

DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA DÜŞÜK SICAKLIKLARDA ORMAN ÜRÜNLERİNDEN OLUŞAN SENTETİK GAZIN DENEYSEL İNCELENMESİ

Burcu BOYACI ve Hüseyin TOPAL

Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe, 06570, Ankara
bboyaci@gazi.edu.tr, htopal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 09.04.2008 ; Kabul/Accepted: 28.07.2008)

ÖZET

Günümüzde fosil kökenli enerji kaynaklarına bağımlılık, bu kaynakların sınırlı olması ve çevresel problemler nedeniyle özellikle gelişmiş ve ülke ekonomileri sanayiye dayalı ülkelerde, enerji politikalarında bir takım bunalımları gündeme getirmiştir.

Deneysel çalışmada, orman ürünleri kökenli biyokütlenin, dolaşimli akışkan yataklı bir gazlaştırıcı düzeneğinde gazlaşma davranışı ve özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Gazlaştırma ısı kaynağı olarak, yatak dış yüzeylerinde konumlanan kelepçeli elektrikli ısıtıcılar ve biyokütlenin eksik yanma ısıları kullanılmıştır. Farklı yatak sıcaklık ve akışkanlaştırma havası hızlarında oluşan sentetik gazın içeriği analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu çalışmada, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu numuneleri kullanılmış, deneysel ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğunun gazlaşma verimleri sırasıyla %26,1, %26,7, %9,9 bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gazlaştırma, dolaşimli akışkan yatak, biyokütle.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SYNTHETIC GAS AT LOW TEMPERATURE FROM WOOD WASTES IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

ABSTRACT

Several crises in energy policies have been come up problems in developed countries especially the industrialized countries due to dependence on energy resources which origin are fossil, limited availability of those resources and environmental problems.

Experimental study has been conducted to determine gasification characteristics by using circulating fluidized bed gasifier in a laboratory scale and forest products. The thermal energy for the gasification was obtained from the electrical resistance heaters located around the side walls of the bed, and from the heat, which is released in the incomplete combustion in the gasification process. Also synthetic gas content which was produced as a result of the analyses in different temperature and air speeds has been analyzed. The research has been conducted for pine and hornbeam chips and hornbeam barks and the gasification efficiencies have been determined as 26,1%, 26,7% and 9,9%, respectively.

Keywords: Gasification, circulating fluidized bed, biomass.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde fosil yakıtlarının enerji üretiminin ana kaynağı olması pek çok problemi gündeme getirmektedir. Fosil yakıtlı yakma sistemlerinden ortama verilen emisyonlar ekolojik dengeyi bozmakta

ve enerji ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, Kyoto Protokolü ile sera gazlarının salınımını azaltılmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Sera gazları içinde en önemlisi olan CO₂ gazı salımı, çok önemli oranda ekonominin her sektöründe kullanılan fosil yakıtların (kömür, petrol, doğal gaz) yakılması

sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle enerji politikaları ve çevre ilişkisi, sera gazı salınımlarının azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. Fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması insanları yeni enerji kaynakları aramaya yöneltmiştir. Yeni enerji kaynakları ve bunları kullanılabilir enerjiye dönüştürme yollarının araştırılması çabaları, devlet kuruluşları ve özel sektör olarak dünya devletlerini çok büyük harcamalar yapmaya zorlamaktadır.

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

Ülkemizde orman ürünleri endüstrilerinde kullanılan yakma sistemlerinin baca gazları duyulur ısı kaybı oldukça yüksektir. Sektörel olarak atık veya yan ürünü mevcut olan endüstri kollarında yakma sistemleri baca gazlarındaki enerji ile biyokütleler, uygun işletme yapısında gazlaştırılarak kullanılabilir. Genel-de alevli yanma ile enerji üretiminde kullanılan biyokütleler düşük sıcaklıklı atık ısı kullanılarak gaz fazına geçirilebilir. Böylece gaz ürünler ve geri kalan karbon, yapısına uygun yakma sistemlerinde yakılabilir.

Ülkemizin halen 858 TWh/yıl (77,31 MTEP/yıl) civarında olan temiz enerji gereksinimi ile 2000 yılında 91,03 MTEP ve 2010 yılında 175,07 MTEP olacağı öngörülen enerji isteğinin, yenilenebilir enerji potansiyelinden küçük olduğu görülmektedir. Bu durumda, yeterli gelişmeler yapılırsa ve tesisler kurulsaydı, isteğin tümünün yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması söz konusu olabilecektir. Bu büyük potansiyelin önemli payını da biyokütle enerjisi oluşturmaktadır [1].

