

BİYOKÖMÜR: ÜRETİMİ ve KULLANIM ALANLARI

¹Gökçen AKGÜL

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü 53100
Fener, RİZE

gokcen.akgul@erdogan.edu.tr

(Geliş/Received: 21.03.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.05.2017)

ÖZ: Artan dünya nüfusu, azalan enerji kaynakları ve fosil enerji kaynaklarının kullanımı sonucu ortaya çıkan küresel ısınma gibi dünyanın karşılaştığı enerji problemlerine alternatif enerji kaynakları ile çözümler sunulmaya çalışılmaktadır. Biyokütle enerji kaynağı bu çözümlerden bir tanesidir. Klasik yöntemlerden farklı olarak biyokütlenin günümüz teknolojisine uygun bir enerji veya madde formlarına dönüştürülmesi gerekmektedir. Piroliz yöntemi, biyokütlenin teknolojiye uygun katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülmesini sağlar. Bu çalışmada piroliz teknolojisi ile üretilen katı ürün olan BİYOKÖMÜR'ün (biochar) özellikleri ve kullanım alanları konusu ele alınmıştır. Biyokömürün toprak ıslahında kullanımından enerji depolama ve pillerde anodik materyal olarak kullanımı, yapılarda elektromanyetik emisyon tutulumuna kadar değişen çok farklı uygulama alanları bulunmaktadır. Biyokömür, fonksiyonel gruplarca zengin karbonize materyal olarak çok farklı uygulama alanları bulabilecek bir potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Biyokömür, Biyokütle, Piroliz, Uygulama

Biochar: Production and Applications

ABSTRACT: The world faces such problems that increasing world population, diminishing energy sources, increasing energy demand and the global warming which is the result of the use of fossil energy resources. Alternative energy sources could provide solutions to these problems. Biomass energy source is one of these solutions. Unlike the classical methods, biomass must be converted into energy-substance forms suitable for today's technology. The pyrolysis method allows biomass to be converted into solid, liquid and gaseous products that are appropriate technologically to use. In this study, the features and usage areas of biochar which is the solid product of pyrolysis technology are discussed. Green coal has a wide range of applications ranging from use in soil treatment, energy storage and use as anodic materials in batteries, and to electromagnetic emission capture in constructions. Green coal has a potential to find a wide range of applications as a carbonaceous material rich in functional groups.

Key Words: Applications, Biomass, Biochar, Pyrolysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artışına paralel olarak insanoğlunun enerji gereksinimi giderek artmaktadır. Endüstrileşmenin başlangıcından beri dünyanın enerji ihtiyacı için ana olarak petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklar kullanılmıştır. Ancak yakın gelecekte bu kaynakların dünyanın enerji gereksinimini sağlayamayacak düzeye geleceği ve tükeneceği öngörülmektedir (Abas ve diğ., 2015; Rintamäki ve diğ., 2016; Schiffer, 2008).

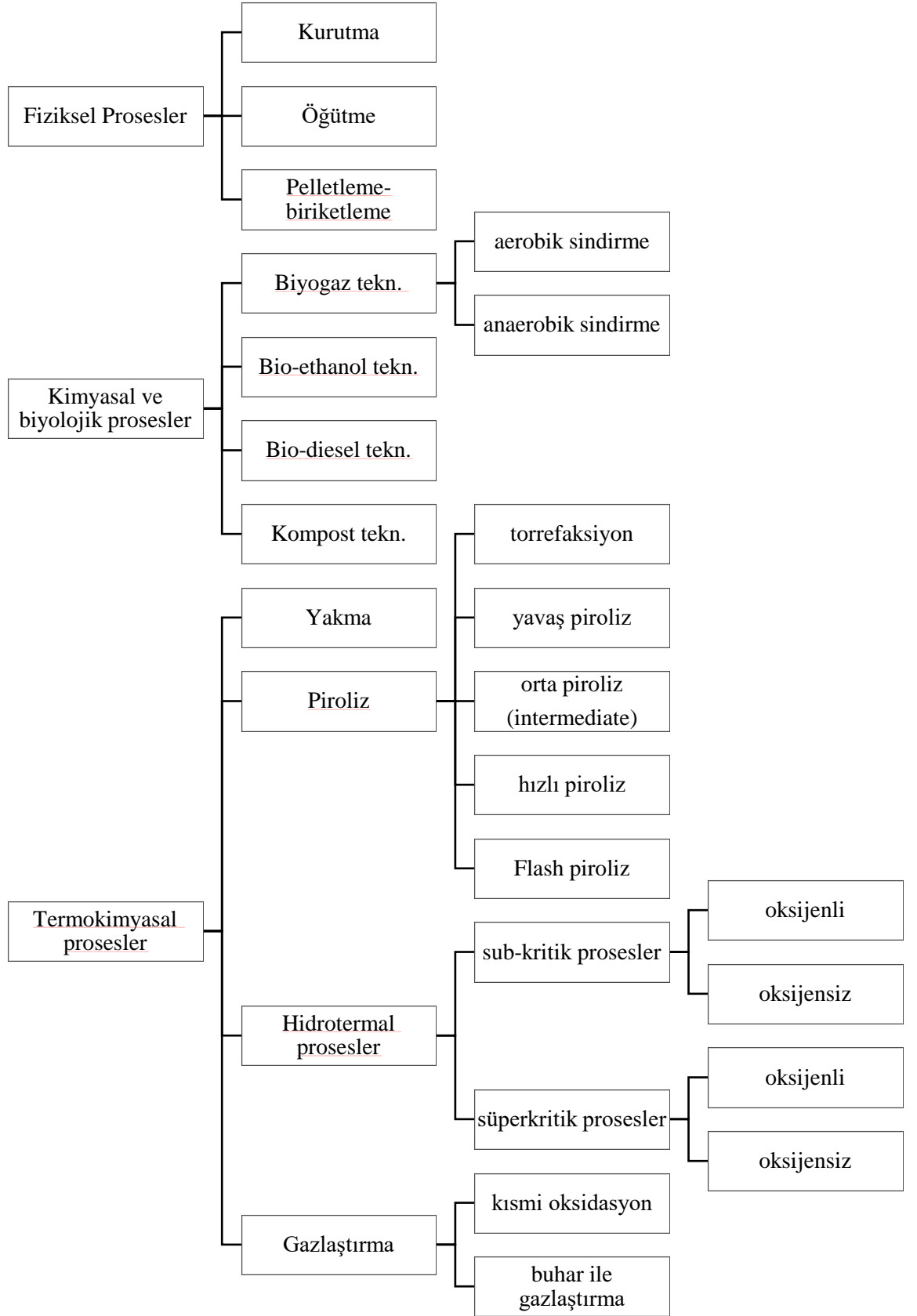
Diğer yandan enerji üretimi için fosil kaynakların kullanılması sonucunda dünya atmosferindeki karbondioksit miktarı artmıştır. Karbondioksit, dünya atmosferinde sera etkisi oluşturmakta, dünya ikliminde bir değişim ve ısınmanın ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Jones ve Warner, 2016).

