

**BİYOKÖMÜR ELDE EDİLMESİNE
YÖNELİK BİR KARBONLAŞTIRMA
MAKİNASININ TASARIMI,
İMALATI VE DENENMESİ**
Tolga BATUR
Yüksek Lisans Tezi
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ
2017

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİYOKÖMÜR ELDE EDİLMESİNE YÖNELİK BİR
KARBONLAŞTIRMA MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI VE
DENENMESİ**

Tolga BATUR

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

TEKİRDAĞ-2017

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Türkan AKTAŞ danıŐmanlıęında, Tolga BATUR tarafından hazırlanan ‘‘Biyokömür Elde Edilmesine Yönelik Bir Karbonlaştırma Makinasının Tasarımı İmalatı ve Denenmesi’’ isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri BaŐkanı : Prof. Dr. Birol KAYIŐOęLU *İmza :*

ye (Danışman) : Prof. Dr. Türkan AKTAŞ *İmza :*

ye : Prof. Dr. Refik POLAT *İmza :*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİYOKÖMÜR ELDE EDİLMESİNE YÖNELİK BİR KARBONLAŞTIRMA MAKİNASININ TASARIMI, İMALATI VE DENENMESİ

Tolga BATUR

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

Son zamanlarda alternatif yakıt kaynağı oluşturmasının yanı sıra ürün özellikleri ile yeni iş imkanları sağlayan termokimyasal çevrim yöntemlerinden biri olan karbonlaştırma (torefikasyon) yöntemi, genel olarak çeşitli biyokütle kaynaklarının 220-350 °C sıcaklıkta oksijensiz ortamda kömürleşme işlemidir. Karbonlaştırma (torefikasyon) yoluyla biyokütleden biyokömür elde edilmektedir. Elde edilen biyokömür, fosil yakıtlardan türetilen enerji bakımından daha temiz bir alternatif enerji kaynağıdır. Bu tez çalışmasında, geleneksel üretime kıyasla daha kaliteli, hızlı ve kontrollü koşullarda biyokömür elde etmek adına kimyasal ve fiziksel torefikasyon süreç özelliklerinin belirlenmesi ve biyokömür üretiminde uygulanan klasik yöntemin yerine seri üretime yönelik elektriksel tahrikli biyokömür makinesi üzerine çalışma yapılmıştır. Biyokömür deneyleri için tasarlanan, imalatı gerçekleştirilen ve denemesi yapılan karbonlaştırma cihazından alınan numuneler kısa analizlere tabii tutulmuş ve çıkan sonuçlar piyasada satılan ürünlerle karşılaştırılmıştır. Analizler sonucu karbonlaştırma makinesinden elde edilen ürünlerde en yüksek ısı değere sahip biyokömür örneği 7135 cal/g ısı değeri ile 300 °C’de elde edilmiş örnek iken, en düşük ısı değere sahip örnek ise 220 °C’de elde edilmiş olan (5421.33 cal/g) numune olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 300 °C’de elde edilen numune sahip olduğu nem ve kül oranı ile ticari anlamda satışı yapılan piyasa ürününü geride bırakmıştır. 220 °C ve 300 °C uygulama sıcaklığı aralığında alınan numunelerde uçucu madde oranı %70-%80, sabit karbon oranları %20-%25 aralığında elde edilmiştir. Tüm analizlerde uygulama sıcaklığı arttıkça (sürme hızı sabit) kalorifik değer arttı, nem ve kül oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Sonuç olarak biyokömür üretimi adına oluşturulan prototip, numune üretme ve numunenin kalitesi bakımından başarılı olmuş, ürün alma süresini 20-40 günlük sürelerden (klasik torluk) 7-8 dakikaya indirmiştir. Gelişime ve değişime açık olan prototip, ileride bu konuda yapılacak ar-ge çalışmaları için yol gösterici nitelikte olup ülke ekonomisine katma değer sağlaması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: biyokömür, karbonlaştırma, enerji

2017, 49 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

DESIGN, MANUFACTURING AND TESTING OF A TORREFICATION MACHINE TO OBTAIN BIOCHAR

Tolga BATUR

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Biosystems Engineering Main Science

Supervisor: Prof. Dr. Türkan AKTAŞ

Carbonization (Torrefaction) which is one of the thermochemical conversion methods is not only an alternative fuel source by the product features but it also provides new job opportunities. In general it is the process of carbonisation of various biomass resources in zero oxygen environment between 220-350 °C. Biocoal is obtained from biomass by Carbonization (Torrefaction). The obtained biochar is cleaner alternative energy source in terms of the energy that is derived from fossil fuels. In this study of thesis, in order to produce of better quality coal, to realize faster process in controlled conditions chemical and physical torrefaction process features are indicated and instead of classical method that is used in bio-coal production, electrically driven biochar machine was worked on so as to maintain mass production. Samples, which are designed for bio-coal experiments, are manufactured, are taken from carbonization device, are analyzed for short periods and the results are compared to the products that are sold in the markets. According to the results of analyses, bio-coal sample that has the highest heating value, which has been obtained from carbonization machine, is the sixth sample having a value 7135 cal/g obtained at 300 °C whereas the product having the least heating value is of 5421,33 cal/g in the second line. Furthermore the sixth number sample, obtained at 300 °C, has outdistanced the home product which is sold commercially speaking with the help of having the rate of ash and moisture. In the samples that are obtained at 220 °C and 300 °C has volatile substance ratio %70-%80, fixed carbon ratios %20-%25. It's been observed in all analyses that calorific value will increase and the ratio of moisture and coal will decrease if applied heating increases. In conclusion, prototype that is formed in the name of bio-coal production has been successful in terms of producing the samples and the quality of the samples. It's degraded the duration of buying the product from 20-40 days (in classical method) to 7-8 minutes. Prototype that is open to development and change, it's a leading figure for research and development areas in the long run and it is expected to contribute into the country's economy.

Keywords: biochar, carbonization, energy

2017, 49 pages

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGE DİZİNİ	v
ŞEKİL DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMASI	2
Biyokütleyle Genel Bakış	2
2.2. Biyokütlenin Özellikleri	3
2.3. Biyokütlelerin Yapısındaki Polimer Bileşimler	3
2.3.1 Selüloz	3
2.3.2 Yarı selüloz	4
2.3.3 Lignin (odun özü)	5
2.4. Torefikasyon Yöntemine Genel Bakış	5
2.4.1. Torefikasyon mekanizmaları	6
2.4.2. Torefike edilmiş biyokütlenin genel özellikleri	7
2.5. Torefikasyon İşlemi.....	9
2.5.1. İşlem Tanıtımı	9
2.5.2. Torefike edilmiş biyokütlenin kütle ve enerji dengesi ile hidrofobikliği	9
2.5.3. Torefike edilmiş biyokütlenin öğütme performansı	10
2.5.4. Torefike biyokütlenin partikül büyüklüğü ve yığın yoğunluğu	11
2.5.5. Torefikasyonda katı, sıvı ve gaz ürün verimi	11
2.5.6. Enerji gereksinimleri	11
2.6. Torefikasyon Teknolojisi ve Durumu	12
2.6.1. Torefikasyon teknolojileri	13
2.6.1.1. Döner tamburlu reaktörler	13

2.6.1.2. Akışkan yataklı reaktörler	13
2.6.1.3. Hareketli yatak reaktörleri	13
2.6.1.4. Vida konveyör reaktörleri	14
2.6.1.5. Mikrodalga reaktörleri	14
2.6.1.6. Çoklu ocaklı fırın reaktörleri	14
2.7. Torefikasyonda Reaktör Tiplerinin Karşılaştırılması	15
2.8. Trakya Bölgesinde Biyokömür İmalatı	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Biyokütle	18
3.1.2. Torefikasyon reaktör imalatında kullanılan malzemeler	19
3.2. Yöntem	24
3.2.1. Karbonlaştırma makinesinin tasarımı	24
3.2.2. Makinenin imalatı	24
3.2.3. Deneilerin yapılması ve ürünlerin elde edilmesi	28
3.2.4. Biyokömür analizleri	29
3.2.4.1. Biyokömür nem içeriği	29
3.2.4.2. Biyokömür ısı değeri	29
3.2.4.3. Biyokömür kül içeriği	30
3.2.4.4. Biyokömür uçucu madde ve sabit karbon yüzdesi	30
3.2.4.5. İstatistiksel analizler	31
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	32
4.1. Hammadde Özellikleri	32
4.2. Numunelerin Isıl Değerleri ve Kısa Analiz Sonuçları	33
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	39
5.1. Sonuç	40
5.2. Öneriler	41
6. KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	47

ÇİZELGE DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Ağaç Atıkları, Ağaç Peleti, Torefike Peletlerin Ve Mangal Kömürünün Yakıt Özelliklerinin Karşılaştırılması (Kleinschmidt 2011).....	7
Çizelge 2. 2. Potansitel Torefikasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması	16
Çizelge 3. 1. Kızıl Meşenin Sistemik Olarak İncelenmesi	18
Çizelge 3. 2. Çelik Türlerinin Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri	21
Çizelge 3. 3. Uygulama Sıcaklığına Göre Ürün Çıkış Süreleri	28
Çizelge 4. 1. Hammaddeye Ait Tanımlayıcı Veriler	32
Çizelge 4. 2. Isı Değerleri Ve Ağaç Türlerinin Isı Değerleri (Bozkurt Ve Sezer, 1987)	32
Çizelge 4. 3. Örneklerin Kısa Analiz Sonuçlarına İlişkin Tanımlayıcı İstatistiksel Değerler.	33
Çizelge 4. 4. Biyokütlelerin Nem Miktarı, Kalori Değeri, Uçucu Değer, Kül Analizleri Ve Sabit Karbon Değerleri İle Varyans Analizi Sonuçları	35

ŞEKİL DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1 : Odunsu Biyokütellerin Polimer Yapısı	4
Şekil 2. 2 : Termik İşlem Sırasında Odun Selülozu Malzemesinin Bozulma Rejimleri (Uslu Vd. 2005)	6
Şekil 2. 3 : Tipik Torefikasyon İşleminin Kütle Ve Enerji Dengesi	9
Şekil 2. 4 : Kayın Ve Ladin Sıcaklığına Göre Öğütme Enerjisi (Govin Vd. 2009)	10
Şekil 2. 5 : Nemli Bir Biyolojik Kütlein "Ortam" Sıcaklığından İstenen Hava Sıcaklığına Kadar Isıtılması Ve Ardından Torefike Edilen Ürünün Soğutulması Sırasında Enerji Gereksinimini Gösteren Aşamalar (Bergman Vd. 2005).....	12
Şekil 2. 6 : Torluk Alanı	17
şekil 3. 1 : Makinede Kullanılan Motorun Görünümü.....	19
Şekil 3. 2 : Rulman Yatak.....	20
Şekil 3. 3 : K Tipi Termokuplun Görünümü	21
Şekil 3. 4 : Sıcaklık Pıd Kontrolörün Görünümü	21
Şekil 3. 5 : Kurutma Fırını (Etüv) Görünümü	22
Şekil 3. 6 : Kül Fırını Görünümü.....	22
Şekil 3. 7 : Kalorimetre Cihazı (a) Ve Oksijen Dolum Cihazının (b) Görünümü.....	23
Şekil 3. 8 : Kullanılan Terazinin Görünümü	23
Şekil 3. 9 : Kullanılan Kumpasın Görünümü	23
Şekil 3. 10 : Karbonlaştırma Sisteminin Şematik Gösterimi.....	24
Şekil 3. 11 : Biyokömür Makinesinin Şematik Çizimi.....	24
Şekil 3. 12 : Taşıyıcı Ayakların Görünümü.....	25
Şekil 3. 13 : Reaktör Yalıtımı (a-Yalıtım),(b-Isıtıcı).....	26
Şekil 3. 14 : Vida Konveyörün Görünüşü	26
Şekil 3. 15 : Motor Bağlantısından Görünümler	27
Şekil 3. 16 : (a) Yapım Aşaması, (b) Montajlı Hali	27
Şekil 3. 17 : Hammadde Fiziksel Büyüklükleri.....	29
Şekil 3. 18 : Hammadde (a) Ve Karbonlaşmış Hali (b).....	29
Şekil 4. 1 : Üst Kalorifik Değerler Sonuçları	36
Şekil 4. 2 : Nem ve Kül İçeriği Sonuçları.....	37
Şekil 4. 3 : Uçucu Değer ve Sabit Karbon Oranları	38

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

N	: Nem İçeriği (% y.b)
%UM	: Biyokömür Uçucu Madde (%)
%K	: Biyokömür Kül İçeriği (%)
m _{p2}	: Kurutma Öncesi Kuru Örnek Kabı Ve Numune Ağırlığı (g)
m _{p3}	: Kurutma Sonrası Kuru Örnek Kabı Ve Numune Ağırlığı (g)
m _{p1}	: Boş Kuru Örnek Kabının Ağırlığı (g)
%SK	: Biyokömür Sabit Karbon Yüzdesi (%)
I	: Akım
V	: Gerilim
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
cal	: Kalori
PID	: Oran-Türev- İntegral Kontrolör
Kcal	: Kilokalori
RPM	: Tur Sayısı
g	: Gram
mm	: Milimetre

ÖNSÖZ

İnsan nüfusunun artması, teknolojinin gelişmesi ile gün geçtikçe artan enerji tüketimi ve dünyadaki enerji kaynak rezervlerinin azalması nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır.

Biyokütle; tükenmez bir kaynak olması, her yerde yetiştirilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması gibi nedenlerle uygun ve önemli bir enerji kaynağıdır ve modern dönüşüm süreçleri uygulandığında değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Tezimizin konusu olan karbonlaştırma (torefikasyon) yöntemi; biyokömür elde edilebilmesi açısından Dünya'da da kullanımı gün geçtikçe artan önemli termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden birisidir.

Tezimizde; ihtiyaçlar göz önüne alındığında, biyokütle özellikleri, karbonlaştırma (torefikasyon) sistemleri ve ülkemizde yoğun olarak üretimi yapılan ormansal biyokütlelerin karbonlaştırılması (torefikasyonu) amacıyla laboratuvar ölçekli elektriksel tahrikli karbonlaştırma (torefikasyon) makinesinin tasarlanması, imalatı ve denenmesi konuları ele alınmıştır.

Çalışmamda bana güler yüzü, rehberliği ve teknik bilgileriyle büyük desteği olan, başta değerli hocam sayın Prof. Dr. Türkan AKTAŞ'a, yıllardır bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan ve bana imkanlarını sonuna kadar sunan değerli hocam Sayın Caner BAYSAL'a ve çalışmalarımda olduğu gibi hayatımın her anında bana karşı desteğini esirgemeyen aileme ve hayat arkadaşım Seyde BATUR'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Aralık 2017

Tolga BATUR

1. GİRİŞ

Biyokütle, son yıllarda çevresel ve domestik özelliklerinden dolayı alternatif yenilenebilir yakıt olarak ele alınmaktadır. Biyokütle; ihtiva ettiği enerjiyi kazanmak için yakıt olarak kullanılabilen tarım veya ormancılıktan sağlanan bitkisel bir maddenin kendisi, tamamı ya da bir kısmından elde edilen ürünlerdir. 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. 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.

