



Bir Torefikasyon Reaktörünün Geliştirilmesi ve Kızıl Meşe “*Quercus Rubra*” Kullanılarak Farklı Torefikasyon Sıcaklıklarında Elde Edilen Biyokömür Yakıt Özelliklerinin Saptanması

Tolga BATUR¹ , Türkan AKTAŞ² 

^{1,2}N.K.Ü. Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 59030, Değirmenaltı-Tekirdağ

¹<https://orcid.org/0000-0002-6717-2718>, ²<https://orcid.org/0000-0001-9977-859X>

✉: taktas@nku.edu.tr

ÖZET

Bu araştırmada, geleneksel üretime kıyasla daha kaliteli, hızlı ve kontrollü koşullarda biyokömür elde etmek amacıyla bir torefikasyon reaktörünün imalatı ve en uygun torefikasyon sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen örneklerin yakıt özellikleri klasik yöntemlerle (torluk oluşturma ve ticari fırın metodu) elde edilen biyokömür örneklerinin yakıt özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, biyokömür elde etmek için geliştirilmiş reaktör kullanılarak 5 farklı sıcaklıkta (220, 245, 260, 280, 300 °C) kızıl meşe “*Quercus Rubra*” örnekleri torefiye edilmiş ve elde edilen örneklerin kısa analizleri yapılarak ısı değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar klasik yöntemlerle elde edilmiş olan ve piyasada satılan ticari ürünler ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonucu torefiye edilmiş ürünlerde en yüksek ısı değeri, 7135 cal g⁻¹ ile 300 °C’de elde edilmiş örnekte saptanırken, en düşük ısı değeri ise 220 °C’de elde edilmiş olan örnekte 5421.33 cal g⁻¹ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 300 °C’de elde edilen altı numaralı numune sahip olduğu nem ve kül oranı ile ticari anlamda satışı yapılan piyasa ürününü geride bırakmıştır. Numunelerde uçucu madde oranları %70-%80 aralığında, sabit karbon oranları ise %20-%25 aralığında saptanmıştır. Uygulama sıcaklığı arttıkça ısı değerinin arttığı, nem ve kül oranının düştüğü saptanmıştır. Nem, kül ve uçucu madde miktarları açısından reaktörden elde edilen örneklerin, geleneksel yöntemlerle elde edilen örneklere kıyasla daha iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. 300 °C’de elde edilmiş olan biyokömür örneklerinin ortalama ısı değeri (7135 cal g⁻¹) ticari fırından elde edilen biyokömürlerin ısı değerinden (6003 cal g⁻¹) oldukça yüksek bulunurken, klasik torluk oluşturma yöntemiyle elde edilen örneklerinkine de oldukça yakın olduğu saptanmıştır.

Araştırma Makalesi

Makale Tarihi

Geliş Tarihi : 20.11.2018

Kabul Tarihi : 18.04.2019

Anahtar Kelimeler

Biyokömür
Torefikasyon
Torluk
Isıl değer
Kısa analiz

Development of a Torrefaction Reactor and Determination of Biocoal Fuel Properties Obtained at Different Torrefaction Temperatures using Red Oak “*Quercus Rubra*”

ABSTRACT

In this research, it was aimed to manufacture a torrefaction reactor and determine the optimum torrefaction temperature to obtain biocoal with better quality under faster and controlled conditions compared to traditional production methods (construction wood piles and commercial kiln method). For this purpose, red oak “*Quercus Rubra*” samples were torrefied at 5 different temperatures (220, 245, 260, 280, 300 °C) using the reactor, proximate analyses of the obtained samples were made and the heat values were measured. According to the results, sample with highest heating value, which was obtained from torrefication system, was the sample having a value of 7135 cal g⁻¹ obtained at 300 °C whereas the product obtained at 220 °C having the least value of 5421.33 cal g⁻¹. Also, the sixth sample obtained at 300 °C was found better in respect of its ash and moisture ratios compare to commercially sold ones. Volatile substance ratios and fixed carbon ratios in the samples were determined between %70-%80 and 20%-

Research Article

Article History

Received : 20.11.2018

Accepted : 18.04.2019

Keywords

Biochar
Torrefaction
Earth mound kiln
Heat value
Proximate analysis

25%; respectively. Calorific value increased and the ratio of moisture and ash amount decreased with increasing of temperature. In terms of moisture, ash and volatile matter; the samples obtained from the reactor were determined to have better properties compared to the samples obtained using conventional methods. The heating value (7135 cal g⁻¹) of biocoal obtained at 300 °C were found significantly higher than the heating value (6003 cal g⁻¹) obtained from commercial furnaces while it is rather close to heating value of sample obtained by traditional earth mound creating method.

To Cite: Batur T, Aktaş T 2019. Bir Torefikasyon Reaktörünün Geliştirilmesi ve Kızıl Meşe “*Quercus Rubra*” Kullanılarak Farklı Torefikasyon Sıcaklıklarında Elde Edilen Biyokömür Yakıt Özelliklerinin Saptanması. KSU Tarım ve Doğa Derg 22(5): 751-762. DOI: 10.18016/ksutarimdog.vi.485914.

GİRİŞ

Biyokütle; biyolojik kökenli, fosil olmayan, içeriğinde karbonun yanı sıra hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve daha küçük oranlarda alkali, alkali toprak ve ağır metaller içeren atomlar bulunan bitkisel veya hayvansal kökenli olabilen organik madde kütleleridir (Sözen ve ark., 2017). Biyokütle kaynakları; enerji bitkileri ve kısa döngülü enerji ormanları, tarımsal ve bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, orman ürünleri ve atıkları, endüstriyel atıklar ve sucul bitkiler olarak sınıflandırılabilir ve bu kaynaklardan elde edilen enerji biyokütle enerjisi olarak tanımlanmaktadır.

Biyokütle yakılarak doğrudan ısınma, çeşitli sistemlere sıcak su veya buhar üretimi yoluyla ısı sağlama veya buhar türbinleri kullanılarak elektrik enerjisi elde edilmesi gibi amaçlar için kullanılabilir. Öte yandan doğrudan yakma yöntemi enerji verimliliği düşük bir yöntemdir. Biyokütleden daha verimli enerji elde etmek amacıyla kullanılan daha ileri biyokütle dönüşüm teknolojileri; biyokimyasal, agrokimyasal ve termokimyasal dönüşüm teknolojileri olarak sınıflandırılmaktadır (Demirbaş 2001). Termokimyasal dönüşüm teknolojileri, özellikle, ısı değeri düşük, nem içeriği yüksek biyokütle kaynaklarından yüksek ısı değeri katı, sıvı ve gaz yakıtlar elde edilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Öte yandan biyokütlenin sahip olduğu bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri; bunların termokimyasal yöntemlerle katı, sıvı ve gaz yakıtlara dönüştürülmesi sırasında sınırlayıcı olabilmektedir. Çalışmalar göstermiştir ki biyokütle türleri, kökeni ve özellikleri nedeniyle ısı işleme karşı farklı davranışlar göstermektedir (Bridgeman ve ark., 2008). Bu nedenle, termal bozunma işlemi biyokütle türüne bağlı olarak değişmektedir.

Biyokütlenin stabil, enerji yoğun katıya dönüştürülmesinde düşük sıcaklıklarda kuru ve yaş prosesler olmak üzere iki farklı termokimyasal proses uygulanmaktadır. Torefikasyon işlemi kuru proses olup, inert ya da indirgenmiş bir ortamda, 30 dakika ile daha fazla reaksiyon sürelerinde biyokütlenin ısı işleme tabi tutulduğu dönüşüm proseslerinden birisi olarak tanımlanmaktadır (Yanık ve Uçar, 2016).

