



KARBON NANOTÜPLERİN KARBONDİOKSİT TUTUCU OLARAK KULLANIMI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Aysun ÖZKAN*, Gamze YILMAZ, Zerrin GÜNKAYA, Müfide BANAR

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Adsorpsiyon,
Karbondiyoksit,
Karbon Nanotüp.

Öz

Küresel ısınmaya sebep olan birincil antropojenik sera gazı olarak bilinen karbondiyoksit (CO₂) emisyonlarının azaltılması için tüm dünyada pek çok araştırma yapılmaktadır. CO₂'in tutulmasına yönelik olarak, yanma öncesi, yanma sonrası ve Oxy-yakıt yakım olmak üzere üç temel yaklaşım vardır. Adsorpsiyon, yanma öncesi ve sonrası kullanılabilen etkin bir CO₂ yakalama yöntemidir. Ancak, CO₂'nin havadan adsorbe edilmesi, baca gazı ve sentez gazı gibi yüksek CO₂ konsantrasyonlu kaynaklar için hala bir sorundur. İlgili literatürün çoğu, daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve daha düşük rejenerasyon enerjisi tüketimi için adsorbanların geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle CO₂ tutucu olarak farklı katı malzemelerin kullanımı üzerine yoğunlaşmaktadır. Adsorban malzeme olarak karbon bazlı adsorbanlar, zeolitler, moleküler elekler, metal-organik çerçeveler kullanılmaktadır. Bu bağlamda, yapısal özellikleri ve zorlu ortamlara karşı yüksek dayanıklılığı nedeniyle CO₂ adsorpsiyonu için karbonlu malzemeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada da CO₂ tutucular ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar irdelenmiş ve bunlar arasında yüksek adsorpsiyon ve dayanım özelliği ile birçok kompozit malzeme ile uygulama alanı olan karbon nanotüpün CO₂ tutucu olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur.

AN EVALUATION ON THE USE OF CARBON NANOTUBES AS A CARBONDIOXIDE ADSORBER

Keywords

Adsorption,
Carbondioxide,
Carbon Nanotube.

Abstract

There are many types of researches all over the world to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions known as primary anthropogenic greenhouse gases causing global warming. There are three basic approaches to CO₂ capture: pre-combustion, post-combustion and Oxy-fuel combustion. Adsorption is an effective CO₂ capture method that can be used pre and post combustion. However, adsorbing CO₂ from air is still a problem for sources with high CO₂ concentrations such as flue gas and syngas. Much of the relevant literature focuses on the development of adsorbents for higher adsorption capacity and lower regeneration energy consumption. These studies focus especially on the use of different solid materials as CO₂ adsorbents. Carbon-based adsorbents, zeolites, molecular sieves, metal-organic frameworks are used as adsorbent materials. In this context, carbon materials are preferred for CO₂ adsorption due to their structural properties and high resistance to harsh environments. In this study, the studies conducted in the literature on CO₂ traps have been examined and among them, the use of carbon nanotubes, which are preferred as adsorbents due to their high adsorption properties, and their application area, are used as CO₂ adsorbers.

Alıntı / Cite

Özkan, A., Yılmaz G., Günkaya, Z., Banar M., (2022). Karbon Nanotüplerin Karbondiyoksit Tutucu Olarak Kullanımı Üzerine Bir Değerlendirme, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(4), 1484-1494.

* İlgili yazar / Corresponding author: aysunozkan@eskisehir.edu.tr, +90-222-321-3550

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
A. Özkan, 0000-0003-1036-7570	Başvuru Tarihi / Submission Date	02.01.2021
G. Yılmaz, 0000-0003-0953-2399	Revizyon Tarihi / Revision Date	25.07.2022
Z. Günkaya, 0000-0002-7553-9129	Kabul Tarihi / Accepted Date	25.07.2022
M. Banar, 0000-0003-2795-6208	Yayın Tarihi / Published Date	30.12.2022

1. Giriş (Introduction)

Küresel ısınma üzerinde etkin gaz olarak bilinen karbondioksitin (CO₂) atmosferdeki konsantrasyonu hızla artmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu yıllık 2,3 ppm (hacimce) olarak hızlı bir artış göstermekte ve bu artışın en büyük sebebini insan faaliyetleri oluşturmaktadır (Açıkgöz vd., 2012). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından 2017 yılında yayımlanan bir rapora göre, atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu, sanayi öncesi dönemde 280 ppm iken, 2017 yılında bu değer 406,67 ppm'e yükselmiştir (Tiwari vd., 2017). Fosil yakıtlı enerji santralleri, atmosferdeki toplam karbon emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumludur (Lee vd., 2015). Fosil yakıtların yanmasından ortaya çıkan karbondioksitin küresel ısınmaya yaklaşık %60 oranında etkilediği tahmin edilmektedir (Altınöz ve Terzi, 2020). Bunun sonucunda, kara ve deniz sıcaklıkları artmakta, yağış miktarı ve biçimlerinin değişmesi sonucunda, küresel ortalama deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyılardaki erozyon risklerini de artırmakta, hava ile bağlantılı doğal afetlerin şiddetinde artışlara şahit olunmaktadır. Değişen su seviyeleri, sıcaklığı ve debisi; gıda arzı, tarım, sağlık, sanayi, turizm ve ulaşım gibi birçok sektörün yanı sıra, ekosistem bütünlüğünü de etkilemektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012). Bu nedenle iklim değişikliğini azaltmak için fosil yakıt kullanımının sınırlanması ile CO₂'in yakalanması ve depolanması en uygulanabilir çözümler olarak öne çıkmaktadır (Dam, 2014).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) Üçüncü Değerlendirme Raporu'nda, sanayi devrimi boyunca gözlenen ısınmanın büyük oranda insan aktivitelerinden kaynaklandığı ifade edilmektedir. IPCC tahminlerine göre, 2100'de atmosfere yayılan ortalama CO₂ konsantrasyonu 570 ppm'e ulaşacak ve bu durum küresel ısınmayı yaklaşık 1,9°C etkileyecektir (Dam, 2014). IPCC, üç aşamalı bir CO₂ emisyon azaltma stratejisi olarak karbon tutma ve depolamayı önermiş olup, aşamaları (i) ayırma, (ii) taşıma ve (iii) depolama şeklindedir. Bu nedenle, mevcut teknolojileri geliştirmek ve CO₂ tutmak üzere yeni teknolojiler geliştirmek için dünya çapında yoğun çalışmalar yapılmaktadır (Chiang ve Juang 2017).

