



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.03.2024
Kabul Tarihi : 14.06.2024

Received Date : 27.03.2024
Accepted Date : 14.06.2024

ÇEVRE DOSTU HAMMADDELERDEN ÜRETİLEN AKTİF KARBONLAR VE UYGULAMA ALANLARI

ACTIVE CARBONS PRODUCED FROM ECO-FRIENDLY RAW MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS

Naciye Olcay HELVACI^{1*} (ORCID: 0009-0008-6628-9325)
Yasemin KORKMAZ¹ (ORCID: 0000-0002-0030-6259)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Naciye Olcay HELVACI, helvaciolcay@gmail.com

ÖZET

Aktif karbon, su arıtmadan ağır metal giderimine, gıdadan metal sanayisine, savunmadan sağlık sektörüne kadar endüstrinin birçok alanında kullanılan ticari potansiyeli çok yüksek olan bir malzemedir. Aktif karbon, karbon miktarı fazla olan maddelere uygulanan yüksek sıcaklıktaki aktivasyon süreciyle elde edilen (350-1000°C), yüksek gözenekliliği ve geniş yüzey alanı olan bir adsorban malzemesidir. Aktif karbonlar fosil kaynaklardan ve sentetik polimerlerden üretilebilirler. Ticari aktif karbon üretiminde odun talaşı, odun, odun kömürü, turba, linyit ve Hindistan cevizi kabukları yaygın olarak kullanılmaktadır. Kömür ve linyitten aktif karbon üretimi, yüksek oranda inorganik madde içermesinden dolayı üretim aşamasında ve sonrasında su veya asit ile ek yıkama işlemleri yapılır. Bu yüzden uzun ve maliyetli işlemdir. Üretim maliyetlerinin artması, araştırmaların daha ekonomik çevre dostu hammaddelere ve üretim yöntemlerine odaklanmasına sebep olmuştur. Bu nedenle biyokütle atıklarından çevre dostu aktif karbon üretimi son yıllarda önem kazanmıştır. Bu çalışmada, aktif karbon üretiminde kullanılan çevre dostu, ucuz, zirai atık niteliğindeki hammaddeler araştırılmış ve aktif karbon üretim sürecinde kullanılan aktivasyon yöntemleri karşılaştırılarak uygulama alanları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, karbonizasyon, aktivasyon, biyokütle, adsorbsiyon

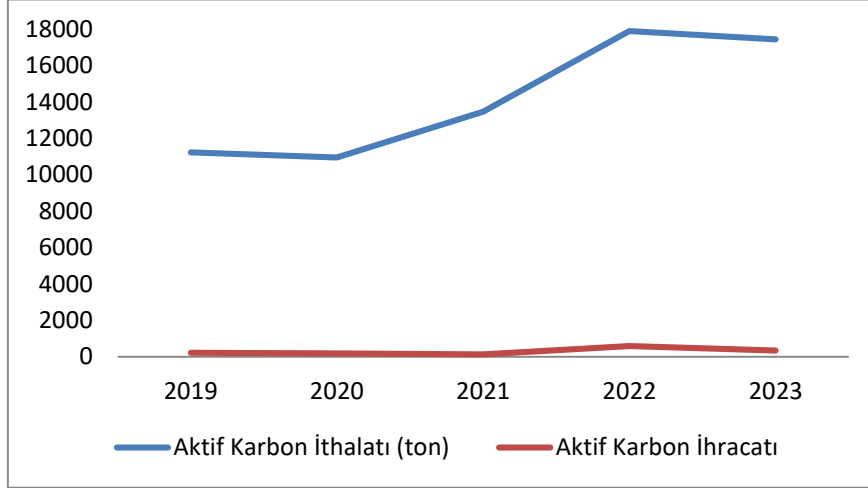
ABSTRACT

Activated carbon is a material with very high commercial potential used in many areas of industry, from water purification to heavy metal removal, from food to metal industry, from defense to the health sector. Activated carbon is an adsorbent material with high porosity and large surface area, obtained by the high temperature activation process (350-1000°C) applied to substances with high carbon content. Activated carbons can be produced from fossil sources and synthetic polymers. Wood sawdust, firewood, charcoal, peat, lignite and coconut shells are widely used in commercial activated carbon production. Since the production of activated carbon from coal and lignite contains high amounts of inorganic substances, additional washing processes are carried out with water or acid during and after the production phase. That's why it is a long and costly process. Increasing production costs have caused research to focus on more economical alternative raw materials and production methods. For this reason, the production of environmentally friendly activated carbon from biomass waste has gained importance in recent years. In this study, environmentally friendly, cheap, agricultural waste raw materials used in activated carbon production were investigated and the activation methods used in the activated carbon production process were compared and their application areas were given.

Keywords: Activated carbon, carbonization, activation, biomass, adsorption

GİRİŞ

Dünyada 2023 yılı itibariyle 5 milyar doları aşan ticari aktif karbon pazarı bulunmaktadır. Türkiye’de ise aktif karbon pazarı 38 milyon dolar civarında olup, 35 milyon dolar dış ticaret açığı bulunmaktadır (Trade Map, 2024). Bu nedenle Türkiye aktif karbon açısından ithalatçı konumunda olan bir ülkedir. Bu durum ülkemiz açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 1. Türkiye’de Yıllara Göre Gerçekleşen Aktif Karbon İthalatı (Trade Map,2024)

Şekil 1’e göre genel olarak aktif karbon ithalatı yıllara göre artış göstermekle birlikte ihracat miktarı çok düşük seviyelerde kalmıştır. 2023 yılına baktığımızda Türkiye’de aktif karbon ithalatı 17.000 ton üzerinde iken sadece 349 ton ihracat gerçekleşmiştir (Trade Map, 2024). Ülkemizde 17.000 ton civarında aktif karbon ihtiyacı olduğunu varsayarsak, 2021 yılında yayınlanan Sivas İli Aktif Karbon Üretimi Ön Fizibilite Raporuna göre fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon üretim verimini %10 olarak kabul ettiğimizde yıllık olarak yaklaşık 170.000 ton/yıl hammaddeye ihtiyacımız olacaktır. Ülkemiz fındık üretiminde dünya ticaretinin %70’ini karşılamaktadır. Tarım Ürünleri Piyasasının raporuna göre ülkemizde 2022 yılında 765.000 ton fındık üretimi gerçekleşmiştir. Üretilen fındığın kabuk miktarının %50 kadar olduğu tahmin edilmektedir. Yaklaşık 380.000 ton/yıl fındık kabuğunun hammadde maliyetinin de çok düşük olduğu göz önünde bulundurduğumuzda sadece fındık kabuğunun bile ülkemizin aktif karbon ihtiyacını karşılama potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda diğer birçok tarımsal atık hammaddeyi de aktif karbon üretim sürecine kazandırdığımızda ülkemizin de dahil olduğu Yeşil Mutabakat Eylem Planı, Sıfır Atık gibi ekolojik hedeflere daha hızlı ulaşabileceği aşikardır.

AKTİF KABONUN TARİHÇESİ

Aktif karbonun bilinen en eski kullanımı M.Ö. 3750 yıllarında başlamaktadır. Sümerliler ve Mısırlılar bronz üretiminde çinko, bakır, kalayın indirgenmesinde odun kömürünü kullanmışlardır. Tıp alanında odun kömürünün kullanımına ilişkin verilere M.Ö. 1550 yıllarına ait Mısır papirüslerinde, sonrasında Gaius Plinius Secundus Maior ve Hipokrates’in kaynaklarında rastlanmıştır (Beton, 2011; Patrick, 1995). 1773 yılında, Carl Wilhelm Scheele tarafından gaz adsorpsiyon özelliğine sahip olan aktif karbonun keşfi yapılmıştır.1785’te Johann Tobias Lowitz, odun kömürünün birçok sıvıları renk giderme özelliği olduğunu gözlemlemiştir (Çetinkaya, 2015).

Aktif karbon, endüstriyel alanda ilk defa İngiltere’de 1811 yılında Pierre Figuiet tarafından, kemik külü, içeriğindeki az miktardaki karbon ile şeker çözeltilisinin renksizleştirilmesi işlemi için kullanılmıştır. Kemik külü, az miktarda karbon ve kalsiyum fosfat içeren bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla, aslında karbon değildir. (Beton, 2011; Othmer,1992). 1822’de Antoine Alexandre Brutus Bussy, kullanılan başlangıç maddesi ve ısıtma prosesinin karbonların renk giderme özelliklerini ve partikül boyutunu belirlediğini göstermiştir. Buna ilaveten, aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerini ve gözenek yapısını çok yüksek sıcaklıkta yapılan ve uzun süren karbonizasyon sürecinin olumsuz etkilediğini söylemiştir. (Şamdan, 2013). Hunter, 1865 yılında hindistan cevizinden ürettiği odun kömürünün gaz adsorpsiyon kapasitesinin çok yüksek olduğunu keşfetmiştir. 1856 yılında John Stenhouse katran esaslı ağartıcı odun kömürü, 1863 yılında Lee turbadan koku engelleyici aktif karbon üretmiştir. Ancak bu ürünler endüstriyel boyutta üretime geçmemiştir. (Hassler, 1967). Johnson, 1894 yılında yaptığı çalışma sonucunda, odun

kok kömürünün siyanat çözeltisinden altın eldesinde kullanılmasıyla ilgili bir patent almıştır. (Akyıldız, 2007; McDouGall, 1991).