İnsanoğlunun artan enerji ihtiyacının karşılanması gerekmektedir ancak bu yapılırken atmosfere sera gazlarının salınmaması, bu gazların olumsuz etkilerinin oluşturulmaması veya azaltılması artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu da ancak çevreyi kirletmeyen, sürdürülebilir, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının kullanılması ile mümkün olacaktır.

Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK); güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi gibi enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar, tüketilme hızından daha çabuk kendini yenileyebilen kaynaklardır ve oluşumları, petrol ve kömürün oluşumu gibi milyonlarca yıl sürmez. Bir saatten birkaç yıla kadar değişen kısa sürelerde tekrar yenilenebilirler. YEK, sürdürülebilir, çevreyi kirletmeyen, fosil yakıtlar gibi belli bölgelerde lokalize olmadan dünyanın her tarafında bulunabilen kaynaklar olduğu için temiz enerji üretimi ve ulusların enerji konusunda dışa bağımlılığını azaltma konularında önemlidir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan "Biyokütle", rüzgâr, güneş gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak yenilenebilir tek karbon kaynağıdır. Biyokütle, çok geniş anlamda, yaşayan organizmalardan türeyen tüm maddeleri kapsar. Küçük çaptaki alglerden devasa ağaçlara kadar değişen geniş bir spektrumu vardır. Organik kökenli kentsel ve endüstriyel atıklar da biyokütledir. Biyokütle yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır.

Biyokütlenin enerji üretiminde kullanımı yeni bir ifade değildir. Tarih boyunca odun, ısınmada ve yemek pişirmede kullanılmıştır. Biyokütlenin, bugünün ve geleceğin teknolojisine uygun enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için bazı tekniklerle işlenerek petrol ürünleri gibi enerji yoğunluğunun artırılması ve uygun yakıt formuna çevrilmesi gerekir. Bunun için kullanılan bazı yöntemler Şekil 1'de verilmiştir. Görüldüğü gibi biyokütleden enerji kaynağı olarak yararlanabilmek için uygulanan çok çeşitli yöntemler mevcuttur. Elde edilen ürünler, biyokütle başlangıç maddesi ve uygulanan proseslere göre çeşitlilik göstermektedir. Kuru odunsu biyokütlenin enerji yoğunluğu fiziksel yöntemlerle pellet veya biriket halinde artırılabilirken (Cao ve diğ., 2015) su içeriği yüksek hayvansal atıklar, ana içeriği metan gazı olan biyogaza dönüştürülebilir (Jang ve diğ., 2016). Yine şeker içeriği yüksek biyokütleden fermantasyon veya ısı işlemleriyle biyoetanol üretilirken (Sindhu ve diğ., 2016), yağ içeriği yüksek biyokütle, trigliseritlerin transesterifikasyonu ile biyodizele çevrilebilir (Kiran ve diğ., 2016). Piroliz yöntemi ile elde edilen aromatik içeriği yüksek ve petrol naftası gibi işlenebilir biyo-yag, biyokütleden türetilmiş enerji kaynağıdır (Alvarez ve diğ., 2016). Hidrotermal yöntemlerle ise yandığı zaman sadece su oluşturan temiz enerji kaynağı hidrojen üretilebilir (Azadi ve diğ., 2012). Bu makalede yavaş ve orta hızda yapılan piroliz yöntemi ile elde edilen katı ürün BİYOKÖMÜR ürünün özellikleri ve uygulama alanları konusunda bilgiler verilecektir.



Şekil 1. Biyokütle Teknolojileri

Figure 1. Biomass Technologies

PİROLİZ (PYROLYSIS)

Termokimyasal proseslerden bir tanesi olan piroliz, aslında bitkilerin dünyada varoluşu kadar eskidir. Bitkiler havasız sıcak ortamlara maruz kaldığında piroliz meydana gelir. Petrol, kömür, doğalgaz, odunkömürü gibi enerji kaynaklarının oluşumu aslında bir tür pirolizdir.

İnsanlık, pirolizin proses olarak önemini 1800'lü yıllardan sonra anlamış ve farkına varmıştır. Bu da sanayileşme devriminin başladığı, enerji ihtiyacının çokça arttığı döneme denk gelmektedir. Endüstriyel ölçekte piroliz ve gazlaştırma, ilk defa kömür ile başlamıştır. Kömürün pirolizi ve gazlaştırılması ile elde edilen ürünler yoğunluğu fazla ve etkin enerji kaynağı olarak evlerin, sokakların aydınlatılmasında kullanılmıştır. Daha sonra petrolün çıkarılması ve yaygın olarak kullanılması ile bu proses bir köşeye bırakılmış, dünyada petrol sıkıntısının baş göstermesi ile alternatif karbon kaynakların özellikle biyokütlenin pirolizi yeniden önem kazanmaya başlamıştır.

Piroliz işlemi sırasında pirolize maruz kalan biyokütlenin kimyasal bağları oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıkta termal olarak bozunur. Büyük hidrokarbon molekülleri daha basit moleküllere parçalanır veya düzenlenir. Genel olarak sıcaklık 500 °C, basınç da atmosfer basıncıdır. Piroliz ile katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilir. Ürünlerin cinsi ve miktarı, biyokütlenin çeşidi, ısıtma hızı ve son sıcaklık gibi faktörlere bağlıdır. Piroliz; proses sırasında uygulanan zaman ve sıcaklık parametrelerine göre yavaş, ılımlı, orta, hızlı ve flash olmak üzere beş temel gruba ayrılır (Çizelge 1).

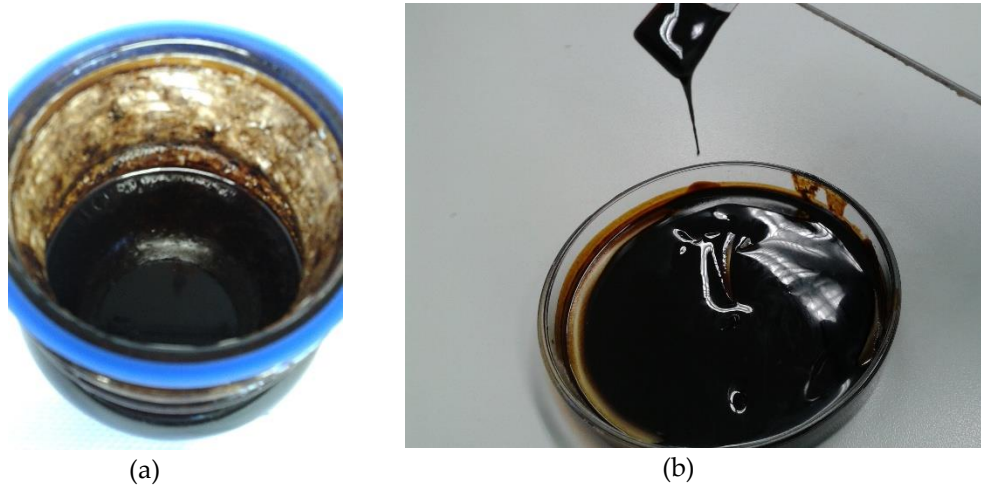
Çizelge I. Piroliz çeşitleri (Kambo ve Dutta 2015)