Dünyadaki CO₂ emisyonunun en fazla olduğu ülkeler; Çin (%28), Amerika Birleşik Devletleri (%16), AB-28 (%10), Hindistan (%6), Rusya (%6) ve Japonya (%4)'dır (Yaumi vd., 2017). Dünyadaki sera gazı emisyonlarındaki artışa bağlı iklim değişikliğini ve olumsuz etkilerini önlemeye yönelik olarak; bu gazları sınırlandırmak ve azaltmak amacıyla Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) ve Kyoto Protokolü yürürlüktedir (Dam, 2014). 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris'te düzenlenen BMİDÇS 21. Taraflar Konferansı'nda (COP21) kabul edilmiştir ve anlaşma, 5 Ekim 2016 itibariyle, küresel sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan en az 55 tarafın anlaşmayı onaylaması koşulunun karşılanması sonucunda, 4 Kasım 2016 itibariyle yürürlüğe girmiştir. Paris Anlaşması'nın uzun dönemli hedefi, endüstrileşme öncesi döneme kıyasla küresel sıcaklık artışının 2°C'nin olabildiğince altında tutulmasıdır. Aralık 2019'da Madrid/İspanya'da COP25 gerçekleştirilmiş ve sonuç bildirisinde öne çıkan tek madde, 2020'de karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla ilgili ülkelerden daha geniş kapsamlı taahhütler sunulması istenmiştir. Son olarak Paris Anlaşması ile ilgili gelişmeler değerlendirilerek 2021'de Glasgow/İngiltere'de COP26 gerçekleştirilmiştir.

Sera gazı emisyonlarıyla ilgili ülkemizdeki duruma bakıldığında ise, Nisan 2019'da TÜİK tarafından Türkiye'nin 2017 yılı sera gazı emisyon istatistiklerinin açıklandığı görülmektedir. Buna göre 2017 yılında Türkiye'nin toplam seragazı emisyon miktarı, artışına devam ederek 526,3 milyon tona ulaşmış ve kişi başına düşen seragazı emisyon miktarı ise 6,6 ton CO₂eşd./kişi olarak kaydedilmiştir. Bu değerler, 1990 yılına göre %140,1 artış olduğunu göstermektedir. On Birinci Kalkınma Planı'na göre, 2023 yılında yeni kurulan yenilenebilir enerji santralleri ile kaçınılan toplam CO₂ emisyonu miktarının 18,0 milyon ton olarak hedeflenmektedir. 2011- 2023 İklim Değişikliği Eylem Planına (2012) göre 2023 yılına kadar sanayi sektöründe üretilen Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) başına eşdeğer CO₂ yoğunluğunun azaltılması amaçlanmakta ve sera gazı emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve kullanılması hedeflenmektedir. 2017 yılında kümülatif CO₂ emisyonlarının yaklaşık %86,3'ü enerjiden, %13,4'ü endüstriyel işlemler ve ürün kullanımından, %0,3'ü ise tarımsal faaliyetler ve atıktan kaynaklanmıştır. CO₂ emisyonlarının birincil ve ikincil alt sektör kırılımında; yakıtların yanması, çevrim ve enerji alt sektörü, mineral ürünler ve metal üretimi alt sektörlerinin ağırlığı diğerlerine göre fazladır.

Diğer yandan enerji sektörü, Türkiye'de insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının başlıca kaynağı olduğundan, Türkiye'nin Yedinci Ulusal Bildirimi'ne (2018) göre enerji verimliliği çalışmaları ile Türkiye'nin enerji yoğunluğunun (milli gelir başına tüketilen enerji) 2023 yılına kadar, 2011 yılına kıyasla %20 azaltılması

hedeflenmiştir. Dolayısıyla tüm sektörlerde CO₂ emisyonu tutulmalı, depolanmalı veya yeni ürünlere dönüştürülmelidir. CO₂ yakalama ve depolama, fosil yakıtlardan elektrik üretimi prosesleri için sürdürülebilirliğe yönelik umut verici bir tekniktir.

2. Karbondioksit Tutucu Malzemeler (Carbondioxide Adsorbent Material)

Atmosferdeki CO₂'i tutarak depolamak ve muhafaza etmek mümkündür. CO₂ tutma işlemi, kimyasal veya fiziksel olarak diğer gaz ürünlerden ayrılması işlemidir. CO₂ tutulduktan sonra basınç altında sıkıştırılarak yoğunluğu artırılır. Yoğunluğu artan CO₂ gazı, tuz yataklarına, petrol, doğal gaz, kömür yataklarına, okyanus ve derin deniz diplerine enjeksiyonla gönderilmektedir. CO₂ tutma işlemi; gazın hacmine, kısmi basıncına ve uygun bir depoya olan yakınlığı gibi özelliklere bağlıdır (Özktulu, 2014).

Fosil yakıtlardan (kömür, doğal gaz veya petrol) elektrik üretimi sonucunda oluşan CO₂'in tutulmasına yönelik olarak, yanma öncesi (pre-combustion), yanma sonrası (post-combustion) ve Oxi-yakıt yakım (oxyfuel combustion) olmak üzere üç temel yaklaşım vardır. Bunlar arasında yanma öncesi ve yanma sonrası CO₂ tutma yöntemleri; adsorpsiyon, düşük sıcaklıkta yoğunlaştırma, membran teknikleri, mineralleştirme, biyomineralleştirme ile rejeneratif uzaklaştırma olarak özetlenebilmektedir. Bunun yanı sıra son dönemlerde algilerle ilgili çalışmalar da gündemdedir (Akgül vd., 2022). Günümüzde santraller için yanma sonrası ve yanma öncesi sistemleri, CO₂'in %85-95'ini tutabilmektedir. Oxy-yakıt yakım sistemleri ise pratikte, CO₂'in hemen hemen tümünü tutabilecek düzeydedir (Beton, 2011).