Ticari aktif karbonun patentini 1900 -1901 yılları arasında Raphael Von Ostrejko almıştır. İlk ticari toz aktif karbon, 1909'da Raphael Von Ostrejko'nun patenti kullanılarak odun ile hazırlanan Eponit tarafından ortaya çıkarılmıştır. Norit ise, 1911 yılında Hollanda'da şeker endüstrisinde kullanılan aktif karbonu üretmiştir. Amerika'da ise, ilk aktif karbon üretimi, soda hamuru üretiminde ortaya çıkan atık ürün olan siyah külün değerlendirilmesiyle gerçekleşmiştir. Siyah kül, fabrikalarda pigment olarak kullanılmaktaydı ve bir fabrika çalışmasının tesadüfen keşfettiği ağartma özelliğiyle dikkat çekmiştir. Bu ürün günümüzde "Filtchar" olarak bilinmektedir. Ancak, Filtchar'ın ürün özelliklerinin parti bazında değişkenlik göstermesi ve istikrarlı bir ürün kalitesi sunmaması, pazarlama sürecinde zorluklar yaşanmasına neden olmuştur. Sudan III yöntemiyle geliştirilen, Filtchar'ın özelliklerini daha iyi belirlemeye ve daha homojen aktif karbon üretimine olanak sağlamıştır. (Akyıldız, 2007).

Zehirli gazların 1. Dünya Savaşı'nda yaygın olarak kullanılması, gaz maskelerinde kullanılan adsorban karbonların büyük ölçekte üretilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Gaz maskeleri üretiminde Nikolay Dmitriyevič Zelinski tarafından aktif karbonların metal kap içine doldurulması ilk kez önerilmiştir. Sonrasında, Amerika'da Chaney, zehirli gazların uzaklaştırılması amacıyla hindistan cevizi esaslı granüler aktif karbon üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Savaştan sonra, aktif karbon üretimi yeni hammaddelerle büyük ölçüde artış göstermiştir. $ZnCl_2$ ile aktivasyonu ile badem kabuğu ve hindistan cevizinden yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip mekanik dayanıklı aktif karbonlar elde edilmiştir. Günümüzde, bilimsel ilerlemeler sayesinde çeşitli hammaddelerden üretilen aktif karbonlar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Şamdan, 2013). Aktif karbon, karışımların ayrılmasında, gazların temizlenmesinde, gıda endüstrisinde saflaştırma işlemlerinde, su ve atık su arıtımında, savunma sanayisinde koruyucu giysi üretiminde, metal endüstrisinde, silah sanayisinde patlayıcı ve elektronik sistemlerin susturulmasında, bomba yapımında ve sağlık sektöründe geniş bir alanda kullanılmaktadır. Günlük yaşamda çeşitli nedenlerle başvurduğumuz aktif karbon, hayati bir maddedir. (Küçükgül, 2004; Stoeckli ve Kraehenbuehl, 1984).

Bu çalışmada aktif karbon üretiminde kullanılan çevre dostu hammaddeler araştırılmış, üretim yöntemleri karşılaştırılarak, avantajları tartışılmıştır. Ayrıca biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların adsorpsiyon uygulamalarında ve diğer uygulama alanlarında kullanım amaçları belirlenmiştir.

AKTİF KARBON

Aktif karbon, karbon elementinin bir allotropu olup, temel bileşeni %80-95 oranında karbondur. Ayrıca, yapısında hidrojen, oksijen, sülfür ve azot gibi elementler de bulunur. Bu hetero-atomların miktarı ve türü, kullanılan hammaddeye, aktivasyon sürecine ve yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Bir aktif karbon genellikle %80-95 karbon, %6-7 oksijen, %1sülfür, %0,5 azot ve %0,5 hidrojen oluşmakta olup, ayrıca uçucu madde de içermektedir. (Şamdan, 2013; Bansal ve Goyal, 2005). Kullanım öncesi bu tür maddelerin uzaklaştırılması gerekir. Bu işleme kül içeriğinin düşürülmesi denilmektedir ve adsorban olarak kullanımında kül içeriğinin % 0.1-0.2 oranına getirilmesi gerekmektedir (Küçükgül, 2004; Choma ve Jaroniec, 1987). Gözenek yapısı ve iç yüzey alanı, aktif karbonu karakterize eden başlıca fiziksel özelliklerdir. IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) verilerine göre aktif karbonların gözenek boyutu mikro gözenek (2nm'den daha küçük çaplı), mezo gözenek (2-50nm çaplı) ve makro gözenek (50nm'den daha büyük) olarak sınıflandırılır. Aktif karbonun iç yüzeyi ise (aktifleştirilmiş yüzey) çoğunlukla BET (Brunauer-Emmet-Teller) yüzeyi olarak (m^2/g) ifade edilir. Yüzey alanı azot (N_2) gazı kullanılarak ölçülür. Kirlilik oluşturan maddeler, aktif karbonun yüzeyinde tutulacağından, yüzey alanının büyüklüğü kirliliklerin giderilmesinde oldukça etkili bir faktördür. Prensip olarak, yüzey alanı ne kadar büyükse, adsorpsiyon merkezlerinin sayısının da o kadar büyük olduğu düşünülür (Deniz, 2014).

Piyasadaki ticari aktif karbonlar granüler, toz ve pelet formunda bulunurlar. Bu formların boyutları ve kullanıldığı yerler aşağıda verilmiştir:

Granül Aktif Karbon (GAC): Tanecik boyutları 2,5-5 mm aralığında olup düzensiz şekillere sahiptirler. Granül aktif karbonlar (GAC), hindistancevizi kabukları gibi sert hammaddelerden üretilebilirler (Şekil 2). Yüzey alanları, toz aktif karbona göre daha düşüktür (Sarıcı, 2022; Perrich, 2018).



Şekil 2.Granül Aktif Karbon

Toz Aktif Karbon (PAC): 0,15-0,25 mm aralığında tanecik boyutu değişmektedir (Şekil 3). Başlıca baca gazı arıtımında ve sıvı faz uygulamalarda kullanılır (Delgado vd., 2012).



Şekil 3.Toz Aktif Karbon

Pelet Aktif Karbon (AC): 0,8-5 mm çapında, basınçla sıkıştırılmış silindirik formdadır (Şekil 4). Yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olmasından, düşük toz içermesinden ve düşük basınç sağlamasından dolayı gaz fazı uygulamalarında çoğunlukla kullanılır (Küçükgül, 2004).



Şekil 4.Pelet Aktif Karbon

Ticari aktif karbonlarda aranan ortak özellikler aktif karbonun pelet, toz ve granül olmasına, kullanım alanına ve hammaddeye göre farklılıklar göstermektedir. Genel olarak yüzey alanı, gözenek hacmi, kül miktarı, sertlik gibi özellikler ön plana çıkmaktadır. Örneğin toz aktif karbonda yüzey alanı ve gözenek hacmi daha ön planda iken, pelet aktif karbonda yüzey alanı ve gözenek hacminin yanı sıra pelet çapı ve sertlik yüzdesi de önemli olmaktadır. Kömürden elde edilen toz aktif karbonda yüzey alanı $1300\text{m}^2/\text{g}$ 'ye kadar ulaşırken, gözenek hacmi 1.3 ml/g civarındadır. Yine kömürden elde edilen pelet ticari aktif karbonda pelet çapı $20\pm 4\text{mm}$ civarında olup, sertlik %96 ve yüzey alanı $1000\text{m}^2/\text{g}$ ölçülebilmektedir.

AKTİF KARBONUNUN ÜRETİM AŞAMALARI

Hammadde Seçimi

Aktif karbon, birçok farklı hammaddeden üretilmektedir. Ticari aktif karbonların, başlıca üretim hammaddeleri odun, kömür, petrol artıkları, linyit ve polimerler olmasına rağmen; son yıllarda düşük maliyetli biyokütle atıklarının aktif karbon üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılacak olan hammaddelerin yüksek karbon ve

düşük mineral içeriğine sahip, ucuz, verimli ve saklama koşullarına dayanıklı yapıda olması gerekmektedir (Güngör, 2013;Ahmadpour ve Do, 1995).