Torefikasyon işlemi nispeten düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen yavaş piroliz işlemi olup biyokütlenin enerji içeriğini iyileştirmek ve kömürüne benzer biyokütle yanma özellikleri geliştirmek için uygulanan bir ön işlem olarak da ifade edilebilmektedir. Torefikasyon sıcaklıkları; literatürlerde farklı sıcaklık aralıklarında tanımlanmıştır. Bu sıcaklık aralıklarından bazıları; 200-300 °C (Bergman ve Kiel, 2005; Rousset ve ark., 2011); Sadaka ve Negi, 2009), 230-300 °C (Pimchuai ve ark., 2010; Prins ve ark., 2006), 220-300 °C (Arias ve ark., 2008) ve 225-300 °C (Chen ve Kuo, 2010; Zwart ve ark., 2006), 240-350 °C (Strandberg, 2015) olarak belirtilmiştir. Torefikasyon uygulama süresi ise birkaç dakikadan birkaç saate kadar çıkabilmekte ve işlem, genellikle atmosfer basıncında gerçekleştirilmektedir (Strandberg, 2015).

Torefikasyon üç ana aşamayı içermektedir. Bu aşamalardan ilki; biyokütlenin daha küçük ve daha düzgün boyutlara dönüştürülmesi, ikincisi biyokütle neminin uzaklaştırılması için kurutma işleminin gerçekleştirilmesi ve son olarak kurutulmuş biyokütleye biyokütle özellikleri ve ürün gereksinimlerine bağlı olarak uygun torefikasyon koşullarında termal uygulama yapılmasıdır. Torefikasyon sırasında yoğunlaştırılabilir madde ve yoğunlaşmaz maddeler, karbon monoksit, karbon dioksit, su buharı, hidrojen ve organik uçucu maddelerden oluşan düşük enerjili baca gazı ortaya çıkmaktadır. İşlem sırasında serbest bırakılan bu gaz miktarı torefikasyon uygulama sıcaklığındaki artış ile artmaktadır. Dolayısıyla torefikasyon sıcaklığı ve reaktörde kalma süresi ne kadar yüksekse, enerji veriminin kütle verimine oranı yani enerji yoğunluğu da o kadar yükselmektedir. Torefikasyon sonucu elde edilen katı ürün; yeşil kömür, biochar, mangal kömürü ve biyokömür olarak bilinmekle beraber bu adlandırmalar torefikasyon edilmiş ürünle daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan piroliz işlemi sonucunda elde edilen katı ürünün karıştırılma riskini azaltmak için kullanılmaktadır (Strandberg, 2015).

Torefikasyon işlemi, çeşitli uçucuların serbest kalması sırasında biyokütlenin bozulmasına (depolimerizasyonuna) neden olmaktadır ve nihai ürün ısı vererek işlem sıcaklığına bağlı olarak

kurutulmuş biyokütle ya da torefike edilmiş yakıt olarak adlandırılmaktadır (Bergman ve ark., 2005; Bridgeman ve ark., 2008; Pimchuai ve ark., 2010). Torefikasyon işlemi, biyokütlenin yanıcı (fiziksel ve kimyasal) özelliklerini geliştirmektedir. Torefike ürünlerin özellikleri, biyokütle özelliklerine, işlemde kullanılan çalışma sıcaklığına ve işlemin gerçekleştiği reaktörde kalış süresine bağlı olarak değişmektedir. Torefike ürünlerin genel olarak uygulama sıcaklığı ve kalma süresine bağlı olarak, daha yüksek ısı değerine, enerji yoğunluğuna ve daha iyi öğütülebilirlik özelliğine sahip oldukları yani öğütmek için ham formlara kıyasla çok daha az enerji gerektirdikleri pekçok araştırmada belirtilmiştir (Arias ve ark. 2008; Bergman ve Kiel, 2005; Bridgeman ve ark., 2008; Pimchuai ve ark., 2010). Çoğu araştırmalar torefike edilmiş biyokütlenin öğütülmesi için gereken enerjinin ham biyokütle için gerekli olan miktarın % 10-20'si arasında olduğunu bildirmektedir (Ciolkosz ve Wallace, 2011).

Türkiye'de ormanlık alan miktarı ülke genel alan toplamının % 27.6'sını oluşturmaktadır. Ülkemiz ormanları, ağaç türü ve kapladıkları alan açısından değerlendirildiğinde, ilk üç sırayı 18 tür ve 6.476.277 hektarlık alan ile meşe (*Quercus*), 5.420.524 hektar alan ile kızılçam ve 4.202.298 hektarlık alan ile karaçam ormanları almaktadır (Aylak Özdemir ve Saraçoğlu, 2016). Trakya Bölgesi' de barındırdığı meşe ve diğer ağaç türleri varlığı ile dikkat çekmektedir. Bölgede meşe ormanlarının kapladıkları bu büyük alana bağlı olarak da torefikasyon işleminin, mangal kömürü üretimi için geleneksel yöntemler kullanılarak uygulandığı ve bu üretimin Türkiye'de belli kesimler için azımsanmayacak bir gelir kaynağı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 1' de, İstanbul ili Çatalca ilçesine bağlı olan Hallaçlı köyünde geleneksel olarak mangal kömürü (odun kömürü vs.) üretiminde kullanılan ve torluk olarak adlandırılan alanı alanının görülmektedir. Geleneksel yöntemde torluk kurulurken, ortasına uzunca bir sırk dikilmekte ve torluktan daha yüksek olan sırk, yanma aşamasında baca görevi görmektedir. Baca içerisine kolayca yanabilen çalı doldurulmaktadır. Kömür haline getirilecek odunlar huni şeklini alacak şekilde istif edilmektedir. Torefikasyon işlemine hazırlık esnasında ilk olarak hava ile doğrudan teması kesmek üzere istifin üzeri, meşe ağaçlarının dökülen yaprakları (gazel), saman vb. materyallerden oluşan 'yeşil örtü' ile kaplanarak onun üzerine toprak veya kömür tozlarıyla hazırlanan 'toprak örtü' kapatılmakta ve üzeri hafifçe ıslatılan torluk yakmaya hazır hale getirilmektedir. Bu yöntem tamamen kontrolsüz şartlarda gerçekleştirilmektedir. Torefikasyon parametrelerinin belirsiz yapıda olması bu yöntemi aynı zamanda tehlikeli hale de getirmektedir. Ortalama olarak 20-40 gün süren torluk süresince torluk sahibi veya çalışanı tehlikeli

durumların oluşmaması için baca gazlarının açığa çıktığına emin olmalıdır. Çeşitli orman ürünlerinin bir arada torluk edilmesi, sürecin (sıcaklık ve kalış süresi) kontrolsüz olması dolayısıyla nihai ürünün kalitesi hakkında tahmin yapılamamaktadır.

Türkiyede mangal kömürü üretiminde geleneksel torluk yönteminin yanısıra, ilkel atölye koşullarında, ticari amaçla üretilmiş olan biyokömür fırınlarının kullanıldığı da gözlemlenmiştir. Bu fırınlar genellikle basit yapıya sahip olup küçük hacimli olarak imal edilmektedir ve sıcaklık, ısıtma hızı, basınç gibi parametreler kontrol edilememekte dolayısıyla her biyokütle için ideal torefikasyon (yavaş piroliz) koşulları sağlanamamaktadır (Sümer ve ark., 2016). Tüm bunlar dikkate alındığında Türkiye'de torefikasyon işlemi için güncel teknolojilerin kullanılmasına ihtiyaç duyulduğu açıktır.



Şekil 1. Geleneksel yöntemlerle mangal kömürü üretimi için hazırlanan torluk alan örneği

Bu araştırmada; elektrik tahrikli vidalı konveyöre sahip bir torefikasyon reaktörü geliştirilmiş ve imal edilmiştir. Hammadde olarak kızıl meşe kullanılarak farklı torefikasyon şartlarında elde edilmiş olan biyokömür örneklerinin kalite ve yanma özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel yöntemler (torluk ve ticari fırın) kullanılarak elde edilen biyokömür örnekler için belirlenmiş olan kalite ve yanma özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş olan torefikasyon sisteminin kullanımı geleneksel yöntemlere göre işlem süresi ve ürün özelliklerinin iyileştirilmesi yönünden irdelenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Biyokütle

Denemelerde materyal olarak Trakya bölgesinde yoğun bir şekilde yetişen ve torluk işleminde kullanılan Kızıl meşe (*Quercus Rubra*) kullanılmıştır. Kızıl meşe Avrupa ve Türkiye'de özellikle Trakya Bölgesi ormanlarında iyi bir gelişme göstermektedir.

