

## Çeltik Saplarının Gazlaştırılması Amacıyla Laboratuvar Tipi Bir Gazlaştırıcının Geliştirilmesi ve Denenmesi

Türkan AKTAŞ<sup>1\*</sup> İ. Savaş DALMIŞ<sup>2</sup> Serkan TUĞ<sup>3</sup> Figan DALMIŞ<sup>4</sup> Birol KAYIŞOĞLU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 59030, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup>Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

<sup>3</sup>Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, 59030, Tekirdağ, Türkiye

<sup>4</sup>Namık Kemal Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 59030, Tekirdağ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar: [taktas@nku.edu.tr](mailto:taktas@nku.edu.tr)

Geliş Tarihi (Received): 10.11.2016

Kabul Tarihi (Accepted): 20.02.2017

Bu çalışma kapsamında, Trakya Bölgesi'nde yoğun olarak yetiştirilen çeltik bitkisinin hasattan sonra tarlada kalan saplarının gazlaştırılarak enerji içeriklerinin değerlendirilmesi için laboratuvar tipi bir gazlaştırıcı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Bölgeden toplanan çeltik sapları %100 sap ve %15 oranında kömür tozu ile karıştırılmış şekilde peletlenmiş ve peletlerin analizleri yapılmıştır. Gerek hammadde ve gerekse pelet örnekleri için gazlaştırma denemeleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen gaz örneklerinin içerikleri belirlenmiştir. 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 en fazla %57,41). Çeltik sapı peletlerinin içerdiği yüksek silisyum sebebiyle 800°C ve yukarı sıcaklık değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Peletlenerek enerji yoğunluğu artırılmış biyokütlenin gazlaştırılması için ise tasarım sorunsuz bir şekilde çalışmış fakat peletlenmemiş, saman halindeki çeltik saplarının gazlaştırılması için reaktör konstrüksiyonunun mevcut şekliyle uygun olmadığı, uygun olması için sürekli biyokütle besleme donanımlarının ilave edilmesi ve ebatlarda değişiklik yapılması gerektiği görülmüştür. Peletlenmemiş çeltik samanı için %37,14 gibi düşük bir verim elde edilmiştir. Aynı şekilde elde edilen singazın ısı değeride çeltik sapı için oldukça düşük (1.94 MJ/Nm<sup>3</sup>) bulunmuştur.

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

## Development and Testing of A Laboratory Type Gasifier for Gasification of Paddy Straw

In this research, a laboratory scale gasifier was designed and manufactured for rice straw straw that stayed on the field after harvesting to evaluate energy contents. Collected rice straw from our region was pelleted (100% straw pellet and pellet mixtured with 15% coal powder) and the pellets were analyzed. Experiments were realized by using both rice straw and pellets and biomass samples were gasified and compositions of obtained gas samples were determined . 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 specific gasification rate (maximum 61.9% for pellets without coal powder and maximum 57.41% for coal powder added pellets). 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. 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 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%. 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>).

**Key Words:** Biomass, gasification, pellet, rice straw

## Giriş

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. 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. Toprağa karıştırılması ve hayvan beslenmesinde kullanımı tercih edilmeyen ürünlerden olan ve hasattan sonra tarlada kalan çeltik saplarının biyokütle potansiyelinin 139.200 ton ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir (Acar, 2013).

Biyokütle enerji kaynakları incelendiğinde, bu kaynakların genellikle homojen olmayan bir yapıda, yüksek su ve oksijen içerikli, düşük yoğunluklu ve düşük ısı değerli olma özellikleri yakıt kalitesine olumsuz etki etmektedir. 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).

Gazlaştırma işlemi çeşitli biyokütle kaynaklarının 850 °C’nin üzerinde bir sıcaklıkta az oksijenli ortamda kısmi olarak yakılması ile yanıcı gaz ya da karbon monoksit ve hidrojen açısından zengin gaz ürününe dönüşmesi olarak tanımlanmaktadır. 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.

Biyokütlenin gazlaştırılması ile mekanik ve elektrik enerjisi üretmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada da denemiş olan aşağı akışlı

gazlaştırıcılar 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 kurutulmuş nem içeriği %20’nin altına çekilmesi gerekmektedir.

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 ısı değeri daha düşüktür (955 - 1435 kcal/m<sup>3</sup>) (Anonim, 2016). 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).