Aktif karbonun kullanım alanına göre istenen özelliklerinin değişmesinden dolayı, üretilecek olan nihai ürün özellikleri tercih edilen hammaddeye bağlı olarak değişir. Son yıllarda ucuz, yüksek karbon ve düşük inorganik madde içeriğine sahip ve kolay bulunabilir olmalarından dolayı daha çok tarımsal kaynaklı atıklardan aktif karbon üretimi yaygınlaşmıştır. Biyokütle atıklardan aktif karbon üretimi hem ekonomik hem de çevresel yönden önemli katkılar sağlamaktadır. Literatürlerde rastlanılan biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların aktivasyon yöntemi, aktivasyon sıcaklığı, yüzey alanları(m²/g) Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Biyokütle Atıklarından Üretilen Aktif Karbonlar

Hammadde	Aktivasyon Kimyasalı	Aktivasyon Sıcaklığı (°C)	Yüzey Alanı(BET; m ² /g)	Literatür
Zeytin çekirdeği	H ₃ PO ₄	500	1133	Akyıldız, 2007
Muz gövdesi atıkları	H ₃ PO ₄	845	1173,16	Danisha vd., 2018
Nişasta	Na ₂ CO ₃ /KOH	300/400	160,6	Suo vd., 2019
Üzüm küspesi	H ₃ PO ₄	400	1455	Güngör, 2010
Pamuk sapı	H ₃ PO ₄	500-800	1720	Nahil ve Williams, 2012
Kiraz çekirdeği	K ₂ CO ₃	850	-	Gerçel ve Seydioğlu, 2015
Çay atıkları	H ₃ PO ₄	450	701,8	Öztrak, 2010
Elma kabuğu	ZnCl ₂	-	794	Bhadusha ve Ananthabaskaran, 2011
Mısır Koçanı	H ₂ O ₂	450	500-1500	Christica ve Muchlisyam, 2018
Kenevir sapı	KOH	800	337,5	Zhang vd., 2017
Vişne çekirdeği	ZnCl ₂	700	1704	Angin, 2013
Kabak çekirdeği	ZnCl ₂	500	1564	Şamdan, 2013
Kenevir kamışı	H ₃ PO ₄	400	1500	Rosas vd., 2008
Kenevir hemiselülozu	Ön İşlem (Hidrotermal karbonizasyon)	-	3062	Wang vd., 2015
Tekstil atıkları (Co/PE)	KOH			
	Ön işlem (Hidrotermal karbonizasyon)/			Duman, 2021
	KOH	700	363	
	ZnCl ₂	500	1795	
	İnert CO ₂	850	788	
Kimyon bitkisi atıkları	H ₃ PO ₄	Mikroalga, 1000W	>1000	Taş, 2017
Nar Kabuğu	KOH	600	900,12	Yılmaz ve Alagöz, 2019
Fındık Kabuğu	%30 K ₂ CO ₃ + %5 borik asit	900	780,31	Sayın vd., 2016
Fındık Kabuğu	ZnCl ₂	823K (549°C)	647	Özçimen ve Ersoy, 2010
Kakao kabuğu	ZnCl ₂	-	780	Cruz vd., 2012
	ZnCl ₂		615	
	K ₂ CO ₃		490	
	KOH			
Antep Fıstığı kabuğu	CO ₂	900	778,1	Lua vd., 2004
Hindistan Cevizi Kabuğu	CO ₂	600	1700	Guo vd., 2009
Hindistan Cevizi Kabuğu	Buhar	1000	1962	Li vd., 2008
Zeytin çekirdeği	Buhar	850	813	Gonzalez vd., 2009
Badem ağacı(budama)	Buhar	850	1080	Gonzalez vd., 2009
Badem kabuğu	Buhar	850	601	Gonzalez vd., 2009
Ceviz kabuğu	Buhar	850	792	Gonzalez vd., 2009
Fıstık kabuğu	Buhar	600	253	Girgis vd., 2002

Tablo 1’de biyokütle atıklarından farklı aktivasyon yöntemleri ve farklı sıcaklıklar kullanılarak üretilen aktif karbonların yüzey alanları verilmiştir. Buna göre kenevir hemiselülozu 3062 m²/g, hindistan cevizi kabuğu 1962 m²/g, tekstil atıkları 1795 m²/g, pamuk sapı 1720 m²/g yüksek yüzey alanlarına sahip olduğu görülmektedir.

Aktif Karbon Üretim Yöntemleri

Aktif karbon üretiminde, düşük inorganik madde içeren ve yüksek karbon içeriğine sahip (% 40-80) hammaddeler çeşitli ön işlemlerden geçirilir; bunlar yıkama, arıtma ve öğütme gibi işlemleri içerir (Öztrak, 2010). Ön işlem sonrası, karbonizasyon 350-900°C sıcaklık aralığında, inert ortamda hammaddeye uygulanmaktadır. Böylece, organik maddeden uçucu maddeler ve nem uzaklaşmakta ve yapının karbon miktarı artmaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklık altında çapraz bağlar oluşarak, sert ve gözenekli bir doku meydana gelmektedir (Akyıldız, 2007). Karbonizasyon sonrasında, yüksek sıcaklık altında aktivasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Aktivasyonda, fiziksel ve kimyasal aktivasyon olmak üzere iki ayrı yöntem kullanılmaktadır (Öztrak, 2010).