Biyokütlenin fiziksel özellikleri bir üründen diğerine farklılık göstermektedir. Karbon oranı %41,78-%47,80, hidrojen oranı %0,63–6,40 ve oksijen oranı %40,77–45,46 aralıklarında değişmektedir. Biyokütlerde kükürt oranının düşük olması bir üstünlük oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra kül oranı (%1,61–16,24) ve ısı değeri (16,50–18,40 MJ/kg) bakımından biyokütlenin özellikle linyit kömürlerine (%18,59–55,51 ve 5,50–14,50 MJ/kg) göre belirgin bir üstünlüğü vardır.

Gazlaştırma, biyokütleyi yüksek sıcaklıkta kısmi oksidasyon ile gaz ürünlere dönüştürülmesidir. Gazlaşma genellikle yoğunlaşmayan gazların (CO, CO₂, H₂, CH₄) üretiminde kullanılır [2]. Gazlaşma işlemi bir reaktörde ve hava, oksijen, kısmi oksidasyon, buhar veya bunların karışımlarının kullanıldığı reaktif atmosferinde gerçekleştirilir. Sürecin temel basamakları yine bu reaktörde gerçekleşir. Gazlaştırıcılar

her ne kadar atmosfer basıncı altında çalıştırılırsa da süreç verimliliğini arttırmak için yüksek basınç uygulamaları da vardır [3]. Gazlaşma sıcaklığı 1000°C'den daha da yüksek olabilir. Gaz ürünler, yoğunlaşmış tarların atıksı fraksiyonlarını, aerosolları ve partiküleleşmiş külleri içerir.

Gazlaştırma kullanılan ortama göre, havada gazlaştırma, oksijenli ortamda gazlaştırma, buhar ortamında gazlaştırma ve karbondioksit ortamında gazlaştırma olarak sınıflandırılmaktadır.

Hava ortamında gazlaştırma, çok basit ve iyi bilinen bir süreç türüdür [4]. Ürünler yüksek oranlarda azot içerirler. Ürün gazlar seyreltik haldedir ve enerji olarak düşük değere sahiptirler (4-600 kJ/Nm³). Oksijen ortamında gazlaştırmada ise ürünler daha yüksek enerjili (12000 kJ/Nm³) ve CO ve H₂ gibi daha değerli gazlardan oluşurlar. Fakat kullanılan oksijen ünitesinin maliyeti oldukça yüksektir [5]. Oksijen veya havanın farklı miktarlarda karışımı olan buhar ortamında gazlaştırmada H₂/CO oranı daha yüksektir ve metan, metanol, hidrojen gazı, nafta, basit aromatik bileşikler (C₁-C₅) gibi çok değerli ürünler yüksek oranda elde edilirler. Çizelge 1'de gazlaştırma sürecindeki temel denklemler verilmiştir [6].

Çizelge 1. Gazlaştırma sürecindeki temel tepkimeler (Basic Equation at gasification process)

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

Literatür çalışması incelendiğinde; Li ve ark., çevresel seçeneklerle ekonomik ve teknik açıdan en iyi şekilde oluşturulan sistem ile testere talaşı kullanılarak analizler yapmışlardır. Biyokütle gazlaştırılması için, pilot ölçekli dolaşım akışkan yatak gazlaştırıcıda deneyler yapılmış ve 700-850°C sıcaklık ile 16-45 kg/h hava debisinde çalışmalar yürütülmüştür. Süspansiyon yoğunluğu göz önünde bulundurarak kimyasal ve enerji analizleri yapılmış, farklı sıcaklık, hava/oksijen oranlarında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pilot ölçekli sistemde yapılan ölçümler ile süspansiyon sıcaklık ve O/C oranında bağlı olarak üretilen gaz karışımı incelenmiştir [7].