En yaygın kullanılan yanma sonrası tutma yöntemleri, adsorpsiyon, kriyojenik distilasyon ve membran ayırma teknikleridir (Aaron ve Tsouris 2005; Hsu vd., 2010). Bu yöntemler içerisindeki katı madde adsorpsiyonunun diğer yöntemlere göre, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, uzun zamanlı stabilite, düşük rejenerasyon enerjisi ve düşük maliyet gibi avantajları vardır (Yaumi vd., 2017). Literatürde yaygın olarak CO₂ adsorplanmasında kullanılan malzemeler aktif karbonlar (Sevilla ve Fuertes 2011), aktif karbon fiberler (Activated carbon fibers, ACF'ler) (Choma vd., 2016), karbon nanotüpler (Carbon nanotube, CNT'ler) (Ghosh ve Ramaprabhu 2019), grafen tabakaları (Chandra vd., 2012), grafen oksit (Chowdhury vd., 2015), moleküler elek (Carruthers vd., 2012), zeolitler (Lu vd., 2008), silika bazlı malzemeler (Abd vd., 2020) ve metal-organik çerçevelerdir (metal-organic frameworks, MOF'lar) (Yazaydın ve diğ., 2009). Bu adsorbanlardan bazılarının, CO₂ adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Tablodaki değerler belirli koşullar altında, malzemelerin saf hallerindeki adsorpsiyon kapasitelerini göstermekte olup, yapılan modifikasyonlarla bu değerleri artırmak mümkündür.

Tablo 1. Literatürdeki Bazı Adsorbanların CO₂ Adsorpsiyon Kapasiteleri (CO₂ Adsorption Capacities of Some Adsorbents in Literature)

Malzemeler	Sıcaklık (K)	Adsorpsiyon Kapasitesi (mmol g ⁻¹)	Referans
Zeolit	301	2,35	(Dantas vd., 2011)
Aktif karbon Fiber	363,15	1,75	(Zhou vd., 2012)
MOF ¹	298	4,1	(Wickramaratne ve Jaronec, 2013)
Ticari Aktif Karbon	313	2,00-2,20	(Sreńscek-Nazzal vd., 2015)
MWCNT ²	303	1,10	(Rahimi vd., 2019)

¹ MOF: Metal organik çerçeveler, ² MWCNT: Çok duvarlı karbon nanotüp

CO₂ adsorplanmasında kullanılan bu malzemelerin endüstriyel uygulamaları, adsorpsiyon kapasitesi yüksek olmasına rağmen sınırlıdır. Bunlar arasında MOF'lar mükemmel adsorpsiyon kapasitelerine rağmen, çoğu karbonlu adsorbandan, özellikle piyasada bulunan aktif karbonlardan çok daha pahalıdırlar (Yaumi vd., 2017). Baca gazı önemli miktarda su buharı içermektedir; bu nedenle, MOF'ların hidrofobiklik ve neme karşı uzun süreli stabilite açısından önemli bir gelişme göstermedikleri sürece fosil yakıtla çalışan enerji santrallerinde CO₂ adsorbanı olarak kullanılması olası değildir (Wickramaratne ve Jaronec 2013).

CO₂ adsorbanlarının genellikle şu özelliklere sahip olmaları gerekmektedir: (i) yüksek CO₂ tutma kapasitesi, (ii) yüksek adsorpsiyon oranı, (iii) adsorpsiyon bölgeleri için diğer moleküllere (özellikle N₂) karşı yüksek seçicilik, (iv) kolay rejenerasyon, (v) düşük maliyet ve yüksek kullanılabilirlik, (vi) tekrarlanan adsorpsiyon / desorpsiyon döngülerinden sonra yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesi ve (vii) yeterli mekanik mukavemet (Chiang ve Juang 2017; vd., 2002).

CO₂ adsorpsiyon malzemeleri, boruların tıkanması ve yeniden kullanılmaması gibi sorunlara da yol açabilmektedir. Bu nedenle, sadece yeterli CO₂ tutma özelliği değil, aynı zamanda oldukça esnek ve mekanik olarak yeterince güçlü olması gereken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, çeşitli karbon katkılı polimerlerden oluşan kompozit malzemeler, CO₂ tutma için geliştirilebilmektedir. Ek olarak, bu tür kompozit malzemelerin CO₂ seçiciliğini ve adsorpsiyonunu arttırmak için çeşitli fonksiyonel gruplar da kullanılmaktadır (Zainab vd., 2017). Tablo 2'de literatür çalışmalarının adsorbanların fonksiyonel grup öncesinde ve sonrasındaki adsorpsiyon kapasitesilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmada, saf haldeki adsorbanlara fonksiyonel grup eklendiğinde, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinin arttığı görülmektedir. Amin fonksiyonel grubu ve CO₂ arasındaki reaksiyon, susuz koşullar altında amonyum karbonat üretmektedir. Böylece bu durum korozyonun ortadan kaldırılmasını arttıracak ve rejenerasyon maliyeti düşecektir (Yaumi vd., 2017). Aktif karbonlar ve zeolitler, araştırma bağlamında en sık kullanılan adsorbanlardır. CO₂ adsorpsiyon çalışmalarında genellikle yüksek basınçlarda zeolitler, düşük basınçlarda aktif karbon ve karbonlu malzemeler tercih edilmiştir. Bunun en önemli nedeni zeolitler nem ile temas ettiğinde, adsorpsiyon kapasitesinde azalma meydana gelmesidir. Enerji santrallerindeki baca gazları su buharı içerdiğinden, adsorbanların suya hassasiyeti önemli bir sorundur (Sun vd., 2013). Bu yüzden zeolitler CO₂ adsorbanı olarak çok sık kullanılmamıştır. Bununla birlikte, adsorban olarak kullanılan karbonlu malzemelerin, zeolitlere göre avantajları, maliyetin daha düşük olması, düşük adsorpsiyon ısısından dolayı rejenerasyon için gereken düşük enerji ve ticari olarak üretim kolaylığıdır (Qasem vd., 2017). Gözenekli karbonlu malzemeler, düşük maliyet, yüksek termal kararlılık, kullanılabilirlik, geniş yüzey alanı, tasarımı kolay gözenek yapısı, suya karşı yüksek direnç gösterme gibi çok çeşitli çalışma koşullarında verimlilik gibi avantajlara sahiptirler ve bu özelliklerinden dolayı CO₂ adsorpsiyonu için tercih edilmektedirler (Chiang ve Juang 2017; Plaza vd., 2010). CNT'lerin, geniş bir yüzey alanına sahip olan içi boş ve katmanlı yapıları nedeniyle organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip oldukları da kanıtlanmıştır (Shawky vd., 2011). Gözenekli karbonlu malzemeler arasında en fazla çalışma, aktif karbonun CO₂ adsorpsiyonu ile ilgili yapılmıştır (Beton 2011; Thote vd., 2010; Maroto-Valer 2008).

