillo A., 2008. Effect of biomass particle size and air superficial velocity on the gasification process in a downdraft fixed bed gasifier. An experimental and modelling study. *Fuel Processing Technology*, 89(11):1076–1089.
19. 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>)
20. WARREN T. J. B., Poulter R., Parfitt R. I., 1995. Converting Biomass to Electricity on a Farm-sized Scale using Downdraft Gasification and a Spark-Ignition Engine. *Bioresource Technology*, 52: 95-98.
21. [http:// www.eie.gov.tr](http://www.eie.gov.tr), (Erişim Tarihi : 01.10.2016).
22. <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (Erişim Tarihi : 02.10.2016).