Torefikasyon işleminde reaktöre beslenen meşe

örneklerinin fiziksel özelliklerinin homojen olması sağlanmıştır. Hazırlanan ham maddenin ortalama uzunluğu 35.5 mm ve kalınlığı 0.1 mm olarak ölçülmüştür. Homojen örneklerin hazırlanması için universal freze tezgahı kullanılmıştır. Freze tablasına bağlanan meşe odununa sıfırlama işlemi yapılarak kesici takımın parçaya göre referans ölçüleri belirlenmiştir. Parçanın üst sıfır noktasından kesici takım Z(-) yönde 35-36 mm hareket ettirilerek oluşacak örneklerin boyu belirlenmiş olup X ekseninde yapılan 0,1 mm hareketle parça kalınlığı sabitlenmiş ve kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Torefikasyon Reaktörü

Torefikasyon işlemi için helezonlu tip bir reaktör imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu reaktörde, bir vidalı konveyör bir shaft etrafında tutturulmuş ve U şeklinde bir oluk içine monte edilmiştir. Böylece vida döndüğünde, malzeme ilerleyen basamağın önüne yığılmakta ve oluk içerisinde itilmektedir. Vidalı konveyör tipi reaktörün tercih edilme sebepleri; malzemenin aynı anda ısıtılabilmesi ve minimum alan gereksinimine sahip olup geniş ısı transferi alanı sağlamasıdır (Waje ve ark., 2006).

Bu reaktörde, düşük devirlerde çalışabilmek için momenti yüksek, devir kontrolünün kolay ve AC (Alternatif Akım) motorlarına göre daha ekonomik olan DC (Doğru Akım) motoru tercih edilmiştir. Redüktör ve kontrol devresi kullanılarak istenilen hızlar elde edilebilmektedir. Milleri sabitlemek için yataklı rulman kullanılmıştır.

Kelepçe rezistanslar, sıcaklık kararlılıkları ve uzun ömürleri sebebiyle reaktör dizaynında tercih edilmiştir. Böylece verim artırılmış aynı zamanda boru çapından ortaya çıkabilecek ölçü hataları minimuma indirilmiştir.

Helezon yaprak ve mil, taşıyıcı sistem olarak

makinada entegre olarak çalışmaktadır. K tipi ısı çifti kullanılarak elde edilen sıcaklık bilgisi (dijital veri), sıcaklık PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörü kullanılarak rakamlara dönüştürülmüştür

Biyokütle Özelliklerinin Saptanmasında Kullanılan Ekipmanlar

Ham ürünlerin ve torefiye edilmiş ürünlerin nem içeriklerinin belirlenmesinde Nüve FN 50 kurutma fırını (ETÜV), kül içeriklerinin belirlenmesinde Nüve MF 120 kül fırını, örneklerin tartılmasında maksimum kapasitesi 200 g olan ve 0.01 g hassasiyetli elektronik terazi, örneklerin boyutlarının ölçümünde 0.01 mm hassasiyetli analog kumpas ve üst ısı değerlerinin ASTM D 5865-04 standardına göre ölçülmesi için IKA marka C 200 model kalorimetre cihazı kullanılmıştır.

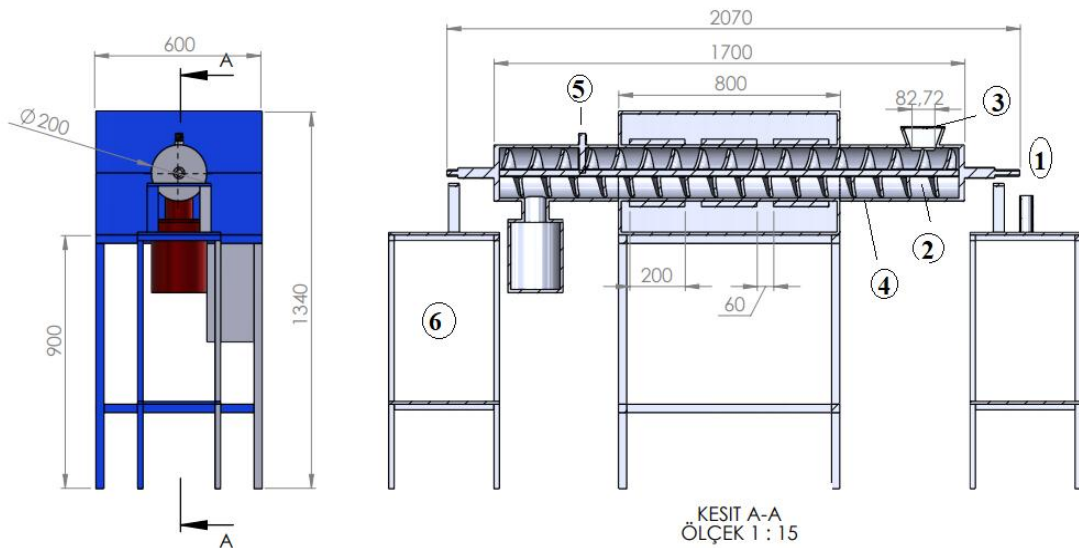
Yöntem

Reaktör Tasarımı ve İmalatı

Torefikasyon reaktörünün tasarımı SolidWorks programı kullanılarak 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan reaktör, elektrik tahrikli, kelepçe rezistanslı ve vida konveyör tiptedir. Ana hatlarıyla prototip 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; ürün giriş, reaktör ve ürün çıkış kısımlarıdır (Şekil 2).

Torefikasyon sisteminin imalatı aşamasında, taşıyıcı ayaklar 30x30x2 mm profillerden oluşturulmuştur. Yalıtım aşamasında yüksek ısı yalıtımlı A sınıfı yutong malzeme kullanılmış olup taş yünü malzeme ile yalıtım kuvvetlendirilmiştir. Reaktör dış yüzeyinin kapatılması için 2 mm silisli sac malzeme kullanılmıştır.

Reaktör içi sıcaklığın, elde edilecek olan biyokömür örneklerinin kalitesine etkisine yönelik denemeleri



Şekil 2. Torefikasyon sisteminin şematik gösterimi ve çizimi (1: Motor ve motor sürücüsü bağlantı yeri, 2: konveyör, 3: Ürün giriş ünitesi, 4: Reaktör, 5: Gaz çıkış noktası, 6: Biyokömür çıkış ünitesi)

yapabilmek amacıyla sıcaklığın reaktör içerisinde homojen şekilde dağıtılabilmesi ve istenilen sıcaklıkların elde edilebilmesi için yüksek verimli seramik kelepçe rezistanslar kullanılmıştır. Homojen sıcaklık dağılımını sağlamak için rezistanslar sistem üzerine 200 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Ürünün reaktör içerisine alınma hızı motor kontrol devresi ile kontrol edilerek helezon mil devri 4 d min⁻¹ devire kadar kontrol edilebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık kontrolü 2 farklı noktadan K tipi ısı çifti kullanılarak kontrol edilmiş ve 3 farklı kontaktörle kontrol edilen rezistanslar istenilen set derecesine göre devreye otomatik olarak girip çıkmıştır. Tesiat için 4x2.5 mm kablo kullanılmış ve ısıya dayanıklı makaronlar ile kablolar korunmuştur.