Table 1. Types of pyrolysis

Piroliz türü	Zaman	Isıtma hızı	Sıcaklık / °C	Sıvı Ürün %	Katı ürün %	Gaz ürün %
Yavaş piroliz "Torrefaction" (ılımlı piroliz)	Saat-gün	Çok düşük	200-600	30	35	35
	20-60 dk	Düşük	230-300	50	25	25
Orta piroliz	5-30 dk	Orta	500	40	30	30
Hızlı piroliz	<2 s	Yüksek	500-950	75	12	13
Flash piroliz	ms	Çok yüksek	1050-1300	85	5	10

En tanınmış piroliz prosesi yavaş piroliz ile odun kömürü üretimidir, degazifikasyon olarak da bilinir ve katı ürün, hedef üründür. Genel olarak, istiflenmiş odun yığınlarının üzeri toprakla kapatılır ve sınırlı hava ortamında yakma ile odun parçalarının karbonlaşması sağlanır. Odun kömürü üretimi sırasında ortaya çıkan gazlar atmosfere verilir. Ancak yoğunlaştırılarak toplanacak olursa odundan daha düşük ortalama moleküler ağırlığa sahip organik kimyasallar ile suyun karışımından oluşan bir sıvı ürün elde edilir. Bir de yoğunlaşmayan gaz ürünler oluşur, CO₂, CH₄, CO, H₂, N₂ gibi gazları içerir (Norgate ve diğ., 2012). "Torrefaction" ise ılımlı yani düşük sıcak pirolizdir. Bu yöntemle biyokütle pirolizinden çeşitli organik asitler üretilebilir (Chen ve diğ., 2015). Bu proses genellikle biyokütle numunelerinden piroliz öncesi uçucuların uzaklaştırılması ve ön-hazırlık amacıyla yapılır. Orta hız pirolizde hemen hemen yaklaşık aynı oranlarda katı-sıvı ve gaz ürünler elde edilir (Yang ve diğ., 2014). Daha fazla sıvı ürünler eldesi için hızlı piroliz tercih edilen bir prosestir. Sıvı ürün, fenol ve furfural türevlerince zengindir (Zellagui ve diğ., 2016). Son olarak flash pirolizde, 1000 °C'nin üzerinde sıcaklıklarda ve milisaniye gibi sürelerde gelişen bir pirolizdir. Yeni gelişen bir teknolojidir. Isıtma hızı yüksek, reaksiyon zamanı saniyeler kadar kısa olunca kömür oluşumu engellenir (Kan ve diğ., 2016).

Piroliz ile üretilen sıvı, petrol naftasına benzer, koyu renkli ve kıvamlı bir kondensattır (Şekil 2a-b). Genellikle asitler, alkoller, aldehitler, ketonlar, esterler, furfuralar ve fenolik bileşikler gibi bileşiklerden oluşmaktadır. Bu ürün petrol naftası gibi işleme tabi tutularak kimyasal hammadde kaynağı olarak kullanılabilir, yakılarak enerjisinden yararlanılabilir veya ileri gazlaştırılarak hidrojen üretilebilir.



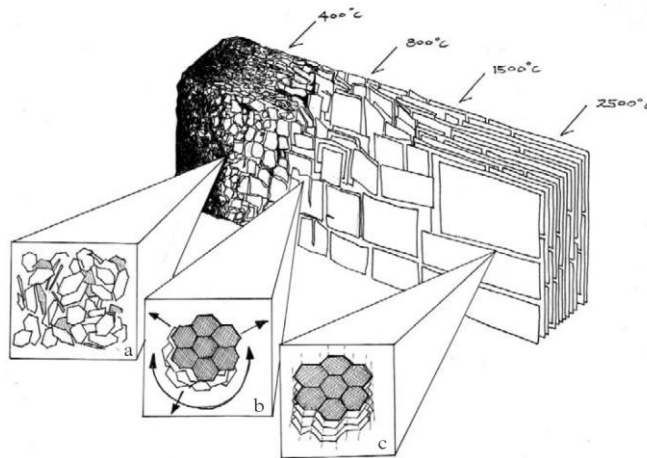
Şekil 2. Piroliz yağı (a, b)(Proje çalışmalarından alınmıştır)
Figure 2. Pyrolysis oil (a, b) (pictures are from individual research works)

Bu makalede piroliz yöntemi ile üretilen katı ürün olan biyokömürün özellikleri ve kullanım alanları üzerinde durulmuştur.

BİYOKÖMÜR (BIOCHAR)

Modern biyokömür endüstrisi kısmen yeni olsa da biyokömürün doğada oluşumu yüzyıllar boyunca kendiliğinden devam etmektedir. Bitkisel atıklar toprak altında kaldığında kendiliğinden oluşan ot yangınları ile çok uzun sürelerde karbonize olur ve biyokömür oluşur. Biyokömür (İngilizcesi "biochar"), saf karbon değildir, hidrojen ve oksijen gibi yan fonksiyonel grupları içeren organik kaynaşmış moleküllerin karışımıdır.

Amazon bölgesinde bulunan "Terra preta" (çernezyum) olarak bilinen verimli siyah toprakların biyokömürce zengin olduğu ve bu karbon içeriğinin toprakta binlerce yıl kaldığı bulunmuştur (Lehmann and Joseph, 2009). Sentetik olarak biyokömür, biyokütlenin termokimyasal piroliz yöntemi ile organik yapısının karbonlaştırılması ile üretilir. Bunun için biyokütle oksijensiz veya çok az oksijen içeren ortamda yavaş veya orta pirolize tabi tutulur. 200°C' den yüksek sıcaklıklarda (<700 °C) kimyasal bağlar bozunur, büyük hidrokarbon molekülleri daha basit moleküllere parçalanır veya düzenlenir (Şekil 3).