Aktif karbonun modifiye edildiği Lu arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; CNT'ler, granül aktif karbon (GAC) ve zeolitleri, 3-aminopropiltiletoksisilan (APTS) ile modifiye etmişler ve elde edilen modifiye adsorbanları CO₂ tutucu olarak incelemişlerdir. CNT'nin ve zeolitin modifiye öncesi ve sonrasındaki adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 2'de verilmektedir. Aynı koşullar altında, modifiye edilmiş CNT'ler, en yüksek CO₂ adsorpsiyon performansı sergilemişlerdir (Lu vd., 2008).

Tablo 2. Adsorbanların Fonksiyonel Grup Öncesinde ve Sonrasındaki Adsorpsiyon Kapasitesileri (Adsorption Capacities before and after Functional Group of Adsorbents)

Adsorbanlar	Fonksiyonel Grup	Sıcaklık (K)	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg/g)	Referans
CNT	-	298	69,2	(Lu vd., 2008)
CNT	APTS ¹	298	96,3	(Lu vd., 2008)
Aktif Karbon	-	303	35,36	(Thote vd., 2010)
Aktif Karbon	N	303	41,0	Thote vd., 2010
Zeolit	-	298	63,5	(Lu vd., 2008)
Zeolit	APTS ¹	298	82,4	(Lu vd., 2008)

¹ APTS: 3-aminopropiltiletoksisilan

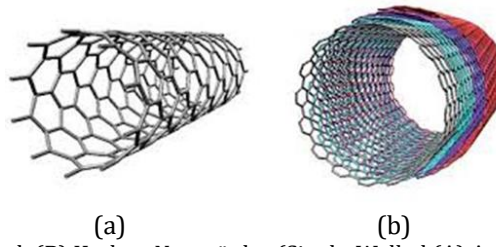
Yapılan çalışmalarda aktif karbonun, metal ve azot gruplarıyla yapılan modifikasyon işleminin CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Beton yaptığı çalışmada, zeytin çekirdeğinden ürettiği aktif karbonlara, demir, bakır ve vanadyum metallerinin ilave edilmesi ile oluşan modifikasyon işlemlerinin CO₂ adsorpsiyon kapasitelerine etkisini incelemiştir (Beton, 2011). Elde edilen adsorpsiyon verileri incelendiğinde, yapılan modifikasyon işlemlerinin aktif karbonun CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Chiang ve Juang'ın yaptıkları çalışmada da aktif karbonların metal oksitlerle modifiye edilmesinin adsorpsiyon kapasitelerini arttırdığı görülmüştür (Chiang ve Juang, 2017). Benzer şekilde Maroto-Valer vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, aktif karbonun yüzeyine modifiye edilen azot gruplarının da CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığını belirlemişlerdir.

Karbon tutma ve depolama alanında her geçen gün, yeni adsorpsiyon malzemeleri veya adsorbanların geliştirilmesi amacıyla hem deneysel hem de simülasyon yöntemleri kullanılarak araştırmalar yapılmaktadır (Ben-Mansour vd., 2016). Mezogözenekli karbon, karbon nanotüpler, grafen gibi karbonlu adsorbanlar, düşük

maliyetleri, kolay bulunabilirlikleri, düşük nem duyarlılığı, kolay yenilenebilirlik ve düşük rejenerasyon maliyetleri nedeniyle CO₂ yakalama için en etkili malzemelerdir (Sharma ve Dhir, 2021).

3. Karbondioksit Tutucu Olarak Karbon Nanotüplerden Kompozit Malzeme Üretimi (Production Of Composite Materials From Carbon Nanotubes As A Carbon Dioxide Adsorbent)

Karbon nano yapılarından birisi olan ve adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan CNT'ler ilk olarak 1991 yılında geliştirilmişlerdir. CNT'ler, grafen düzlemi örülü yapının bir silindir şeklinde sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla oluşurlar. Şekil 1'de gösterildiği gibi tek ve çok duvarlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek duvarlı karbon nanotüpler (Single Walled Carbon Nanotube: SWCNT) grafen katmanı bir levhanın çevresine sarıldığı zaman elde edilmekte olup, çapları yaklaşık 0,7-10 nm'dir. Çok duvarlı karbon nanotüpler (Multi-Walled Carbon Nanotube: MWCNT) ise üst üste birkaç grafenin konulup katlanmasıyla iç içe geçmiş CNT'lerden oluşmaktadır. Karbon nano yapılar; çok küçük boyutlarda olmaları, sadece karbon elementinden oluşmaları, fiziksel özelliklerinin detaylı olarak belirlenebilmesi ve deneylerde elde edilen verilerin karşılaştırılabilir olması nedeniyle nanobilimde önemli bir yere sahiptirler. Karbon, nano yapı halde doğal olarak bulunduğu gibi laboratuvar şartlarında da üretilebilmektedir.



Şekil 1. Tek Duvarlı (A) ve Çok Duvarlı (B) Karbon Nanotüpler (Single-Walled (A) And Multi-Walled (B) Carbon Nanotubes)

CNT üretiminde yaygın olarak ark boşaltımı, lazer aşındırma ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri kullanılır. Ark boşaltım metodu ucuz, basit ve yüksek sıcaklık gerektiren bir yöntem olup, tek ve çok duvarlı CNT üretmek mümkündür. Bu metot yüksek sıcaklık gerektirdiği için dezavantajlıdır. Lazer aşındırma yönteminde lazer ışını ile inert ortamda, grafit ve metal katalizör parçalarından oluşan karışım buharlaştırılarak CNT elde edilmektedir. Maliyeti yüksek olduğundan, endüstriyel üretim için elverişli değildir. CVD yöntemi ise, hidrokarbon içeren gazın metal katalizör yardımıyla nanotüp haline getirilmesidir. Bu yöntem reaksiyon süresi ve sıcaklığı, katalizör çeşidi, karbon kaynağı ve miktarı, ortam basıncı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ticari CNT üretiminde CVD metodu yaygın olarak kullanılmaktadır (Köse, 2016).