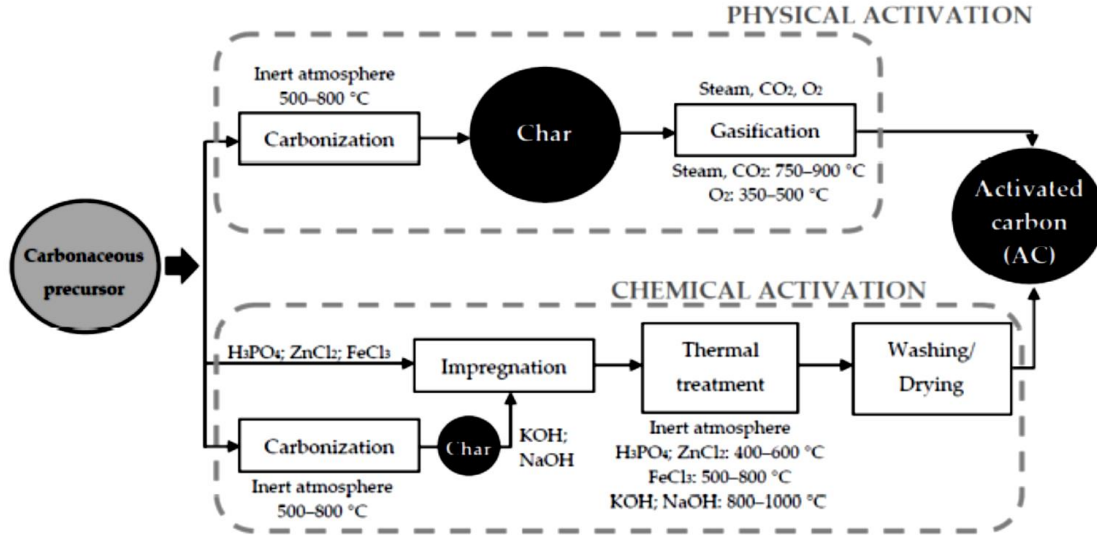
Fiziksel Aktivasyon Yöntemi

Fiziksel aktivasyon yönteminde su buharı, hava, karbondioksit gibi oksitleyici gazlar ve bu gazların uygun oranlarda karışımı kullanılabilir. Fiziksel aktivasyon yöntemi öncelikle uygun hammaddenin karbonizasyonu ve akabinde aktivasyonu olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir (Şekil 4). Karbonizasyon aşaması genellikle inert bir ortamda gerçekleşmekte ve hammaddenin yapısında bulunan hidrojen, oksijen gibi uçucu maddelerin uzaklaştırılması ve gözenekli yapının oluşması sağlanmaktadır. Aktivasyon aşamasında ise daha önceden oluşmuş gözenek yapısı daha da belirginleşmekle beraber yeni gözeneklerin oluşması sağlanmakta ve gözenek hacmi ve yüzey alanı gibi özellikler uygulanan sıcaklık ve süreye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bu yöntemde sistemin daha az korozif olması ve emdirme-yıkama gibi işlemlere gereksinim duyulmaması avantajları olarak sayılabilir (Ganan vd., 2006). Diğer bir çalışmada farklı karbonizasyon sıcaklıkları kullanarak (400, 600, 800 ve 1000°C) farklı aktivasyon sürelerinde hindistancevizi kabuğunu karbonize etmişlerdir. 120 dakika aktivasyon süresi ile 1000°C’de üretilen aktif karbonun yüzey alanının 1926 m²/g olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuçta yüksek karbonizasyon sıcaklığı ve uygun aktivasyon süresi ile fiziksel aktivasyon (buhar aktivasyonu) yöntemi kullanarak hindistancevizi kabuklarından yüksek yüzey alanına sahip aktif karbonlar üretebileceği sonucuna varmışlardır (Li vd., 2008). Bouchelta vd., (2008) çalışmalarında hurma çekirdeğinden su buharı kullanarak fiziksel aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretmişlerdir. Aktivasyon süresi ve karbonizasyon sıcaklığının aktif karbon özelliklerine etkisini incelemişler ve 700°C’de 1 saat sürede gerçekleştirilen aktivasyon aşamasında en yüksek yüzey alanına ulaşmışlardır. Cagnon vd., (2009) çalışmalarında ise erik ve elma posası, erik ve zeytin çekirdeği, Hindistan cevizi kabuğu ve lignin kullanarak su buharı ortamında fiziksel aktivasyon yöntemini kullanmışlardır. 800°C’de, 2 saat sürede gerçekleşen aktivasyon sonucunda ligninin aktif karbon üretiminde en verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Diğer bir çalışmada fındık kabuğundan aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretilmişlerdir. Karbonizasyon aşamasında N₂ ortamında 600°C ve 1 saat süre ile aktivasyon aşamasında CO₂ atmosferinde 800°C’de ve 3 saat süre ile en verimli aktif karbon üretim parametrelerine ulaşmışlardır (Örkün, 2011).

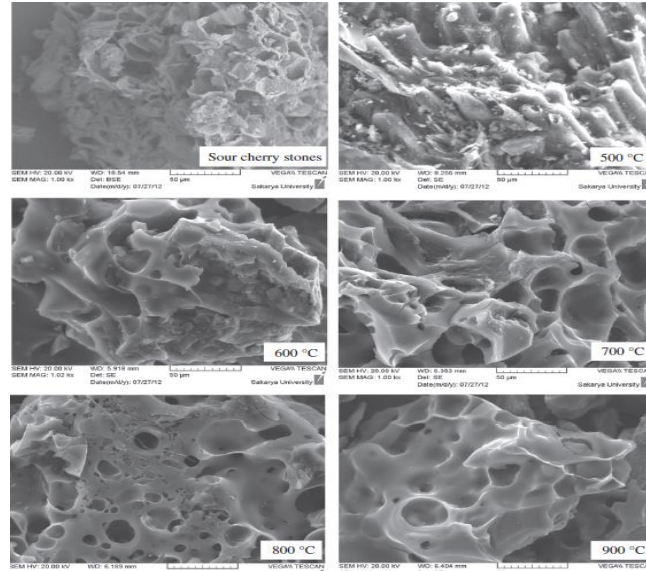
Kimyasal Aktivasyon Yöntemi

Kimyasal aktivasyon yönteminde; öncelikle başlangıç maddesi belli oranlarda uygun kimyasal ile emdirme, yoğurma veya kuru karıştırma gibi farklı yöntemlerle etkinleştirilmektedir. Uygulanan yöntem seçilen kimyasala bağlı olarak değişmektedir (Gündoğdu, 2010; Hayashi vd., 2002; Ahmadpour ve Do, 1995). Kimyasal aktivasyon aşamasında genellikle hem karbonizasyon hem de aktivasyon aynı anda gerçekleşmektedir. Ancak ön işlem olarak karbonizasyon da uygulanabilmektedir (Şekil 5). Isıl işlem sırasında oluşan uçucu maddeler, oksijenle birleşerek ortamdan uzaklaşır; bu da gözenek hacmini ve yüzey alanını genişletmektedir (Dermanlı, 2006).

Kimyasal aktivasyon için literatürde yaygın olarak fosforik asit (H₃PO₄), potasyum karbonat (K₂CO₃), potasyum hidroksit (KOH) ve çinko klorür (ZnCl₂) gibi maddelerin kullanıldığı görülmektedir. Fosforik asit ve çinko klorür gibi kimyasallar yıkama işlemi ile yapıdan tam anlamıyla giderilememekte olup, çevreye zarar vermesinden dolayı kullanım alanı her geçen gün azalmaktadır. Ancak, potasyum karbonatın etkili bir aktivasyon aracı olarak kabul edilmesi ve insan sağlığına zarar vermeyen bir madde olması nedeniyle gıda katkı maddesi olarak kullanımı giderek artmaktadır. (Tsai vd., 2001). Meyve suyu endüstrisinin atık maddesi olan vişne çekirdekleri kullanılarak yapılan çalışmada reaksiyon sıcaklıkları sırasıyla 500, 600, 700, 800 ve 900 °C olarak belirlenmiş ve farklı emdirme oranlarında çinko klorür kullanılarak kimyasal aktivasyon yöntemine göre aktif karbonlar elde edilmiştir. Aktivasyon sıcaklığı ve emdirme oranının gözenekli yapıyı, yüzey alanını, aktif karbonların gözenek hacmini ve BET yüzey alan değerlerini etkilediği görülmüş ve Şekil 6’da aktif karbon üretimi için optimum koşulların 700 °C aktivasyon sıcaklığı ve 3:1 emdirme oranı olarak belirlenmiştir (Angin, 2014).



Şekil 5. Fiziksel ve Kimyasal Aktivasyon Mekanizması (Bedia vd.,2020)



Şekil 6. Farklı Aktivasyon Sıcaklıklarında Vişne Çekirdeklerinden Üretilen Aktif Karbonların SEM Resimleri (Angin, 2014).

Diğer bir çalışmada ise Ladin ağacı kraft hamurunun atık maddesi olan siyah likör kullanılmış ve lignin izole edilmiştir. Ligninden alkali metal bileşikleri (K_2CO_3 , Na_2CO_3 , KOH, NaOH) ve $ZnCl_2$, H_3PO_4 reaktifleri kullanarak kimyasal aktivasyon yöntemine aktif karbon üretmişlerdir. Sonuçlara göre lignin esaslı aktif karbonun $600^\circ C$ karbonizasyon sıcaklığında $ZnCl_2$ ve H_3PO_4 aktivasyonunda maksimum yüzey alanına sahip olduğunu ve aynı zamanda yüzey alanının ticari aktif karbonlarınkı kadar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Alkali metal aktivasyonunda ise, maksimum yüzey alanlarının, $800^\circ C$ karbonizasyon sıcaklığında elde edildiği ve Na_2CO_3 haricinde maksimum yüzey alanlarının ticari aktif karbonlardan çok daha büyük olduğunu görmüşlerdir (Hayashi vd.,2000).

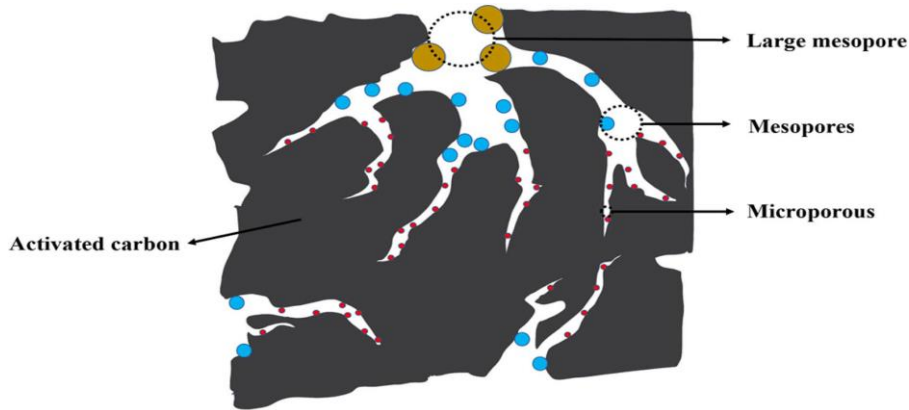
Kimyasal ve fiziksel aktivasyon yöntemi karşılaştırıldığında; kimyasal aktivasyonda karbonizasyon ve aktivasyon aşamalarının tek basamakta gerçekleşmesi, karbonizasyonun düşük sıcaklıklarda yapılması, verimin yüksek olması, yüksek yüzey alanı elde edilmesi ve gözenekliliğin geliştirilebilir ve kontrol edilebilir olması ve mineral madde içeriğinin az olması nedeniyle avantaj sağladığı görülmektedir (Tiryaki, 2013; Marsh ve Rodriguez-Reinoso,2006; Yeganeh vd., 2006; Bansal ve Goyal, 2005; Manocha, 2003; Hayashi vd., 2000). Tarım ve gıda endüstrisindeki atıklardan olan kayısı ve şeftali çekirdeği ile badem kabuğundan yapılan bir çalışmada, fiziksel ve kimyasal