Şekil 3. Biyokömür yapısının sıcaklıkla değişimi (Lehmann and Joseph 2009)
Figure 3. Biochar structure development

En bilinen biyokömür üretimi odun kömürü üretimidir. Özellikle meşe ağaçlarından mangal kömürü üretimi oldukça yaygındır ve Türkiye’de daha çok klasik yöntemlerle üretilmektedir. Bunun için düzgün şekilde istiflenen odunlarla torluklar kurulur ve odunlar üzeri toprakla kaplanarak kısmi yakma ile karbonlaştırılır. Endüstriyel üretim için birçok farklı tipte reaktörler geliştirilmiştir (Meyer ve diğ., 2011; Tripathi ve diğ., 2016; Yang ve diğ., 2014; Agirre ve diğ., 2013). Üretim, sürekli veya kesikli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Dünyada biyokömür çalışmaları yoğunlukla Amerika, Avrupa ve Çin’de yapılmaktadır (www.biochar-international.org). Bu firmalardan bazıları 3R Environmental Technology Group (İsveç) (<http://www.3ragrocarbon.com/>), Acclaim Technology Services India Private Limited (Hindistan) (<http://www.acclaimcleanenergy.com/>), Sonoma Biochar (Amerika) (<http://www.sonomacompost.com/biochar.shtml>) gibi firmalardır (<http://cost.european-biochar.org/en/ct/16-Biochar-Producers>). Şekil 4, dünyada biyokömür ile ilgili en çok çalışma yapılan ülkeleri göstermektedir

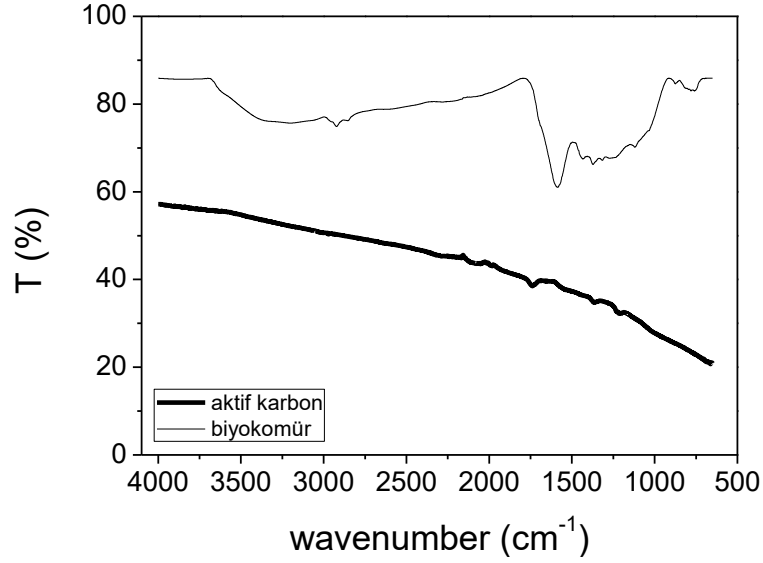


Şekil 4. Biyokömür çalışmalarının gerçekleştiği bölgeler (www.biochar-international.org)

Figure 4. Biochar research locations in the world

Biyokömür, gözenekli yapıdadırlar, yüzey alanı büyüktür ($\sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$), su tutma ve katyon değişim kapasiteleri yüksektir. Bu tür özellikleri nedeni ile topraktaki katyonik faaliyetleri artırır ve böylece toprak; kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi besinleri tutar. Aromatik ve humik maddelerce zengindirler (Lorenz ve Lal 2014). Enerji yoğunlukları aynı miktardaki biyokütleyle göre daha yüksektir (Alhashimi ve Aktas 2017). Genel olarak biyokömür, toprak iyileştirilmesi, bitki gübresi olarak, toprakta karbon depolanması, agrokimyasalların bağlanarak toprak veriminin artırılması, iklim değişikliğinin azaltılması (CO_2 ve CH_4 salınımlarının azaltılması), atık yönetiminde çevre kirliliğine neden olan atıkların bertarafı ve materyal akım yönetim maliyetlerinin düşürülmesi ve enerji üretiminde kullanılması gibi motivasyonlara sahiptir (Lorenz ve Lal 2014). Diğer yandan biyokömürlerin topraktan ve atık sulardan organik ve inorganik kirlilikleri uzaklaştırma amacı ile kullanılması yönünde son yıllarda araştırmalar da önem kazanmıştır (Tan ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2013). Tüm bu faktörler son yıllarda modern biyokömür endüstrisinin gelişiminde etkili olmuştur.

Biyokömür aktif karbondan farklı bir materyaldir. Aktif karbon üretiminde uygulanan sıcaklıklar, biyokömür üretiminde uygulanan sıcaklıklara göre daha yüksektir. Dolayısıyla aktif karbon üretiminde biyokütle, barındırdığı fonksiyonel gruplarını çoğunlukla kaybeder ve yüksek oranda karbonlaşır. Karbonlaşan yüzeyin aktivasyonunu sağlamak ve gözenekliliğini artırmak için ise ayrıca buhar veya kimyasallarla işleme tabi tutulur. Biyokömür üretiminde ise, tüm bunlara gerek kalmadan biyokütle daha düşük sıcaklıklarda karbonlaştırılarak yüzey fonksiyonel grupları yok edilmeden ve hatta etkinleştirilerek farklı uygulamalar için uygun bir madde haline dönüştürülür (Şekil 5).



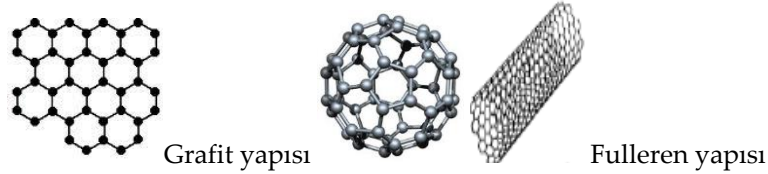
Şekil 5. Biyokömür (çay atığından 400 °C’de türetilmiştir) ve aktif kömürün (carbomix) FTIR spektrumları (RTEÜ-BAP. 2014.109.04.01 raporu)

Figure 5. FTIR analyses of biochar and activated carbon

Biyokömür yüksek oksijen içeriğine sahiptir. Dolayısıyla yüksek yüzey asit-baz fonksiyonel faaliyetleri yürütürler. Ayrıca topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprak için iyi birer besin maddesi olur (Glaser ve diğ., 2014).

Biyokömür jenerik bir terimdir ve karakteristikleri üretildikleri biyokütlenin cinsine ve piroliz koşullarına göre çok değişmektedir (Mcbeath ve diğ., 2015). Biyokütle genel olarak selüloz, hemiselüloz, lignin ve az miktarda uçuculardan oluşur ve bunların oranları biyokütleden biyokütleğe değişim gösterdiği için çeşitli biyokütleden üretilen biyokömürler aynı karbon oranına sahip olsalar bile yüzey özellikleri, yüzey alanları veya gözeneklilik gibi önemli fizikokimyasal özellikleri de farklılık gösterir (Lei ve Zhang 2013; Xie ve diğ., 2014). Örneğin Lignin miktarı yüksek olan ağacimsi biyokütlenin biyokömüre dönüşme reaktivitesinin, selüloz miktarı fazla olan otsul biyokütleğe göre daha az olduğu gösterilmiştir (Burherne ve diğ., 2013).