Son 20 yılda gelişmekte olan ülkelerde ekonomik ve endüstriyel büyüme hızlıca olmuştur. Bu yüzden dünyanın enerji talebi kaçınılmaz şekilde artmaktadır. Bu da dünyada hakim olan fosil yakıtların enerji rezervlerinin giderek azalmasına yol açmıştır. 1970'lerin enerji krizinden bu yana birçok ülkede biyokütle gibi alternatif yakıt kaynaklarına yönelim artmaya ve bu kaynakların kullanımına ilişkin modern teknolojiler gelişmeye başlamıştır. Biyokütle yenilenebilir bir kaynaktır bu yüzden dünyada artan enerji talebi ve çevresel faktörler biyokütleyle olan ilgiyi artırmıştır (Tsai vd. 2007).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyokütle enerji üretiminde önemli bir yere sahiptir ve dünya enerji tüketiminin yaklaşık %15'ini karşılamaktadır. Biyokütle elektrik enerjisi ve ısı enerjisi elde etmek için kullanılabilir gibi, taşıtlar için yeni bir yakıt kaynağı olarak da kullanılabilir (Johnson 2007).

Torefikasyon; orijinal biyokütleyi daha iyi yakıt özelliklerine sahip olan biyokömürüne dönüştürmek için kullanılan bir ısıl işlemdir. Torefikasyon, biyokütlenin oksijenin yokluğunda tipik olarak 200 ° C ila 400 ° C arasında bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını ihtiva etmektedir. Ana ürün katı, kurutulmuş biyokütledir. İşlem sonucunda biyokütlenin yapısı, kırılğan ve daha hidrofobik hale gelecek şekilde değişmektedir. Ağırlık kaybı yaklaşık % 30 olmakla birlikte, enerji kaybı, sadece % 10'dur.

Torefikasyon yöntemi ile elde edilen biyokömür, tarımda toprak iyileştiricisi ve organik gübre, hayvan çiftliklerinde hayvan yemi ajanı ve silaj ek maddesi, gazlarda tutucu, enerjide depolama, binalarda elektromanyetik radyasyonun emilimi ve yalıtım amaçlı yapı malzemesi, su filtrasyon sistemlerinde filtre yardımcı elemanı, tekstil sanayinde fonksiyonel giysilerin üretimi, karbonize materyalden grafen oksit üretimi, ilaç endüstrisi, çelik endüstrisi gibi birçok kullanım alanına hitap etmektedir (Nanda vd. 2016, Qian vd. 2015, Sun vd. 2016,

Park vd. 2013, Norgate vd. 2012). Bu anlamda kullanım alanlarının yaygınlaşması ile torefikasyon işlemine olan ilgi, son on yıl içinde önemli ölçüde artmıştır.

1.1.Çalışmanın Amacı

Bu çalışmayla amacımız biyokömürleştirme işlemi, kendi ürettiğimiz elektriksel tahrikli karbonlaştırma makine prototipi ile gerçekleştirerek, elde edilen biyokömürün kalite ve yanma özelliklerinin belirlenmesidir. Elde edilen sonuçların, klasik yöntemle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılıp ürün özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlaması ve ülkemiz için biyokömür üretiminde modern bir yöntemin pratiğe aktarılması geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMASI

2.1. Biyokütleyle Genel Bakış

Yoshida'ya göre (2008), "biyokütle" kelimesi aslen belirli bir birim içinde yaşayan canlı bir maddenin toplam kütlesi anlamına gelir, ama son zamanlarda, bitki malzemesi, bitki ya da bir enerji kaynağı olarak kullanılan tarımsal atık olarak tarif edilmektedir. Ayrıca biyokütle materyalleri, inorganik maddenin küçük bir miktarı ve çıkarılabilir organik bileşenli düşük molekül ağırlığı ile karbonhidrat polimerlerinin bileşimi olarak tanımlanmaktadır. Diğerleri biyokütleyi, termal veya biyokimyasal dönüşüm süreçleri kanalıyla yenilenebilir enerji kaynağı olarak hizmet verebilen bir biyolojik veya organik madde olarak tanımlanmaktadır. Çünkü; biyokütleler tüm canlı maddeyi kapsayan organik maddeler olduğundan, enerji içerikleri güneş ışığından elde edilir ve ardından dönüşüm süreçleri boyunca ısı enerjisine dönüşen kimyasal enerji olarak saklanır. Bitkiler, çim, ağaç artıkları, tarımsal atıklar, hayvansal atıklar ve belediye atıklarında biyokütle olarak değerlendirilen malzemelerdir.

Biyokütle, fosil yakıtların aksine, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. İyi bir örnek de ormancılık süreçlerinde elde edilen kalıntılardan oluşan ahşap artıklarıdır. Ağaçlar, şekerlerden selüloz yapmak için fotosentez sırasında atmosferden gelen güneş ışığını ve CO₂ emer; Dolayısıyla, depolanmış kimyasal enerji içeren selüloz, bu enerjiyi yaktığında ısıyı serbest bırakır ve atık gaz olarak ayrılan CO₂, fotosentez sırasında absorbe edilen miktara yaklaşık olarak eşdeğerdir. Bu nedenle, biyokütle sera gazı emisyonu düşüktür.

2.2. Biyokütlenin özellikleri

Biyokütlenin yakıt olarak performansı, kökenine ve tipine bağlıdır. Bunlar fiziksel ve kimyasal özellikleri ile tanımlamaktadır. Kimyasal özellikleri elemental (ultimate) ve kısa (proksimit) analizlerle tespit edilirken; biyokütlelerin boyutları, şekilleri, özgül ısı kapasitesi, ısı iletkenlik, nem içeriği, hacim ağırlığı, öğütülebilirliği ve gözenekli yapısı gibi fiziksel özelliklerinin de belirlenmesi önemlidir.

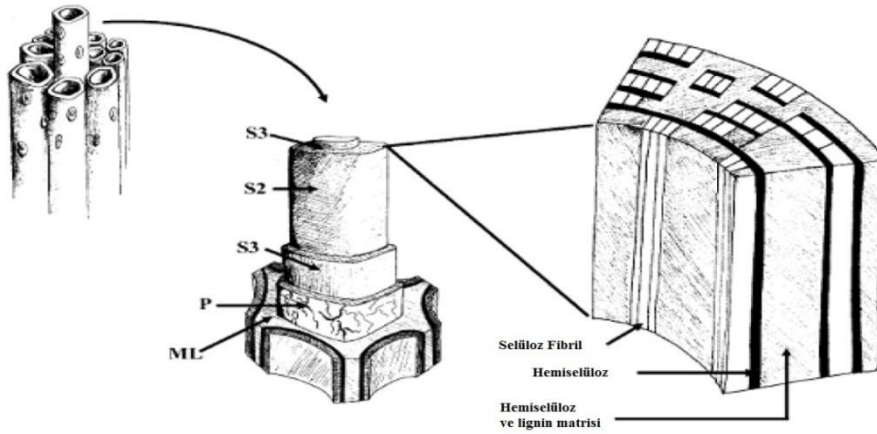
Biyokütlenin elemental analizinde, biyokütlenin esas ağırlık yüzdesi olarak, bileşimleri ve karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N), kükürt (S), klor (Cl), potasyum (K) vb. elementleri saptanmaktadır. Bununla birlikte, kısa analizler, sabit karbon (FC), nem yüzdesi (M), kül (A) ve uçucu madde (VM) içeriklerinin saptanmasını içermektedir. Bu analizler ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO vb. standartlarında belirtilmiş yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Biyokömürleştirme işleminde; elde edilen ürünün kimyasal ve fiziksel özellikleri, biyokütlenin sıcaklık ve sistemde kalış süresine bağlı olarak değişmektedir. Biyokütlenin yanma sürecini etkileyen diğer kimyasal bileşenleri; selüloz, yarı selülozlar, odun özü, lipidler, proteinler, basit şekerler, modifiye nişastalar vb. gibi yapılardır. Her bileşim sınıfının yoğunluğu; türlere, bitki dokusunun türüne, büyüme aşamasına ve büyüme koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Jenkins vd. 1998).

2.3. Biyokütlelerin Yapısındaki Polimer Bileşimler

Biyokütle üç ana polimerik bileşenden oluşmaktadır: Yarı selüloz, selüloz, lignin ve genellikle lignoselülozik biyokütle için bu bileşenler sırasıyla yüzde 20–40, 40–60, ve 10– 25 ağırlıklı olarak değişmektedir. (McKendry 2002). (Şekil 2-1’de) odunsu bir biyokütlenin polimer yapısını göstermektedir.

2.3.1. Selüloz

Selüloz, kuru odun ağırlığının yaklaşık yüzde 45’inden oluşan doğrusal bir polimerdir. Hidrojen bağı ve Van der Waals kuvvetleri ile birbirine daha da bağlı olan uzun zincirler (elemental fibriller) oluşturmak üzere bir araya getirilmiş D-glikoz alt birimlerinden oluşur.



Şekil 2. 1. Odunsu biyokütlerin polimer yapısı (Jeffries 1994)

Ek olarak; Selüloz, yüksek moleküler ağırlıklı bir polimer olup lignoselülozik materyallerin parçalanması, kristalin yapısının yüksek direnci nedeniyle termal ambarolizme kuvvetine sahip olduğundan 240°C - 350°C ' den itibaren başlamaktadır (Mohan vd. 2006; Tumuluru vd. 2010). Selülozik duvarın amorf bölgelerinde tutulan sular yapıyı parçalayıp daha sonra ısı işlemin bir sonucu olarak su buharına dönüştürülmektedir (Tumuluru vd. 2010).

2.3.2. Yarı selüloz

Yarı selüloz, selülozdan daha düşük moleküler ağırlıklı kuru odun ağırlığının yüzde 25-30'unu oluşturan karışık bir karbonhidrat polimerdir. D-odun şekeri, manoz, D-galaktoz, D-glukoz, D-arabinoz, metil glukorinik, D-galaktronik ve D-glukorinik asitlerden oluşmaktadır. (Pe'rez vd. 2002). Yumuşak odunda glukomanan (suda çözünebilen polisakarit) baskın iken; sert odun yarı selülozunun başlıca bileşeni (glukuronik asit ve odun şekeri) glukuronoksilandır. (Pe'rez vd. 2002).

Selüloza kıyasla; yarı selülozlar kolay hidrolize olabilir ve kum oluşturmaz. Selülozda görülen polimer başına 7,000–15,000 glukoz moleküllerine kıyasla 500–3000 şeker birimli daha kısa polimer zincirleri içerir (Tumuluru vd. 2010). Yarı selülozun ısı bozulması 130° – 260°C arasındadır. 180°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağırlık kaybı meydana gelmektedir (Demirbas 2009; Mohan vd. 2006; Tumuluru vd. 2010). Selülozunkine kıyasla yarı selüloz düşük bozulma ısısına bağlı olarak daha az katran ve kömür üretmektedir.

2.3.3. Lignin (Odun özü)

Selüloz ile birlikte Lignin tabiatta bulunan en bol polimerdir (Perez 2002). Lignin selüloz, yarı selüloz ve pektin bileşenleri arasındaki hücre duvarında boşlukları dolduran, yapısal olmayan ve oldukça dallanmış bir polimerdir (Tumuluru vd. 2010). Bu yapı yarı selüloza kovalent bağlanmıştır ve hücre duvarında mekanik mukavemet sergilemektedir (Şekil 2.1 'e bakınız). Lignin selüloz doğada nispeten hidrofobik ve aromatikdir ve 280 - 500 ° C arasında bir termik muameleye tabi tutulduğunda ayrışmaktadır (Tumuluru vd. 2010, Demirbaş 2009, Mohan vd. 2006). Odun şekerini dehidre etmek zordur ve bu yüzden selüloz veya yarı selülozdan daha çok kömüre dönüşmektedir (Tumuluru vd. 2010).

2.4. Torefikasyon Yöntemine Genel Bakış

Biyokütle, kömür gibi sarf yakıtla dönüştürülürken sınırlayıcı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Torefikasyon olarak bilinen karbonlaştırma işlemi kömürünkine benzer biyokütle yanma özelliklerini geliştirmek için kullanılan tanımlamadır.

Torefikasyon işlemi tarif eden literatürde birçok tanım mevcuttur. Süreçler açısından tanımlar benzerlik gösterse de çalışma sıcaklık aralığı ve biyokütle türlerine göre tanımlamalar değişmektedir. Sadaka ve Negi, (2009), Bergman vd. (2005), Rousset vd. (2011), 200-300 °C ve Mani (2009) 200-300 °C ile torefikasyon sıcaklık aralığı tanımlamıştır. Prins vd. (2006) ve Pimchuai vd. (2010) 230 – 300 ° C sıcaklık arasında tanımlamıştır. Arias vd. (2008) 220-300 °C sıcaklık aralığını tanımlarken Chen ve Kuo (2010) ve Zwart vd. (2006) 225-300 °C arasında tanımlamıştır.

Çalışmalar göstermiştir ki biyokütle türleri, kökeni ve özellikleri nedeniyle ısı işleme karşı farklı davranışlar göstermektedir (Bridgeman vd. 2008). Bu nedenle, termal bozunma başlangıcı biyokütle türüne bağlı olmaktadır. Bu konseptin daha iyi anlaşılması biyokütlenin aslında hangi sıcaklıkta kurutulduğu üzerine daha çok araştırma gerektirmektedir.

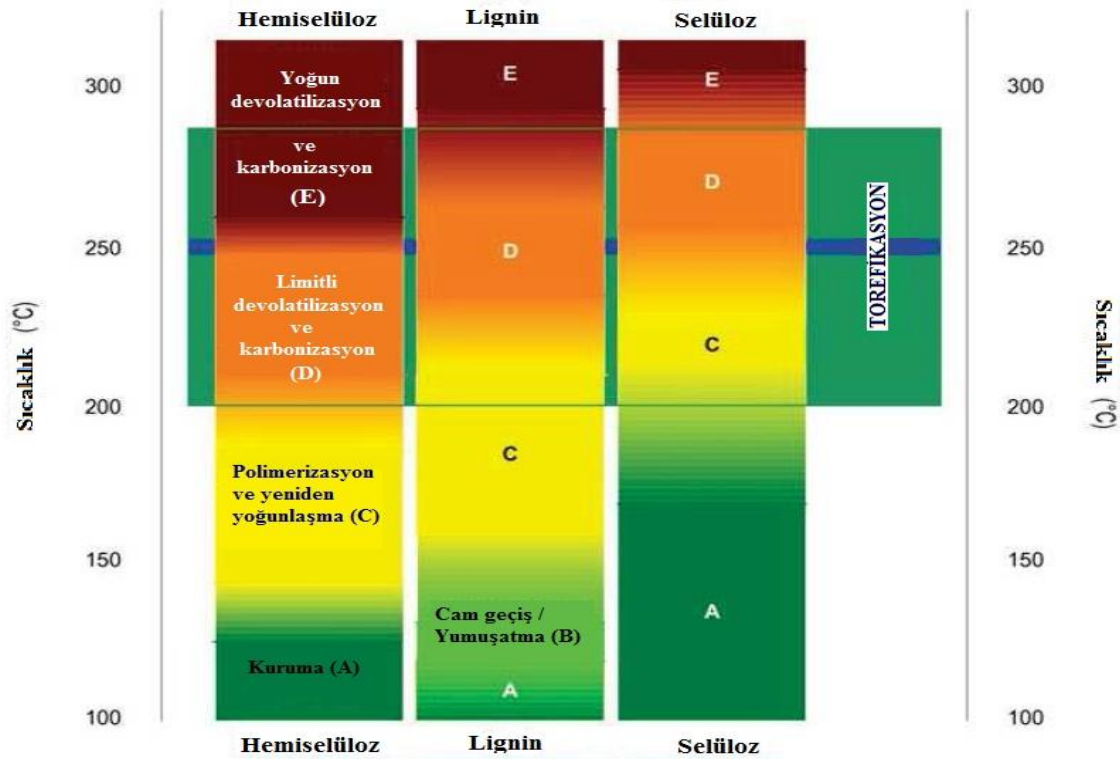
Ayrıca torefikasyon, çeşitli uçucuların serbest kalması sırasında biyokütlenin bozulma/depolimerizasyonuna neden olmaktadır ve nihai ürün ısı vererek işlem sıcaklığına bağlı olarak kurutulmuş biyokütle ya da torefike edilmiş yakıt olarak adlandırılmaktadır (Bergman vd. 2005, Pimchuai vd. 2010, Bridgeman vd. 2008).