Lv ve ark. yaptığı çalışmada ise, biyokütlenin hava – buhar kullanarak dolaşımli akışkan yatakta gazlaştırma incelenmiştir. Yapılan deneylerde reaktör sıcak–lığının etkisi, buhar–biyokütle oranı (S/B), denklik oranı (ER), ve biyokütle boyutuna bağlı olarak gaz bileşimleri, gaz ürün, buhar ayrışımı, alt ısı değeri, karbon dönüşüm verimi incelenmiştir. Yatak malzemesi olarak silis kumu (0,2-0,3 mm çaplarında) ve yakıt olarak da çam ağaç talaşı (0,6-0,9 mm, 0,45-0,6 mm, 0,3-0,45 mm ve 0,2-0,3 mm çaplarında) kullanılmıştır. Özgül yoğunluğu 1,43 ile 2,57 Nm³/kg-biyokütle olan gaz ürün elde edilmiş ve gaz ürünün alt ısı değeri 6741 ile 9143 kJ/Nm³ olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra biyokütlenin hava ve buhar ile gazlaştırma işlemleri karşılaştırılmıştır [8].

125 mm çapında, 1800 mm yüksekliğindeki dolaşımli akışkan yatak test sistemi ile pirinin yanma prosesi üzerine, Topal ve ark. farklı hava fazlalık katsayıları (1,1 ile 2,16 aralığında) ile deneysel çalışma yapmışlardır. Gaz yakıttaki O₂, SO₂, CO₂, CO ve NO_x konsantrasyonları ölçülmüş, pirina ve kömür için yanma verimleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda pirinin yanma verimi %82,25 ile %98,66 aralığında ve minimum emisyon için hava fazlalık katsayısının 1,35 olduğu belirlenmiştir [9].

Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği bünyesinde yürütülen “Orman ürünleri atıkları ve SEKA kağıt fabrikası atık çamurlarının gazlaştırma davranışının akışkan yatakta deneysel incelenmesi ve enerji potansiyeli” adlı araştırma fonu projesi ile odun ve atık çamur gazlaştıran biyokütle sistemlerinin dikkate alınan ısı ve güç üretim için enerji verimliliği ve ekonomisi üzerine çalışmalar yapılmıştır [10].

Topal ve ark., tarımsal atıklar (şeftali ve kayısı çekirdeği) ve linyit kömürü kullanımı ile 125 mm çapında, 1800 mm yüksekliğindeki dolaşımli akışkan yatak yanma prosesini gerçekleştirmiş ve farklı hava fazlalık katsayıları ile deneysel çalışma yapmışlardır [11]. Ayrıca yine aynı düzenekte farklı işletme şartlarında tarımsal atıkların yanma süreci farklı hava hızlarında yanma verimleri belirlenmiştir [12].

Bu çalışmada, biyokütle enerjisini elde etmek amacıyla kolon malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılan, dağıtıcı elekten itibaren 0,9 m yüksekliğinde, 10 cm çapındaki dolaşımli akışkan yatak test düzeneğinde gazlaştırma işlemi yapılmıştır.

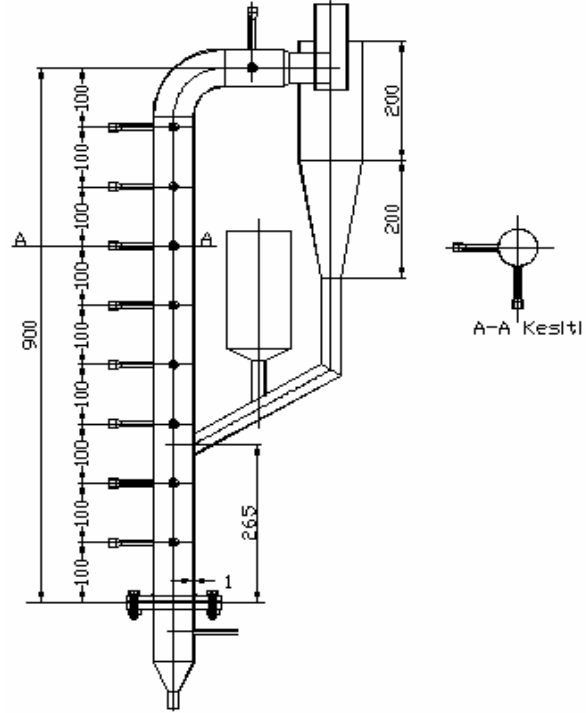
2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

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

laboratuvar ölçekli bir dolaşımli akışkan yatak test düzeneğinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.1. Dolaşımli Akışkan Yatak Test Sistemi (Circulating Fluidized Bed Test System)

Kolon malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılan, dağıtıcı elekten itibaren 0,9 m yüksekliğinde, 10 cm çapında ana kolona sahip deney sistemi ile, orman ürünlerinin gazlaştırması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sentetik gazın analizi yapılmıştır (Şekil 1) [13].