Biyokütleden üretilen kömürün yapısı henüz tam olarak aydınlığa kavuşturulamamış olmasına rağmen, normal kömür gibi tek düzeyde uzun grafit yapısından ziyade daha çok fulleren tipi konsantre halkalar, kısa grafit yapılar veya yarı küresel yapıları içerdiği görülmüştür (Şekil 6) (Ho ve diğ., 2012). Biyokütleğe uygulanan sıcaklık değeri arttıkça, moleküllerin parçalanması artar, daha küçük ve aromatik formlara dönüşürler. Çok daha yüksek sıcaklıklarda biyoküttelede gazlaşma meydana gelir.



Şekil 6. Grafit ve fulleren yapıları
Figure 6. Graphite and fullerene structures

Kullanım Alanları (Application areas)

Toprak iyileştiricisi ve organik gübre olarak kullanılması (Soil amending and organic fertilizer)

Biyokömür toprakta kendi ağırlığının 6 katı kadar su tutar, topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprak için iyi birer besin maddesi olur (Glaser ve diğ., 2014). Bu yetenekler özellikle çöl topraklarında tarım konusunda bir avantaj sağlamaktadır. Biyokömür yüzeyindeki fonksiyonel gruplar, topraktaki katyonik faaliyetleri artırır ve böylece toprak; kalsiyum, magnezyum ve potasyum gibi besinleri tutar. Tarımsal üretim verimini artırır. Ayrıca biyokömürler genel olarak bazik karakter gösterdikleri için toprağa eklendiğinde özellikle asitli toprakların pH değerlerini artırarak toprak pH'ını düzenlerler (Ippolito ve diğ., 2016).



Şekil 7. Biyokömür toprak uygulamaları
Figure 7. Biochar-soil applications

Hayvan çiftliklerinde kullanımı (Animal feed)

Biyokömür hayvan yemi ajanı, silaj ek maddesi olarak da kullanılabilir. İneklerde süt verimini midelerindeki mikro-flora etkilemektedir. Ortaya çıkabilecek toksit faaliyetlerin biyokömürce

inhibe edildiği ve süt veriminin arttığı araştırmalar sonucu ortaya çıkmıştır (<http://www.ithaka-journal.net/pflanzenkohle-in-der-rinderhaltung?lang=en>).



Şekil 8. Biyokömür hayvan yemi uygulamaları
Figure 8. Biochar-forage applications

Gazların tutulumu (Adsorption of gases)

Biyokömürün özellikle hidrojen sülfür (H_2S) gibi gazları tutma yeteneğinin olduğu araştırmalarda gösterilmiştir (Shang ve diğ., 2013; Xu ve diğ., 2014). H_2S , anaerobik faaliyetler sonucunda atık sularda, çöp toplama alanlarında, biyogaz oluşumu sırasında ortaya çıkan bir gazdır. Volkanik-jeolojik kaynaklardan ortaya çıkan H_2S 'e daha az rastlanmaktadır. Bunun dışında petrol arıtım tesislerinde doğal gaz ve kömür gazlaştırma proseslerinde yan ürün olarak açığa çıkmaktadır.

Hidrojen sülfür gazı çok zehirli, uçucu, renksiz ve yanıcı bir maddedir. Proses ekipmanları için korozif ve insan sağlığı için tehlikelidir. Ayrıca asit yağmurlarına neden olabilen bu gazın çevreye vereceği zararları önlemek için bulunduğu prosesden güvenilir bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir.

H_2S gazını uzaklaştırmada oksitlemenin yanı sıra aktif karbon da kullanılmaktadır (Balsamo ve diğ., 2016). Buradaki temel parametre, aktif karbonun sahip olduğu yüksek yüzey alanı ve mikro boyuttaki gözeneklere gazın hapsedilebilmesidir. Aktif karbonun alkalinitesi artırılarak veya tuzlarla muamele edilerek, asidik H_2S gazının aktif karbona işlenmesi de artırılmaktadır. Hatta aktif karbonların H_2S adsorpsiyonunda etkili bir şekilde kullanılabilmesi için bazlarla muamelesi mutlaka gerekmektedir. Bu tür aktif karbonlara "emprenye (impregnated) karbon" da denilmektedir. Ancak baz muamelesi yapılmış aktif karbonlarda kendi kendine yanma sıcaklığı düşmekte ve yapı çökerek gözenekler Na, K gibi bazdan gelen iyonlar tarafından bloke edilmektedir. Bu olumsuzluklar H_2S 'in aktif karbonlarca uzaklaştırılması uygulamalarını zorlaştırmaktadır.

Diğer yandan biyokömür, aktif karbonlar yerine kullanılacak ümit veren malzemeler olarak ortaya çıkmaktadır. Çoğu biyokömür bazık-doğal bir yapıya sahiptir ve NaOH veya KOH ile alkalinitesinin artırılmasına gerek yoktur. Biyokömür üretilmesi sırasında in-sitü bir bazlık oluşmaktadır. Diğer yandan bazı biyokömür numunelerinin gözeneklilik ve yüzey alanı, aktif karbonlarla karşılaştırılabilir düzeydedir veya aktivasyon yöntemleri ile artırılabilir.

H_2S 'in biyokömür tarafından adsorpsiyon ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur (Shang ve diğ., 2016; Nowicki ve diğ., 2014). Kamfor, pirinç kabuğu, bambu atıkları, kahve endüstri atıkları biyokömüre dönüştürülmüştür. Aktif karbona göre daha fazla oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı ve yüksek pH, biyokömürün yüzey alanları aktif karbona göre çok küçük olduğu halde H_2S 'i daha etkili bir şekilde uzaklaştırmıştır. Ayrıca H_2S 'in alkali biyokömür yüzeyinde SO_4^{2-} 'ye okside olup minerallerle immobilize olup biyokömür gözeneklerinde elemental kükürte dönüşebildiği de gösterilmiştir (Xu ve diğ., 2014).

Biyokömür H₂S dışında zehirli Hg, NH₃ ve CO₂ gibi sera gazlarının uzaklaştırılmasında da etkili ve yeni bir gaz uzaklaştırıcı materyaldir (Bhandari ve diğ., 2014; Lomax ve diğ., 2015; Nguyen ve Lee 2016; Niu ve diğ., 2017; Yang ve diğ., 2016).

Enerji depolamada kullanımı (Energy storage)

Enerjiyi kullanma ve depolama ihtiyacı, enerji kaynaklarının farklı şekillerde kullanıma hazır hale getirilmesine ve dizayn edilmesine yol açmaktadır. Enerji depolamada genellikle kimyasal piller ve özellikle de ağır metalleri içeren kuru piller kullanılmaktadır. Biyokömür karbonu elektrokimyasal enerji depolama araçlarında da kullanılmaktadır (Kalyani ve Anitha 2013).