Tarihte torefikasyon ilkesi, 1930'da Fransa'da (Bioenergy Update, 2000) gazlaştırıcılarda kullanılmak üzere ısı vererek kurutulmuş ahşap üretimi (TW) araştırıldığında tanınmıştır.

Fransız şirketi Pechiney tarafından 12000 ton/dönüm metalurjik işleme tesisinde kömür yerine torefike edilmiş malzeme üretmiştir (Bergman vd. 2005). O zamandan beri, torefikasyon yöntemine karşı gözle görülür ilgi oluşmuştur.

2.4.1. Torefikasyon mekanizmaları

Torefikasyon sırasında biyokütlenin ısıl bozulması polimer/hücrel yapısı boyunca sayısız reaksiyonlara neden olmaktadır. Ayrışma süreci Şekil 2. 2’de görüldüğü gibi Bergman ve arkadaşları tarafından da detaylı bir şekilde açıklanmıştır (2005). Düşük karbonlaştırma sıcaklıklarında, sınırlı miktarda devolatilizasyon ve karbonizasyon ile yarı selüloz yapısında ayrışma oluşmakta; bu sırada, lignin (odun özü) ve selüloz yapısında küçük bir bozulma meydana gelmektedir. Yarı selüloz, 200 ° C ile 300 ° C arasında ağır termal bozulmaya uğrarken, lignin ve selüloz yapısında sadece sınırlı bir devolatilizasyon ve karbonizasyon meydana gelmektedir (Bergman vd. 2005). Bu nedenle, yarı selüloz bileşenin biyokütlenin en reaktif polimer bileşeni olduğu sonucuna varılabilir ve torefikasyon sırasında biyoküttele önemli kütle kaybı olmaktadır (Bergman vd. 2005, Chen ve Kuo 2011, Sadaka ve Negi 2009, Acharjee vd. 2011).



Şekil 2. 2. Termik işlem sırasında odun selülozu malzemesinin bozulma rejimleri (Uslu vd. 2005)

2.4.2. Torefike edilmiş biyokütlenin genel özellikleri

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 başlıca özellikleri aşağıdaki gibidir:

i. Yüksek ısı değeri

Karbonlaştırılmış ürünlerin karbon değeri uygulama sıcaklığındaki yükseliş ve kalma süresi artışı ile doğru orantılıdır olmaktadır (Bridgeman vd. 2008, Pimchuai vd. 2010). Bunun nedeni, nem içeriği kaybı ve yüksek karbon-oksijen veya karbon-hidrojen oranı olarak açıklanmaktadır (Arias vd. 2008).

ii. Daha yüksek enerji yoğunluğu

Enerji yoğunluğu, uygulama sıcaklığı ve kalma süresi ile artmaktadır (Pimchuai vd. 2010, Sadaka ve Negi 2009). Karbonlaştırılmış malzemeler, enerji içeriğinin yaklaşık % 90'nını korurken orijinal ağırlığının yaklaşık % 70'ini kaybetmektedir. Dolayısıyla enerji veriminin kütle verimine oranı ile yaklaşık %30 oranında enerji yoğunluğu artışı sağlanmaktadır (Bergman vd. 2005).

iii. Hidrofobi

Karbonlaştırılmış biyokütle, O-H bağ yapısının yok edilmesine bağlı olarak hidrofobiktir ve dolayısıyla nemi muhafaza edemez veya ememezler.

iv. Geliştirilmiş öğütülebilirlik

Karbonlaştırılmış biyokütle daha gevrek, dolayısıyla gelişmiş pulverize özellikleri sağlar ve öğütmek için ham formdakilere kıyasla çok daha az enerji gerektirmektedirler (Bergman vd. 2005, Arias vd. 2008, Bridgeman vd. 2010).

Çizelge 2.1 ağaç, ağaç pelet, torefike edilmiş ağaç pelet ve odun kömürü özelliklerinin karşılaştırmasını özetlemektedir.

Çizelge 2. 1. Ağaç atıkları, ağaç peleti, torefike peletlerin ve mangal kömürünün yakıt özelliklerinin karşılaştırılması (Kleinschmidt 2011)

ÖZELLİKLER	AĞAÇ ATIKLARI	AĞAÇ PELETİ	TOREFİKE EDİLMİŞ AĞAÇ PELETİ	MANGAL KÖMÜRÜ
------------	---------------	-------------	------------------------------	---------------

Nem İçeriği (wt%)	30-40	7-10	1-5	1-5
Kalorifik Değer (LHV, MJ/kg)	9-12	15-16	20-24	30-32
Uçucu Değer (% db)	70-75	70-75	55-65	50-55
Çözülmüş Karbon (% db)	20-25	20-25	28-35	85-87
Kütle Yoğunluğu (kg/m³)	200-250	550-750	750-850	800-850
Hacim Enerji Yoğunluğu (GJ/m³)	2.0-3.0	7.5-10.4	15.0-18.7	18.4-23.8
Hidrokopik Özellikler	Hidrofilik	Hidrofilik	Hidrofobik	Hidrofobik
Biyolojik Bozulma	Hızlı	Orta	Yavaş	Yok
Freze Gereksinimleri	Özel	Özel	Standart	Standart
Ürün Tutarlılığı	Limitli	Orta	Yüksek	Yüksek
Taşıma Maliyeti	Yüksek	Orta	Düşük	Düşük

2.5. Torefikasyon İşlemi

2.5.1 İşlem tanıtımı

Torefikasyon üç ana adımı içerir: doğrama, kurutma ve torefikasyon (karbonlaştırma). Torefikasyon öncesinde biyokütleleri daha küçük ve daha düzgün boyutlara dönüştüren bir doğrayıcı içine atılmaktadır. Torefike edilecek biyokütle neminin uzaklaştırılması için kurutma prosesine gider. Kurutulmuş biyokütle, daha sonra biyokütle özellikleri ve ürün gereksinimlerine bağlı olarak uygun torefikasyon koşullarında termal uygulama yapılır. Torefikasyon sırasında yoğunlaştırılabilir madde ve yoğunlaşmaz maddeler, karbon monoksit, karbon dioksit, su buharı, hidrojen ve organik uçucu maddeler dahil olmak üzere, düşük enerjili çıkış gazı (baca gazı) oluşmaktadır.

İşlem sırasında serbest bırakılan gaz ürün miktarı torefikasyon uygulama sıcaklığındaki artış ile artmaktadır. Dolayısıyla torefikasyon sıcaklığı ve kalma süresi ne kadar yüksekse, enerji veriminin kütle verimine oranı yani enerji yoğunluğu da o kadar yükselmektedir.

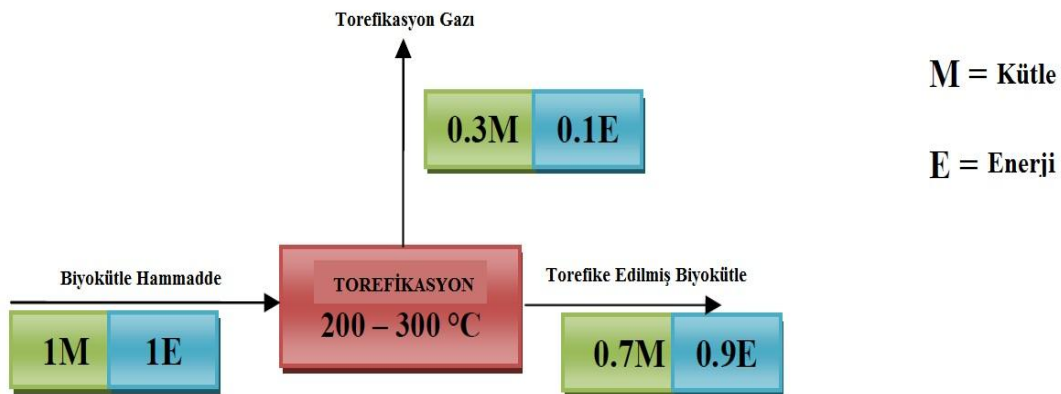
2.5.2. Torefike edilmiş biyokütlenin kütle ve enerji dengesi ile hidrofobikliği

Torefikasyon sırasında biyokütlenin bozulması hidroksil grubunun (OH) yok olmasına neden olarak su ile hidrojen bağı oluşturmasını engellemekte ve böylece emme ya da su tutma eğilimini kaybetmektedir (Bergman vd. 2005, Sadaka ve Negi 2009).

Böylece torefike edilmiş kütle, pratikte hidrofobik olan kutupsuz bir moleküler yapıya sahip olmaktadır (Bergman vd. 2005). Pimchuai vd. (2010), ham ve torefike edilmiş biyokütle örneklerini farklı çalışma sıcaklıklarında işlemiş ve su içine iki saat daldırarak hidrofobik testi uygulamıştır. Daha yüksek çalışma sıcaklığında torefike edilmiş olan numune asgari miktarda nem absorbe etmiştir.

Biyokütle torefikasyon sürecinde kütle kaybına uğramaktadır. Ürün kalitesi torefikasyon sıcaklığı ve kalma süresine bağlıdır. Biyokütle ağırlık kaybının büyük bir kısmı yarı selüloz devolatilizasyonunun (buharsızlaşmasının) yüksek reaktivitesi nedeniyle oluşmaktadır.

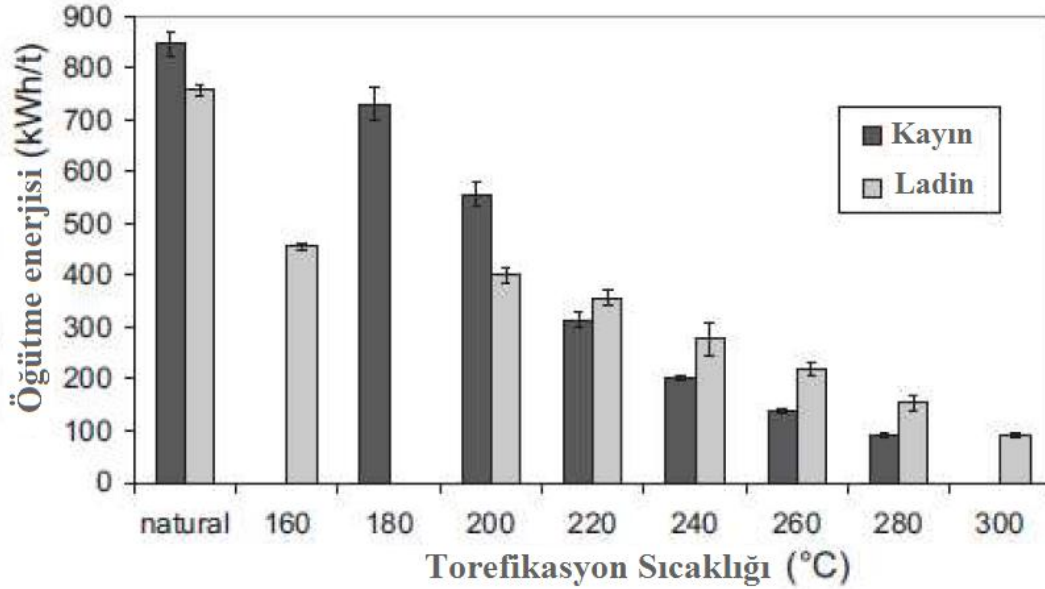
Odun özü ve selülozda sadece hafif buharsızlaştırma meydana gelmektedir, torefike edilmiş biyokütle enerji içeriğinin büyük kısmını korur (Pimchuai vd. 2010). Bergman vd. (2005)'e göre, tipik torefikasyon süreci, başlangıçtaki enerji içeriğinin yaklaşık % 90'ını içeren kütlelerin yaklaşık % 70'ini korumaktadır; dolayısıyla, biyokütlenin enerji içeriğinin % 10'unu ihtiva eden kütlelerin yaklaşık % 30'u, tütsüleme gazlarına (yani, baca gazı olarak salınan uçucu organik bileşikler) dönüştürülmektedir. Bu durum Şekil 2. 3' de gösterilmiştir. Dolayısıyla, enerji yoğunluğu artmaktadır.



Şekil 2. 3. Tipik torefikasyon işleminin kütle ve enerji dengesi

2.5.3. Torefike edilmiş biyokütlenin öğütme performansı

Torefike edilmiş biyokütlenin öğütülmesi kolaylaşmaktadır. Buna bağlı olarak Şekil 2. 4'te görüldüğü gibi öğütme için gerekli enerji gereksinimini de azalmaktadır (Arias vd. 2008 Govin vd. 2009, Repellin vd. 2010; Phanphanich ve Mani 2011). Çoğu araştırmalar torefike edilmiş biyokütlenin öğütülmesi için gereken enerjinin ham biyokütle için gerekli olan miktarın % 10-20'si arasında olduğunu bildirmektedir (Ciolkosz ve Wallace 2010).



Şekil 2. 4. Kayın ve ladin sıcaklığına göre öğütme enerjisi (Govin vd. 2009)

2.5.4. Torefike biyokütlenin partikül büyüklüğü ve yığın yoğunluğu

Torefikasyon işlemi, biyokütlenin linyoselülozik yapısında çatlakları başlatan ve yayan dehidrasyona neden olur, sonuç olmakta, sonuç olarak; porozite ve yoğunluk değişiklikleri oluşmaktadır (Repellin vd. 2010).

Torefikasyon işleminden sonra oluşan partikül boşluğuna bağlı olarak, gözenekliliğin artması, parçacık yoğunluğu ve yığın yoğunluğu gibi partikül boyutunu da azaltmaktadır.

Mani ve Phanphanich (2011), çam talaşlarının partikül yoğunluğu ve yığın yoğunluğunun torefike ürünün işlem sıcaklığına bağlı olarak farklı davranış sergilediğini göstermiştir.