Şekil 1. DAY deney düzeneği (CFB experimental mechanism)

Deney düzeneği bir panel üzerine monte edilmiş, silindirik altlığı, dağıtıcı elek, dağıtıcı hücre, hava giriş bağlantısı, fazla basınç boşaltma sistemi bağlantısı, (üstünde) hava filtresi, (içinde) ısıtıcı eleman, ısıtıcı elemanın içinde gömülü olarak ısıtıcı sıcaklığını ölçen prob, yatak sıcaklığını ölçen prob, yatak hücresi basıncını ölçen prob, panel üzerine monte edilmiş halde bulunan hava akış metresi (rotometre), akış kontrol vanası ve hava giriş bağlantısı üzerinde filtre basınç regülatörü, değişken transformatör (ısıtıcı kontrolü), basınç transmitteri (3 adet), yatak hücresindeki farklı yüksekliklerde basınç değerini ölçmek için kullanılmakta, sıcaklık indikatörü (ısıtıcı eleman, yatağa hava giriş sıcaklığını gösterir), on/off anahtarı, sigorta, voltmetre, ampermetre, yüksek sıcaklık kontrol devresi, elektriği ve mekanik bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Düşey silindirik hücrenin içinde, seçilecek malzemenin dağıtıcı eleğinin üzerine yerleştirilmesiyle yatak oluşturulur. Dağıtıcı elek, yatak malzemesinin, yatak hücresinin dışına akmasına engel olur, yatağa

homojen hava akışını, fazla basınç düşümüne neden olmadan sağlar. Yatak hücresi, dağıtıcı elek, filtre, panel üzerine monte edilmiş dirsek ile panele asılı durumdadır.

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

2.2. Deney sisteminde kullanılan analiz yöntemleri (Experimental System by Using Analysis Methods)

Kazan ısı performans ve emisyon özelliklerinin incelenmesi amacıyla, gazların içerdiği gaz derişimlerinin zamana bağlı olarak derişimlerinin analizi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda ilgili test programının gerçekleştirilmesinde her bir gaz analizi için Çizelge 2’de verilen EPA standartlarındaki analiz yöntemlerinin kullanılmasının uygun olacağı saptanmıştır.

Çizelge 2. Baca gazının analiz yöntemleri (Instruments used for analysis of flue gas)

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

¹ Seyreltilmiş Hat ² Direk Hat

2.3. Kullanılan numunelerin özellikleri (Using sample properties)

Kullanılan numunelerin yenilenebilir enerji kaynağı olarak incelenmesinde, öncelikle örneklerin elementer analizi belirlenmiş ve ısı değer hesabı yapılmıştır. Ayrıca örneklerin nem, kül ve uçucu madde miktarları belirlenerek numune özellikleri saptanmıştır (Çizelge 3).

Deneylerden önce numunelerin dolaşım akışkan yataklı gazlaştırıcı da kullanılabilecek duruma

Çizelge 3. Çam talaşı, gürgen talaşı ve gürgen ağaç kabuğu elementer, kaba ve ısı değer analiz sonuçları (Results of thermal and rude value analyses of pine sawdust, hornbeam sawdust and hornbeam bark)

Bileşenler	Çam Ağacı Talaşı	Gürgen Ağaç Talaşı	Gürgen Ağaç Kabuğu
Kuru ve Külsüz Temelde Elementer Analiz			
C	49,81	53,08	57,00
H	5,80	8,11	4,85
N	0,17	0,26	1,43
O	44,23	38,55	36,72
Kaba Analiz			
Nem	6,45	7,42	8,20
Uçucu Madde	77,77	81,63	76,74
Kül	3,50	1,70	2,01
C _{fix}	12,28	9,25	13,05
Alt Isıl Değeri kcal/kg	5264,85	5253,97	5544,64

getirilmesi için boyutlarının uygun hale getirilmesi şarttır. Ayrıca gazlaştırma prosesi, tanecik boyutuna göre farklılık göstereceğinden boyut analizi yapmayı zorunlu hale getirmektedir. Şekil 2’de çam, gürgen ağacı talaşı ve gürgen ağaç kabuğu boyut analizi gösterilmektedir.