Bu araştırma kapsamında, öncelikle Dünya’daki çeşitli biyokütle kaynaklarının gazlaştırılması uygulamalarında da yoğun olarak kullanılmakta olan aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız olarak laboratuvar tipi bir gazlaştırıcı tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen bu gazlaştırıcı kullanılarak, ülkemizde özellikle Trakya Bölgesinde önemli üretim potansiyeline sahip olan çeltik bitkisinin hasattan sonra tarlada kalan ve bileşimlerine bağlı olarak parçalanarak toprağa karıştırılması tercih edilmeyen ve kullanım alanı olmayan sap atıkları değerlendirilmiştir. Bu saplar 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 özelliklerine bağlı olarak değişimi incelenmiş ve sapların farklı formları için optimum özgül gazlaşma parametreleri tespit edilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Materyal

#### Gazlaştırıcı sistem

Gazlaştırma denemeleri için aşağı akışlı, sabit yataklı ve boğazsız tipte bir

Gazlaştırıcı tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İmal edilmiş gazlaştırma reaktörü

Figure 1. Manufactured gasification reactor

Gazlaştırıcının tasarımında reaktör çapı 170 mm ve boyu 750 mm olarak alınmıştır. Izgara, reaktör gövdesi alt kısmından 50 mm yükseklikte 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 ısı değeri 5 MJ/kg alındığında elde edilecek gazın ısı 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. Reaktör üzerinde ek hava girişleri için nozullar ve sıcak hava ceketini bulunmaktadır. Ek hava girişi 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.

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 2). Sistemdeki yoğunlaşma siklon altından ve birinci soğutma ünitesinin altından tahliye edilmektedir. Buralarda aynı zamanda su kilidi uygulaması yapılmıştır.



Şekil 2. Gaz temizleme sistemi

Figure 2. Gas cleaning system

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. Sistemden gaz emişini bir vakum blower sağlamaktadır. Vakum blower olarak GRENCO 2RB 210-7AH16 modeli bir blower kullanılmıştır.

#### Gaz kromatografi cihazı

Sentez gazının bileşimini tespit etmek amacıyla AGILANT 7890B GC 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.

#### Ölçüm ve kontrol donanımı

Gazlaştırma sisteminin proses şartlarını kontrol etmek ve elde edilecek verileri görüntüleyerek kaydetmek üzere PLC kontrollü ölçüm, kontrol ve otomasyon sistemi kullanılmıştır. Sistem yapısal olarak genişletilmeye uygun analog ve dijital giriş/çıkış kanalları ile donatılmıştır. Sistemin reaktör üzerine monte edilmiş hali Şekil 3' de görülmektedir.



Şekil 3. Sistemde kullanılan ölçüm ve kontrol sistemi

Figure 3. Measurement and control system used in the system

Kullanılan ölçüm sisteminde; ortam sıcaklığına ek olarak 6 ayrı sıcaklık ölçümü ve 2 basınç ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca sistemin toplam ağırlığında proses sırasında meydana gelecek ağırlık değişimleri de kullanılan yük hücresi tarafından algılanarak ekranda görüntülenmektedir. Vakum blowerin 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.

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 150 mm aralıklarla reaktör gövdesi boyunca yerleştirilmişlerdir. Reaktör çıkış sıcaklığı T5 ve soğutma grubu çıkış sıcaklığı da T6 olmaktadır. Ayrıca ortam sıcaklığı da ölçülmüş ve görüntülenmiştir.

Reaktör çıkışında ve soğutma grubu çıkışında olmak üzere iki ayrı basınç ölçer, sistem üzerindeki basınç düşüşünü ve vakumu gözlemlemek üzere

yerleştirilmiştir. Sistem negatif basınç altında çalışmaktadır.

## Yöntem

### 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 makineleri incelendiğinde peletleme için genel olarak 3-3.5 mm parçacık büyüklüğünün kullanıldığı saptanmıştır. Bu sebeple sap örnekleri 3.5 mm parçacık boyutuna parçalanmış ve bu işlem için 3 kW güce sahip elektrik motoru olan bıçaklı tip parçalayıcı kullanılmıştır.

Araştırmada hiçbir bağlayıcı madde kullanılmadan hazırlanan peletlerin yanı sıra (%100 sap), %15 oranında kömür tozu katılmış 2 farklı karışımda aşağıda gösterildiği şekilde pelet yapılmıştır (Şekil 4). Peletleme amacıyla 45 kW güçte ve 1250 kg/h kapasitede makine kullanılmıştır.