a



b

Şekil 3. (a) Sistemin imalat aşaması, (b) Montajlı hali

Torefikasyon Deneilerinin Yapılması ve Ürünlerin Elde Edilmesi

Deneyler sırasında; biyokütlenin reaktör içerisine alınma hızı yani helezon mili devri 4 d min⁻¹ olarak

sabitlenmiş ve 5 farklı torefikasyon sıcaklığı (220, 245, 260, 280 ve 300 °C) denenmiştir. Ürünlerin torefikasyon işlemi öncesi ağırlıkları da nihai ürünlerle karşılaştırılmak üzere ölçülmüştür. Deneme koşulları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Uygulama sıcaklığına göre ürün çıkış süreleri

| Kızıl meşe numunelerinin numaralandırılması | Uygulama sıcaklığı (°C) | Helezon mil devri (d min ⁻¹) | Kalış süresi |
|---|-----------------------------------|--|--------------|
| Numune 1 (hammadde) | - | - | - |
| Numune 2 | 220 | 4 | 8 dak |
| Numune 3 | 245 | 4 | 7 dak 48 s |
| Numune 4 | 260 | 4 | 8 dak 15 s |
| Numune 5 | 280 | 4 | 8 dak 28 s |
| Numune 6 | 300 | 4 | 7 dak 52 s |
| Numune 7 (Ticari fırın ürünü) | Kontrol sıcaklığı bulunmamaktadır | - | 20-40 gün |
| Numune 8 (Ticari torluk ürünü) | Kontrol sıcaklığı bulunmamaktadır | - | 20-40 gün |

Hammadde ve Biyokömür Örneklerinin Özelliklerinin Saptanması

Kısa Analizler

Nem İçeriğinin Saptanması

Ham madde ve biyokömür örneklerinin nem içeriği EN 14774-2 (2009) standardına göre belirlenmiştir. Nem içeriklerinin belirlenmesi amacıyla alınan materyaller 1 mm eleğe sahip olan öğütücüde elendikten sonra 105 °C sıcaklıkta 24 saat kurutma fırınında (etüv)

bekletilmiştir ve nem içerikleri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$N_i = \frac{M_{top} - M_{kuru}}{M_{top}} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

N_i : Materyalin nem içeriği (% y.b.),

M_{top} : Materyalin başlangıçtaki kütlesi (su+kuru madde) (kg),

M_{kuru} : Materyalin kuru kütlesi (kg).

Örneklerin Kül İçeriklerinin Saptanması

Örneklerin kül içerikleri, EN14775 standardına göre kül fırını kullanılarak belirlenmiştir. Porselen krozeler $575\pm 25^{\circ}\text{C}$ 'de kül fırınında minimum 4 saat bekletilmiştir. Daha sonra desikatöre alınmış, soğutulmuş ve tartımları yapılmıştır. Tekrar kül fırınına yerleştirilmiş ve sabit ağırlığa gelmesi beklenmiştir. Porselen krozeler sabit ağırlığa ulaştınca 1'er g olarak hazırlanmış örnekler (etüvde kurutulmuş) tartılmış ve fırına yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı standarda uygun şekilde belirli bir artış programına göre yükseltilmiştir. Sonuçta, kül içerikleri Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$K_i = \frac{M_k}{M_t} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

K_i : Kül içeriği (%),

M_t : Biyokütlenin yakma öncesi kütlesi (g),

M_k : Biyokütlenin yakma sonrası kütlesi (g).

Örneklerin Uçucu Madde Ve Sabit Karbon Yüzdelerinin Saptanması

Biyokömürlerin uçucu madde oranı, ASTM E872-82 (2006) standardına göre tayin edilmiştir. Uçucu madde ve sabit karbon yüzdelerini saptamak amacıyla örnekler 24 saat 105°C 'de kurutulmuş, 0.8-1 g ağırlığında hazırlanarak seramik kaplara yerleştirilip $600\pm 50^{\circ}\text{C}$ 'de 6 dakika ve hemen arkasından $950\pm 20^{\circ}\text{C}$ 'de 6 dakika tutulmuştur. Bu ısıl uygulamalardan sonra elde edilen örnekler soğuduktan sonra tartılmış, 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 Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\%SK = 100 - (\%K + \%UM) \quad (3)$$

Isıl (Kalorifik) Değerlerin Belirlenmesi

Örneklerin üst ısıl değerleri, ASTM D 5865-04 standardına göre kalorimetre cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Test öncesi numuneler bir parçalayıcıda parçalanıp 1 mm elekten geçirildikten sonra 24 saat 105°C 'de bekletilerek içerisindeki nem uzaklaştırılmıştır. 0.5-1 g ağırlığında hazırlanan

örnekler standart koşullarda bir kalorimetre cihazının (IKA marka C 200 model) parçası olan yakıt bombasında oksijen ortamında yakılmış olup kalorimetre kabı içindeki suyun sıcaklık derecesinin artışına ve sistemin ortalama gerçek ısı sığasına göre üst ısıl değer cihazdan cal g^{-1} olarak direkt okunmuştur.

İstatistiksel Analizler

Hammadde, ticari ürünler ve tez kapsamında farklı sıcaklık koşullarında 3 tekerrürlü olarak yapılmış olan torefikasyon işlemleri sonucunda elde edilen örnekler için yöntem bölümünde belirtilmiş olan tüm analizler 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla SPSS Ver.18 İstatistik paket programından yararlanılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Hammadde ve Biyokömür Örneklerinin Özelliklerine İlişkin Sonuçlar

Hammadde Özelliklerine İlişkin Sonuçlar

Çizelge 2' de biyokütle materyali olarak kullanılmış olan kızıl meşe için; torefikasyon yapılmamış örneklerin üst ısıl değer ve kısa analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hammaddenin ortalama kalorifik değerinin ($4132.33 \text{ cal g}^{-1}$) olarak belirlendiği ve bu değer Çizelge 3'de farklı ağaç türleri ve meşe için Bozkurt ve Sezer (1987) tarafından verilmiş olan ısıl değerler ile uyduğu görülmektedir. Ayrıca meşenin, petrol ve kömür gibi fosil kaynaklı yakıtlardan ve bazı ağaç türlerinden daha düşük ısıl değere sahipken, bazı ağaç türlerine ve Linyit'e göre ise daha yüksek enerji potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Biyokömür Özelliklerine İlişkin Sonuçlar

Her bir numune için saptanmış olan tanımlayıcı istatistikler yani; ısıl değer ve kısa analiz sonuçlarına ilişkin ortalama, standart sapma, varyans, minimum ve maksimum değerler Çizelge 4'de verilmiştir. Ortalama değerlerin arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olup olmadığı aynı çizelgede Duncan testine göre belirlenmiş olan harflendirmeye belirtilmiştir.

Çizelge 2. Hammaddede ait tanımlayıcı veriler

| Hammadde (Numune 1) | Üst ısıl değer (cal g^{-1}) | Kül (%) | Uçucu madde (%) | Nem (%) | Sabit karbon (%) |
|---------------------|--|---------|-----------------|---------|------------------|
| Ortalama | 4132.33 | 10.47 | 82.07 | 10.4 | 7.46 |
| Standart sapma | 6.50641 | 0.30551 | 0.00577 | 0.53116 | 0.30006 |
| Varyans | 42.333 | 0.093 | 0.000 | 0.282 | 0.090 |
| Minimum | 4126.00 | 10.20 | 82.07 | 10.09 | 7.13 |
| Maksimum | 4139.00 | 10.80 | 82.08 | 11.01 | 7.72 |

Çizelge 3. Bazı petrol ve kömür gibi fosil kaynaklı yakıtların ve tam kuru haldeki ağaç türlerinin alt ısıl değerleri (Bozkurt ve Sezer, 1987)

| Hammadde | Isıl değeri (kcal kg ⁻¹) | Ağaç türleri | Isıl değeri (kcal kg ⁻¹) |
|------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| Butan gazı | 12.000 | Çam | 5.066 |
| Fuel oil | 10.000 | Kayın | 4.802 |
| Antrasit | 7.800 | Ladin | 4.726 |
| Maden kömürü | 7.000 | Gökнар | 4.651 |
| Kok | 6.000 | Huş | 4.505 |
| Linyit | 4.200 | Meşe | 4.356 |
| Odun (Rutubetli) | 3.000 | Akçağaç | 4.183 |
| Tezek | 2.300 | Kavak | 4.129 |
| | | Gürgen | 4.062 |