2.5.5 Torefikasyonda katı, sıvı ve gaz ürün verimi

Torefikasyon ürün verimleri katı, sıvı ve gaz olarak sınıflandırılmakta ve bu ürünlerin bileşimi torefikasyon çalışma koşullarına (sıcaklık ve kalış süresi) ve biyokütle özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bergman vd. (2005)' e göre torefikasyon ürünleri oda

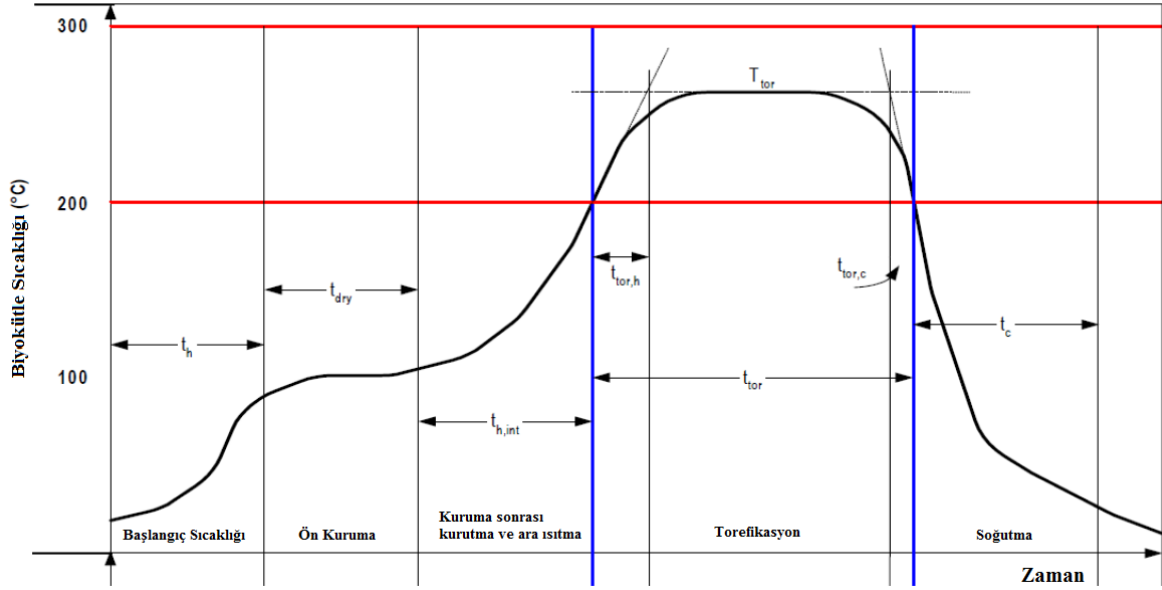
sıcaklığındaki durumlarına göre sınıflandırılmıştır. Katı fazdaki ürünler koyu kahverengidir ve kül izleri ile karbon açısından zengin bir kömür rengine boyanmıştır. Gaz fazında olanlar, yoğunlaşmayan veya kalıcı gazlar olarak adlandırılır ve genellikle CO₂, CO, H₂, CH₄, C_xH_y, toluen ve benzen olup, sıvı fazdakiler yoğunlaştırılabilir gaz veya sıvı olarak adlandırılır ve üç alt gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar: buhar (nem), organik (şeker, alkol vb.) ve lipidler (yağ asitleri gibi). Lipidler, sertleşme koşullarında buharlaşabilen hareketsiz bileşiklerdir (Bergman vd. 2005).

2.5.6 Enerji gereksinimleri

Torefikasyon işlemi için enerji gereksinimleri, biyokütle özelliklerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak üç aşamalı reaksiyonlar biçiminde sınıflandırılabilir: Bunun ilk aşaması, ısıtma ve ön kurutmayı içeren kurutma aşamasıdır (Bergman vd. 2005). Bu aşamada, biyokütle sıcaklığını buharlaşma durumuna ulaştırmak için sıcaklık genellikle 110 °C civarındadır. Kritik nem oranına ulaşılan kadar nem buharlaşır ve su buharlaşması düşmeye başlar. Diğer aşama ise biyokütle sıcaklığının 200 °C'ye yükseldiği kurutma sonrası aşamadır (Bergman vd. 2005) ve pratik olarak bu aşamada biyokütle nemsizdir. Bu noktanın sonrasında, torefikasyon aşaması başlar ve bu süreç, işlem sıcaklığına ve tutuş süresine bağlıdır. Genellikle, biyokütlenin bozulma reaksiyonu 180 °C civarında bir sıcaklıkta başlamakta (Felfli vd. 2004) ve ısınırken ısı cephesi katı biyolojik kütle için doğru sürekli ilerlemektedir.

Bu etkiler doğada endotermik olan birincil bozunma reaksiyonu oluşturur; Bununla birlikte, odunsu bir biyokütle için 250 °C civarında bir sıcaklıkta, parçalanma reaksiyonunun parçaları ekzotermik hale gelmektedir, ancak bu 300 °C' nin altındaki endotermik reaksiyona kıyasla önemsizdir, çünkü yeterli miktarda karbon ve gaz üretilmemiştir.

Genel olarak, torefikasyon sırasında Şekil 2.5' de görüldüğü gibi biyokütlenin, kuruma öncesi ve son kurutma aşamaları için büyük miktarda enerji (veya ısı verimi) gerekmektedir (Bergman vd. 2005).



Şekil 2. 5. Nemli bir biyolojik kütlenin "ortam" sıcaklığından istenen hava sıcaklığına kadar ısıtılması ve ardından torefike edilen ürünün soğutulması sırasında enerji gereksinimini gösteren aşamalar (Bergman vd. 2005)

2.6. Torefikasyon Teknolojisi ve Durumu

Biyokütleyi torefike etmek için farklı kurutma teknolojilerine dayanan birçok "patentli potansiyel" yöntem bulunmaktadır. Bununla birlikte, tam bir ticari ölçekli torefikasyon tesisinin çalıştırılmasını zorlaştıran çeşitli zorluklar mevcuttur; bu zorluklardan birisi, biyolojik kütlenin karmaşık özellikleri ve torefike edilmiş ürünlerin kalitesini düşük maliyetlerle artıracak çalışma koşullarını kontrol etme becerisidir.

Bir kurutma işlemi sırasında ısı temasının iki prensibi vardır. Bunlar, doğrudan ısıtma ile kurutma ve dolaylı ısıtmaya dayalı kurutmadır. Doğrudan ısıtılmış kurutucularda biyokütle, sıcak buhar veya ısı taşıyıcı ile temas ettirilir. Bununla birlikte, dolaylı olarak ısıtılan kurutucuda, biyokütle ısı taşıyıcı ile doğrudan temasta değildir. (Amos 1998, Bergman vd. 2005). Birçok kurutma teknolojisi, bir torefikasyon sisteminin özelliklerini karşılamak üzere modifiye edilebilir. Bu teknolojiler arasında döner tamburlu kurutucu, akışkan yataklı kurutucu, bantlı kurutucu, konveyörlü kurutucu, vida (burgu) kurutucusu, mikrodalga kurutucu ve çok sayıda ocak fırını kurutucu (veya turbo kurutucu) bulunmaktadır.

2.6.1. Torefikasyon Teknolojileri

Önerilen birçok torefikasyon teknolojisi kurutma teknolojilerine dayanmaktadır. Bu bölüm, kurutucular için potansiyel teknolojiler olarak araştırılmakta olan çeşitli yaygın kurutma teknolojilerini anlatacaktır.

2.6.1.1. Döner tamburlu reaktörler

Döner tamburlu reaktör, dönen bir tambura sahiptir; bu silindir, sabit bir nokta etrafında dönen şaft ve eğimli veya dikey konumda yapılandırılabilir. En çok kullanılan tip, sıcak gazın (veya buharın) dönen bir tamburda biyokütle ile temas ettiği doğrudan ısıtılmış olanıdır. Dönen tambur, ısı ve kütle transferini sağlamak için biyokütle parçacıklarının sıcak gaz vasıtasıyla termokimyasal dönüşümüne neden olmaktadır (Amos 1998). Buna ek olarak, sıcak buhar, döner tamburlu bir kurutucuda ısı taşıyıcı olarak kullanılabilir. Önceki araştırmalar, döner reaktörlerin düşük ısı aktarım hızı, yavaş kurutma kapasitesi, sıcaklığı tutamama ve ısı tutamama özelliği sergilediğini göstermiştir (Bergman vd. 2005).

2.6.1.2. Akışkan yataklı reaktörler

Bu kurutma tipi, en sık kullanılan tekniklerden biridir ve katı partiküllerin kurutulması için yaygın uygulamalar mevcuttur. Bu teknik, özel hidrodinamik ısı ve kütle transferi özelliklerine sahip bir "akışkan yatak" oluşturan yüksek hızlı sıcak gaz akışı gerektirir (Kudra ve Mujumdar 2002).

Akışkan yataklı kurutma, hızlı kurutma, üniform, yakından kontrol edilebilir ve yatak sıcaklığında yüksek termal verimlilik gibi pek çok avantaj sunmaktadır (Chandran vd. 1990). Ayrıca bu sistem, birçok işlemi birleştirmeyi kolaylaştırır (Chandran vd. 1990). Bununla birlikte, hızlı kurutma avantajı torefikasyon için ideal değildir çünkü torefikasyon yavaş ve kontrol edilebilir kurutma hızı gerektirir.

2.6.1.3. Hareketli yatak reaktörleri

Hareketli yataklı bir reaktör, reaksiyon sırasında hem katı hem de sıvı fazın hareketi ile tanımlanır. Bu işlem akışkanın ve katı maddenin görelî yönlerine bağılı olarak karşı akış, yan akış veya çapraz akış olabilir (Marb ve Vortmeyer 1998, Barrozo vd. 2006). Hareketli yatak tekniğı, özellikle daha düşük yatırım, daha düşük enerji tüketimi gibi sebeplerle popüler olmuştur (Barrozo vd. 2006). Bergman vd. (2005) ayrıca, hareketli yatak sisteminin yüksek ısı aktarım hızı, sıcaklık için iyi tutuş süresi ve düşük basınç değerine sahip olduğı sonucuna varmıştır.

2.6.1.4. Vidalı konveyör reaktörleri

Bir vidalı konveyör, bir boru veya katı şaft etrafında tutturulmakta, boru şeklinde veya U şeklinde bir oluk içine monte edilmektedir. Bu nedenle vida döndüğünde, malzeme ilerleyen basamağın önüne yığılmakta ve oluk içerisinden itilmektedir (Waje vd. 2006). Vidalı konveyör tipi reaktör, malzemenin aynı anda ısıtıldığı ve minimum alan gereksinimlerine sahip geniş ısı transferi alanı sağlamak üzere dolaylı ısıtma kontağı ile kurutulduğu ceketli bir konveyörden oluşmaktadır (Waje vd. 2006). Vidalı konveyör kurutucuları (SCD), tarım, gıda, kimya, ilaç ve kömürün pirolitik prosesi de dahil olmak üzere birçok endüstriyel uygulamaya sahiptir (Waje vd. 2007).

2.6.1.5. Mikrodalga reaktörler

Mikrodalga ısıtma, ekzotermik koşullar altında dahi kimyasal reaksiyon etkili iç ısıtma ürettiğinden dolayı birçok kimyasal işlem için ilgi çekicidir (Leonelli ve Mason 2010) ve organik sentez yapmak için yaygın olarak kabul gören, geleneksel olmayan bir enerji kaynağı haline gelmiştir (De la Hoz vd. 2005).

Buna ek olarak, mikrodalga ısıtma, daha kısa bir kalış süresi sağlamakta, yabancı maddelerin oluşumuna neden olan arzu edilmeyen ikincil reaksiyonları önlemekte ve iyi penetrasyon derinliği ile hacimsel ısıtma sağlamaktadır (Miura vd. 2004, Leonelli ve Mason 2010). Mikrodalga kurutmanın birçok avantajı, ısı penetrasyonu nedeniyle yüzey ısınması yerine hacimsel ısıtmadan kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, Mikrodalga ısıtma teknolojisinin dezavantajlarından bazıları, uniform ısıtma sağlamak için ince malzemeleri işleme yetmezliği ve çalışma derecesinin artırılmasına izin vermemesidir (Melin 2011).

2.6.1.6 Çoklu ocaklı fırın reaktörü

Çoklu odun fırını (MHF) dikey refrakter astarlı silindirik çelik kabuk reaktördür, bu da her ocak boyunca spiral yolda hareket eden erimiş demir karıştırıcı kollarıyla donatılmış bir merkez mil etrafında yatay bir düzlemde dönen dairesel ocaklar içermektedir (Dangtran vd. 2000). En üst ocağa giren malzemeler bir damla deliği içinden geçerek aşağıdaki ocağa gitmektedir. Malzemelerin çoklu ocaklardaki alıkoyma süresi, şaft hızına ve ocakların sayısına bağlı olarak 0,5 ila 3 saat olabilmektedir (Dangtran vd. 2000). Dangtran vd. (2000)'e göre, çoklu ocak fırını üç bölgeye ayrılmıştır: üst bölgeler (veya kurutma bölgesi), ham maddelerin nemi uzaklaştırmak için kurutulduğu yerdir; orta ocak bölgeleri (veya yanma

bölgesi), kurutulmuş malzemelerin yüksek sıcaklıklarda yanıcı reaksiyonlara maruz kaldıkları yerdir, bu nedenle kalış süresi genellikle kısadır; ve alt ocaklar (veya soğutma bölgesi), ürünlerin soğutulduğu ve gelen yanma havasına/buharına aktarıldığı yerdir.

Çoklu ocak fırınının yararlarından bazıları şunlardır: ısı transferi modu (eş akım, karşı akım veya çapraz akış) dahil olmak üzere geniş işleme koşullarına izin vermek; sıcaklık ve kalış süresini kontrol etmek, yüksek ısı ve kütle transferi sağlamak ve iyi karıştırmayı sağlamak (Dangtran vd. 2000, Melin 2011, FGC Group 2010). Bununla birlikte, çoklu ocak fırınının dezavantajları, değişen besleme özelliklerine, sızdırmazlık sorunlarına ve çoklu hareketli parçalardaki yüksek bakım maliyetine duyarlılardır.

2.7 Torefikasyonda Reaktör Tiplerinin Karşılaştırılması

Çeşitli torefikasyon teknolojilerine genel bakış, torefaksiyon derleme makalelerinde ve konferans sunularında belgelendirilmiştir (Melin 2011, Kleinschmidt 2011, Walton ve Van Bommel 2011) ve bu incelemelerde şirketlerin ve ilişkili satıcıların listeleri, yerleri, reaktör konseptleri, üretim kapasitesi ve çalışmaya başlaması için tahmini süre dahil edilmiştir. Bununla birlikte, henüz önerilen hedeflerini karşılayamamıştır. Sonuç olarak, bir fırınlama reaktörü, çeşitli çalışma koşullarını karşılayabilmeli ve aşağıda belirtilen özellikleri karşılayacak şekilde çok yönlü olmalıdır:

- Sıcaklık ve kalış süresini kontrol etme;
- Geniş yelpazeli besleme stoğu özellikleri ve çok çeşitli partikül boyutlarını temin etme;
- Isı entegrasyon sistemini, proses ısısını tamamlamak için enerji dolaşımının avantajlarından yararlanma;
- Düzgün ısıtma, yüksek ısı ve kütle aktarım hızı sağlama;
- Sağlam, uygun maliyetli ve ölçeklenebilir

Farklı reaktör teknolojilerinin sıralaması, karar matrisi ile yukarıda özetlenen kriterlere dayanmaktadır. Çizelge 2.2, torefikasyon işleminde kullanılan reaktör teknolojilerinin karşılaştırılmasını ve puanlamasını göstermektedir.