Şekil 4. Çeltik sapı pelet numuneleri: (a) %100 çeltik sapı, (b) %15 kömür tozu karışımı  
Figure 4. Paddy straw pellet samples: (a) 100% straw, (b) mixture with 15% coal powder)

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

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 1' de özetlenmiştir (Akçay ve Aktaş, 2014). Örneklerin nem içeriklerinin saptanmasında Nüve marka etüv kullanılmıştır. Kül, sabit karbon ve uçucu madde miktarları ise programlanabilen ve 1100 °C sıcaklığa kadar çıkabilen Nüve marka kül fırını kullanılmıştır.

Tablo 1. Sap örneklerinin kısa analizleri için kullanılan standart metodlar

Table 1. Standard methods used for proximate analyses of the stalk samples

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  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  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 içeriği (%)

$M_{top}$  : 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  $10^\circ\text{C}/\text{dk}$  sıcaklık artışıyla  $250^\circ$ ye kadar ısıtılmıştır. Bu sıcaklıkta 3 saat bekletildikten sonra sıcaklık  $575^\circ\text{C}$  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 içeriği (%)

$M_t$  : Biyokütlenin yakma öncesi kütlesi (g)

$M_k$  : Biyokütlenin yakma sonrası kütlesi (g)

Uçucu madde ve sabit karbon yüzdeleri saptamak amacıyla örnekler 24 saat  $105^\circ\text{C}$  de kurutulmuştur. 0.8-1 g ağırlığında hazırlanmış olan örnekler seramik kaplara koyularak  $600 \pm 50^\circ\text{C}$  de 6 dakika ve hemen arkasından  $950 \pm 20^\circ\text{C}$  de 6 dakika kül fırınında tutulmuştur. Bu ısı 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 içeriğinde (%N) eklenmelidir.

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

### Gazlaştırma işlemi

Pelet örneklerinin gazlaştırılması işlemleri materyal bölümünde detayları verilmiş 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).

### 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. Gazın alt ısı değeri üretilen gazın birim kütledeki bileşenlerin oranları ve enerji içerikleri dikkate alınarak bulunmuştur (Waldheim 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 hacimsel yüzdeleri GC ile ölçülmektedir. Bu bileşenlerin enerji değerleri de 1 atm basınç ve 0°C sıcaklık için aşağıda verilmiştir (Waldheim 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>

### Optimum özgül gazlaşma hızının saptanması

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

Özgül gazlaşma hızı SGR (special gasification rate) kg/m<sup>2</sup>h, yakıt tüketim hızı FCR'nin reaktör kesit alanına (A<sub>R</sub>) bölünmesiyle bulunmaktadır.

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

### Enerji dönüşüm verimliliğinin hesaplanması

Sistemin ısı verimliliğinin hesabı için elde edilen sentez gazının ısı gücü, tüketilen biyokütlerin 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

### İstatistiksel analizler

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

### Bulgular ve Tartışma

#### Biyokütle analiz sonuçları

Denemelerde kullanılan çeltik sapının ve bu sapsar ile kömür tozu kullanılarak yapılan peletlerin kısa analiz sonuçları ve alt ısı değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Çeltik örneklerinin nem içerikleri 7.01 ile 11. 02 % arasında değişmiştir. 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. Bu nedenle, literatür bilgileri doğrultusunda gazlaştırma işlemi öncesinde örnekler için bir kurutma işlemi uygulanmamıştır.

Tablo 2. Kullanılan çeltik sapı peletlerinin kısa analiz sonuçları ve alt ısıl değerleri

Table 2. Results of proximate analyses and lower heating value for pellets and stalk

	Katkısız çeltik sapı peleti		%15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti		Parçalanmış çeltik sapı
	Orijinal	Kuru baz	Orijinal baz	Kuru baz	Orijinal baz
Nem	7.01	-	8.39	-	11.02
Kül	17.21	18.50	19.16	20.91	13.42
Uçucu madde	61.61	66.25	56.55	61.73	61.49
Sabit karbon	14.18	15.24	15.91	17.36	14.07
Toplam kükürt	0.18	0.20	0.29	0.32	0.1
Alt ısıl değer (MJ/kg)	12.765	13.903	12.916	14.309	12.975

Kısa analiz ve ısıl değerlere ilişkin varyans analiz sonuçlarına göre tüm özellikler arasındaki farklılıkların 0,01 seviyesinde önemli olduğu bulunmuştur. 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 ( $P>0,01$ ).