CNT'ler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan nanomalzemelerdir. CNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yüzeyel özelliklerine bağlıdır. CNT'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elemanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı iyileştirmeler yapılmalıdır. CNT'lerin matris tarafından iletilebilmesi, adhezyon gibi etkenler, CNT'lerin performansını etkileyen en önemli konulardır (Eskizeybek, 2012).

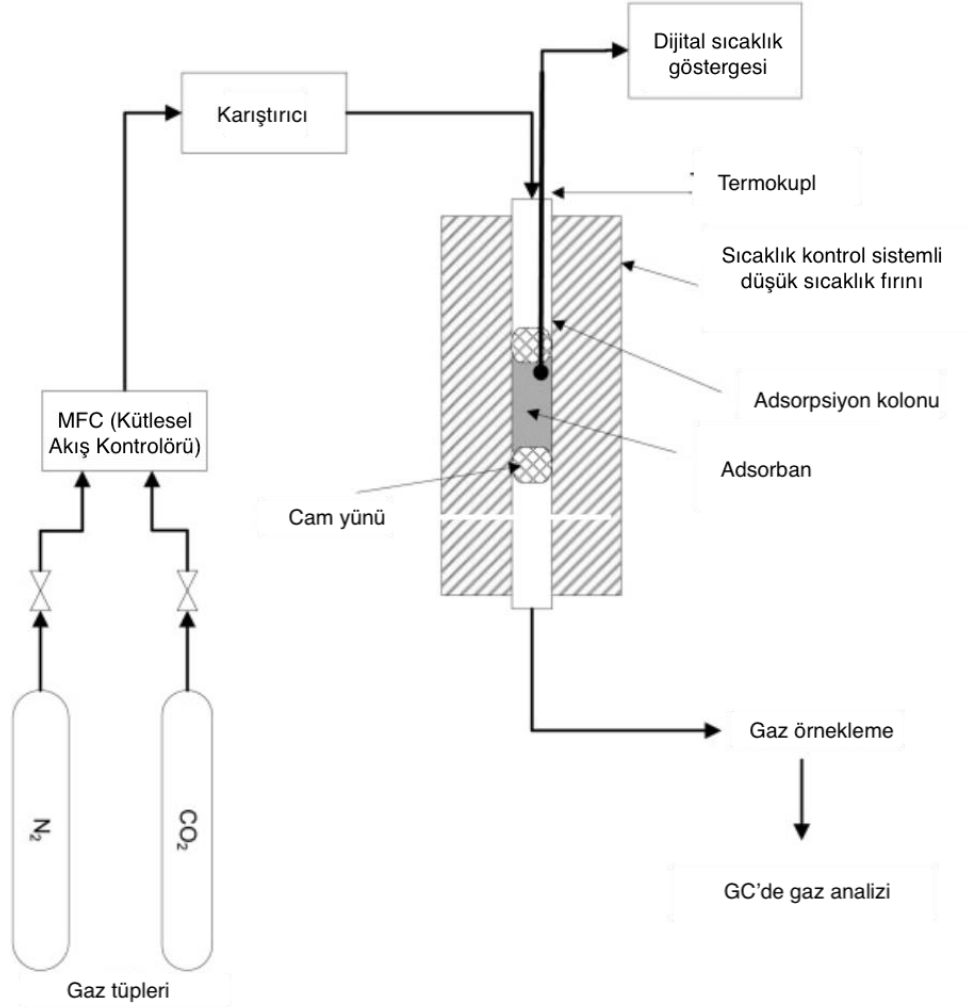
CNT'ler, ortam şartları değiştiğinde bu değişim karşısında hassas olduklarından, biyo-sensör, gaz sensörü, sıcaklık sensörü gibi uygulamalarda; nano boyutlarda olduklarından kapasitör ve gaz depolayıcı gibi nano düzeneklerde; yüksek filtreleme özellikleri nedeniyle filtre ve adsorban olarak; yüksek mukavemetleri sebebiyle de kompozit malzeme üretimi gibi pek çok alanda kullanılmaktadırlar.

Birden fazla malzemenin değişik tekniklerle bir araya getirildiği, amaca uygun özellikler taşıyan kompozit malzemeler birçok endüstri alanında geleneksel malzemelerin yerini almıştır. Özellikle mühendislik alanında yaşanan gelişmeler sayesinde yüksek dayanım/yoğunluk ve elastiklik modülü/yoğunluk oranı elde edilmesiyle daha üstün nitelikli kompozit malzeme üretimi ve performans özellikleri üzerine yapılan araştırma faaliyetleri de artarak devam etmektedir (Korkmaz vd., 2016).