Hareketli yatak, akışkan yatak, çok hazneli fırın, döner tambur fırın üst düzey teknolojilerdir. Bu derecelendirmeler, yüksek bakım maliyetlerine ve/veya tesis operasyonlarının kesintilerine göre farklılık arz etmektedir..

Çizelge 2. 2. Potansiyel Torefikasyon Teknolojilerinin Karşılaştırılması

<u>Varolan Teknoloji</u>	<u>Sıcaklık Modları</u>		<u>Kriterlerler</u>												<u>Toplam</u>
	Direkt	Dolaylı	Karıtlanmış Teknoloji	Yüksek Sıcaklık ve Kütle Transferi	Hammade Tiplerini İşleme (Hafif, ağır, kalıntı, atık, ağaç)	Sıcaklık Kontrol	Direnç Zamanı Kontrol	Ölçülebilirlik	Isı Entegrasyonu	Fiş Akışı	Malzemelerin Uniform Isıtılması	Partikül Boyutlarındaki Genişlik Oranı	Dahili hareketli Parça Yok	Sızdırmazlık Problemi	
<i>Döner Tamburlu Reaktörler</i>	x		2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	0	17
<i>Akışkan yataklı reaktörler</i>	x		2	2	0	2	1	2	0	2	2	1	2	2	18
<i>Hareketli Yatak Reaktörleri</i>	x		1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	19
<i>Vidalı Konveyör Reaktörleri</i>		x	2	1	1	1	2	0	2	2	1	1	0	0	13
<i>Mikrodalga Reaktörler</i>	x		0	1	2	0	2	0	2	0	0	1	2	2	12
<i>Çoklu Ocaklı Fırın Reaktörü</i>	x		2	2	2	2	1	2	2	2	1	2	0	0	18

Puanlama: 2 = Yüksek, 1= Orta, 0= Düşük

2.8 Trakya Bölgesinde Biyokömür İmalatı

Ülkemizde biyokömür üretimi belli kesimlerde azımsanmayacak bir gelir kaynağıdır. İstanbul Çatalçaya bağlı Halaçlı köyünde yapılan gözlemlerde bu amaçla kullanılan ve torluk olarak adlandırılmış olan üretim yönteminin biyokömür üretiminde kullanılan genel yapı olduğu anlaşılmıştır.(Şekil 2. 6)



Şekil 2. 6. Torluk alanı

Bu yöntemde torluk kurulurken, ortasına uzunca bir sıruk dikilir ve torluktan daha yüksek olan sıruk, yanma aşamasında baca görevi görür. Baca içerisine kolayca yanabilen çalı doldurulur. Kömür haline getirilecek odunlar huni şeklini alacak şekilde istif edilir. Kömürleştirme esnasında hava ile doğrudan teması kesmek üzere istifin üzeri, meşe ağaçlarının dökülen yaprakları (gazel), saman vb. materyallerden oluşan ‘yeşil örtü’ ile kaplanarak onun üzerine toprak, kömür tozlarıyla hazırlanan ‘toprak örtü’ ile kapatılır ve üzeri hafifçe ıslatılan torluk yakmaya hazır hale getirilir. Fakat bu yöntem tamamen kontrolsüz şartlarda gerçekleştirilmektedir. Karbonlaştırma 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 açıklığından emin olmalıdır. Çeşitli orman ürünlerinin bir arada torluk edilmesi, sürecin(sıcaklık ve kalış süresi) kontrolsüz olması nihai ürünün kalitesi hakkında bilgi vermemektedir. Tüm bu gözlemlerin ve bilgilerin ışığında ülkemiz adına karbonlaştırma yöntemleri için güncel teknolojilerin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Biyokütle

Denemelerde kullanılan materyal Trakya bölgesinde yoğun bir şekilde yetişen ve torluk işleminde kullanılan Kızıl meşe'dir. Latince adı "*Quercus Rubra*" olarak bilinen kızıl meşe aynı zamanda Amerikan kızıl meşe olarakta bilinmektedir. Kuzey Amerika'nın doğu bölgelerinde yerli olarak bulunmaktadır. Avrupa ve ülkemizde Trakya Bölgesi ormanlarında iyi bir gelişme göstermektedir. Türleri arasında özellik olarak en hızlı büyüyen meşe türüdür. Maksimum boyları 30 metredir.

Sistematik olarak;

Çizelge 3. 1. Kızıl Meşenin Sistematik Olarak İncelenmesi

Alem	<i>Plantea</i>
Bölümü	Kapalı tohum
Sınıfı	Çift çenekli
Takımı	<i>Fagales</i>
Familyası	<i>Fagaceae</i>
Cins	<i>Quercus</i>
Tür	<i>Quercus Rubra L.</i>

Morfolojik olarak;

a) Ortalama Boy: Hızlı büyür. Tüm meşeler içinde en hızlı büyüyendir. Maksimum 30 metre boy yapar.

b) Yaprak: Yaz yeşili yaprakları sürgün üzerinde almaçlı dizilişte 10-22 cm uzun 5-6 cm geniş değişik biçim ve boyutta olmakla birlikte genellikle elips yada yumurta biçimli ve kenarları derince dilimlidir. Üst yüzü koyu yeşil ve parlak, alt yüzü açık renkte sarımsı yeşil renklidir. Sonbahar renklenmesi portakal kırmızısı beyaz kırmızı- kahve rengine dönüşür. Genç sürgünler pas renginde tüylerle örtülüdür.

c) Budama: Budamaya yatkındır.

d) Meyve: Meyveler 2-3 cm uzun yumurta biçimli ve kısa saplıdır. Meyveler iki yılda olgunlaşır. Olgunlaşma zamanı sonbahardır.

e) Tohum: Tohum yarım küre biçiminde tabak görünümlü ve kadehcik tarafından üçte biri veya daha azı kuşatılmış durumdadır.

f) Kök: Kazı kök yapar.

g) Tepe Özelliği: Piramidal bir tepe yapar. Tepe apı 15-20 m. dir.

Ekolojik olarak;

a) İklim: Erken ve geç donlara karşı oldukca duyarlıdır. Ilıman iklimlerin ağcıdır. Ancak bir miktar soğuğa dayanır.

b) Işık: Işık- yarıgölge ağacıdır.

c) Toprak: Toprak isteği azdır. Yarı nemli taze topraklar, kuru, humuslu ve vezatasyon döneminde sulanan topraklar ile balık topraklar ile kireçli yetişmesi için uygundur.

3.1.2. Torefikasyon reaktör imalatında kullanılan malzemeler

Geliştirilmiş ve imal edilmiş olan makinede redüktörlü DC fırçasız motor kullanılmış olup düşük devirlerde alıştırabileceğimiz momenti yüksek, devir kontrolünün kolay ve AC (Alternatif Akım) motorlarına göre daha ekonomik olduğundan DC (Doğru Akım) motor tercih edilmiştir (şekil 3.1). Redüktör ve kontrol devresi ile kullanılarak istenilen hızlar elde edilebilmektedir. Kullanılan DC motorun özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- a. Motor alışma Gerilimi:12V
- b. Hız: 55 Rpm (devir/dakika)
- c. Boşta ektiği Akım: 2A
- d. Zorlanma Akımı: 10A (Yaklaşık)
- e. Motor Gücü: 120W
- f. Mil apı: 10mm
- g. Mil Uzunluğu: 29mm



şekil 3. 1. Makinede kullanılan motorun görünümü

Milleri sabitlemek için SKF, PFT 47 yataklı rulman kullanılmıştır (şekil 3.2).

Yüksek hassas performans sınıfındaki rulman aşağıda belirtilen niteliklere sahiptir:

- Yüksek hız kapasitesi,
- Yüksek yük taşıma kapasitesi,
- Yüksek dayanıklılık,

- Düşük sürtünme,
- Daha uzun rulman hizmet ömrüne sahiptir.



Şekil 3. 2. Rulman yatak

Piyasada çeşit çeşit rezistanslar bulunmaktadır. Tasarlanan makine yüksek sıcaklıklarda çalıştırılacağı için hem ısıya dayanıklı hem de dış yalıtımı yüksek özellikte imal edilmiştir. Elektriksel tahrikli reaktör fırının rezistansları özel tasarım seramik rezistans olarak imalatı İzmir’ de yaptırılmıştır. Rezistansların her biri yüksek akım çekebilen yüksek sıcaklık kapasitesindedir. Kelepçe rezistanslar sıcaklık kararlılıkları ve uzun ömürleri sebebiyle sistem dizaynında tercih edilmiştir. Böylece verim arttırılmış aynı zamanda boru çapından ortaya çıkabilecek ölçü hataları minimuma indirilmiştir.

Teknik Özellikler:

- a) Rezistans Teli (80/20),
- b) Dış Kılıf (paslanmaz sac)
- c) Seramik yalıtım,
- d) Kablo.

Helezon yaprak ve mil, taşıyıcı sistem olarak makinada entegre olarak çalışmaktadır. Çap ölçülerinin birbiri ile uygun olması açısından işlem öncesi mil torna işleminden geçirilerek 26,8 mm’ye düşürülmüştür. Helezon yaprak çap 98 mm, iç çap 27 mm, hatve boyu 98 mm, kalınlığı 4 mm olarak seçilmiştir.

Çelik boru TS- EN 10217-1 standardında basınçlı ortamlara dayanıklı olması sebebiyle 4 inç (104,30 mm) olarak seçilmiştir. Boyu 1.80 metre olarak belirlenen çelik boru gerçekleştirilecek tüm karbonlaşma aşamaları için yeterli alanı sağlamaktadır.

Aşağıdaki Çizelge 3.2’de çeliğin ergime noktası görülmektedir. Bu değerler göz önüne alınarak karbonlaştırma işlemi için gerekli ısı değerinin çok daha üzerinde malzeme seçimi yapılarak, malzeme hatasından ortaya çıkabilecek sorunlar minimuma indirilmiştir.

Çizelge 3. 2. Çelik türlerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

ALAŞIM	YOĞUNLUK (gr/cm ³)	ERGİME NOKTASI (°C)	ÇEKME MUKAVEMETİ (N/mm ²)
Çelik	7,7-7,85	1450-1520	340-1800
Gri Dökme Demir	7,1-7,3	1150-1250	150-400
Paslanmaz Çelik	7,8-7,9	1440-1460	600-800
Mg Alaşımları	1,8-1,83	590-650	180-300
Al Alaşımları	2,6-2,85	570-655	100-400
Zn Alaşımları	5,7-7,2	380-420	140-300
Pirinç	8,25	900-950	250-600
Bronz	8,56-8,9	880-1040	200-300

Helezon tip taşıyıcının destek ayakları 30*30*2 mm profiller ile elektrot kaynağı kullanılarak imal edilmiştir.

Sıcaklık bilgisini okumak için K tipi termokupl tercih edilmiştir. K tipi termokup -200 derece ila 1200 derece aralığında sıcaklık ölçümü yapabilecek kapasitedir (Şekil 3.3).



Şekil 3. 3. K tipi termokuplun görünümü

Okuduğu sıcaklık bilgisini (dijital veriyi) rakamlara dönüştürmek için sıcaklık PID kontrolörü kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. Sıcaklık PID kontrolörün görünümü

Makineden elde edilen numunelerin nem içeriklerinin belirlenmesinde Nüve FN 50 kurutma fırını (ETÜV) kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3. 5. Kurutma fırını (Etüv) görünümü

Deneylelerden elde edilen örneklerin kül içeriklerinin belirlenmesinde Nüve MF 120 Kül fırını kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3. 6. Kül fırını görünümü

Biyokömürlerin alt ısı değerleri, ASTM D 5865-04 standardına göre IKA marka C 200 model kalorimetre cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kalorimetre analizi için örnek hazırlama IKA C 240 oksijen dolum makinası kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.7).



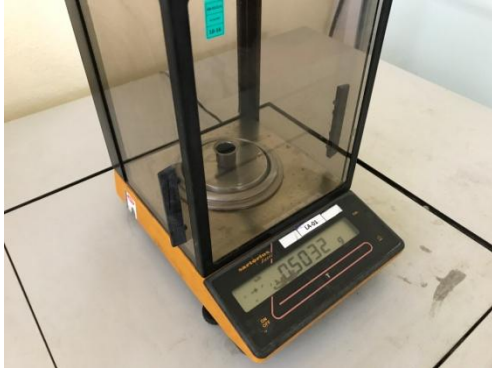
(a)



(b)

Şekil 3. 7. Kalorimetre cihazı (a) ve oksijen dolum cihazının (b) görünümü

Biyokömür örneklerinin tartılmasında maksimum kapasitesi 200 g olan ve 0.01 g hassasiyetli elektronik terazi, ve biyokömür boyutlarının ölçümünde 0.01 mm hassasiyetli analog kumpas kullanılmıştır (Şekil 3.8 ve Şekil 3.9).



Şekil 3. 8. Kullanılan terazinin görünümü

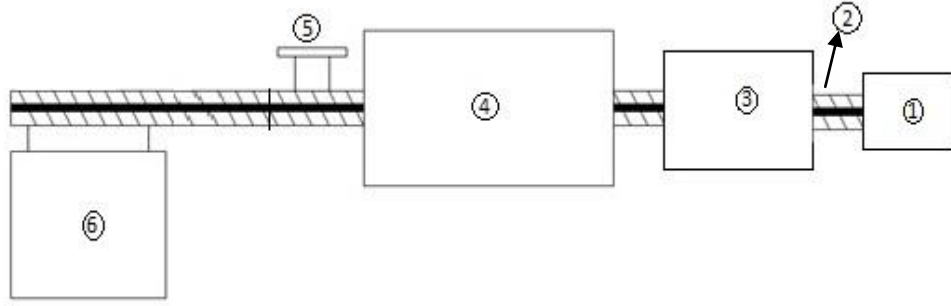


Şekil 3. 9. Kullanılan kumpasın görünümü

3.2. Yöntem

3.2.1. Karbonlaştırma makinesinin tasarlanması

Karbonlaştırma makinesinin tasarımı 3 boyutlu olarak SolidWorks programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan karbonlaştırma makinesi elektrikli tahrikli, kelepçe rezistanslı ve vida konveyör tiptedir. Ana hatlarıyla prototip 3 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; ürün giriş, reaktör ve ürün çıkış ünitesidir.(Şekil 3.10 ve Şekil 3.11)



Şekil 3. 10. Karbonlaştırma sisteminin şematik gösterimi (1: Motor Ünitesi (Sürücü ile Birlikte), 2:Vida Konveyör, 3: Ürün Giriş Ünitesi,4: Reaktör, 5:Gaz Çıkışı, 6: Çıkış Ünitesi)



Şekil 3. 11. Biyokömür makinesinin şematik çizimi

3.2.2 Makinanın imalatı

Karbonlaştırma makinesinin imalatı Kapaklıda bulunan Özel Çerçezköy Organize Sanayi Bölgesi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Üretim aşamaları aşağıdaki gibidir;

- Taşıyıcı Ayakların Hazırlanması,

- b) Reaktörün Oluşturulması,
- c) Helezon Mil ve Boru Montajı,
- d) Elektrik Tesisatı ve Pano Montajı,
- e) Genel Montaj ve Modifikasyon,
- f) Testlerin Yapılması.