2.4. Deney Programı (Experimental Program)

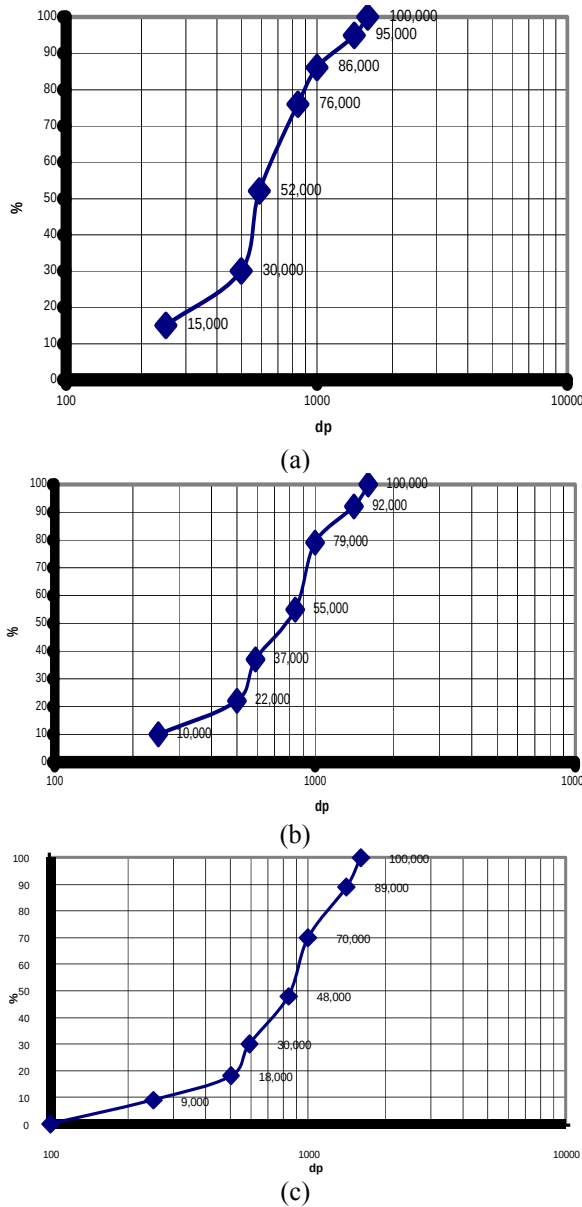
Deneysel çalışma boyunca, ağaç talaşı ve kabuğu üzerine karar verilen yakıtların sistem dağıtıcı elek yapısına bağlı olarak ASTM 8 inç elek setine göre belli aralıklarda partikül boyutu belirlenmiştir. Yine dolaşım akışkan yatak sistemindeki elektrikli ısıtıcılara göre işletme sıcaklığı deneysel çalışma da maksimum değerde çalıştırılmıştır.

Biyokütle olarak kereste, talaş, ağaç kabuğu ve kağıt seçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan biyokütle türleri, çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu kolay elde edilebilir olması sebebiyle seçilmiştir (Şekil 3). Seçilen biyoküteller belli partikül boyutlarında (0,25-0,5mm, 0,5-0,84mm, 0,84-1,41mm, 1,41-1,6mm) öğütülerek hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada, belli partikül boyutunda hazırlanan yakıt, işletme sıcaklığı 180°C, 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C, 300°C’lerde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma ile hedeflenen, özellikle düşük sıcaklıklarda biyokütle gazlaşmasının deneysel olarak incelenmesidir.

2.5. Gaz Ürünü Isıl Değeri (Calorific value of gas product)

Biyokütellerin alt ısı değerleri (ısıtma ısısı) biyokütlenin net kullanılabilen ısısını verir. Biyokütlenin tersinir biçimde gazlaştığı varsayılırsa, oluşan maksimum (teorik) yanıcı gaz miktarının yakılması sonucu oluşan net ısı da biyokütlenin ısı değerine eşit varsayılabilir. Bu nedenle, gazlaşma verimi aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır. Gaz ürünü ısı değer hesabı Çizelge 4’ de gösterilmiştir.