Çizelge 4. Kısa analiz ve ısıl değer sonuçlarına ilişkin tanımlayıcı istatistiksel değerler*

| Biyokömür Numune no | | Kalorifik değer (cal g ⁻¹) | Kül (%) | Uçucu madde (%) | Nem (%) | Sabit karbon (%) |
|---------------------|----------------|--|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| No:2 | Ortalama | 5421.33 ^(g) | 6.07 ^(b) | 74.37 ^(e) | 5.11 ^(d) | 19.57 ^(f) |
| | Standart sapma | 4.16333 | 0.03055 | 0.00577 | 0.00577 | 0.03512 |
| | Varyans | 17..333 | 0..001 | 0.000 | 0.000 | 0..001 |
| | Minimum | 5418..00 | 6..04 | 74.36 | 5.11 | 19.53 |
| | Maksimum | 5426..00 | 6..10 | 74.37 | 5.12 | 19.60 |
| No:3 | Ortalama | 5798..0 ^(g) | 4..43 ^(d) | 70.55 ^(f) | 4.83 ^(d) | 25.01 ^(c) |
| | Standart sapma | 2..00000 | 0..15275 | 0.02082 | 0.01000 | 0.16258 |
| | Varyans | 4.000 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.026 |
| | Minimum | 5796.00 | 4.30 | 70.53 | 4.82 | 24.83 |
| | Maksimum | 5800.00 | 4.60 | 70.57 | 4.84 | 25.14 |
| No:4 | Ortalama | 6200.33 ^(d) | 4.30 ^(d) | 74.22 ^(d) | 4.13 ^(e) | 21.48 ^(e) |
| | Standart sapma | 2.30940 | 0.26458 | 0.01155 | 0.01155 | 0.27227 |
| | Varyans | 5.333 | 0.070 | 0.000 | 0.000 | 0.074 |
| | Minimum | 6199.00 | 4.10 | 74.21 | 4.12 | 21.17 |
| | Maksimum | 6203.00 | 4.60 | 74.23 | 4.14 | 21.69 |
| No:5 | Ortalama | 6565.33 ^(e) | 4.17 ^(d) | 76.17 ^(b) | 4.07 ^(e) | 19.67 ^(f) |
| | Standart sapma | 23.11565 | 0.41633 | .02517 | .01000 | 0.43662 |
| | Varyans | 534.333 | 0.173 | .001 | .000 | 0.191 |
| | Minimum | 6541.00 | 3.70 | 76.14 | 4.06 | 19.33 |
| | Maksimum | 6587.00 | 4.50 | 76.19 | 4.08 | 20.16 |
| No:6 | Ortalama | 7135.0 ^(b) | 3.60 ^(e) | 73.23 ^(e) | 3.8 ^(e) | 23.17 ^(d) |
| | Standart sapma | 17.08801 | 0.17321 | 0.04163 | 0.01528 | 0.18903 |
| | Varyans | 292.000 | 0.030 | 0.002 | 0.000 | 0.036 |
| | Minimum | 7119.00 | 3.40 | 73.20 | 3.78 | 23.02 |
| | Maksimum | 7153.00 | 3.70 | 73.28 | 3.81 | 23.38 |
| No:7 | Ortalama | 6003.0 ^(e) | 5.27 ^(e) | 16.15 ^(b) | 9.84 ^(b) | 78.59 ^(a) |
| | Standart sapma | 2.64575 | 0.30551 | 0.01528 | 0.05132 | 0.29366 |
| | Varyans | 7.000 | 0.093 | 0.000 | 0.003 | 0.086 |
| | Minimum | 6001.00 | 5.00 | 16.13 | 9.78 | 78.27 |
| | Maksimum | 6006.00 | 5.60 | 16.16 | 9.88 | 78.85 |
| No:8 | Ortalama | 7204.67 ^(a) | 4.24 ^(d) | 27.55 ^(g) | 5.50 ^(e) | 68.21 ^(b) |
| | Standart sapma | 5.03322 | 0.27055 | 0.00577 | 0.01732 | 0.27099 |
| | Varyans | 25.333 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.073 |
| | Minimum | 7200.00 | 3.98 | 27.54 | 5.48 | 67.93 |
| | Maksimum | 7210.00 | 4.52 | 27.55 | 5.51 | 68.47 |

*Farklı harfler ortalamalar arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir (P<0.05)

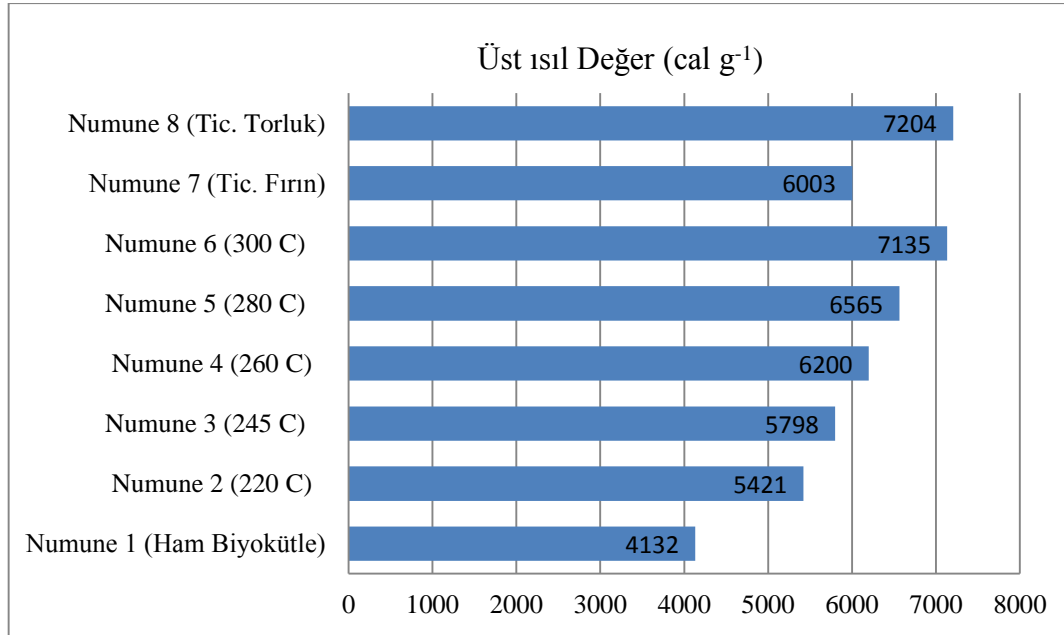
Örneklerin kısa analiz ve ısıl değerlerine ilişkin varyans analiz sonuçları incelendiğinde, tüm özellikler arasındaki farklılıkların 0.05 seviyesinde önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4 ve Şekil 4 incelendiğinde torefikasyon işleminin tüm örneklerde ısıl değerleri yükselttiği yani ısıl değer açısından yakıt özelliğini oldukça iyileştirdiği anlaşılmaktadır. İşlem görmemiş meşe örneğinin ısıl değeri 4132 cal g^{-1} iken, torefiye edilmiş ürünler içerisinde en yüksek ısıl değer 7135 cal g^{-1} ile $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiş olan 6 numaralı örnekte, en düşük ısıl değer ise $5421.33 \text{ cal g}^{-1}$ ile $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiş olan 2 numaralı numunede ölçülmüştür. Torefikasyon işleminin biyokütle hammaddesinin ısıl değerini yükselttiğine dair pek çok çalışmanın sonuçları da bu araştırma sonucunu desteklemektedir (Kumar ve ark. 2016, Magdziarz 2017, Rokni ve ark. 2018). Torefikasyon reaktöründen çıkan ürünlerde $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilen biyokömür kalori değeri olarak ticari fırın ürününden 1132 cal g^{-1} daha fazla, torluk

ürününden 69 cal g^{-1} daha azdır. Sonuçlar, torefikasyon sistemi kullanılarak elde edilen biyokömür örneklerinde torefikasyon sıcaklığının artışının (helezon hızı sabit kalmak koşulu ile) ısıl değeri de arttırdığını göstermiştir.

Torefikasyon sisteminin kullanılmasıyla $300 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklık uygulaması sonucu elde edilmiş olan biyokömürlerde, ticari olarak piyasada satılan biyokömürün ısıl değeri yakalanmıştır.