Taşıyıcı ayaklar 30*30*2 mm profillerden oluşturulmuştur. Elektrod kaynağı ile birleştirilen profiller öncelikle belirlenen boylarda testere ile kesilmiştir. 45 derecelik köşe açılarıyla kesilen profiller 90 derecelik gönye yardımı ile teraziye alınıp kaynatılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3. 12. Taşıyıcı ayakların görünümü

Reaktörün imalatı 2 aşamada gerçekleştirilmiştir.

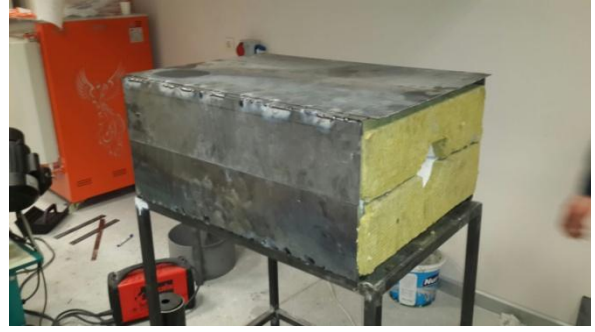
- a) Yalıtım
- b) Isıtıcı Sistem

Yalıtım aşamasında yüksek ısı yalıtımlı A sınıfı yutong malzeme kullanılmış olup taş yünü malzeme ile yalıtım kuvvetlendirilmiştir.

Ortaya çıkabilecek yüksek ısı karşısında kullanıcı ve sistemin zarar görmemesi için bu 2 malzeme birlikte seçilmiştir. Reaktör dış yüzey kapatması için 2 mm silisli sac kullanılmıştır (Şekil 3.13).



(a)



(b)

Şekil 3. 13. Reaktör yalıtımı (a-yalıtım),(b-ısıtıcı)

Sıcaklığın, elde edilecek olan biyokömür örneklerinin kalitesine etkisine yönelik denemeleri yapabilmek amacıyla sıcaklığı homojen şekilde dağıtılabilmesi ve istenilen sıcaklıkları elde etmek için yüksek verimli seramik kelepçe rezistanslar kullanılmıştır. Homojen sıcaklık dağılımını sağlamak için rezistanslar sistem üzerine 200 mm aralıkla yerleştirilmiştir.

Çap 98 mm, iç çap 27 mm, hatve boyu 98 mm, kalınlığı 4 mm olarak seçilen helezon yaprakları mile sıkı geçme ile montajlanmıştır. Mil bu işlem öncesinde tornalama işleminden geçirilerek çapı 26,8 mm'ye düşürülmüştür. Gerekli kontrollerin yapılması ile montajlanan helezon daha sonrasında elektrot kaynağı ile mile kaynatılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3. 14. Vida konveyörün görünüşü

Reaktör ünitesinin boru çapı 104,30 mm'dir. Helezon milin boru ile birleştirilmesi ile vida konveyör taşıyıcı sistem oluşturulmuştur (Şekil 3.14).

Ürün hızı motor kontrol devresi ile kontrol altında tutularak dakikada 4 (d/dk) devire kadar kontrol edilebilmektedir. Ayrıca sıcaklık kontrolü 2 farklı noktadan termokupl ile kontrol edilerek rezistanslar istenilen sıcaklığa (set değerine) ulaştığında kontrolörler sayesinde On/Off- PID yöntemleri ile sistem sıcaklığı sabit tutulmakta ve 3 farklı kontaktörle kontrol edilen rezistanslar istenilen set derecesine göre devreye otomatik girip çıkmaktadır. Tesisat için 4*2.5 mm kablo kullanılmış ve ısıya dayanıklı makaronlar ile kablolar korunmuştur (Şekil 3.15).



Şekil 3. 15. Motor bağlantısından görünüm

Son aşamada imal edilmiş olan tüm parçalar montajlanarak karbonlaştırma makinesi oluşturulmuştur. Uygulama sırasında ürünün oksijenle reaksiyon sonucu yanmaması için sistemin hava ile teması kesilmiştir. Bu yüzden oluşturulan prototip kapalı tiptir. Havanın sistem içerisine girmemesi için helezon mili barındıran taşıyıcı çelik boru tek parça olarak montajlanmıştır (Şekil 3.16).



(a)



(b)

Şekil 3. 16. (a) Yapım aşaması, (b) Montajlı hali

3.2.3. Deneilerin yapılması ve ürünlerin elde edilmesi

İstanbulun Çatalca ilçesine bağlı Halaçlı köyünden biyokütle materyali yani kızıl meşe örnekleri temin edilmiş, hazırlanan karbonlaştırma makinesinde deneilere tabii tutulmuştur. Deneiler sırasında ham madde (kızıl meşe) frezeleme işlemi ile ince talaş haline getirilmiş ve ürünler üzerinde sürme hızı sabit olmak üzere 5 farklı sıcaklık (220- 240 –260- 280 -300 C) değeri uygulanmıştır. Ürünlerin uygulamadan önceki hammadde ağırlıkları nihai ürünlerle karşılaştırılmak üzere kayıt altında tutulmuştur. Deneme koşulları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3. 3. Uygulama sıcaklığına göre ürün çıkış süreleri

Kızıl Meşe numunelerinin numaralandırılması	Uygulama Sıcaklığı	Sürme Hızı	Kalış Süresi
Numune 1 (hammadde)	-	-	-
Numune 2	220 C	4 d/dk	8 dk
Numune 3	245 C	4 d/dk	7 dk 48 sn
Numune 4	260 C	4 d/dk	8 dk 15 sn
Numune 5	280 C	4 d/dk	8 dk 28 sn
Numune 6	300 C	4 d/dk	7 dk 52 sn
Numune 7 (Ticari fırın ürünü)	Kontrolsüz	-	20-40 gün
Numune 8 (Ticari torluk ürünü)	Kontrolsüz	-	20-40 gün

Torefikasyon işleminde reaktöre beslenen hammaddenin fiziksel özelliklerinin homojen olması sağlanmıştır. Hazırlanan bu örneklerde boyutlar Şekil 3.17’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.



Şekil 3. 17. Hammadde fiziksel büyüklükleri

Ham maddenin ortalama uzunluğu 35,5 mm kalınlığı 0,1 mm olarak ölçülmüştür.

Hammaddenin torefikasyon öncesi ve sonrası görünüşleri Şekil 3.18’de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3. 18. Hammadde (a) ve karbonlaşmış hali (b)

3.2.4. Biyokömür analizleri

3.2.4.1. Biyokömür nem içeriği

Hammaddelerin öğütme işlemi yapıldıktan sonra yaklaşık 50 gr olarak hazırlanmış örnekler kapalı kaplara alınmış, ham madde 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. Kurutulmadan önceki ve sonraki ölçülen kütleler aşağıdaki eşitlikte kullanılarak yaş bazda nem içerikleri belirlenmiştir.

$$N = \left[\frac{(m_{p3} - m_{p1})}{(m_{p2} - m_{p1})} \times 100 \right] \quad (3.1)$$

Eşitlikte;

N : Hammadde nem içeriği (% y.b),

m_{p1} : Boş kuru örnek kabının ağırlığı (g),

m_{p2} : Kurutma öncesi kuru örnek kabı ve örnek ağırlığı toplamı (g),

m_{p3} : Kurutma sonrası kuru örnek kabı ve örnek ağırlığı toplamıdır (g).

3.2.4.2. Biyokömür ısı değeri

Biyokömürlerin alt ısı değeri, EN 14918 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 ağırlığındaki kurutulmuş örnekler standart koşullarda bir kalorimetre cihazının bir parçası olan yakıt bombasında oksijen ortamında yakılıp, kalorimetre kabı içindeki suyun sıcaklık derecesinin artışına ve sistemin ortalama gerçek ısı sığasına göre ısı değeri otomatik olarak cihaz tarafından sonuçlar direkt cal/g cinsinden verilmiştir.

3.2.4.3. Biyokömür kül içeriği

Biyokömürlerin kül içerikleri, EN14775 standardına göre kül fırını kullanılarak tayin edilmiştir. Porselen krozeler 575±25°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 ulaştıkça 1’er g olarak hazırlanmış örnekler (etüvde kurutulmuş) tartılmış ve fırına yerleştirilmiştir. Fırın sıcaklığı belli bir artış programına göre yükseltilmiştir

Sıcaklık artış programı:

Fırın sıcaklığı oda sıcaklığından 105 °C’ye yükseltilip ve bu sıcaklıkta 12 dakika bekletilmiştir.

Sıcaklık 10 °C/dk artışla 250 °C’ye yükseltilip ve bu sıcaklıkta 30 dakika bekletilmiştir.

Sıcaklık 20 °C/dk artışla 575°C’ye yükseltilmiş ve bu sıcaklıkta 180 dakika bekletildikten sonra sıcaklığın 105 °C ye düşmesi beklenmiş ve krozeler desikatöre alınarak soğutulup tartımları yapılmıştır. Kül içerikleri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\%Kül = \frac{Ağırlık_{Kroze+Kül} - Ağırlık_{Kroze}}{Ağırlık_{Kuru örnek}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.2.4.4. Biyokömür uçucu madde ve sabit karbon yüzdesi

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 hazırlanan örnekler seramik kaplara koyulup 600±50 °C'de 6 dakika ve hemen arkasından 950±20 °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.

Sabit karbon yüzdesi (%SK) ise kül (%K) ve uçucu madde yüzdesine (%UM) bağlı olarak:

$$\% SK = 100 - (\% K + \% UM) \quad (3.3)$$

3.2.4.5. İstatistiksel analizler

Hammadde, ticari ürünler ve tez kapsamında farklı sıcaklık koşullarında biyokömürleştirme işlemleri sonucunda elde edilen örneklerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi amacıyla SPSS Ver.18 İstatistik Paket programından yararlanılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Hammadde Özellikleri

Çizelge 4.1’de bu tez kapsamında biyokütle materyali olarak kullanılmış olan kızıl meşe için yapılmış olan ısıl değer ve kısa analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hammaddenin kalorifik üst değer (4132.33 cal/gr) olarak belirlendiği ve bu değer Çizelge 4.2’de farklı ağaç türleri ve meşe için 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 göre ise daha yüksek enerji potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4. 1. Hammaddeye ait tanımlayıcı veriler

Numune no		Kalorifik değer	Kül (%)	Uçucu madde	Nem (%)	Sabit karbon
Kızıl Meşe Hammadde		(cal/g)		(%)		(%)
1	Ortalama	4132,33(h)	10,47(a)	82,07(a)	10,4(a)	7,46(g)
	Standart sapma	6,50641	0,30551	0,00577	,53116	0,30006
	Varyans	42,333	0,093	0,000	,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 4. 2. Isı değerleri ve ağaç türlerinin ısı değerleri (Bozkurt ve Sezer, 1987)

Hammadde	Isı değeri (Kcal/kg)	Ağaç türleri	Isı değerleri (Kcal/kg)
Butan gazı	12.000	Çam	5.066
Fuel oil	10.000	Kayın	4.802
Antrasit	7.800	Ladin	4.726
Maden kömürü	7.000	Gök nar	4.651
Kok	6.000	Huş	4.505
Linyit	4.200	Meşe	4.356
Odun(Rutubetli)	3.000	Akça ağaç	4.183
Tezek	2.300	Kavak	4.129
		Gürgen	4.062

4.2. Numunelerin Isıl Değerleri ve Kısa Analiz Sonuçları

Herbir numune için saptanmış olan tanımlayıcı istatistikler yani; ısı değer ve kısa analiz sonuçlarına ilişkin ortalama, standart sapma, varyans, minimum ve maksimum sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir. Ortalama değerlerin arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olup olmadığı aynı çizelgede Duncan testine göre belirlenmiş olan harflendirmeye verilmiştir.

Çizelge 4. 3. Örneklerin kısa analiz sonuçlarına ilişkin tanımlayıcı istatistiksel değerler

Numune no		Kalorifik değer (cal/g)	Kül (%)	Uçucu madde (%)	Nem (%)	Sabit karbon (%)
1	Ortalama	4132,33(h)	10,47(a)	82,07(a)	10,4(a)	7,46(g)
	Standart sapma	6,50641	0,30551	0,00577	,53116	0,30006
	Varyans	42,333	0,093	0,000	,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
2	Ortalama	5421,33(g)	6,07(b)	74,37(c)	5,11(d)	19,57(f)
	Standart sapma	4,16333	0,03055	,00577	,00577	0,03512
	Varyans	17,333	0,001	,000	,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
3	Ortalama	5798,0(f)	4,43(d)	70,55(f)	4,83(d)	25,01(e)
	Standart sapma	2,00000	0,15275	,02082	0,01000	0,16258
	Varyans	4,000	0,023	,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
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
5	Ortalama	6565,33(c)	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
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
7	Ortalama	6003,0(e)	5,27(c)	16,15(h)	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
8	Ortalama	7204,67(a)	4,24(d)	27,55(g)	5,50(c)	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 (proksimit) ve ısıl değerlere ilişkin varyans analiz sonuçlarına göre tüm özellikler arasındaki farklılıkların 0,05 seviyesinde önemli olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4. 4. Biyokütlelerin nem miktarı, kalori değeri, uçucu değer, kül analizleri ve sabit karbon değerleri ile varyans analizi sonuçları

		Kareler toplamı	df	Kareler ort.	F	Önemlilik
Kalorifik değer (cal/g)	Gruplar arası	2,081E7	7	2972819,524	25636,963	0,000
	Gruplar içi	1855,333	16	115,958		
	Toplam	2,081E7	23			
Kül (%)	Gruplar arası	102,990	7	14,713	211,139	0,000
	Gruplar içi	1,115	16	,070		
	Toplam	104,105	23			
Uçucu madde (%)	Gruplar arası	13183,990	7	1883,427	4612474,653	0,000
	Gruplar içi	,007	16	,000		
	Toplam	13183,997	23			
Nem (%)	Gruplar arası	145,520	7	20,789	582,178	0,000
	Gruplar içi	,571	16	,036		
	Toplam	146,091	23			
Sabit karbon (%)	Gruplar arası	13865,984	7	1980,855	27423,002	0,000
	Gruplar içi	1,156	16	,072		
	Toplam	13867,140	23			

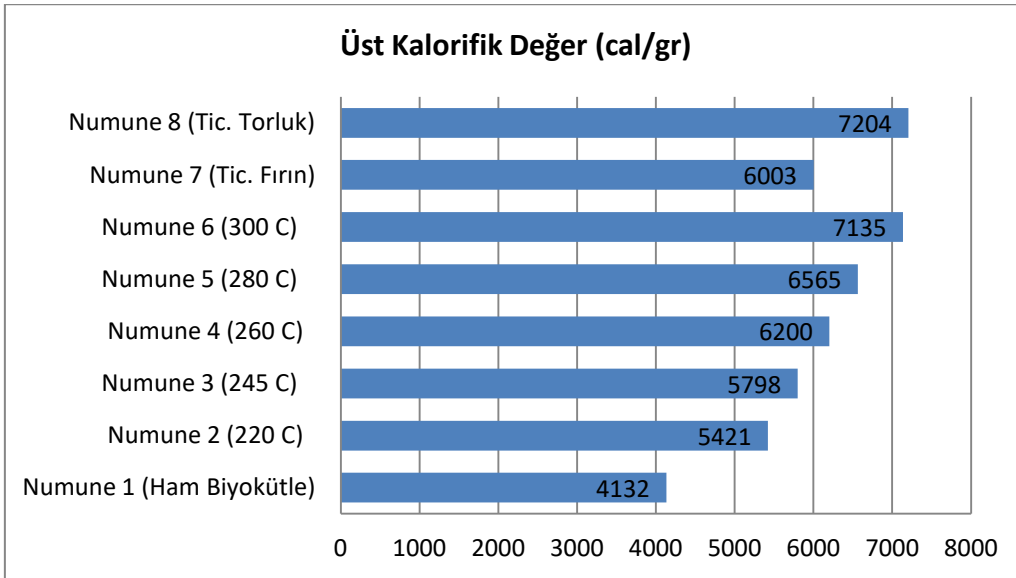
Çizelge 4.3’de verilmiş olan her bir örnek için ortalama değerler göz önüne alındığında işlem görmemiş kızıl meşe örneğinin, farklı sıcaklıklar altında karbonlaştırma işlemlerinden sonra elde edilmiş biyokömür örneklerinin ve geleneksel olarak torluk ve ticari fırından elde edilmiş biyokömür örneklerinin; ısıl içerikleri ile kısa analiz sonuçlarının

ortalamaları (nem miktarı, kül, uçucu madde ve sabit karbon değerleri) arasındaki farklılıkların önemli olup olmadığı ve hangi örneklerin farklı olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1 incelendiğinde karbonlaştırma makinesinden elde edilen ürünlerde en yüksek ısıl değere sahip olan biyokömür örneği 7135 cal/g ısıl değer ile 300 °C’de elde edilmiş olan 6 numaralı örnekte, en düşük ısıl değere sahip ürün ise 220 °C’de elde edilmiş olan 5421.33 cal/g değer ile 2 numaralı numune olarak belirlenmiştir.