Süperkapasitörler, bu teknolojiler arasında en fazla gelecek vaat eden elektrokimyasal enerji depolama teknolojisidir (Jin ve diğ., 2013). Mobil araçlardan devasa boyutlu elektrikli araçlara kadar geniş ölçekte uygulama alanı bulmaktadır (fren sistemleri, kaldıraçlar, soğuk depolu araçlar, voltaj stabilizörleri, data merkezleri, sürdürülebilir enerji uygulamaları, uçak kapıları...). Süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj ve deşarj özellikleri olan enerji depolama araçlarıdır. Pil ve bataryalara göre daha fazla şarj/deşarj döngüsü, yüksek ve hızlı güç yoğunluğu, geniş çalışma sıcaklığı, düşük iç direnç gibi özellikler gösterirler.



Şekil 9. Süperkapasitör uygulama alanları (şematik)

Figure 9. Supercapacitor application areas (schematic)

Biyokömürün sahip olduğu amorf yapıdaki karbon materyali son zamanlarda lityum-iyon pili uygulamalarında dikkat çekmeye başlamıştır, çünkü bu materyal yüksek lityum emilimi yapabilir, geri dönüştürülebilir ve yapısı; organik biyokütlenin çeşidi, uygulanan piroliz sıcaklığı ve piroliz süresi gibi parametrelerle çeşitlendirilebilir (Gu ve diğ., 2014; Ryu ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2014). Biyokömür karbonu düzenli kristal yapısı olmayan, çoğunlukla planar hegzagonal yapılar içeren bir karbondur ve hala yapıda hidrojen içerir. Bu hidrojen içeriği lityum-iyon pillerinde yüksek lityum kapasitesi oluşturulmasında etkilidir. Diğer yandan biyokömürün yüzey fonksiyonel grupları özellikle oksijen içeren asidik karboksil ve fenol grupları, tersinir redoks reaksiyonlarının oluşumu ile spesifik kapasitansı artırır. Karbon materyali yüksek iyon kapasitesi de sağlamaktadır. Ayrıca H₃PO₄, ZnCl₂, ve KOH gibi kimyasallarla aktivasyon, karbon materyalinin kapasite performansını artırmaktadır.

Katalizör olarak kullanımı (Catalyst)

Biyokömür, çok çeşitli reaksiyonlar için katalizör olarak kullanılabilir. Örneğin fenton reaksiyonu olarak bilinen zehirli ve istenmeyen poliaromatik hidrokarbon olan fenantren bileşiğinin bozunmasında biyokömür katalizör olarak kullanılabilir (Gu ve diğ., 2013; Gu ve diğ., 2013).

Biyokömürün katalizör olarak kullanıldığı bir diğer uygulama biyodizel üretimidir. Yağ asitlerinin esterifikasyonunda ve bitkisel yağların transesterifikasyonunda karbon bazlı katı-heterojen katalizörlerin kullanımı dikkate değer ölçüde araştırılmıştır (Konwar ve diğ., 2014). Karbon esaslı katalizörlerin reaksiyon sonunda bozunmadan kalması, yeniden kullanılabilmesi, katalizör destek malzemesi olması, yenilenebilir ve ucuz olması gibi özellikleri vardır. En güncel karbon esaslı katalizör, biyokömürdür (Hidayat ve diğ., 2015; Li ve diğ., 2014; Kastner ve diğ., 2012).

Yapılarda kullanımı (Cement material)

Biyokömür, binalarda elektromanyetik radyasyonun emilimi veya yalıtım amaçlı yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Guan ve diğ., 2006; Makoviny ve Makovinyová 2011; Naeem ve diğ., 2017). Düşük ısı iletkenliği olduğu için binalarda yalıtımı sağlayabilir. Yüksek pH değeri ve yüksek su tutma özelliği ile çimento harcında kireç yerine kullanılabilir, hem yalıtım sağlar hem de oda içerisinde nem sürdürülebilir. Gaz tutulumu iyi olduğu için kötü koku ve duman olabilecek yerlerde kullanımı avantajlıdır. Elektronik cihazlardan yayılan elektromanyetik ışınımın zararları da biyokömürün yapı malzemesinde kullanımı ile azaltılabilir.

Adorbent olarak kullanılması (Adsorbent)

Sulardaki ağır metal ve organik kirleticiler, insan sağlığına zarar vermekte, çevreyi kirletmekte ve su canlılarının yaşam koşullarını kötü etkilemektedir. Daha çok insan faaliyetleri ile ortaya çıkan bu kirlilikler biyokömür kullanılarak giderilebilmektedir (Han ve diğ., 2016; Jung ve diğ., 2015; Ding ve diğ., 2016; Ding ve diğ., 2015). Biyokömürün gözenekliliği ve yüzey fonksiyonel grupları, topraktaki ve sudaki ağır metallerin ve fenolik bileşiklerin uzaklaştırılmasında uygun bir adsorbent olacağını göstermiştir. Bir aktif kömür öncü maddesi olarak biyokömür, aktif kömürün kullanıldığı alanlarda kullanılarak hem yerel kaynakların değerlendirilmesi hem de aktif karbona nazaran daha düşük maliyetlerde üretilmesi bakımından avantajlar sunmaktadır (Alhashimi ve Aktas 2017; Ahmed ve diğ., 2016).

Diğer kullanım alanları (Other applications)

Biyokömürün yukarıda bahsedilen özelliklerine dayanarak çok daha fazla ve farklı kullanım alanları mevcuttur. Örneğin tekstil sanayiinde fonksiyonel giysilerin üretiminde, karbonize materyalden grafen oksit üretiminde, ilaç endüstrisinde, çelik endüstrisinde yüksek kalite kömür yerine, aktif karbon üretiminde kullanımı gibi daha farklı uygulama alanları ile ilgili çalışmalara literatürde rastlanabilir (Nanda ve diğ., 2016; Qian ve diğ., 2015; Sun ve diğ., 2016; Park ve diğ., 2013; Norgate ve diğ., 2012). Yeni kullanım alanları ile ilgili çalışmalar devam etmekte ve daha da gelişecek gibi görünmektedir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Biyokütle enerji kaynağı biyokömüre dönüştürülerek toprak ıslahı, enerji depolama, çevreyi kirleten organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesi gibi pek çok alanda çok yönlü ve avantajlı bir materyal olarak kullanılabilir. Biyokütle enerjisinin kullanımında en önemli nokta, insan beslenmesinde kullanılan gıdaların hammadde olarak kullanılmamasıdır. Bunun yerine atıkların kullanılması gerekmektedir. Çoğunlukla çürümeye terk edilen biyokütle atıklarının değerlendirilmesi ve katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi, çevre kirliliğine sebep olan atıkların ortadan kaldırılmasına da katkıda bulunmaktadır. Ayrıca karbondioksit sera gazı salınımını ve parçacık salınımını da azaltacaktır (Meyer ve diğ., 2011).