Reaktörden elde edilen biyokömürlerin üst ısıl değerleri ile geleneksel yöntem olan torluk oluşturma yöntemi ile elde edilmiş olan örneklerin üst ısıl değerleri karşılaştırıldığında torluk yöntemiyle elde edilmiş olan biyokömürün daha yüksek bir ısıl değere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Torefikasyon reaktöründen $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiş olan biyokömür örneğinin kalori değeri torluk ürününün değerine yakın olmakla beraber yine de 69 cal g^{-1} daha düşük bulunmuştur.



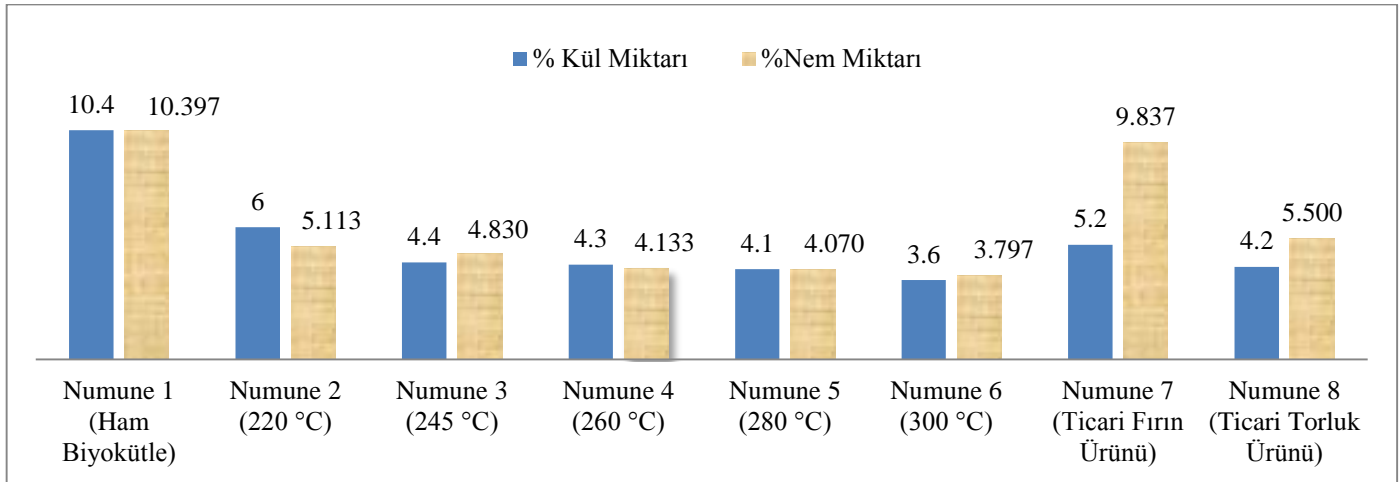
Şekil 4. Isıl değerlere ilişkin sonuçlar

Bunun muhtemel nedeni, reaktörden elde edilmiş ve torluk yöntemiyle edilmiş olan örneklerin sabit karbon yüzdelerinin farklılığı olarak açıklanabilir. Carrasso ve ark. (2013) akışkan yataklı bir reaktör kullanarak kızıl meşeden 4 farklı sıcaklıkta ($230\text{-}330 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında) biyokömür elde etmişlerdir. Bu denemeler sırasında biyokütle örnekleri reaktör içerisinde 10-30 dakika arasında tutulmuştur. Ham kızıl meşe örneklerinin ısıl değeri (üst) 4230 cal g^{-1} olarak saptanırken bu değer torefikasyon sıcaklığı ve reaktörde tutuş süresine bağlı olarak elde edilmiş olan biyokömür örneklerinde $4705.9 \text{ cal g}^{-1}$ ($230 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 10 dakika) ile $6041.44 \text{ cal g}^{-1}$ ($230 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 10 dakika) arasında değişmiştir. Bu değişimin pek çok faktöre bağlı olarak oluştuğu belirtilmekle beraber temelde elde edilen örneklerin

sabit karbon yüzdelerine bağlı olarak arttığı belirtilmiştir. Bu çalışmada; torefike edilmiş örneklerin sabit karbon oranları $\%19.5$ ($230 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 10 dakika) ve $\%43.8$ ($230 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 10 dakika) arasında saptanmıştır. Öte yandan Emrich (1985) torluk vb. geleneksel yöntemlerle elde edilmiş olan biyokömürlerin sabit karbon oranlarının oldukça yüksek olduğu ve $\%65\text{-}80$ arasında değiştiğini bildirmiştir.

Duncan testine göre örneklerin ortalama değerleri arasındaki farklılıklar incelendiğinde, ısıl değerler arasındaki farklılıkların tüm örneklerde istatistiksel olarak önemli olduğu anlaşılmaktadır ($P < 0.05$).

Şekil 5'de örneklerin nem ve kül içerikleri verilmiştir.



Şekil 5. Nem ve kül içeriği sonuçları

Bu değerler incelendiğinde hammaddenin nem ve kül içeriğinin elde edilen biyokömür örneklerine kıyasla oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu değerlerin yüksek olması yakıt özellikleri açısından istenmeyen bir durumdur (Aktas ve ark., 2015). Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerinde en düşük kül içeriğine sahip örnek %3,6 ile 300 derecelik sıcaklıkta torefike edilen 6 numaralı numune iken en yüksek kül içeriğine (%6) sahip örneğin 220 derecelik sıcaklıkta işleme tabi tutulmuş olan 2. numune olduğu görülmektedir.

Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerini nem içeriği bakımından incelendiğinde, en düşük nem içeriği 300 °C sıcaklıkta torefiye edilmiş olan 6 numaralı numunede (%3.80), en yüksek nem içeriği ise 2 numaralı numunede (%5.11) saptanmıştır. Sonuçlar, 300 °C'de torefiye edilmiş olan 6 numaralı numunenin sahip olduğu nem ve kül oranı ile ticari anlamda satışı yapılan piyasa ürününe göre daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar, uygulama sıcaklığının artışıyla biyokömürlerde nem ve kül oranının düştüğünü göstermektedir.

Nem içeriği açısından ortalamalar arasındaki farklılıklar incelendiğinde, 4, 5 ve 6 numaralı örneklerin (260, 280 ve 300 °C'de elde edilmiş örnekler ve ticari torluk örneğinin kül içerikleri açısından aynı grupta yer aldığını ve farklılıkların istatistiksel olarak önemli olmadığını göstermiştir ($P>0.05$). 2 ve 3 numaralı örneklerin (220 ve 245 °C'de elde edilmiş örnekler) nem içerikleri arasındaki farklılığında istatistiksel olarak önemsiz olduğu belirlenmiştir ($P>0.05$) (Çizelge 4).

Kül içeriği açısından ortalamalar arasındaki farklılıklar incelendiğinde 3, 4, 5 ve 8 numaralı örnekler (245, 260 ve 280 °C'de elde edilmiş örnekler ve torluk örneği) arasındaki farklılıkların önemsiz olduğu ve aynı grup içerisinde değerlendirilebileceği anlaşılmaktadır ($P>0.05$). 2 ve 3 numaralı örneklerin nem içerikleri arasında da farklılığın önemli olmadığı anlaşılmaktadır ve ticari torluk örneği ile kül içeriği