aktivasyon yöntemleri kullanılarak aktif karbon üretilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında; saf karbondioksit ortamında farklı sıcaklıklarda fiziksel aktivasyon, ikinci aşamasında ise farklı $ZnCl_2$ /üçlü karışım oranlarında çinko klorürle, farklı sıcaklıklarda ve sürelerde kimyasal aktivasyona yapılmıştır. Sonuçlara göre; fiziksel aktivasyonda istenen özelliklerde aktif karbonların elde edilemediği ancak kimyasal aktivasyonunda ticari aktif karbon özelliklerine yakın aktif karbonların elde edildiği söylenmiştir (Akçakal, 2017). Diğer bir çalışmada tekstil atıklarına (pamuk, pamuk-poliester, poliester) $230^{\circ}C$ 'de 1 saat hidrotermal karbonizasyon ön işlemi uygulanmış ve sonrasında fiziksel aktivasyon ($850^{\circ}C$, CO_2 , 3 saat) ve kimyasal aktivasyon (KOH, $700^{\circ}C$ ve $ZnCl_2$, $500^{\circ}C$) yöntemleri ayrı ayrı uygulanarak aktif karbon elde edilmiştir. Neticede $ZnCl_2$ aktivasyonu ve pamuk içeren hammaddenin yüksek yüzey alanına $1795 m^2/g$ sahip olduğunu görülmüştür (Duman, 2021).

AKTİF KARBON ADSORBSİYONU

Adsorpsiyon, çözültide çözülmüş halde bulunan atom, iyon veya moleküllerin uygun bir yüzeyde biriktirilmesi ve bir katının yüzeyine bağlanması olarak tanımlanır. Adsorpsiyonda maddeleri üzerinde tutan katıya adsorban veya adsorplayıcı, katı üzerine tutunan maddeye adsorbat veya adsorplanan denir. Katı üzerinde tutunan maddenin tekrar ortamdan ayrılması olayına ise desorpsiyon denir (Sarıcı, 2022; Yagub vd., 2014). Adsorpsiyon işlemi adsorplanan tanecik ile adsorplayan yüzey arasındaki çekme kuvvetine bağlı olarak meydana gelmektedir. Fiziksel ve kimyasal olmak üzere 2 farklı adsorpsiyon çeşidi bulunmaktadır. Fiziksel adsorpsiyon, adsorplayan madde ile adsorplanan madde arasında Van der Waals, hidrojen, dipol-dipol, iyon-dipol gibi zayıf bağlar içeren, moleküller arası ikincil etkileşimlere dayanmaktadır. (Sarıcı, 2022; Eckenfelder, 2000). Kimyasal adsorpsiyon, adsorplanacak taneciğin adsorbanın katı yüzeyine molekül içi kovalent bağlarla bağlanıp yapışması ve adsorban maddenin yapısını bozmasıyla gerçekleşir (Abdullah vd., 2011).

Aktif karbon, geniş yüzey alanı ve iç gözenek yapısı ile adsorbanlar arasında en çok tercih edilmektedir. Granül veya toz formunda bulunan aktif karbon, kesikli veya sürekli-dinamik sistemlerde yüzeye tutunma açısından en yüksek arıtma performansını sağlar (Şekil 7). Bu adsorpsiyon işlemi, çözülmüş haldeki klorlu-hidrokarbon bileşikleri, bazı ağır metaller, su arıtımı, yüzey aktif maddeler, atık su arıtımı, çürümeyen biyolojik atıklar, tarım ilaçları ve bazı zehirli metal iyonlarının giderimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır. (Gür, 1994).



Şekil 7. Aktif Karbonun Gözenek Yapısı ve Adsorbsiyon Mekanizması (Wang vd.,2023)

Adsorpsiyon, gaz-katı, sıvı-katı veya karışmayan sıvı-sıvı arayüzeylerinin meydana geldiği durumlarda gerçekleşen bir durumdur. Tekstil endüstrisinde kullanılan Basic Blue 41 (BB 41) ve Basic Red 46 (BR 46) boyarmaddelerinin sulu çözültiden adsorpsiyon yöntemi ile uzaklaştırılmasını inceleyen bir çalışmada, ticari aktif karbona (AC) alternatif olarak düşünülen kömürden fiziksel (PAC) ve kimyasal (CAC) aktivasyon sonucu elde edilen adsorbentler, boyar madde adsorpsiyonları açısından karşılaştırılmış ve PAC, AC ve CAC BET yüzey alanlarını sırasıyla 52.6, 741 ve $1325 m^2/g$ olarak bulunmuştur. En yüksek yüzey alanı kimyasal aktivasyonla hazırlanan $800^{\circ}C$ 'de CAC numuneleri olduğu belirtilmiştir (Sulu, 2011). Lo vd., tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, Moso ve Ma bambu türü ağaçlardan elde edilen aktif karbonlar üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Aktif karbonların adsorpsiyon kapasiteleri, zeta potansiyelleri, karbon ve ağır metal uzaklaştırma verimleri, gözenek hacimleri ve yüzey alanları zamana, pH etkisine ve aktif karbon miktarına bağlı olarak belirlenmiştir. Ağır metal adsorpsiyonu için optimum pH, Moso için 5,81-7,86; Ma için 7,10-9,82 aralığında bulunmuştur. Moso için optimum adsorpsiyon süresi Cu^{+2} için 4-8 saat, Pb^{+2} için 2-4 saat, Cr^{+3} için 4 saat olarak belirlenirken, Ma için tüm ağır metallerde bir saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca iki kez aktive edilmiş Ma bambu esaslı aktif karbonunun düşük zeta potansiyeline

sahip olduğu ve adsorblama kapasitesinin yüksek olduğu bulunmuştur. Gökara, 2013 yılında aktif karbon çalışmasında iğde meyvesi çekirdeği kullanmıştır. İğde çekirdeği esaslı aktif karbonun boyarmaddelerin sulu çözeltisinde bulunan rhodamine B, metilen mavisi, malahit green gideriminde adsorpsiyon kapasitelerini sırasıyla 282 mg/g, 288 mg/g, 433mg/g olarak bulmuştur (Tablo 2).Tablo 2’de saman, bambu, hindistan cevizi, şeftali çekirdeği, iğde çekirdeğinden elde edilen aktif karbonların adsorbsiyon kapasiteleri yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 2.Doğal Atık Esaslı Aktif Karbonlar için Adsorpsiyon Kapasiteleri (Gökara, 2013)

Aktif Karbon Üretiminde Kullanılan Atık Madde	Adsorbsiyon Kapasitesi(mg/g)
Bambu tozu	143,20
Yer fıstığı kabuğu	164,90
Kauçuk ağacı tohumu	227,27
Bezelye kabukları	246,91
Zeytin çekirdeği	263,00
Hindistan cevizi kabuğu	277,90
Yağ palmyesi lifi	277,90
İğde çekirdeği(Rhodamine B)	281,69
İğde çekirdeği(Metilen mavisi)	288,18
Hint kamışı talaşı	294,12
Çeltik kavuzu	343,50
Hurma çekirdeği	398,19
Palmiye ağacı elyafı	400,00
Şeftali çekirdeği	412,00
İğde çekirdeği(Malahit yeşili)	432,90
Hindistan cevizi kavuzu	434,78
Bambu	454,20
Saman	472,10

Doğanay, 2013 yılında yaptığı çalışmada kağıt sanayisi atık sularında fenolün giderim oranlarını incelemiştir ve deneylerinde adsorbent olarak palmye kabuğu kökenli aktif karbon kullanmıştır. Deneyler sonucunda, fenolün %70,58 oranında giderildiği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada, çay fabrikası atıklarından aktif karbon üretmek için mikrodalga ön işlemlili kimyasal aktivasyon(fosforik asit) kullanılmıştır. Çay atığı temelli aktif karbonun, krom, bakır, nikel ve kurşun gibi ağır metallerin giderim kapasiteleri araştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla, su ile yıkanmış çay fabrikası atığı da adsorbent olarak kullanılmıştır. Çay atığı esaslı aktif karbonun mezo gözenekli olduğu ve yüzey alanı ise 1387 m²/g olarak ölçülmüştür. Çay atığı esaslı aktif karbonun nikel ve kromun uzaklaştırılmasında, su ile yıkanmış çay fabrikası atığının kurşun gideriminde daha etkili olduğu bulunmuştur. Bakır gideriminde ise her ikisinin de başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Deniz, 2014).