Karbonlaştırma makinesinden çıkan ürünlerde 300 °C’de elde edilen biyokömür kalori değeri olarak ticari fırın ürününden 1132 cal/gr daha fazla, torluk ürününden 69 cal/gr daha azdır. Sonuçlar göstermektedir ki; imalatı gerçekleştirilen karbonlaştırma makinesi ile elde edilen ürünlerde uygulanan sıcaklık değeri (sürme hızı sabit kalmak koşulu ile) arttıkça kalori değeri artmaktadır ve makine ile sadece 300 °C de ticari olarak piyasada satılan biyokömürün ısıl değeri yakalanmıştır.

Öte yandan Duncan testine göre örneklerin ortalama değerleri arasındaki farklılıklar incelendiğinde, ısıl değer ve uçucu madde özellikleri arasındaki farklılıkların tüm örneklerde istatistiksel olarak önemli olduğu anlaşılmaktadır ($P<0,05$) (Çizelge 4.3).



Şekil 4. 1. Üst kalorifik değerler sonuçları

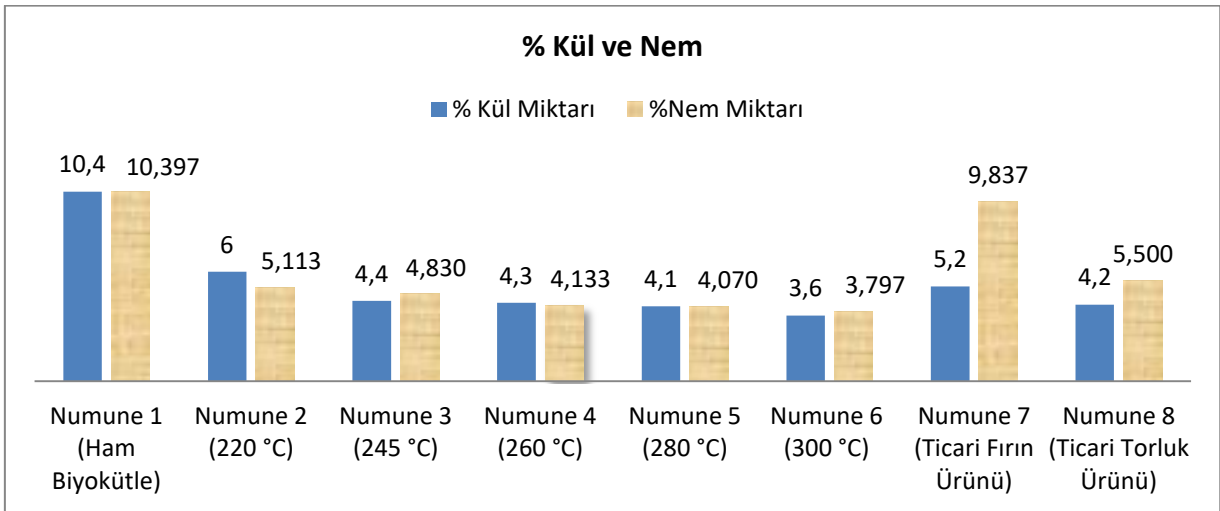
Şekil 4.2’de örneklerin nem ve kül içerikleri verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde hammaddenin nem ve kül içeriğinin elde edilen biyokömür örneklerine kıyasla oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu değerlerin yüksek olması yakıt özellikleri açısından istenmeyen bir durumdur. Elde edilen ürünlerden en düşük kül içeriğine sahip örnek %4,1 ile

280 derecelik sıcaklıkta karbonlaştırılan 5 numaralı numune iken en yüksek kül içeriğine sahip örneğin 220 derecelik sıcaklıkta işleme tabi tutulmuş 2. numune olduğu görülmektedir.

Nem içeriği bakımından incelendiğinde en düşük nem içeriği 6 numaralı numune (%3,797), en yüksek nem içeriği ise 2 numaralı numune (%5,113) de bulunmaktadır. Sonuçlar göstermektedir ki, 300 °C lik 6 numaralı numune sahip olduğu nem ve kül oranı ile ticari anlamda satışı yapılan piyasa ürününü geride bırakmıştır. Değerlere göre uygulama sıcaklığı arttıkça (sürme hızı sabit) nem ve kül oranının düştüğü görülmektedir.

Nem içeriği açısından ortalamalar arasındaki farklılıklar incelendiğinde 4, 5 ve 6 numaralı örneklerin (245, 260, 280 °C' de elde edilmiş örnekler ve ticari torluk örneği) kül içeriği açısından aynı grupta yer aldığı ve farklılıkların önemli olmadığı anlaşılmaktadır ($P>0,05$). 2 ve 3 numaralı örneklerin nem içerikleri arasındaki farklılığında istatistiksel olarak önemsiz olduğu belirlenmiştir (220 ve 245 °C' de elde edilmiş örnekler) (Çizelge 4.3).

Kül içeriği açısından ortalamalar arasındaki farklılıklar incelendiğinde 3, 4, 5 ve 8 numaralı örnekler (260, 280 ve 300 °C' de elde edilmiş örnekler) 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 kül içeriği açısından aynı grupta yer aldığı ve farklılıkların önemli olmadığı anlaşılmaktadır ($P>0,05$) (Çizelge 4.3).



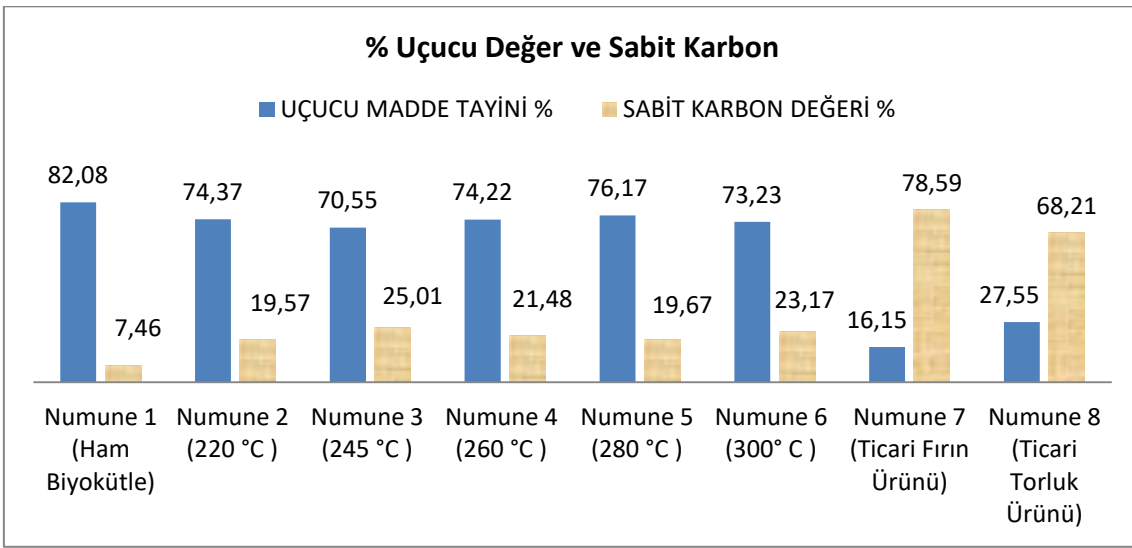
Şekil 4. 2. Nem ve kül içeriği sonuçları

Şekil 4.3'de uçucu madde ve sabit karbon içeriklerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde uçucu madde oranı en düşük değer %70,55 ile 245 °C 'lik 3. numune, en yüksek değer %76,17 ile 5. numune (280 °C) olarak saptanmıştır. Sabit karbon oranlarında ise en yüksek

değer %25,01 ile 3. numune (245 °C) iken en düşük değer %19,57 ile 2. numunededir. (220°C)

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 4.3).

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 4.3).



Şekil 4. 3. Uçucu değer ve sabit karbon oranları

İdeal değerler Kleinschmitt (2011)'e göre uçucu değer oranı torefikasyona uğramış biyokütlelerde %55-65 aralığında iken mangal kömüründe %50-60 aralığındadır. Sabit karbon oranı ise torefike biyokütlelerde %28-35 iken mangal kömüründe %85-87 aralığındadır (Çizelge 2.1). Bu denemeler sonucunda farklı sıcaklıklarda elde edilmiş olan biyokömür örneklerimiz 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.

Odun kömürü üretiminde, kömürleşme safhası çok önemlidir. Etkili bir kömürleştirme işlemi gerçekleştirilemez ise hammadde israfı olur, verim düşer ve böylece maliyet artar. Kömürleştirmenin ilk safhası, odunun 100 °C'de tam kuru hale getirilmesidir. Bu sırada tam kuru odunun sıcaklığı 280 °C'ye kadar yükselir. Kömürleştirme sıcaklığının düşük olması kömür verimini artırır, ancak kalite düşer. İyi kalitede ticari bir kömürün sabit karbon miktarı

%75 civarındadır. Bu da kömürleştirmede sıcaklığın 500 °C'ye çıkarılmasıyla sağlanır (Göker ve Akbulut 1994). Kömürleşme için en az 280 °C'lik bir sıcaklık gerektiği ifade edilmektedir (FAO 198, Kızılel 2014).

İfadeden de anlaşılacağı üzere sabit karbon değerlerinin istenilen değerlerde olması için minimum 500 °C ye tekabül eden bir kömürleşme sıcaklığına ihtiyaç duyulmaktadır. Makineden elde edilen ürünlerin uygulama sıcaklıkları ilk aşamada maksimum 300 °C olarak belirlenmiştir. Bu yüzden elde edilen uçucu madde ve sabit karbon oranları bu bilgiler ışığında olağandır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. 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. Kontrolsüz ve insan güvenliği açısından tehlikeli gerçekleşen torluk sürecine alternatif olması vesilesi ile seri üretime örnek olabilecek bir biyokömür makinesinin tasarlanması, denenmesi ve ürünlerinin analiz edilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Söz konusu çalışma odun kömürünün kullanılmasının yaygınlaştırılması, tarımsal ve ormansal atıkların katma değere dönüştürülmesi ve odun kömürü kullanımında dışa bağımlılığın azaltılması bakımından üretici için örnek olması ve modern teknikler konusunda farkındalık sağlaması açısından da yararlı olacaktır. Biyokömür elde edilmesine yönelik karbonlaştırma makinesinin tasarlanması, imalatı, denenmesi ve ürünlerinin analizi ile elde edilen sonuç ve öneriler aşağıdaki gibidir.

- Klasik zorlu torluk yönteminin yerine daha pratik, kontrol edilebilir ve seri üretime yönelik bir prototip elde edilmiştir.
- Elde edilen biyokömürlerin düşük nem içeriği sayesinde ürünlerin paketlenmesi, taşıma ve nakliye konularında ekonomiklik sağlanacaktır.
- Biyokömürlerin düşük kül içeriği, çevre kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır.
- Kış aylarında son bulan torluk üretim süreçleri, imalatı gerçekleştirilen makine ile tüm yıl boyunca devam edebilecektir.

- Doğru havalandırma sistemi ile kullanıcılar makineyi iç mekanlarda da kullanabilecektir.
- Günümüzde uygulanan uzun torluk süreçlerini en aza indirmeyi hedeflediğimiz çalışma ile ürünün çıkış süresi 20-40 günlük süreçlerden 7-10 dakikalık süreçlere varmıştır.
- Dezavantajlı durumda bulunan vida tipi taşıyıcılı reaktör seri üretime uygun hale getirilerek sistem iyileştirmesi yapılmış ve bu sayede dezavantajlı durum ortadan kalkmıştır.
- Piroliz prosesine yatkın portatif ve değiştirilebilir bir sistem oluşturulmuştur.
- Yapılan çalışmada kurutulup-öğütülmüş biyokömürlerin nem içerikleri % 1-5 arasında saptanmış ve standartlara göre nominal aralıkta olduğu görülmüştür.
- Biyokömürlerin kalori değerleri 5421 cal/gr ve 7135 cal/gr arasında değiştiği 300 °C'lik uygulama sıcaklığı ile 6 nolu numunenin en yüksek kalori değerine sahip olduğu ve değer olarak torluk ürününden ve linyit/ taş kömür kalori değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür.
- Elde edilmiş biyokömürlerin kül içerikleri %3,6-%6 arasında değişmektedir. En yüksek kül içeriğine sahip 1 numaralı 220 °C de işlenmiş numune olup, en düşük kül içeriğine sahip biyokömür numunesi 300 °C de işlenmiş 6 numaralı numunedir. Görülmektedir ki uygulama sıcaklığı arttıkça kül oranı düşmektedir. Elde edilen biyokömürlerin kül içeriklerinin düşük olması yakıcı tasarımlarının yapılması, yanma hacminin hesaplanması, gaz temizleme üniteleri ile kül boşaltma sistemlerinin tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır.
- 220 °C ve 300 °C uygulama sıcaklığı aralığında alınan numunelerde uçucu madde oranı %70-%80, sabit karbon oranları %20-%25 civarlarında elde edilmektedir. Sonuçlara göre numunelerden elde edilen yüksek uçucu madde içeriği biyokömürün kolay yanmasını sağlamaktadır.