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- Abas, N., Kalair, A., Khan, N., 2015, "Review of Fossil Fuels and Future Energy Technologies", *Futures*, Vol. 69, pp. 31–49.
- Agirre, I., Griessacher, T., Rösler, G., Antrekowitsch, J., 2013, "Production of Charcoal as an Alternative Reducing Agent from Agricultural Residues using A Semi-Continuous Semi-Pilot Scale Pyrolysis Screw Reactor", *Fuel Processing Technology*, Vol. 106, pp. 114–121.
- Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., 2016, "Biomass and Bioenergy Insight into Biochar

- Properties and Its Cost Analysis", *Biomass and Bioenergy*, 84, 76–86.
- Alhashimi, H. A., Aktas, C. B., 2017, "Life Cycle Environmental and Economic Performance of Biochar Compared with activated Carbon: A Meta-analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 118, pp. 13–26.
- Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Barbarias, I., Arregi, A., Olazar, M., 2016, "Characterization of the Bio-Oil Obtained by Fast Pyrolysis of Sewage Sludge in a conical Spouted Bed Reactor", *Fuel Processing Technology*, Vol. 149, pp. 169–175.
- Azadi, P., Khan, S., Strobel, F., Azadi, F., Farnood, R., 2012, "Hydrogen Production from Cellulose , Lignin , Bark and Model Carbohydrates in Supercritical Water Using Nickel and ruthenium Catalysts", *Applied Catalysis B, Environmental*, Vol. 117–118, pp. 330–338.
- Balsamo, M., Cimino, S., de Falco, G., Erto, A., Lisi, L., 2016, "ZnO-CuO Supported on Activated Carbon for H₂S Removal at Room Temperature", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 304, pp.399–407.
- Bhandari, P. N., Kumar, A., Huhnke, R. L., 2014, "Simultaneous Removal of Toluene (model tar), NH₃, and H₂S, from Biomass-Generated Producer Gas Using Biochar-Based and Mixed-Metal Oxide Catalysts", *Energy and Fuels*, Vol. 28(3), pp. 1918–1925.
- Burhenne, L., Messmer, J., Aicher, T. Laborie, M. P., 2013, "The Effect of the Biomass Components Lignin, Cellulose and Hemicellulose on TGA and Fixed Bed Pyrolysis", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 101, pp. 177–184.
- Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Zeng, G. 2015, "Complementary Effects of Torrefaction and Co-Pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets", *Bioresource Technology*, Vol. 185, pp. 254–262.
- Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zeng, Z., Wang, J., Lu, M., 2015, "Torrefaction of Biomass Stalk and Its Effect on the Yield and Quality of Pyrolysis Products", *Fuel*, Vol. 159, pp. 27–32.
- Ding, G., Wang, B., Chen, L., Zhao, S., 2016, "Simultaneous Adsorption of Methyl Red and Methylene Blue onto Biochar and an Equilibrium Modeling at High Concentration", *Chemosphere*, Vol. 163, pp. 283–289.
- Ding, Z., Wan, Y., Hu, X., Wang, S., Zimmerman, A. R., Gao, B., 2015, "Sorptions of Lead and Methylene Blue onto Hickory Biochars from Different Pyrolysis Temperatures: Importance of Physicochemical Properties", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 37, pp. 261–267.
- Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., 2014, "Biochar Organic Fertilizers from Natural Resources as Substitute for Mineral Fertilizers", *Agron. Sustain. Dev.* Vol. 35, pp. 667–678.
- Gu, L., Huang, S., Zhu, N., Zhang, D., Yuan, H., Lou, Z., 2013, "Influence of Generated Intermediates' Interaction On Heterogeneous Fenton's Degradation of an azo dye 1-diazo-2-naphthol-4-sulfonic acid by using Sludge Based Carbon as Catalyst", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 263, pp. 450–457.
- Gu, L., Wang, Y., Zhu, N., Zhang, D., Huang, S., Yuan, H., Wang, M., 2013, "Bioresource Technology Preparation of Sewage Sludge Based Activated Carbon by using Fenton ' s Reagent and Their use in 2-Naphthol Adsorption", *Bioresource Technology*, Vol. 146, pp. 779–784.
- Gu, X., Wang, Y., Lai, C., Qiu, J., Li, S., Hou, Y., Zhang, S., 2014, "Microporous Bamboo Biochar for Lithium-sulfur Batteries", *Nano Research*, Vol. 8(1), pp. 129–139.
- Guan, H., Liu, S., Duan, Y., Cheng, J., 2006, "Cement Based Electromagnetic Shielding and absorbing Building Materials", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 468–474.
- Han, S., Zhou, X., Tang, Y., He, M., Zhang, X., Shi, H., Xiang, Y., 2016, "Practical, Highly Sensitive, and regenerable Evanescent-wave Biosensor for Detection of Hg²⁺ and Pb²⁺ in Water", *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 80, pp. 265–272.
- Hidayat, A., Rochmadi, Wijaya, K., Nurdiawati, A., Kurniawan, W., Hinode, H., Budiman, A., 2015, "Esterification of Palm Fatty Acid Distillate with High Amount of Free Fatty Acids Using Coconut Shell Char Based Catalyst", *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 969–974.
- Ho, K., Kim, J., Cho, T., Weon, J., 2012, "Influence of Pyrolysis Temperature on Physicochemical