AKTİF KARBONUN UYGULAMA ALANLARI

Aktif karbon, su arıtmadan ağır metal giderimine, gıdadan metal sanayisine, savunmadan sağlık sektörüne kadar endüstrinin birçok alanında kullanılan ticari potansiyeli çok yüksek olan bir malzemedir. Aktif karbonun en güncel uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

Çözücü Geri Kazanımı: Birçok çözücü buharı, hava ile karıştırıldığında yanıcı özellik göstermektedir. Kimyasalın cinsine bağlı olarak değişen hava/kimyasal buhar oranı, kritik miktarın üstüne çıktığında yanıcılık görülmektedir. Bu durumda kullanılan aktif karbon, hem çözücü buhar konsantrasyonu belli bir değerin altında tutmakta hem de yaklaşık %95 oranında çözücünün geri kazanımını sağlamaktadır. Günümüzde, aktif karbon uygulamaları ile aseton, izopropanol, tetrakloretilen, benzen, metanol, trikloretilen, metil asetat, etanol, toluen, ksilen, etil asetat, petrol naftası, etil eter, solvent nafta vb çözücülerin geri kazanılması mümkün olmaktadır.

Fermentasyon: Aktif karbon, mikroorganizmalar için zararlı olan maddeleri adsorbe ederek fermentasyonu hızlandırır. Ancak, mikroorganizma besinlerini ve enzimlerini de adsorbe edebilir ve bu durum işlemin yavaşlamasına neden olabilir (Akyıldız, 2007;Hassler, 1967).

Filtreler: Sigara ağızlıklarında filtre olarak yaygın bir şekilde kullanılan aktif karbon, kötü kokuları ve duman içerisinde bulunan bazı zararlı maddeleri uzaklaştırmada etkilidir. Aynı zamanda, atıkların bertarafında kullanılan baca gazı filtrelerinde, sanayi kaynaklı gazların filtrelenmesinde ve soğutucu filtrelerinde de kullanılmaktadır.

Endüstriyel Gazların Filtrasyonu: Aktif karbon boya, vernik, suni deri, barut ve plastik üretimi sonucu atmosferi kirleten gazların tutulmasında tercih edilmektedir. Ayrıca ofis, laboratuvar, restoran ve hastane gibi kapalı alanların havasının temizlenmesinde de kullanılmaktadır. Hava temizliği için, genellikle 2-3 ppm gibi düşük kirlilik konsantrasyonlarında, levha şeklinde aktif karbon kullanılabilir.

Nükleer reaktörlerde meydana gelen bir kaza durumunda, aktif karbon filtreler, iyot, özellikle metil iyot gibi organik iyotlar, kripton, ksenon gibi noble gazlar ve radyoaktif buharın giderilmesinde ve helyum soğutması için kullanılan suyun arıtılmasında da kullanılmaktadır. %3 propan ve %4-5 oranında yüksek hidrokarbonları içeren doğalgaz, aktif karbon adsorpsiyonu ile arıtım sağlanmaktadır (Akyıldız, 2007; Bansal ve Goyal, 2005).

Atık Su Arıtma: Tekstil atık suları, içerdikleri çeşitli kimyasallar ve özellikle boyar maddeler nedeniyle arıtılması zor olan bir atık su kategorisine dahil edilmektedir. Boyarmaddelerin giderimi genellikle fiziksel ve kimyasal yöntemlerle yapılır. Fakat, bu yöntemlerin maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle, büyük hacimli atık sularındaki boyar maddelerin etkili ve ekonomik bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Adsorpsiyon, renk giderimi için en önemli yöntemlerden biridir. Renk gideriminde en yaygın olarak kullanılan malzeme ise aktif karbondur.

Gıda Renklendirme: Gıda sektöründe kullanılan aktif karbon, tatsız ve kokusuz olup, insan sağlığına zararsızdır. Her türlü ekmek ve pastane ürünü ile dondurma, dondurma külahı ve makarna gibi yiyeceklerin renklendirilmesinde güvenle kullanılabilir. Ayrıca nişasta, glikoz, şeker şurupları ve yağların rengini açmak veya rafinerizasyon amacıyla da aktif karbon tercih edilmektedir.

Su Saflaştırma: Aktif karbon, suyun arıtılması sürecinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem yüzey suları hem de yer altı kaynak sularının arıtılmasında aktif karbon kullanılır.

İçme Suyu Arıtma: Aktif karbon, insan tüketimine uygun suyun arıtılma sürecinde, çok düşük miktarlardaki çözünmüş organik maddelerin dahi giderilmesine olanak sağlar.

Klor Giderimi: Su arıtma süreçlerinde, suyun genellikle klor ile dezenfekte edilmesi gerekmektedir. Klorun sudan uzaklaştırılması, genellikle granül aktif karbon filtreleri kullanılarak gerçekleştirilir.

Yer Altı Kaynak Suyu İyileştirme: Kaynak suları genellikle yüksek miktarlarda organik madde içerdiğinden kirlidir. Bu kirleticiler genellikle rafineri ve petrol istasyonlarından kaynaklanan hidrokarbonlardır. Bu tür işlemlerde, uygun adsorpsiyon kapasitesine ve parçacık boyutuna sahip granül aktif karbon seçimi, hidrokarbonların etkili bir şekilde uzaklaştırılmasında önemli rol oynar.

Soğuk Depolama: Tarımsal ürünlerin uzun süreli saklanması, sebze ve meyvelerin metabolizmalarının kontrol edilerek yavaşça olgunlaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Soğuk depolama sürecinde, bu ürünler karbondioksit gazı üretirler. Karbondioksitin ortamdan uzaklaştırılarak belirli bir seviyenin altına indirilmesi, bozulmayı hızlandıran etkileri engellemek için önemlidir. Bu süreçlerde, aktif karbon, karbondioksiti adsorbe ederek soğuk hava depolarında bozulmayı önlemek, kayıpları azaltmak ve depolama süresini uzatmak için kullanılmaktadır.

Biyogaz: Biyogaz, yenilenebilir enerji üretmek için güç motorlarında yakılarak kullanılmaktadır. Ancak, içerdiği çeşitli safsızlıkların motora zarar vermemesi için temizlenmesi gerekmektedir. Biyogaz sanayisinde, hidrojen sülfür (H₂S) gazı, siloksanlar ve çeşitli uçucu organik bileşiklerin uzaklaştırılması için aktif karbon yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonim, 2021).

Savunma Sanayi: Son yıllarda nükleer, biyolojik ve kimyasal savaş (NBC) ajanları, hem savunma kuvvetleri hem de siviller için kaçınılmaz bir tehdit oluşturmaktadır. Bu toksik ajanlara maruz kalmak, yaşamda çok fazla hasara neden olmaktadır. Kirli havadan saflaştırılmasında aktif karbon şimdiye kadar olağanüstü bir başarı sağlamaktadır. Kirli havadan kimyasal veya fiziksel adsorpsiyon yoluyla toksik kimyasalların uzaklaştırılmasında aktif karbon ve HEPA (yüksek verimli partikül hava) veya ULPA (ultra düşük) gibi adsorban malzeme içeren filtreler tercih edilmektedir. Önümüzdeki yıllarda muharebe sahası koşullarında daha uzun süre kullanılacak gaz maskelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bertaraf problemlerini önlemek için kimyasal, biyolojik ve radyolojik ajanlara karşı gelişmiş koruma potansiyeline sahip biyolojik olarak parçalanabilir, yeniden kullanılabilir ve kullanıcı dostu maskeler geliştirilmelidir (Kiani vd.,2021).

Superkapasitör Üretiminde: Son yıllarda süperkapasitör üretiminde yaygın olarak biyoatıklardan üretilen aktif karbonlar kullanılmaktadır. Örneğin kahve atıklarından fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonlar süperkapasitör üretiminde kullanılmış ve kimyasal aktivasyonla üretilen aktif karbonlarda üretilen süperkapasitörün 84 F/g spesifik kapasitans değerine ulaştığı bulunmuştur (Adan-Mas vd., 2021). Ayrıca *Tectona grandis* yaprağı (Taer vd., 2021) ve kenaf dahil olmak üzere birçok biyokütle atığı (Park vd.,2021), şeker kamışı ucu (Wei vd.,2021), manyokun yeşil buharı (Taer vd.,2020), bambu yaprağı (Jayachandran vd.,2021), *Sapindus trifoliatus* fındık kabukları (Vinayagam vd.,2021), kaju fıstığı kabuğu (Merin vd.,2021), çürük patates (Wang vd.,2021), *Allium cepa* kabuğu (Ali vd.,2021), narenciye kabuğu lifi (Mondal vd., 2021), *Acacia auriculiformis* (Bhat vd., 2021), *Caesalpinia Sappan* (Bhat vd., 2022) ve huş ağacı (dondurma çubukları) (Selvaraj vd.,2022), süperkapasitör üretimi için alternatif karbon kaynakları olarak kullanılmıştır.