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



Şekil 2. Çam (a), gürgen ağacı talaşı (b) ve gürgen ağaç kabuğu (c) boyut analizi (kümülatif değerlere göre) (Size analysis of pine sawdust, hornbeam sawdust and hornbeam bark, according to cumulative values)

Çizelge 4. Gaz ürünü ısı değeri hesabı (Heat value calculation of fuel gas)

	Çam Ağaç Talaşı	Gürgen Ağaç Talaşı	Gürgen Ağaç Kabuğu
$V_G \left(\frac{Nm^3 - G}{kg - biyokütle} \right)$	11,82	11,58	14,18
$H_{u-G} (kcal/Nm^3)$	116,21	121,46	38,72
$q_G (kcal/kg)$	1373,03	1407,08	548,92
$H_{u-biyokütle} (kcal/Nm^3)$	5264,85	5253,97	5544,64
$\eta_G (\%)$	26,14	26,81	9,93

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

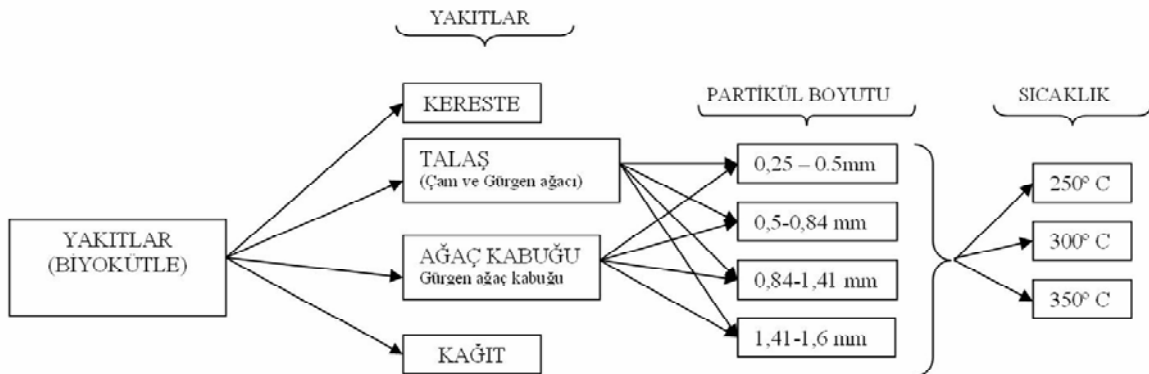
$$\eta_{gazlaşma} = \frac{\sum_1^2 (V_G H_u)_i}{H_{u-biyokütle}} \times 100$$

2.6. Deney Sonuçları (Experimental Results)

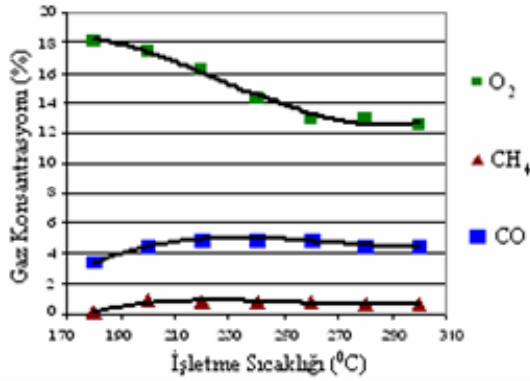
Deneyisel çalışma boyunca ele alınan 3 numune (çam ağaç talaşı, gürgen ağaç talaşı, gürgen ağaç kabuğu) ile işletme sıcaklığı boyunca gaz ürün içerisindeki bileşenler incelenmiştir.

Yapılan deneylerde üç tür biyokütle ile akışkan yatak kolonunun dağıtıcı plakadan 1000 mm yukarıda alınan kesitte sıcaklık ve gaz konsantrasyon profilleri çıkarılmıştır. İncelemesi yapılan kesitte 180°C, 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C, 300°C ortalama yatak sıcaklıklarında deneyler yapılmıştır. Her bir deneyde sürekli analizleri yapılan CO, CH₄, O₂ gazlarının dağılımları elde edilmiş, deney ortalama değerleri Şekil 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

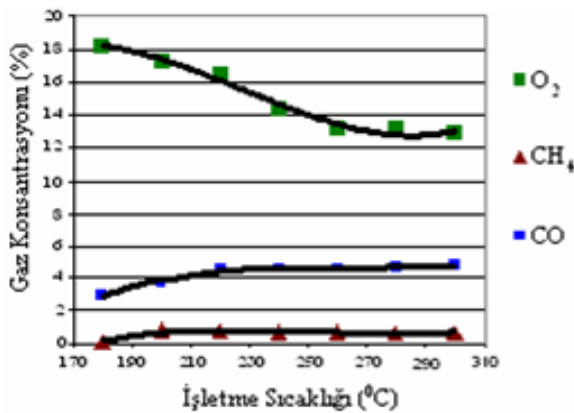
Deneyisel incelemelerde çok küçük tanecikler reaksiyon hızını artırarak, iri tanecikler beslenen hava ile reaksiyona giren yakıt yüzey alanı küçük taneciklere göre az olması sebebiyle reaksiyon sonucunda CO yerine CO₂ üretimi artacağı belirlenmiştir.