- Properties of Biochar Obtained from the Fast Pyrolysis of Pitch Pine (*Pinus rigida*), *Bioresource Technology*, Vol. 118, pp. 158–162.
- Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Lentz, R. D., 2016, "Designer, Acidic Biochar Influences Calcareous Soil Characteristics", *Chemosphere*, Vol. 142, pp.184–191.
- Jang, H. M., Ha, J. H., Kim, M.-S., Kim, J.-O., Kim, Y. M., Park, J. M.,2016, "Effect of Increased Load of High-strength Food Wastewater in Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge on Bacterial Community Structure", *Water Research*, Vol. 99, pp. 140–148.
- Jin, H., Wang, X., Gu, Z., Polin, J., 2013, "Carbon Materials from High Ash Biochar for Supercapacitor and Improvement of Capacitance with HNO₃ Surface Oxidation", *Journal of Power Sources*, Vol. 236, pp. 285–292.
- Jones, G. A., Warner, K. J., 2016, "The 21st century Population-Energy-Climate Nexus", *Energy Policy*, Vol. 93, pp. 206–212.
- Jung, C., Oh, J., Yoon, Y., 2015, "Removal of Acetaminophen and Naproxen by Combined Coagulation and Adsorption Using Biochar: Influence of Combined Sewer Overflow Components", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22(13), pp. 10058–10069.
- Kalyani, P., Anitha, A., 2013, "Biomass Carbon & Its Prospects in Electrochemical Energy Systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38(10), pp. 4034–4045.
- Kambo, H. S., Dutta, A., 2015, "A Comparative Review of Biochar and Hydrochar in Terms of Production , Physico-Chemical Properties and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 359–378.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T. J., 2016, "Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 126–1140.
- Kastner, J. R., Miller, J., Geller, D. P., Locklin, J., Keith, L. H., Johnson, T., 2012, "Catalytic Esterification of Fatty Acids Using Solid Acid Catalysts Generated from Biochar and Activated Carbon", *Catalysis Today*, Vol. 190(1), pp. 122–132.
- Kiran, B., Pathak, K., Kumar, R., Deshmukh, D., 2016, "Statistical Optimization using Central Composite Design for Biomass and Lipid Productivity of Microalga: A Step Towards Enhanced Biodiesel Production", *Ecological Engineering*, Vol. 92, pp. 73–81.
- Konwar, L. J., Boro, J., Deka, D., 2014, "Review on Latest Developments in Biodiesel Production Using Carbon-Based Catalysts", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 546–564.
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009, *Biochar Environmental Management*, ISBN: 978-1-84407-658-1, Earthscan Yayıncılık, 2. Bölüm, sayfa 18.
- Lei, O., Zhang, R., 2013, "Effects of Biochars Derived from Different Feedstocks and pyrolysis Temperatures on Soil Physical and Hydraulic Properties", *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 13(9), pp. 1561–1572.
- Li, M., Zheng, Y., Chen, Y., Zhu, X., 2014, "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using a Heterogeneous Catalyst from pyrolyzed Rice Husk", *Bioresource Technology*, Vol. 154, pp.345–348.
- Lomax, G., Workman, M., Lenton, T., Shah, N., 2015, "Reframing the Policy Approach to Greenhouse Gas Removal Technologies", *Energy Policy*, Vol. 78, pp. 125–136.
- Lorenz, K., Lal, R., 2014, "Biochar Application to Soil for Climate Change Mitigation by Soil Organic Carbon Sequestration", *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, Vol. 177, pp. 651–670.
- Makovíny, I., Makovínyiová, K., 2011, "Shielding of electromagnetic Radiation by Using Wood-Cement Boards Modified with Carbon in Microwave Frequency Band", *Eur. J. Wood Prod.* Vol. 69, pp.671–673.
- Mcbeath, A. V., Wurster, C. M. Bird, M. I., 2015, "ScienceDirect Influence of Feedstock Properties and Pyrolysis Conditions on Biochar Carbon Stability as Determined by Hydrogen Pyrolysis" *Biomass and Bioenergy*, Vol. 73, pp.155–173.

- Meyer, S., Glaser, B., Quicker, P., 2011, "Technical, Economical and Climate Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature Review", *Environmental Science & Technology*, Vol. 45, pp. 9473–9483.
- Naeem, S., Baheti, V., Tunakova, V., Militky, J. Karthik, D., 2017, "Development of Porous and Electrically Conductive Activated Carbon Web for effective EMI Shielding Applications", *Carbon*, Vol. 111, pp. 439–447.
- 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.
- Nguyen, M. V., Lee, B. K., 2016, "A Novel Removal of CO₂ Using Nitrogen Doped Biochar Beads as a Green Adsorbent", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 104, pp.490–498.
- Niu, Q., Luo, J., Xia, Y., Sun, S., Chen, Q., 2017, "Surface Modification of Bio-char by Dielectric Barrier Discharge Plasma for Hg₀ Removal", *Fuel Processing Technology*, Vol. 156, pp. 310–316.
- Norgate, T., Haque, N., Somerville, M., Jahanshahi, S., 2012, "Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking", *ISIJ International*, Vol. 52(8), pp. 1472–1481.
- Nowicki, P., Skibiszewska, P., Pietrzak, R., 2014, "Hydrogen Sulphide Removal on carbonaceous Adsorbents Prepared from Coffee Industry Waste Materials", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 248, pp. 208–215.
- 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.
- 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.
- Rintamäki, H., Rikkonen, P., Tapio, P., 2016, "Carrot or Stick: Impacts of Alternative Climate and Energy Policy Scenarios on Agriculture", *Futures*, Vol. 83, pp. 64–74.
- Ryu, D. J., Oh, R. G., Seo, Y. D., Oh, S. Y., Ryu, K. S., 2015, "Recovery and Electrochemical Performance in Lithium Secondary Batteries of Biochar Derived from Rice Straw" *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 22(14), pp. 10405–10412.
- Schiffer, H. W., 2008, "WEC Energy Policy Scenarios to 2050", *Energy Policy*, Vol. 36(7), pp. 2464–2470.
- Shang, G., Li, Q., Liu, L., Chen, P., Huang, X., 2016, "Adsorption of Hydrogen Sulfide by Biochars Derived from Pyrolysis of Different Agricultural / Forestry Wastes", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol. 66(1), pp. 8–16.
- Shang, G., Shen, G., Liu, L., Chen, Q., Xu, Z., 2013, "Kinetics and Mechanisms of Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochars", *Bioresource Technology*, Vol. 133, pp. 495–499.
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., 2016, "A novel Sono-assisted Acid Pretreatment of Chili Post Harvest Residue for Bioethanol Production", *Bioresource Technology*, Vol. 213, pp. 58–63.
- 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.
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., Yang, Z., 2015, "Application of Biochar for the Removal of Pollutants from Aqueous Solutions" *Chemosphere*, Vol. 125, pp. 70–85.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., Ganesan, P., 2016, "Effect of Process Parameters on Production of Biochar from Biomass Waste Through Pyrolysis : A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 467–481.
- Xie, T., Reddy, K. R., Wang, C., Yargicoglu, E., Spokas, K., 2014, "Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp.. 45, 939–969.
- Xu, X., Cao, X., Zhao, L., Sun, T., 2014, "Comparison of Sewage Sludge- and Pig Manure-derived Biochars for Hydrogen Sulfide Removal", *Chemosphere*, Vol. 111, pp. 296–303.
- Yang, J., Zhao, Y., Ma, S., Zhu, B., Zhang, J., Zheng, C., 2016, "Mercury Removal by Magnetic Biochar

- Derived from Simultaneous Activation and Magnetization of Sawdust", *Environmental Science and Technology*, Vol. 50(21), pp. 12040–12047.
- Yang, Y., Brammer, J. G., Mahmood, A. S. N., Hornung, A., 2014, "Intermediate Pyrolysis of Biomass Energy Pellets for Producing Sustainable Liquid, Gaseous and Solid Fuels", *Bioresource Technology*, Vol. 169, pp. 794–799.
- Zellagui, S., Schönnenbeck, C., Zouaoui-Mahzoul, N., Leyssens, G., Authier, O., Thunin, E., Brillhac, J. F., 2016, "Pyrolysis of Coal and Woody Biomass under N₂ and CO₂ Atmospheres using a Drop Tube Furnace - Experimental Study and Kinetic Modeling", *Fuel Processing Technology*, Vol. 148, pp. 99–109.
- Zhang, L., Jiang, J., Holm, N., Chen, F., 2014, "Mini-chunk Biochar Supercapacitors", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 44(10), pp. 1145–1151.
- Zhang, W., Mao, S., Chen, H., Huang, L., Qiu, R., 2013, "Pb(II) and Cr(VI) Sorption by Biochars Pyrolyzed from the Municipal Wastewater Sludge under Different Heating Conditions", *Bioresource Technology*, Vol. 147, pp.545–552.