Ağır Metal İyonların Adsorbsiyonunda: Aktif karbonlar endüstriyel çözeltilerde bulunan ağır metal iyonlarının adsorbsiyonunda kullanılmaktadır. Atık sigara tütününden $ZnCl_2 + CO_2$ kimyasal ve fiziksel aktivasyon kombine yöntemi ile elde edilen aktif karbonlar Pb^{2+} metal iyonunun adsorblanmasında kullanılmıştır (Manfrin vd.,2021).

SONUÇ

Aktif karbonun son yıllarda savunma sanayisinden süperkapasitör üretimine, arıtmadan adsorbsiyona kullanım amacına göre üretilebilmesinden dolayı uygulama alanları sürekli artmıştır. Gelecekte aktif karbon pazarının daha da büyüyeceği öngörülmekte olup, bu büyüme oranına uyumlu olarak uygulama alanlarının daha da çeşitleneceği ve biyokütle atıklarından üretilen nitelikli aktif karbonların endüstriyel aktif karbonların yerini alacağı düşünülmektedir. Ticari aktif karbon yüksek oranda inorganik maddeler içeren kaynaklardan üretilmekte olup, bu durum hem maliyetin daha da artmasına hem de çevresel problemlere yol açmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araştırmalar alternatif çevre dostu hammaddelere yönelmiştir. Biyokütle atıkları, kolay bulunabilirlikleri, ucuz olmaları ve karbonlu yapıları nedeniyle aktif karbon üretimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Biyokütle atıklarının aktif karbon üretim sürecine dahil edilmesiyle beraber hem çevresel sorunların azalması hem de sıfır atık ve yeşil dönüşüm çalışmaları kapsamında ülke ekonomisine büyük oranda katkı sağlanması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M.O., Tan, I.A.W. & Lgm, L.S. (2011). Automobile adsorption air-conditioning system using oil palm biomass-based activated carbon: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2061-2072. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.012>
- Adan-Mas, A., Alcaraz, L., Arévalo-Cid P., López-Gómez F.A., & Montemor F.(2021). Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications. *Waste Management* 120 (2021) 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>
- Ahmadpour, A., & Do, D.D.(1995). The Preparation of Active Carbons from Coal by Chemical and Physical Activation, *Carbon*, 34 (1995) 471–479. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00204-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00204-9)
- Akyıldız, H. (2007). H_3PO_4 Aktivasyonu ile Zeytin Çekirdeğinden Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü.
- Ali, G. A. M., S. Supriya, K. F. Chong, E. R. Shaaban, H. Algarni, T. Maiyalagan, & G. Hegde. (2021). Superior supercapacitance behavior of oxygen self-doped carbon nanospheres: A conversion of *Allium cepa* peel to energy storage system. *Biomass Conversion and Biorefinery* 11 (4):1311–23. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00520-3>
- Angin, D. (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. *Fuel* 115 (2014) 804–811. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.060>
- Anonim. (2021). Sivas İli Aktif Karbon Üretimi Ön Fizibilite Raporu. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Orta Anadolu Kalkınma Ajansı.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*, Taylor & Francis Group, 497 p.
- Bedia, J., Penas Garzon, M., Gomez Aviles, A., Rodriguez, J.J., & Belver, C. (2020). Review on Activated Carbons by Chemical Activation with $FeCl_3$. *C-Journal of Carbon Research* 2020, 6, 21. <https://doi.org/10.3390/c6020021>
- Beton, İ. (2011). Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbona CO_2 Adsorpsiyonun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

- Bhadusha, N., & Ananthabaskaran, T. (2011). Adsorptive Removal of Methylene Blue onto ZnCl₂ Activated Carbon from Wood Apple Outer Shell: Kinetics and Equilibrium Studies. *E-Journal of Chemistry*, 8(4), 1696-1707. <https://doi.org/10.1155/2011/429831>
- Bouchelta, C., Medjram, M.S., Bertrand, O. & Bellat, J.P. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam. *J. Anal. Applied Pyrolysis*, 82, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.12.009>
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F., & Chambat, G.(2009). Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors, *Bioresource Technology* 100, 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.009>
- Christica, I.S., & Muchlisyam, J.R. (2018). Activated Carbon Utilization From Corn Cob(Zea mays) as a Heavy Metal Adsorbent in Industrial Waste. *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development*.6(5): 01-04. <https://doi.org/10.22270/ajprd.v6i5.411>
- Choma J., & Jaroniec M. (1987).*Materials Chem. Phys.*18,409.
- Cruz, G., Pirlä, M., Huuhtanen, M., Carrión, L., Alvarenga, E., & Keiski, R. (2012). Production of Activated Carbon from Cocoa (Theobroma cacao) Pod Husk. *Civ. çevre. Müh.*,2(1–6)(2012),s.2. <https://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000109>
- Çetinkaya, M.Ş. (2015). Badem Kabuğu ve Çam Fıstığı Kabuğundan Kimyasal yöntem ile Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi.Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Danisha, M., Ahmadb, T., Majeedc, S., Ahmadd. M., Ziyange. L., Pine. Z., & Iqubalf S.M.S. (2018). Use of banana trunk waste as activated carbon in scavenging methylene blue dye: Kinetic, thermodynamic, and isotherm studies. *Bioresource Technology Reports* 3, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.007>
- Delgado, L.F., Charles, P., Glucina, K., & Morlay, C. (2012). The removal of endocrine disrupting compounds, pharmaceutically activated compounds and cyanobacterial toxins during drinking water preparation using activated carbon—A review. *Science of the Total Environment*, 435, 509-525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.046>
- Deniz, T. (2014). Çay Atığından Üretilen Aktif Karbon ile Sulu Çözeltilerden Ağır Metallerin Giderimi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Dermanlı, Y. (2006). Gıda Fabrikasyon Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Soya Yağını Ağartma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği.
- Doğanay, M. (2013). Kağıt Atıksularının Palmiye Kabuğu Kökenli Aktif Karbon Adsorpsiyonu ile Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Duman, G. (2021). Preparation of novel porous carbon from hydrothermal pretreated textile wastes: Effects of textile type and activation agent on structural and adsorptive properties. *Journal of Water Process Engineering* 43 (2021) 102286. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102286>
- Eckenfelder, W. W. (2000). *Industrial water pollution control* (McGrawHill). Boston, EUA.
- Ganan J., Gonzalez J.F., Gonzalez-Garcia C.M., Ramiro A., Sabio E. & Roman S. (2006). Carbon dioxide-activated carbons from almond tree pruning: Preparation and characterization. *Applied Surface Science* 252 (2006) 5993–5998. <https://doi:10.1016/j.apsusc.2005.11.025>
- Gerçel, Ö., & Seydioğlu, G. (2015). Kiraz Çekirdeğinden Granül Aktif Karbon Üretimi. *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering Cilt: 16 Sayı: 2, Sayfa: 189 – 193.* <https://doi.org/10.18038/btd-a.93727>
- Girgis, B.S., Yunis, S.S., & Soliman, A.M. (2002). Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. *Mater. Lett.* 57 (1), 164–172. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00724-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00724-3)
- Gonzalez, J., Roman, S., Encinar, J.M., & Martínez, G., (2009). Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 85 (1–2), 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.035>