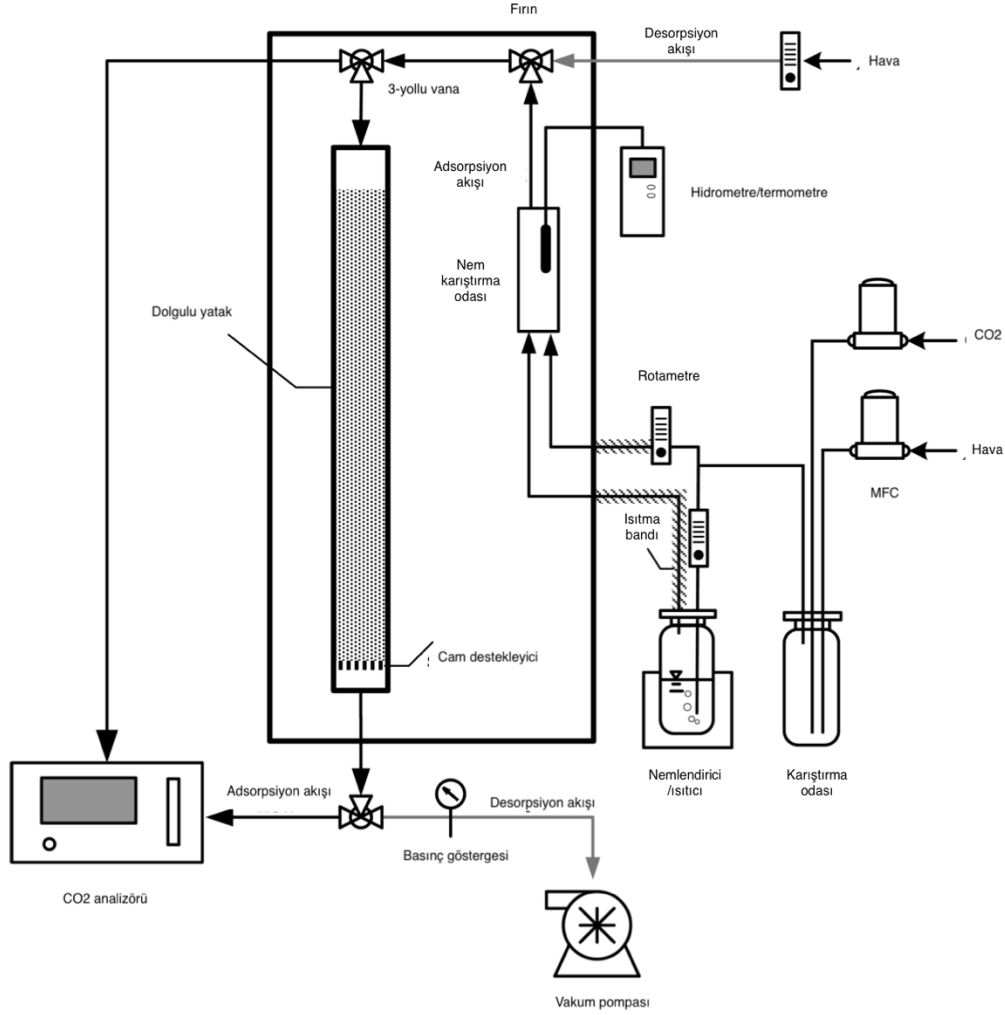
Çeşitli katkı maddelerinin ilave edilmesiyle, kompozit malzemenin katkısız kompozit malzemelere oranla fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı görülmüştür. Ancak, nanotakviyeli kompozitlerde en önemli nokta nanotakviyenin organik fazda iyi bir şekilde dağılarak topaklanma oluşturmamasıdır. Nanotakviyeli kompozit malzemelerde, kullanım alanına uygun olarak malzemenin hafiflemesi hedeflenirken, mekanik değerlerin düşmemesi de önemli bir husustur (Öner vd., 2017).

CO₂ tutucu olarak kullanılan kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin birleşiminden oluşan, bileşenlerin tek başına elde edemediği yüzeyel özelliklere sahip, yapay bir kombinasyonu ile üretilen malzemelerdir (Yaumi vd., 2017).

Yapılan araştırmalarda adsorbanlar arasında, CNT'nin CO₂'in tutulması için umut verici bir adsorban olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, MWCNT'lerin, SWCNT'lere kıyasla daha iyi CO₂ adsorbanı olduğu kabul edilmektedir (Shukrullah vd., 2016). MWCNT'ler, yüzey alanının fazla olması, mekanik mukavemeti ve termal stabilitesinin yüksek olması nedeniyle CO₂ adsorplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Rahimi vd., 2019). CNT'lerin CO₂ adsorpsiyonunda kullanımıyla ilgili tipik bir deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir. Bunun yanı sıra su buharına karşı seçiciliğin ve desorpsiyon özelliklerinin araştırıldığı daha kompleks bir deney düzeneği de Şekil 3'de görülmektedir.

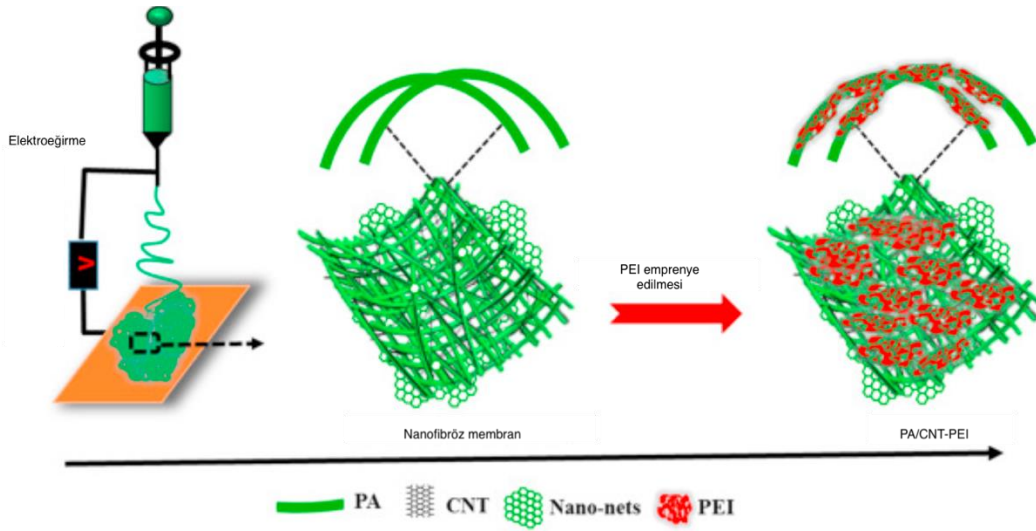


Şekil 2. Tipik Bir CO₂ Adsorpsiyon Deney Düzeneği (A Typical CO₂ Adsorption Experiment Setup) (Gui vd., 2013)



Şekil 3. Nemlendirici ve Desorpsiyon İçeren CO₂ Adsorpsiyon Deney Düzeneği (CO₂ Adsorption Experimental Setup Including Humidifier And Desorption) (Su vd., 2011)

Modifiye edilmiş CNT'lerin CO₂ tutucu olarak kullanımı ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur (Firdaus vd., 2021). Amin grupları birçok bileşikle reaksiyona girme yeteneğine sahiptir (Shen vd., 2007). Nitekim, amin ile modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT-NH₂), MWCNT'ye göre CO₂ adsorpsiyon kapasitesinde artışa sebep olduğu görülmüştür (Sun vd., 2013; Gui vd., 2013; Lourenço vd., 2021). Ye vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, 298K sıcaklıkta tetraetilenpentamin (CNTs-TEPA) ile modifiye edilmiş CNT'lerin karbon tutma kapasitesinin 2,97 mmol/g olduğunu, aynı koşullardaki ham CNT'nin adsorpsiyon kapasitesinin ise 0,5 mmol/g olduğu bulunmuştur. Zohdi vd.'nin (2019) yaptıkları çalışmada, aminle modifiye edilmiş MWCNT'leri CO₂ adsorpsiyon kapasitesini araştırmak için kullanmışlar ve Lewis baz özelliklerinden dolayı amin fonksiyonel gruplarının MWCNT yüzeyinde bulunmasının CO₂ adsorpsiyonunu artırdığını belirlemişlerdir (Şekil 4).