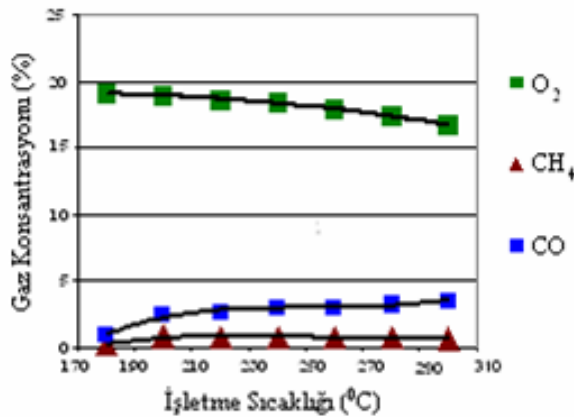
Şekil 3. Deney programı (Experimental Program)



Şekil 4. İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenlerinin değişimi (Obtained of gas component hornbeam sawdust gasifier process changes with working temperature)



Şekil 5. İşletme sıcaklığı ile çam ağaç talaşı gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenlerinin değişimi (Obtained of gas component pine sawdust gasifier process changes with working temperature)



Şekil 6. İşletme sıcaklığı ile gürgen ağaç kabuğu gazlaştırma prosesinden elde edilen gaz bileşenlerinin değişimi (Obtained of gas component hornbeam bark gasifier process changes with working temperature)

Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6'da işletme sıcaklığı boyunca ana kolonda O₂, CO ve CH₄ hacimsel yüzdeleri görülmektedir. Yatak malzemesi olarak düşünülen silis kumunun 1200g ana kolona beslemesi yapılmıştır. Ayrıca hava debisi 61 m³/h, ısıtıcı verimi %38 ayarlanarak sıcaklık artışının ~ 4°C/dk olması sağlanmıştır.

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

Yapılan deneylerde gürgen ağacı kullanımı ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada (Şekil 4) yüksek sıcaklıklarda CO miktarındaki artış diğer yakıtlarla yapılan deneylere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç, gürgen ağaç talaşıyla gerçekleştirilen gazlaştırma deneyinde elde edilen gazlaşma veriminin diğer yakıtlara göre daha yüksek olması ile de açıklanabilir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalarda, gürgen ağaç kabuğu ile yapılan deneylerde kimyasal reaksiyonların tam olarak gerçekleşmediği O₂, CO ve CH₄ değerlerinin azlığı ile belirlenmiştir.

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

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

Ülkemizde orman ürünleri endüstrilerinde kullanılan yakma sistemlerinin baca gazları duyulur ısı kaybı oldukça yüksektir. Sektörel olarak atık veya yan ürünü mevcut olan endüstri kollarında baca gazlarındaki enerji ile biyoküteller uygun işletme yapısında gazlaştırılarak kullanılabilir. Genelde alevli yanma ile enerji üretiminde kullanılan biyoküteller düşük sıcaklıklı atık ısı kullanılarak gaz fazına geçirilebilir. Böylece gaz ürünler ve geri kalan karbon yapısına uygun yakma sistemlerinde yakılabilir.

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

Deneylerde çam ağacı talaşı, gürgen ağacı talaşı ve gürgen ağaç kabuğu kullanılarak gazlaştırma prosesinde amaçlanan çalışma bölgesinde (180 – 300

°C) gazlaştırma işlemi gerçekleştirilmeye çalışılmış ve elde edilen gaz ürün bileşenleri incelenmiştir.

Gaz ürün olarak belirlenen gaz bileşenlerin hava ile gazlaştırma sürecinde buhar ile gazlaştırma ile elde edilene göre daha düşük olduğu belirlenmiş ve gazlaştırma işlemi boyunca etki eden sıcaklığın da daha düşük olması ürün gaz konsantrasyonunu azaltmıştır.