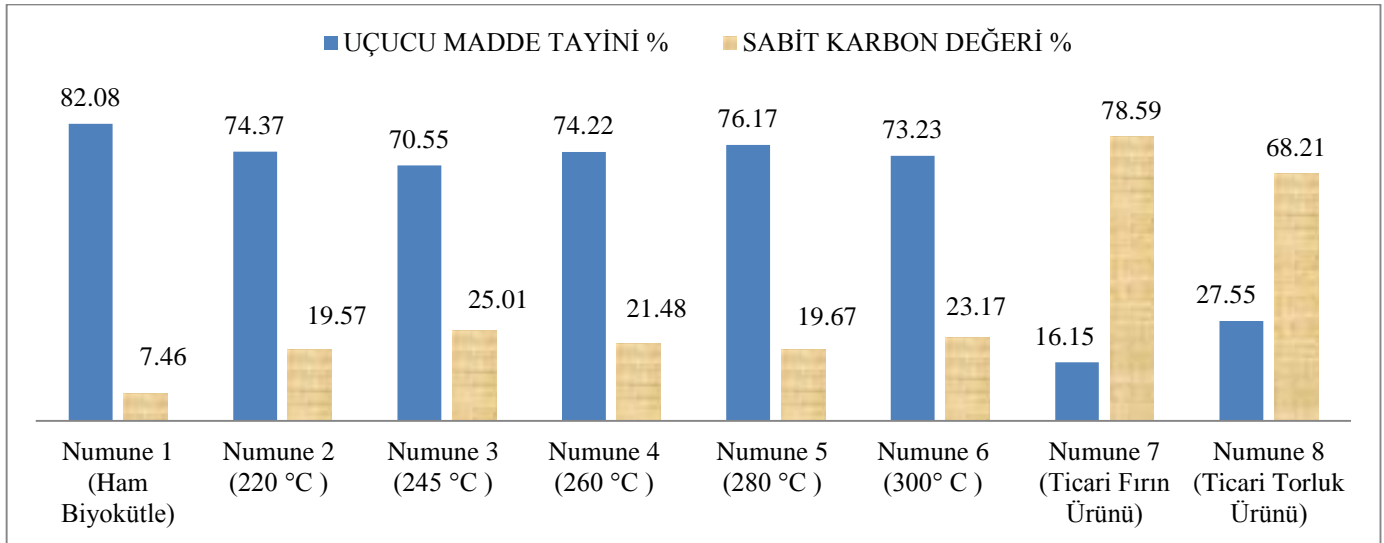
açısından aynı grupta oldukları anlaşılmaktadır ($P>0.05$) (Çizelge 4).

Şekil 6'da uçucu madde ve sabit karbon içeriklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde torefikasyon işlemi uçucu madde miktarını azalttığı, sabit karbon oranını arttırdığı görülmektedir. Benzer sonuçlar Kumar ve ark. 2016 tarafından da bildirilmiştir. Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerinde en düşük uçucu madde oranı %70.55 olarak 245 °C'lik 3. numunede, en yüksek değer %76.17 olarak 5. numunede (280 °C) saptanmıştır. Sabit karbon oranları için en yüksek değer %25.01 ile 3. numunede (245 °C) saptanırken en düşük değer %19.57 ile 2. numunede belirlenmiştir (220 °C).

Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerinde Duncan testine göre örneklerin ortalama değerleri arasındaki farklılıklar incelendiğinde, uçucu madde ortalamaları arasındaki farklılıkların tüm örneklerde istatistiksel olarak önemli olduğu anlaşılmaktadır ($P<0.05$) (Çizelge 4).

Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerinde sabit karbon ortalamaları arasındaki farklılıkların analizine göre 2 ve 5 numaralı numuneler (220 ve 280 °C'de elde edilmiş numuneler arasındaki farklılık önemsiz bulunurken ($P>0.05$) diğer tüm örnekler arasındaki farklılıkların önemli olduğu belirlenmiştir ($P<0.05$) (Çizelge 4).

Kleinschmitt (2011)'e göre uçucu madde için ideal oran, torefike edilmiş biyokütelerde %55-65 aralığında iken mangal kömüründe %50-60 aralığındadır. Sabit karbon oranı ise torefike biyokütelerde %28-35 iken mangal kömüründe %85-87 aralığındadır. Bu deneyler sonucunda torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerinde farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan biyokömür örnekleri için sabit karbon değeri %19.57 (220 °C'de elde edilmiş olan 2 numaralı örnek) ile %25.01 (245 °C'de elde edilmiş olan 3 numaralı örnek) arasında değişmiştir.



Şekil 6. Uçucu madde ve sabit karbon oranları

Odun kömürü üretiminde, torefikasyonun 3. aşaması olan kömüre dönüşme aşaması çok önemlidir. Etkili bir torefikasyon işlemi gerçekleştirilemez ise hammadde israfı olmakta, verim düşmekte ve böylece maliyet artmaktadır. Torefikasyonun ilk safhası, odunun 100 °C'de tam kuru hale getirilmesidir. Bu sırada tam kuru odunun sıcaklığı 280 °C'ye kadar yükseltilmektedir. Torefikasyon sıcaklığının düşük olması kömür verimini arttırmakta ancak kalitenin düşmesine sebep olmaktadır. İyi kalitede ticari bir kömürün sabit karbon miktarı %75 civarındadır. Bu da torefikasyon sıcaklığının 500 °C'ye çıkarılmasıyla sağlanabilmektedir (Göker ve Akbulut, 1994). Kömürleşme aşamasının gerçekleşebilmesi için en az 280 °C'lik bir sıcaklık gerektiği ifade edilmektedir (FAO, 1987; Kızılel, 2014). Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere sabit karbon değerlerinin belirtilen bu değerlerde olması için minimum 500 °C'ye tekabül eden bir torefikasyon sıcaklığına ihtiyaç duyulmaktadır. Öte yandan sıcaklığın bu denli artırılması biyoyağ ve gaz oluşumunu arttıracak reaksiyonlara sebep olacağı için sistemden elde edilecek olan biyokömürün verimini düşürecektir. Torefikasyon reaktöründen elde edilen ürünler için uygulama sıcaklıkları ilk aşamada maksimum 300 °C olarak belirlenmiştir ve denenen sıcaklık koşullarında elde edilen uçucu madde ve sabit karbon oranları literatür bilgileri ile uyumlu bulunmuştur.

SONUÇ

Türkiye'de oldukça geniş alanlarda üretimi yapılan ve ekonomik değeri oldukça fazla olan odun kömürünün hazırlanması, üretimi ve müşteriye sunulması oldukça zahmetli ve zorlu şartlarda gerçekleşmektedir. Bu araştırmada; kontrolsüz ve insan güvenliği açısından tehlikeli gerçekleşen torluk sürecine alternatif olması nedeni ile seri üretime örnek olabilecek bir

torefikasyon reaktörünün tasarlanması, denemesi ve ürünlerin analiz edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu tür sistemlerin kullanılmasının en önemli avantajı işlem süresini önemli oranda kısaltması ve ürün verimini oldukça artırmasıdır. Nahoya ve ark. (2013) geleneksel yöntemler ile biyokömür eldesi ile ilgili yaptıkları çalışmada bu yöntemlerle çok düşük verimlerde biyokömür elde edebildiklerini, elde edilen bu biyokömürlerinde homojen bir yapıda olmadıklarını ve üretim sırasında çevreye önemli oranda katran ve zehirli gaz verildiğini saptayarak biyokömür eldesinde gelişmiş sistemlerin kullanımının gerekliliğini belirtmişlerdir. Reaktörler gibi kontrollü koşulların sağlanabildiği sistemlerin biyokömür elde etmek amacıyla kullanımına yönelik vb. sistemlerin literatürlerde belirtilen bu avantajlarına ilaveten, araştırmamız kapsamında tasarımı, imalatı ve farklı sıcaklıklarda denemesi yapılmış olan reaktörden elde edilen tüm biyokömür örneklerinin nem, kül değerleri ticari fırın ürünü (7) ve ticari torluk ürününden (8) daha düşük saptanmıştır. Bu biyokömürler için oldukça büyük bir avantajdır. Araştırmada elde edilen sonuç ve öneriler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Yapılan çalışmada kurutulup öğütülmüş biyokömürlerin nem içerikleri %1-5 arasında saptanmış ve standartlara göre nominal aralıkta olduğu görülmüştür.
- Reaktörden elde edilen biyokömürlerin üst ısıl değerlerinin 5421 cal g⁻¹ ve 7135 cal g⁻¹ arasında değiştiği saptanmıştır. 300 °C'lik uygulama sıcaklığı ile 6 numaralı numunenin en yüksek ısıl değere sahip olduğu ve bu değer sabit karbon oranı en yüksek örnek olan torluk ürününden 69 cal g⁻¹ daha düşük olmakla beraber linyit kömürünün kalori değerinin üzerinde bir ısıl değer olduğu anlaşılmaktadır. Ticari fırın ürünlerinin ortalama ısıl değeri ise 6003 cal g⁻¹ değeri ile oldukça düşük düzeyde kalmıştır. Türkiyede çıkarılan linyit

kömürünün %90'undan fazlasının ısı değerinin 3000 kcal kg⁻¹ değerinden düşük olduğu düşünüldüğünde hem ekonomiklik hem de gaz emisyonunun çok düşük olması sebebiyle alternatif yakıt olarak değerlendirilebilecek meşe biyokömürünün önemi bir kez daha anlaşılmaktadır.