Şekil 4. PEI Emprenye Edilmiş PA/CNT Kompozit Nanofibröz Membranların Şematik Gösterimi (Schematic Illustration of PEI Impregnated PA/CNT Composite Nanofibrous Membranes) (Zohdi vd., 2019)

Su vd.'nin (2011) yaptıkları çalışmada CNT'lerin 3-aminopropiltrietoksisilan (APTES) ile modifikasyonunun CO₂ adsorpsiyon kapasitesini nasıl etkilediğini incelemişler ve CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu adsorbanın CO₂ adsorpsiyon kapasitesini 293 K sıcaklıkta yaklaşık 2,59 mol/kg olarak bulmuşlar ve bu modifikasyon işleminin CO₂ adsorpsiyon potansiyelini geliştirmek için etkili bir yöntem olacağını doğrulamışlardır.

CNT'lerin, geniş bir yüzey alanına sahip olan içi boş ve katmanlı yapılar olmaları nedeniyle organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için de iyi bir adsorpsiyon kapasitesine sahip oldukları bilinmektedir (Rahimi vd., 2019). CNT'leri kimyasal olarak aktif hale getirmek için yüzey aktif maddesi eklenmesi, CO₂ adsorplama potansiyellerini artırabilmektedir. Lee ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada MWCNT'ler üzerine polietileniminin emprenye edilmesiyle CO₂ adsorpsiyon kapasitesinin %200 oranında arttığı görülmüştür (Lee vd., 2015).

Tablo 3'de literatür çalışmalarının CNT'nin modifikasyon öncesi ve sonrasındaki sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Saf CNT'lerin modifiye edildikten sonra yüzey alanında azalma, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinde artış görülmüştür. Modifikasyondan sonra adsorbanların gözenek yapıları değişmektedir. Modifikasyon işleminden sonra adsorbanların yüzey alanındaki azalmasının sebebi, gözenek girişlerinin tıkanmasından kaynaklıdır.

Tablo 3. CNT'nin Modifikasyon Öncesi ve Sonrasındaki Adsorpsiyon Kapasiteleri (Adsorption Capacities Before And After CNT Modification)

Adsorban Malzeme	Koşullar	Yüzey Alanı (m ² g ⁻¹)		CO ₂ adsorpsiyon kapasitesi (mmol/g)		Referans
		Saf Adsorban	Modifiye edilmiş adsorban	Saf Adsorban	Modifiye edilmiş adsorban	
CNT/PEI ¹	T=298K P= 1 bar	272	174	0,61	2,13	(Lee vd., 2015)
Fe/Fe ₃ C@CN Ts	T=298 K P= 20 bar	392,3	196,8	7,4	15,4	(Ghosh ve Ramaprabhu, 2019)
CNT/DAP ²	T= 303 K P=17,3 bar	167,2	112,8	1,10	2,10	(Rahimi vd., 2019)
CNT/TEPA	T= 298 K P=0,02 bar	87,03	8,94	0,50	2,97	(Ye vd., 2012)
CNT/APTS	T= 293 K P= 1 bar	310,75	15,87	0,63	1,16	(Su vd., 2011)
CNT/PEI ¹	T=343 K P=1 bar	54,10	26,28	0,22	1,12	(Zhou vd., 2018)

¹ PEI: Polietilenimin, ² DAP: 1,3-diaminopropan

Literatürde PVA ve kitosanın CNT ile birlikte üretildiği kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Köysüren ve Köysüren yaptıkları çalışmada hazırladıkları PVA/CNT kompozitlerinin UV radyasyonu altındaki katı faz fotokatalitik bozunma özelliğini incelemişlerdir (Köysüren ve Köysüren, 2018). PVA nanofibrer ile kompozit

nanolifler karşılaştırıldığında, kompozit nanoliflerin UV radyasyonu altındaki katı-faz fotokatalitik bozunma veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Shawky ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kitosan ve CNT ile kompozit malzeme elde edilmiş, bu kompozit malzemenin atıksularda Hg (II) giderimi yaptığı görülmüştür (Shawky vd., 2011). PVA ve kitosanın, metal nanopartikülleri gibi farklı malzemelerle hazırlanmış kompozitlerinin mangan (Abdeen vd., 2015), bakır (Li vd., 2015), çinko (Dolgormaa vd., 2018) ve katyonik boya adsorpsiyonu (Mahdavinia vd., 2014) ile ilgili çalışmalar da mevcuttur.

Tablo 4'te gösterildiği gibi Osler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada kitosanın, CNT yüzeyine emprenye edilmesinin CNT'nin adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmektedir. Bu çalışmada, MWCNT'ler tarafından adsorbe edilen CO₂ miktarının, kitosanın MWCNT'lerin yüzeyine modifiye edilmesiyle %650 oranında artırılabilceğini göstermektedir. Bu oran başka malzeme ile modifiye edilen CNT'lere kıyasla daha yüksektir. Böylece kitosan, CO₂ adsorpsiyonu için CNT ile modifiye edilmelidir ve bu CNT'nin CO₂ adsorpsiyon kapasitesini geliştirebilmektedir (Osler vd., 2017).