Deneysel çalışma süresince, biyokütle gazlaşma potansiyeli ısı değerlerinin hesabı, biyokütlenin tersinir biçimde gazlaştığı varsayılarak ve oluşan maksimum (teorik) yanıcı gaz miktarının yakılması sonucu oluşan net ısı da biyokütlenin ısı değerine eşit olduğu düşünülerek hesaplanmıştır. Buna göre brüt gazlaşma verimi $\eta_{\text{gazlaşma}}$ belirlenmiştir. Çam, gürgen ağaç talaşı ve gürgen ağaç kabuğu üzerine yapılmış, deneysel ölçüm ve hesaplamalar sonucunda, sırasıyla gazlaşma verimleri %26,1-%26,7-%9,9 bulunmuştur. Deney sonuçlarına bakılarak deney şartlarındaki gazlaştırma sonunda biyokütle uçucu miktarının yaklaşık üçte birinin elde edildiği anlaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, gazlaşma potansiyelinden en az yararlanan ağaç kabuğu, en fazla yararlanan ise ağaç talaşı olduğu belirlenmiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

Simgeler	Açıklama
d_p	Partikül çapı (μm)
T_R	Reaksiyon Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
CO_2	Karbondiyoksit
CO	Karbonmonoksit
CH_4	Metan (Hidrokarbon)
H_2	Hidrojen
O_2	Oksijen
SO_2	Kükürtdiyoksit
C_{fix}	Sabit karbon
H_u	Gazın ısı değeri (kcal/Nm^3)
$H_{u-\text{biyokütle}}$	Biyokütlenin alt ısı değeri (kcal/Nm^3)
$V_G(\frac{\text{Nm}^3-G}{\text{kg-biyo}})$	Yanıcı gazın gazlaşma potansiyeli
q_G	Gazın ısı değeri (kcal/kg)
$\eta_{\text{gazlaşma}}$	Gazlaşma verimi (%)
ER	Denklik oranı

KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Acaroğlu, M., Ültanır, M. Ö., “Türkiye’de biyokütle enerji potansiyeli ve değeri-

dirilmesi”, **Türkiye’de 8. Enerji Kongresi**, Cilt II, Ankara, 161-172, 2000.

2. Diebold, J.P., Bridgwater, A.W., “Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for the Production of Liquid Fuels”, **In Development in Thermochemical Biomass Conversion**, 5-25, London, 1997.
3. Backman, R., Frederick, W.J., Hupa, M., “Basic Studies on Black Liquor Pyrolysis and Char Gasification”, **Biosource Technology**, 46:153-158, 1993.
4. Devi, G.T., Kannan, M.P., “Calcium Catalysis Air Gasification of Cellulosic Chars”, **Fuels**, 77: 1825-1830, 1998.
5. Wang, Y., Kinoshita, C.M., “Experimental Analysis of Biomass Gasification With Steam and Oxygen”, **Solar Energy**, 49: 3-4, 1992.
6. Demirbaş, A., Çağlar, A., “Catalytic Steam Reforming of Biomass and Heavy Oil Residues to Hydrogen”, **Energy, Education Science and Technology**, 11: 45-52, 1998.
7. Li, X. T., Grace J. R., Lim C. J., Watkinson A. P., Chen H. P., Kim J. R., “Biomass gasification in a circulating fluidized bed”, **Biomass and Bioenergy**, 26: 171-193, 2004.
8. Lv, P.M., Xiong, Z. H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y, Zhu, J. X., “An experimental study on biomass air – steam gasification in a fluidised bed”, **Bioresource Technology**, 95: 95-101, 2004.
9. Topal, H., Atımtay, A.T., Durmaz, A., “Olive cake combustion in circulating fluidized bed”, **Fuel** 82: 1049-1056, 2003.
10. Topal, H., “Orman ürünleri atıkları ve SEKA kağıt fabrikası atık çamurlarının gazlaştırma davranışının akışkan yatakta deneysel incelenmesi ve enerji potansiyeli”, **Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi**, MMF 06/2002-47, Ankara, 2004.
11. Topal H., Atımtay A.T., “Co-Combustion of Agricultural wastes in a Circulating Fluidized Bed”, **Circulating Fluidized Bed Technology VIII, Proceedings of the 8th International Conference on Circulating Fluidized Beds**, Hangzhou, May 10-13, China, 2005.
12. Atımtay A.T., Topal H., “Agro-waste Combustion in a Circulating Fluidized Bed”, **Circulating Fluidized Bed Technology VIII, Proceedings of the 8th International Conference on Circulating Fluidized Beds**, Hangzhou, May 10-13, China, 2005.
13. Erbaş, O., “Dolaşım akışkan yatakta ısı transferi mekanizması ve bu mekanizmanın kuramsal ve deneysel analizi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 2007.