- Torefikasyon reaktörü ile elde edilen biyokömür örneklerin kül içerikleri %3.6-%6 arasında değişmiştir. En yüksek kül içeriğine sahip örnek 1 numaralı 220 °C de elde edilmiş örnek olup, en düşük kül içeriğine sahip biyokömür örneği ise 300 °C' de elde edilmiş olan 6 numaralı numunedir. Uygulama sıcaklığı arttıkça kül oranının düştüğü anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta elde edilen biyokömürlerin kül içeriklerinin geleneksel yöntemlerden elde edilen örneklerin kül içeriklerine göre düşük olması, yakıcı tasarımlarının yapılması, yanma hacminin hesaplanması, gaz temizleme üniteleri ile kül boşaltma sistemlerinin tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır ve yüksek sıcaklıkta elde edilmiş olan reaktör ürünlerinin kullanımı bu açıdan avantaj yaratacaktır.
- Torefikasyon reaktöründe 220 °C ve 300 °C uygulama sıcaklığı aralığında elde edilen numunelerde uçucu madde oranı %70-%80, sabit karbon oranları %20-%25 civarlarında elde edilmiştir. Sonuçlara göre numunelerden elde edilen yüksek uçucu madde içeriği biyokömürün kolay yanmasını sağlamaktadır.
- Kış aylarında son bulan, haftalarca süren ve zorlu bir süreç olan klasik torluk üretim süreci, imalatı gerçekleştirilen prototip makinaya benzer seri üretime yönelik makinaların geliştirilmesi ile tüm yıl boyunca ve kontrol edilebilir şekilde yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu makale Tolga BATUR'un yüksek lisans tezinden türetilmiştir (This paper was derived from Tolga BATUR's master thesis).

KAYNAKLAR

- Akçay T, Aktaş T 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. 3-6 September, 2014, Cappadocia-Nevsehir.
- Aktas T, Thy P, Williams R, McCaffrey Z, Khatami R, Jenkins BM 2015. Characterization of Almond Processing Residues from the Central Valley of California for Thermal Conversion. *Fuel Processing Technology*. 140: 132-147.
- Aylak Özdemir G, Saraçoğlu Ö 2016. Trakya Meşe Ormanlarında Artım ve Büyüme İlişkileri. *Journal*

of the Faculty of Forestry Istanbul University, 66(1): 211-243.

- Arias B, Pedida C, Feroso J, Plaza MG, Rubiera F, Pis JJ 2008. Influence of Torrefaction on The Grindability and Reactivity of Woody Biomass. *Fuel Process Technology Journal*. 89(2): 169-175.
- Bergman PCA, Kiel JHA 2005. Torrefaction for biomass upgrading. *Proceeding of 14th European Biomass Conference & Exhibition*, 17-21 October, Paris, France. *Bioenergy Update April 2000*, Vol. 2 No. 4, URL: https://www.bioenergyupdate.com/magazine/security/NL0400/bioenergy_update_april_2000.htm
- Bridgeman TG, Jones JM, Shield I, Williams PT 2008. Torrefaction of Reed Canary Grass, Wheat Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties. *Journal of Fuels*. 87: 844-856.
- Bozkurt AY, Göker Y 1987. Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi. İ.Ü. Üniversite Yayın No: 3445, Orman Fakültesi Yayın No: 388, İstanbul.
- Carrasco JC, Oporto GS, Zondlo J, Wang J 2013. Torrefaction Kinetics of Red Oak (*Quercus rubra*) in a Fluidized Reactor. *BioResources*. 8(4): 5067-5082.
- Chandran AN, Rao SS, Varma YBG 1990. Fluidized Bed Drying of Solids. *AIChE Journal*. 36(1): 29-38.
- Chen W, Kuo P 2010. A Study on Torrefaction of Various Biomass Materials and Its Impact on Lignocellulosic Structure Simulated by A Thermogravimetry. *Energy Journal*. 35(6): 2580-2586.
- Ciolkosz D, Wallace R 2011. A Review of Torrefaction for Bioenergy Feedstock Production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 5(3): 317-329.
- Demirbaş A 2001. Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fuels and Chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11): 1357-1378.
- Emrich W 1985. *Handbook of Charcoal Making: The Traditional and Industrial Methods*, Solar Energy R&D in the European Community. Series E. Volume 7.
- FAO 1987. *Simple Technologies for Charcoal Making*. Forest Products Division, FAO Forestry Paper 41, Rome.
- Göker Y, Akbulut T 1994. Odun Kömürü ve Seyyar Madeni Kömür Ocaklarında Üretimi. *İÜ Orman Fakültesi Dergisi*. 44(3-4):35-49.
- Kumar L, Koukoulas AA, Mani S, Satyavolu J 2016. Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review. *Energy Fuels*. 31: 37-54.
- Magdziarz A, Wilk M, Straka R 2017. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 127: 1339-1349.
- Nahayo A, Ekise I, Mukarugwiza A 2013. Comparative Study on Charcoal Yield Produced by Traditional and Improved Kilns: A Case Study of

- Nyaruguru and Nyamagabe Districts in Southern Province of Rwanda. *Energy and Environment Research*. 3(1): 40-48.
- Pimchuai A, Dutta A, Basu P 2010. Torrefaction of Agricultural Residue to Enhance Combustible Properties. *Energy Fuel Journal*. 24(9): 4638-4645.
- Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG 2006. More Efficient Biomass Gasification via Torrefaction. *Energy Fuels Journal*. 31(15): 3458-3470.
- Rokni E, Ren X, Panahi A, Levendis YA 2018. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of Coals with Raw and Torrefied Biomass Fuels. *Fuel*. 211: 363-374.
- Rousset P, Davrieux F, Macedo L, Perre' P 2011. Characterisation of the Torrefaction of Beech Wood using NIRS: Combined Effects of Temperature and Duration. *Biomass and Bioenergy Journal*. 35(3): 1219-1226.
- Sadaka S, Negi S 2009. Improvements of Biomass Physical and Thermochemical Characteristics via Torrefaction Process. *Environmental Progress and Sustainable Energy, AIChE Journal*. 28(3): 427-434.
- Strandberg M 2015. From Torrefaction to Gasification - Pilot Scale Studies for Upgrading of Biomass. Doktora Tezi. Department of Applied Physics and Electronics, Umeå University, İsveç.
- Sözen E, Gündüz G, Aydemir D, Güngör E 2017. Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*. 19(1): 148-160.
- Sümer SK, Kavdır Y, Çiçek G 2016. Türkiye'de Tarımsal ve Hayvansal Atıklardan Biyokömür Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*. 19(4): 379-387.
- Waje SS, Patel AK, Thorat BN, Mujumdar AS 2006. An Experimental Study of the Thermal Performance of a Screw Conveyor Dryer. *Drying Technology*. 24(3): 293- 301.
- Yanık J, Uçar S 2016. Sürdürülebilir Kaynak Olarak Biyokömür. TÜBİTAK 1001 Proje Raporu. Proje No: 114M001.
- Zwart RWJ, Boerrigter H, Drift AVD 2006. The Impact of Biomass Pretreatment on the Feasibility of Overseas Biomass Conversion to Fischer-Tropsch Products. *Energy Fuels Journal*. 20(5): 2192-2197.