5.2. Öneriler

İnsan nüfusunun artması, teknolojinin gelişmesi ile gün geçtikçe artan enerji tüketimi ve dünyadaki enerji kaynak rezervlerinin azalması nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Biyokütle; tükenmez bir kaynak olması, her yerde yetiştirilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması gibi nedenlerle uygun ve önemli bir enerji kaynağıdır ve modern dönüşüm süreçleri uygulandığında değerli ürünlere dönüştürülebilmektedir.

Geçmiş dönemlerde Türkiye Ziraat Odası Başkanlığı tarafından yapılan açıklamalara göre tarımdaki israf nedeniyle her yıl 65 Milyar TL zarar edilmektedir. Ülkemize katma değer sağlayacak olan karbonlaştırma (kömürleştirme) makinesi ekonomik kazanç oluşturacak ve ülke kalkınmasını destekleyecektir. Her yıl israf olan tarımsal ve ormansal ürünler bu tür yöntemle ekonomiye kazandırılabilir ve bu yolla milli kaynaklar daha doğru kullanılabilir halde kalacaktır.

Biyo kömürünün üretimi için hem çalışanlar açısından hem de ürün kalitesi açısından standartlar oluşturulmalı ve bu konuda çalışmalar yapılmalıdır. Tasarlanan sistemle birlikte tamamen kontrolsüz şartlarda gerçekleşen odun kömürü süreci kontrol altına alınarak seri üretime yönelik atılımlar yapılabilecektir. Ayrıca dolaylı olarak bu sebepten meydana gelebilecek orman yangınlarının önüne geçilebilecektir.

Türkiye’de, Ormanları Koruma Yasası kapsamında odun kömürü ihracatı yapılmamaktadır. Odun kömürü pazarının yüzde 50’sini ithalat oluşturmaktadır. Bu anlamda geliştirdiğimiz makine ve geliştirilecek sistemlerle dışa bağımlılık oranı azaltılabilecek, bu konuda ar-ge çalışmaları ile ülkenin ihtiyacını giderebilecek tamamı yerli kaliteli odun kömürü üretimi yapılabilecektir.

Ülkemizde çıkarılan linyit kömürünün % 90’ından fazlasının ısı değerinin 3000 kcal/kg değerinden düşük olduğu saptanmıştır. Bu çalışma ile birlikte linyit kömüründen daha kaliteli biyokömür üretilecek ve alternatif yakıt olacak kullanılabilir. Ayrıca biyo kömürün fosil yakıtlara göre gaz emisyonunun çok düşük olduğu bilinmektedir.

Yakıt özelliğinin yanı sıra makine ile mineral içeriği sayesinde toprak iyileştirmede Ziraat alanında, karbon içeriği sayesinde Kimya ve Kozmetik alanlarında(aktif karbon vb.) kullanılabilir geniş skalada ürünler elde edilebilir.

Makine klasik yöntemle göre daha güvenli ve kullanımı kolay olduğundan makinenin çeşitli ebatlarda üretimi gerçekleştirilerek evlere kadar ulaşması sağlanabilir ve her hane odun veya tarımsal ürün atıklarını bu yöntemle daha verimli bir enerjiye çevirebilir.

Tarımsal alanlarda hasat sonrası oluşan her türlü tarımsal ürün atığı karbonlaştırılarak (kömürleştirilerek) pelet haline getirilebilir ve kullanılabilir.

Torluk sürecinin zorlu olması, insanların güvenliğini tehlikeye sokacak durumların oluşabilmesi, ürün kalitesinin belirsizliği adına daha efektif değerlendirme yapılabilmesi bakımından biyokömür elde etmek için modern yöntemlerin geliştirilmesi ve özellikle üretimi

sık yapılan bölgeler başta olmak üzere ülke çapında yaygınlaştırma çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Çalışmamız konu ile ilgilenen insanlara ışık tutacak, biyoenerjinin sahip olduğu potansiyele ve kazandırdıklarına dikkat çekecektir. Aynı zamanda gelişime ve değişime açık olan prototipimiz, ileride yapılacak ar-ge çalışmaları için yol gösterici nitelikte olup değerlendirildiği takdirde ülke ekonomisine katma değer sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Acharjee TC, Coronella CJ, Vasquez VR (2011). Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology Journal*. 102 (7), 4849-4854.
- Amos WA (2011). Report on biomass drying technology. National Renewable Energy Laboratory, Report No. NREL/TP-570-25885, [Online Publication], URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf> [Cited 10 May, 2011]
- 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.
- Barrozo MA S, Murata VV, Assis AJ, Freire JT (2006). Modeling of Drying in Moving Bed, Drying Technology”, Taylor and Francis Group. 24, 269-279.
- Bergman PCA, Kiel JHA (2005). Torrefaction for biomass upgrading. Proceeding of 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France, 17-21 October 2005. *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.
- Bridgeman TG, Jones JM, Williams A, Waldron DJ (2010). An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel Journal*. 89(12):3911-3918.
- Bozkurt AY, Göker Y (1987). Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi. İ.Ü. Üniversite Yayın No: 3445, Orman Fakültesi Yayın No: 388, İstanbul.
- 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.
- Chen W, Kuo P (2011). Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy Journal*. 36(2), 803-811.
- Ciolkosz D, Wallace R (2011). A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 5(3), 317-329.
- Dangtran K.Y., Mullen J.F., and Mayrose D.T., A Comparison of Fluid Bed and Multiple Hearth Biosolids Incineration, The 14th Annual Residuals & Sludge Management Conference, 2000.
- De la Hoz A, Di'az-Ortiz A, Moreno A (2005). Microwaves in organic synthesis. Thermal and nonthermal microwave effects. *Chemical Society Reviews*. 34, 164-178.
- Demirbas A (2009). Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 31:13, 1186-1193.

- FAO (1987). Simple Technologies for Charcoal Making. Forest Products Division, FAO Forestry Paper 41, Rome.
- Felfli FF, Luengo CA, Soler PB, Rocha JD (2004). Mathematical Modelling of Woods and Briquettes Torrefaction, Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, Spain, October 19–2, 2004 <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2004/Fscommand/PDF/Agrener/Trabalho%205.pdf>
- FGC Group (2010). url: http://www.fgcgroupllc.com/multiple_hearth_furnaces.html [cited: May 30, 2011]
- García-Torrent J, Conde-Lázaro E, Wilén C, Rautalin A (1998). Biomass dust explosibility at elevated initial pressures. *Fuel Journal*. 77: 9 - 10, 1093-1097.
- Govin A, Repellin V, Rolland M, Duplan J (2009). Effect of torrefaction on grinding energy requirement for thin wood particle production. [online Journal], URL: <http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/46/23/39/PDF/AG-SFGP09.pdf> [cited 17 April 2011]
- Göker Y, Akbulut T (1994). Odun Kömürü ve Seyyar Madeni Kömür Ocaklarında Üretimi. İÜ Orman Fakültesi Dergisi, Seri B, Cilt 44, Sayı 3-4, s.35-49, İstanbul.
- Harper S H T, Lynch JM (1981). The Chemical Components and Decomposition of Wheat Straw Leaves, Internodes and Nodes. *J. Sci. Food Agric.* 32, 1057-1062.
- Jeffries TW (1994) Biodegradation of lignin and hemicelluloses. In: Ratledge C (Ed) *Biochemistry of Microbial Degradation*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 233-277
- Jenkins B.M., Baxter L.L., and Miles Jr. T.R., Combustion properties of biomass, *Fuel Processing Technology*, Vol. 54, 1998, pp 17 – 46.
- Johnson R (2007). Torrefaction - A Warmer Solution to a Colder Climate. World Conservation and Wildlife Trust.
- Kleinschmidt CP (2011). Overview of international developments in torrefaction. *Bio-energy Trade, Torrefaction workshop*. [online article], URL: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/grazkleinschmidtpaper2011.pdf> [cited 24 May 2011]
- Kudra T, Mujumdar AS (2002). *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc. New York. 69-70, 81 – 83, and 335- 336.
- Mani S (2009). Integrating biomass torrefaction with thermo-chemical conversion processes. Proceedings of the Annual Meeting of AIChE, Nashville, TN. Nov 8 – 13, 2009, Paper #160229, [online publication], URL: <http://www.aicheproceedings.org/2009/Fall/data/papers/Paper160229.pdf> [cited on 16 Nov. 2010]
- Marb CM, Vortmeyer D (1988). Multiple Steady States of a Crossflow Moving Bed Reactor. *Chemical Engineering Science*. 43 (4), 811-819.
- McKendry P (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Biores Technology*. 83, 37-46.
- Miura M, Kaga H, Sakurai A, Kakuchi T, Takahashi K (2004). Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 71, 187-199.

- Mohan D, Pittman CU, Steele PH (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*. 20:3, 848-889.
- Nanda, S., Dalai, A. K., Berruti, F., Kozinski, J. A., 2016, "Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy , Agronomy , Carbon Sequestration , Activated Carbon and Specialty Materials", *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 7(2), pp. 201–235.
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., Huhnke, R., 2015, "Recent Advances in Utilization of Biochar", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1055–1064.
- Park, J., Hung, I., Gan, Z., Rojas, O. J., Lim, K. H., Park, S., 2013, "Activated Carbon from Biochar: Influence of Its Physicochemical Properties on the Sorption Characteristics of Phenanthrene", *Bioresource Technology*, Vol. 149, pp. 383–389.
- Perez J, Muñoz-Dorado J, Rubia T, Martínez J (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology*. 5(2), 53 -63.
- Phanphanich M, Mani S (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology Journal*. 102(2), 1246-1253.
- Pimchuai A, Dutta A, Basu P (2009). 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.
- Repellin V, Govin A, Rolland M, Guyonne R (2010). Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy Journal*. 34(7), 923-930.
- 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.
- Sun, J., Hoon, S., Jung, S., Ryu, C., Jeon, J., Shin, M., Park, Y., 2016, "Journal of Industrial and Engineering Chemistry Production and Utilization of Biochar : A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 40, pp. 1–15.
- Svoboda K, Pohořelý M, Hartman M, Martinec J (2009). Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification. *Fuel Processing Technology Journal*. 90(5), 629-635.
- Tumuluru JS, Sokhansanj S, Wright CT, Boardman RD (2010). Biomass Torrefaction Process Review and Moving Bed Torrefaction System Model Development. [INL publication: 08/2010] URL: <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4734111.pdf>.
- Uslu A, Faaij A, Bergman PCA (2005). Pre-treatment Technologies, and their Effects on the International Bioenergy Supply Chain Logistics. <http://terrapreta.bioenergylists.org/files/I2005-27.pdf>
- Uslu A, Faaij APC, Bergman PCA (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Elsevier Energy*. 33, 1206-1223.

- 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.
- Waje SS, Patel AK, Thorat BN, Mujumdar AS (2007). Study of Residence Time Distribution in a Pilot-Scale Screw Conveyor Dryer. *Drying Technology*. 25(1), 249-259.
- Walton RA, Van Bommel IBG (2011). A complete and comprehensive overview of torrefaction technologies.
- W.T. Tsai, M.K. Lee, Y.M. Chang, Fast pyrolysis of rice husk: product yields and compositions, *Bioresource Technology* 98 (2007) 22–28.
- Yıldız ÜC (2011). Sürdürülebilir Üretimde ve Kalkınmada Ahşap Malzemenin Gücü. I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu 26-28 Ekim 2011, Bildiriler Kitabı Sayfa: 891-901, Kahramanmaraş.
- Yoshida S, et al. (2008) Development of bottom-fermenting *saccharomyces* strains that produce high SO₂ levels, using integrated metabolome and transcriptome analysis. *Appl Environ Microbiol* 74(9):2787-96
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Tolga BATUR, 07.12.1990 yılında Çorlu'da dünyaya gelmiştir. İlkokulu Ahmet Rıza İşbilen İlköğretim Okulu, Ortaokulu Başöğretmen İlköğretim okulu ve lise eğitimini Çorlu Mehmet Rüştü Uzel Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Elektrik Bölümünde tamamlamıştır. Lise zamanlarında katılmış olduğu proje ile Almanya (Ausbürg)'da bulunan Kuka Roboter GmbH şirketinde robotik sistemler üzerine staj yapma fırsatı bulmuş olup ayrıca Unilever Sanayi ve Ticaret Türk Anonim Şirketi (Algida)'nde işletmede beceri eğitimi almıştır. Lise eğitimini tamamladıktan sonra üniversite eğitimine Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünde devam etmiş ve lisans eğitimi boyunca işletme deneyimlerini Termo Teknik Ticaret ve Sanayi ve Modern Karton Tic. ve Sanayinde yaşamıştır. Mezuniyetin ardında Çorlu Mehmet Rüştü Uzel Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Endüstriyel Otomasyon Öğretmeni olarak çalışmaya başlamış olup bir yıl sonra Özel Çerkezköy Organize Sanayi Bölgesi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Endüstriyel Otomasyon ve Elektrik Elektronik Öğretmeni olarak görevlendirilmiştir. Üç yılın ardından yine aynı okulda yöneticilik hayatı başlamıştır. Şuan hala Çerkezköy Organize Sanayi Bölgesi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde çalışma hayatına devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilen Tolga BATUR, boş zamanlarında müzik dinlemeyi, piyano ve gitar çalmayı sevmektedir.

Aldığı seminer ve kurslar aşağıdaki gibidir;

- Mps 500 ve Robot Eğitimi – Festo - 2016
- Servo Sistemler – Festo 2016
- Cnc Freze ve Cnc Torna – Festo 2016
- Plc S7 1200 – Festo 2016
- Plc ve Pnömatik - Festo - 07.2013
- Cnc ve Torna - Festo - 07.2013
- Mesleki Yükseliş Paneli - Türk Eğitimciler Kulübü - 04.2011
- Sensors And Motors In Industrial Robots - Sa Consulting (Augsburg/Germany) - 09.01.2008
- Yabancı Diller - (Almanca Kursu Bitirme Sertifikası) - Teilnahme-Bestaetigung - 04.01.2008 Almanya - Ausbürg
- Step ve Servo Motorlar - M.E.B Yaygın Eğitim Kurumu - 28.12.2007

- Pedogojik ve Kültürel Hazırlık - M.E.B Yaygın Eğitim Genel Müdürlüğü - 28.12.2007
- Yabancı Diller - (Almanca Kursu Bitirme Sertifikası) - Meb Yaygın Eğitim Genel Müdürlüğü - 26.12.2007
- Sersrler ve Transdüserler - M.E.B Yaygın Eğitim Genel Müdürlüğü - 21.12.2007
- Robotik Sistemler - M.E.B Yaygın Eğitim Kurumu - 21.12.2007

Ŗu Ana Kadar Verdiği Dersler;

- Mikrodenetleyiciler
- Algılayıcılar ve Sinyal İŖleme
- PLC ve Touch Panel Programlama
- Fabrika Otomasyon
- Scada Sistemleri
- ArdıŖık Kontrol Sistemleri
- Pnömatik ve Hidrolik Sistemler
- Temel Programlama
- Elektrik Elektronik lme
- Elektrik – Elektronik ve Otomasyon Teknik Resim
- Elektrik Elektronik Esasları
- Elektrik Makinaları ve Kontrol Sistemleri
- Dijital Elektronik
- Elektronik Sistemler
- Endüstriyel Elektrik Sistemleri
- Endüstriyel Kontrol ve Arıza Analizi
- YG Tesis Bakım Onarım Teknikleri
- Proje Hazırlama