#### Çeltik sapsularının gazlaştırılmasına ilişkin sonuçlar

Çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma işleminde sistemdeki vakum kademeli olarak artırılarak 3 kademede denemeler yapılmıştır. Her bir kademede 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 3'de verilmiştir. Elde edilen sentez gazı analiz sonuçları değerlendirilerek sentez gaz alt ısıl değerleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Tablo 4'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 5 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 6'da verilmiştir.

Tablo 3. Katkısız çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

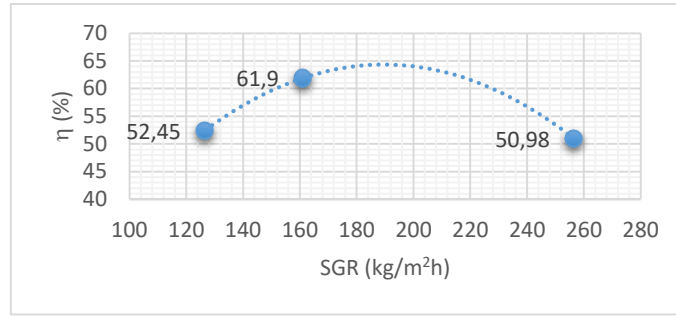
Table 3. Gasification parameters of for pure paddy straw pellets

Gazlaştırma	FCR	SGR	GFR	G/F	Pb	Pg	$\eta$
	kg/h	kg/m <sup>2</sup> h	Nm <sup>3</sup> /h	-	kW	kW	%
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. Katkısız çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

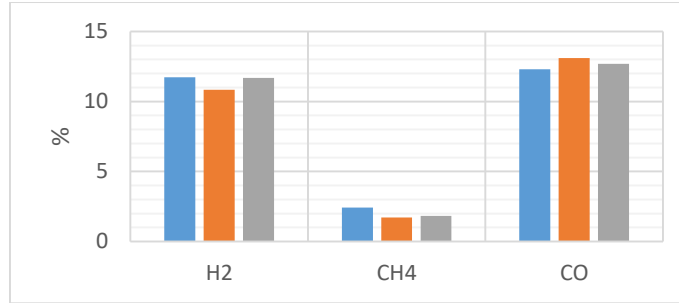
Table 4. Analyses results of sythes gas obtained from pure straw pellets

	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 5. Katkısız çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı-verim değişimi

Figure 5. Changing of specific gasification rate-efficiency for pure straw pellets



Şekil 6. Katkısız çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi

Figure 5. Changing of the ratio of combustible gases with vacuum levels for pure straw pellets

Tablo 5. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin gazlaştırma parametreleri

Table 5. Gasification parameters of for paddy straw pellets with 15% coal powder

Gazlaştırma	FCR	SGR	GFR	G/F	Pb	Pg	η
	kg/h	kg/m <sup>2</sup> h	Nm <sup>3</sup> /h	-	kW	kW	%
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 6. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinin sentez gazı analiz sonuçları

Table 6. Analyses results of sythes gas obtained from paddy straw pellets with 15% coal powder

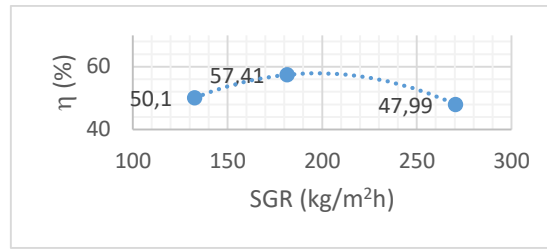
	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> %	N <sub>2</sub> %	CH <sub>4</sub> %	CO %	LHV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )
1.kademe	17.38	14.22	55.98	2.61	9.81	3.71
2.kademe	15.84	13.07	57.81	2.29	10.99	3.62
3.kademe	16.73	12.50	57.91	2.44	10.42	3.54

%15 kömür tozu içeren peletler için de sade peletlerle aynı vakum değerleri 3 kademe olarak uygulanmış ve Tablo 5 ile verilen değerler elde edilmiştir. Elde edilen sentez gaz analizi de Tablo 6. ile verilmiştir.

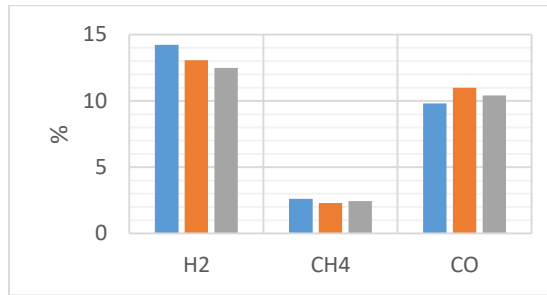
%15 kömür tozu içeren çeltik sapı peletleriyle yapılan denemelerde en yüksek sentez gaz alt ısı değeri 1 nolu denemede elde edilmiştir (3.71

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 ısı verim (%57.41) bulunmuştur. Özgül gazlaşma hızı ile verimin değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Bu grafik SGR için 200 kg/m<sup>2</sup>h değerinde maksimum verim alınacağını öngörmektedir. Elde edilen sentez gaz analizi de Tablo 8'de verilmiştir.