- Gökara, G. (2013). İğde Çekirdeğinden Elde Edilen Aktif Karbon Üzerinde Tekstil Boyarmaddelerinin Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Fizikokimya Anabilim Dalı.
- Guo, S., Peng, J., Li, W., Yang, K., Zhang, L., Zhang, S., & Xia, H. (2009). Effects of CO₂ activation on porous structures of coconut shell-based activated carbons. *Appl. Surf. Sci.* 255 (20), 8443–8449. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.05.150>
- Gündoğdu, A. (2010). Fabrika Çay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Bölümü
- Güngör, S. (2013). Tarımsal Atıklardan Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Temel İşlemler ve Termodinamik Programı.
- Güngör, C. (2010). Üzüm Küspesinden Aktif Karbon Üretimi ve Bakır Gideriminde Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Termodinamik ve Temel İşlemler Bölümü.
- Gür, N. (1994). Pestisitlerin Bentonitle Adsorpsiyonu, Bitirme Ödevi, İTÜ Kimya-Metalurji Fak., İstanbul.
- Hassler, J. (1967). Activated Carbon, Chemical Publishing Co. Inc., Leonard Hill-London.
- Hayashi, J., Horikawa, T., Takeda, I., Muroyama, K. & Ani, F.N.(2002). Preparing Activated Carbon from Various Nutshells by Chemical Activation with K₂CO₃, *Carbon*, 40 (2002) 2381–2386. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00118-5)
- Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., & Watkinson A.P.(2000).Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon* 38 (2000) 1873–1878. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)
- Jayachandran, M., S. Kishore Babu, T. Maiyalagan, N. Rajadurai, & T. Vijayakumar. (2021). Activated carbon derived from bamboo-leaf with effect of various aqueous electrolytes as electrode material for supercapacitor applications. *Materials letters* 301 (June):130335. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130335>
- Kiani, S.S., Farooq, A., Ahmad, M., Irfan, N., Nawaz, M. & Irshad, M.A.(2021). Impregnation on activated carbon for removal of chemical warfare agents (CWAs) and radioactive content. *Environmental Science and Pollution Research* (2021) 28:60477–60494. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15973-1>
- Küçükgül, E.Y. (2004). Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 6 Sayı: 3 s. 41-56 Ekim 2004. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/590657>
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S., & Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Ind. Crop. Prod.* 28 (2), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.02.012>
- Lo, S., Wang, S., Tsai, M. & Lin, L. (2011). Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by moso and ma bamboo activated carbons. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 1397-1406. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.11.020>
- Lua, A.C., Yang, T., & Guo, J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 72 (2), 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.08.001>
- Manfrin J., Gonçalves, A.C., Schwantes, D., Conradi, E., Zimmermann, J. & Ziemer, G. L. (2021). Development of biochar and activated carbon from cigarettes wastes and their applications in Pb²⁺ adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2021) 104980. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104980>
- Manocha, S.M. (2003). Porous carbons. *Sadhana*, 28, 335-348. <https://doi.org/10.1007/BF02717142>
- Marsh, H., & Rodriguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*, Elsevier Science and Technology Books, 542 p., United Kingdom
- McDouGall, G.J. (1991). The physical nature and manufacture of activated carbon, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp 109-120. https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2042

- Merin, P., Jimmy Joy, P., Muralidharan, M.N., Veena Gopalan, E., & Seema, A. (2021). Biomass-derived activated carbon for high-performance supercapacitor electrode applications. *Chemical Engineering & Technology* 44 (5):844–51. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000450>
- Mondal, M., Kumar D., & T. Kanti. (2021). Lignocellulose based bio-waste materials derived activated porous carbon as superior electrode materials for high-performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage* 34 (December 2020):102229. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102229>
- Nahil M.A., & Williams P.T. (2012). Pore characteristics of activated carbons from the phosphoric acid chemical activation of cotton stalks. *Biomass and Bioenergy* 37, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.019>
- Othmer, K. (1992). *Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley&Sons. 4: 1015-1035.
- Örkün, Y. (2011). Fındık Kabuğundan Fiziksel ve Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özçimen, D., & Ersoy, M.A. (2010). Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy* 3, 1319–1324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.042>
- Öztrak, M. (2010). Biyokütle Atıklarından Aktif Karbon Üretimi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Park, H. Y., M. Huang, T. H. Yoon, & K. H. Song. (2021). Electrochemical properties of kenaf-based activated carbon monolith for supercapacitor electrode applications. *RSC advances* 11 (61):38515–22. <https://doi.org/10.1039/D1RA07815A>
- Patrick, J. W. (1995). *Porosity in Carbons*, Edward Arnold(eds), Halsted Pres, London.
- Perrich, J. R. (2018). *Activated carbon adsorption for wastewater treatment*. CRC press.12-47
- Rosas, J.M., Bedia, J., Rodriguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2008). Preparation of Hemp-Derived Activated Carbon Monoliths. *Adsorption of Water Vapor*. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 47, 4, 1288–1296. <https://doi.org/10.1021/ie070924w>
- Sarıcı, B. (2022). Fındık Kabuğundan Aktif Karbon Üretimi ile Nanopartiküler Gümüş Eklenecek Aktif Karbonun Patojen Mikroorganizmalara Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi. İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gıda Güvenliği ve Beslenme Bilimleri Ana Bilim Dalı.
- Sayın, Z. E., Kumaş C., & Ergül B. (2016). Fındık Kabuğundan Aktif Karbon Üretimi. *AKU J. Sci. Eng.* 16 (2016) 025805(409-419) <https://doi.org/10.5578/fmbd.28129>
- Selvaraj, A. R., Chinnadurai, D., Cho, I., Bak, J. S. & Prabakar. K. (2022). Bio-waste wood-derived porous activated carbon with tuned microporosity for high performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage* 52 Part B(15 August 2022):104928. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104928>
- Stoeckli, H.F., & Kraehenbuehl F. (1984). “The External Surface of Microporous Carbons, derived from Adsorption and Immersion Studies”, *Carbon*, 22, 297. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(84\)90174-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(84)90174-X)
- Sulu, E. (2011). Bazık Blue 41 ve Bazık Red 46'nın Kömürden Elde Edilen Aktif Karbon Üzerine Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı.
- Suo, F., Liu, X., Li, C., Yuan, M., Zhang, B., Wang, J., Ma, Y., Lai, Z., & Ji, M. (2019). Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal. *International Journal of Biological Macromolecules* Volume 121, Pages 806-813. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.132>
- Şamdan, C.A. (2013). Kabak Çekirdeği Kabuğundan Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi, Boya ve Ağır Metal Gideriminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü.
- Taer, E., Melisa, M., Agustino, A., Taslim, R., Sinta, W., & Apriwandi, A. (2021). Biomass-based activated carbon monolith from *Tectona grandis* leaf as supercapacitor electrode materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 00 (00):1–12. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1950871>

- Taer, E., Yanti, N., Mustika, W. S., Apriwandi, A., Taslim, R., & Agustino, A. (2020). Porous activated carbon monolith with nanosheet/nanofiber structure derived from the green stem of cassava for supercapacitor application. *International Journal of Energy Research* 44 (13):10192–205. <https://doi.org/10.1002/er.5639>
- Taş, R. (2017). Mikrodalga Enerji ile Kimyon Bitkisinden Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Tiryaki, B. (2013). Selüloz, Hemiselüloz ve Ligninden Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Trade Map, Uluslararası İş Geliştirme İçin Ticaret İstatistikleri. (2024) . https://www.trademap.org/Product_SelCountry_TS.aspx?nvpm=1%7c792%7c%7c%7c%7c380210%7c%7c%7c8%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1/ErişimTarihi:17.05.2024.
- Tsai, W.T., Chang, C.Y., Wang, S.Y., Chang, C.F., Chien, S.F. & Sun, H.F. (2001). Preparation of activated carbons from corn cob catalyzed by potassium salts and subsequent gasification with CO₂. *Bioresource Technology*, 78, 203-208. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00111-5)
- Wang, A., Sun, K., Xu, R., Sun, Y., & Jiang, J. (2021). Cleanly synthesizing rotten potato-based activated carbon for supercapacitor by self-catalytic activation. *Journal of Cleaner Production* 283:125385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125385>
- Wang, B., Lan J., Bo C., Gong B., & Ou, J. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. *RSC Adv.*, 2023, 13, 4275. <https://doi.org/10.1039/D2RA07911A>
- Wang, Y., Yang, R., Li, M., & Zhao, Z. (2015). Hydrothermal preparation of highly porous carbon spheres from hemp (*Cannabis sativa* L.) stem hemicellulose for use in energy-related applications. *Industrial Crops and Products*. Volume 65, March 2015, Pages 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.008>
- Wei, B., Wei, T., Xie, C., Li, K., & Hang, F. (2021). Promising activated carbon derived from sugarcane tip as electrode material for high-performance supercapacitors. *RSC advances* 11 (45):28138–47. <https://doi.org/10.1039/D1RA04143F>
- Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S., & Ang, H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yeganeh, M.M., Kaghazchi T., & Soleimani, M. (2006). Effect of raw materials on properties of activated carbons. *Chem. Eng. Technol.* 29, No. 10, 1247–1251. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500298>
- Yılmaz, N., & Alagöz, O. (2019). Nar Kabuklarından Kimyasal Aktivasyon ile Hazırlanan Aktif Karbon Üzerinde Metilen Mavisinin Adsorpsiyonu. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* Cilt: 6, No: 3, 2019 (817-829). <https://doi.org/10.31202/ecjse.583102>
- Zhang, J., Gao, J., Chen, Y., Hao, X., & Jin, X. (2017). Characterization, preparation, and reaction mechanism of hemp stem based activated carbon. *Results in Physics* 7, 1628–1633. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.028>
- Zhang, L., Xu, L., Zhang, Y., Zhou, X., Zhang, L., Yasin, A., Wang, L. & Zhi, K. (2018). Facile synthesis of bio-based nitrogen- and oxygen-doped porous carbon derived from cotton for supercapacitors. *RSC* 8 (7):3869–77. <https://doi.org/10.1039/C7RA11475C>