Şekil 7. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde özgül gazlaşma hızı-verim değişimi  
Figure 7. Changing of specific gasification rate-efficiency for straw pellets mixed with 15% coal powder



Şekil 8. %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peletlerinde yanıcı gaz oranlarının vakum kademelerine göre değişimi  
Figure 8. Changing of the ratio of combustible gases with vacuum levels for straw pellets mixed with 15% coal powder

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

Gerek ısı verimlilik gerekse elde edilen singazın ısı 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 7' de çeltik samanının gazlaştırılma parametreleri ve Tablo 8'de elde edilen singazın özellikleri verilmiştir. Bunun neticesinde mevcut gazlaştırma sisteminin konstrüktif açıdan saman halindeki biyokütlerin 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 7. Parçalanmış çeltik sapı gazlaştırma parametreleri  
Table 7. Gasification parameters of for milled paddy straw

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

Tablo 8. Parçalanmış çeltik sapı sentez gazı analiz sonucu  
Table 8. Analyses results of sythes gas obtained from milled paddy straws

	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

## Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma 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 saptanmıştır.

Çeltik sapı peletlerinde içerdiği yüksek silisyum sebebiyle 800°C ve yukarı sıcaklık değerlerinde camlaşma riski taşıdığından dolayı yüksek gazlaşma hızlarına çıkılamamıştır. Peletlenmemiş, saman halindeki çeltik 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 edilmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre, özgül gazlaşma hızı ile verim ilişkisini gösteren grafikler değerlendirildiğinde; özgül gazlaşma hızı olarak %100 çeltik peleti için 180-200 kg/m<sup>2</sup>h ve %15 kömür tozu katkılı çeltik sapı peleti için 190-210 kg/m<sup>2</sup>h önerilmiştir.

## Teşekkür

Bu araştırma NKUBAP.00.24.AR.14.28 proje numarasıyla, N.K.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen projenin bir bölümüdür.

Araştırmada kullanılan PLC tabanlı veri toplama ve kontrol sistemi N.K.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından desteklenen NKUBAP.00.MB.AR.14.03 nolu proje kapsamında geliştirilmiştir.

## Kaynaklar

- Anonim, 2016. <http://www.eie.gov.tr>, (Erişim Tarihi : 01.10.2016).
- 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.
- Akçay T., T. Aktas, 2014. Estimation of biomass potential, energy values, and characterization of field wastes: example of paddy wastes in Tekirdag city. 12th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture. p. 149-154.
- Aktaş T., M.H. Öztop, 2012. Üzüm posası ve bileşenlerinin bazı termokimyasal özellikleri ve izotermal olmayan şartlarda piroliz kinetikleri. 27. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, 5-7 Eylül 2012, Samsun, s. 509-517.
- Bridgwater A.V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal. 91: 87-102.
- Jain A.K. 2006. Design parameters for a rice husk throatless gasifier. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Manuscript EE 05 012. Vol VIII.
- Kargbo F.R., J. Xing, Y. Zhang, 2009. Pretreatment for energy use of rice straw: A review. African Journal of Agricultural Research. 4 (13):1560-1565.
- Kaupp, A., R.Goss, 1984. Small scale gas producer engine systems. Friedr. Vieweng and Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresource Technology. 83:47-54.
- Öngen A. 2011. Endüstriyel Atıklardan Gazlaştırma ile Sentez Gaz Üretimi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Rajvanshi A.K. 1986, Alternative energy in agriculture. Chapter: 4, Vol: II. Nimbkar Agricultural Research Institute, PHALTAN-415523, Maharashtra, India CRC Press, p. 83-102.
- Reed, B.T., A. Das, 1996. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. The Biomass Energy Foundation Press.
- Singh R. N., U. Jena, J. B. Patel, and A. M. Sharma, 2006. Feasibility study of cashew nut shells as an open core gasifier feedstock. Renewable Energy. 31: 481-487.
- 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.
- Waldheim L., T. Nilsson, 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/pu-blications/HeatingValue.pdf>)