Tablo 4. Kitosan ve Kitosan/MWCNT'nin Adsorpsiyon Kapasitesi (Adsorption Capacities of Chitosan and Chitosan/MWCNT)

Adsorban Malzeme	Koşullar	Adsorpsiyon Kapasitesi (mg CO ₂ / g adsorban)	Referans
Kitosan	T= 318 K P= 1 bar	9	(Osler vd., 2017)
MWCNTs	T=318 K P=1 bar	0,4	(Osler vd., 2017)
Kitosan/ MWCNTs	T=318K P= 1 bar	3	(Osler vd., 2017)

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu makalede kullanım kolaylığı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve seçiciliği, düşük rejenerasyon enerjisi ve düşük maliyetli olması nedeniyle CO₂ adsorpsiyonu için yaygın olarak kullanılan katı sorbentlere odaklanılmıştır. Bu literatür taramasından çıkarılan sonuçlara göre, kompozit malzemelerin metal ve azot gruplarıyla yapılan modifikasyon işleminin sonucunda CO₂ adsorpsiyon kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Bu makalede, son yıllarda nanobilim alanında pek çok sektörde kullanılmaları ve özellikle artan CO₂ emisyonlarının azaltılması konusunda, mekanik mukavemeti, içi boş yapısı, yüksek spesifik yüzey alanı ve kimyasal stabilitesi nedeniyle belirli koşullar altında gaz adsorpsiyonu için dikkat çeken CNT'lerle ilgili çalışmalar irdelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde CNT'lerin genellikle CVD yöntemi ile üretildiği görülmektedir. CNT'lerin CVD yöntemiyle metal katalizörlüğünde üretildiği göz önüne alınırsa, metal ilave edilmiş CNT'nin adsorban olarak kullanılabilceği öngörülmüştür. Literatürdeki çalışmalara göre, CNT'lerin modifiye edildikten sonra yüzey alanında azalma görülürken, CO₂ adsorpsiyon kapasitelerinde artış görülmüştür. Ayrıca, kitosan gibi doğal polimerler veya Poli Vinil Alkol (PVA) gibi yapay polimerlerle üretilecek CNT kompozitlerinin yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olabileceği düşünülmektedir. Söz konusu malzeme ve modifikasyonlarla yeni CO₂ adsorpsiyon çalışmalarının literatüre ışık tutacağı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 20ADP184 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Aaron, D., Tsouris, C., 2005. A review – Separation of CO₂ from flue gas. *Separation Science and Technology*, 40 (1-3), 321-348.
- Abd, A.A., Naji, S.Z., Hashim, A.S., Othman, M.R., 2020. Carbon dioxide removal through physical adsorption using carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104142.
- Abdeen, Z., Mohammad, S. G., Mahmoud, M. S., 2015. Adsorption of Mn (II) ion on polyvinyl alcohol/chitosan dry blending from aqueous solution. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 3, 1-9.
- Açıkgöz, M. A., Sargin, O., Kara, Ş. M., 2012. Karbondioksit Emisyonunun Azaltılmasında Yeni Yaklaşımlar. *Ekoloji 2012 Sempozyumu*, 03-05 Mayıs 2012, 1-7.
- Akgül, G., Varol, M., Erdem Ünşar, A., 2022. CO₂ Derişiminin ve Azot Stresinin *Chlorella Vulgaris* Mikroalg Kültürünün CO₂ Tutma Verimine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 698-721.
- Altınöz, E., Terzi, S., 2020. Karayollarında Üstyapı Tipinin Karbon Ayak İzi Etkisinin Araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve*

- Tasarım Dergisi, 8(2), 451-459.
- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Bamidele, O. E., Basha, M., Qasem, N. A. A., Peedikakkal, A., ... Ali M., 2016. A review–Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations. *Applied Energy*, 161, 225-255.
- Beton, İ., 2011. Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbonla CO₂ Adsorpsiyonunun İncelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Türkiye.
- Chandra, V., Yu, S. U., Kim, S. H., Yoon, Y. S., Kim, D. Y., Kwon, A. H., ... Kim, K. S., 2012. Highly selective CO₂ capture on N-doped carbon produced by chemical activation of polypyrrole functionalized graphene sheets. *Chemical communications*, 48 (5), 735-737.
- Chiang, Y. C., Juang, R. S., 2017. A review – Surface modifications of carbonaceous materials for carbon dioxide adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 214-234.
- Choma, J., Osuchowski, L., Marszewski, M., Dziura, A., Jaroniec, M., 2016. Developing microporosity in Kevlar®-derived carbon fibers by CO₂ activation for CO₂ adsorption. *Journal of CO₂ Utilization*, 16, 17-22.
- Carruthers, J. D., Petruska, M. A., Sturm, E. A., Wilson, S. M., 2012. Molecular sieve carbons for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*, 154, 62-67.
- Chowdhury, S., Parshetti, G. K., Balasubramanian, R., 2015. Post-combustion CO₂ capture using mesoporous TiO₂/graphene oxide nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 263, 374-384.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2012. Türkiye'nin İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı 2011–2023.
- Dam M. M., 2014. Sera gazı emisyonlarının makroekonomik değişkenlerle ilişkisi: OECD ülkeleri için panel veri analizi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın, Türkiye.
- Dantas, T. L., Luna, F. T., Silva Jr, I. J., Torres, A. E., De Azevedo, D. C. S., Rodrigues, A. E., Moreira, R. F. P. M. 2011. Modeling of the fixed-bed adsorption of carbon dioxide and a carbon dioxide-nitrogen mixture on zeolite 13X. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28 (3), 533-544.
- Dolgormaa A., Lv C. J., Li Y., Yang J., Yang J. X., Chen P., Wang H.P., Huang J., 2018. Adsorption of Cu (II) and Zn (II) ions from aqueous solution by gel/PVA-modified super-paramagnetic iron oxide nanoparticles. *Molecules*, 23(11), 2982.
- Eskizybek, V., 2012. Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.
- Firdaus, R.M., Desforjes, A., Mohamed, A.R., Vigolo, B., 2021. Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study. *Progress in adsorption capacity of nanomaterials for carbon dioxide capture: A comparative study. Journal of Cleaner Production*, 328, 129553.
- Ghosh, S., Ramaprabhu, S., 2019. Green synthesis of transition metal nanocrystals encapsulated into nitrogen-doped carbon nanotubes for efficient carbon dioxide capture. *Carbon*, 141, 692-703.
- Gui, M. M., Yap, Y. X., Chai, S. P., Mohamed, A. R., 2013. Multi-walled carbon nanotubes modified with (3-aminopropyl) triethoxysilane for effective carbon dioxide adsorption. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 65-73.
- Hsu, S. C., Lu, C., S F., Zeng, W., Chen, W., 2010. Thermodynamics and regeneration studies of CO₂ adsorption on multiwalled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Science*, 65 (4), 1354-1361.
- Korkmaz, N., Çakak, E., Dayık, M., 2016. Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (2), 338-353.
- Köse, Ü., 2016. Karbon Nanotüp Esaslı Yüksek Performanslı Liflerin Üretim Yöntemleri, Mekanik ve Yapısal Özellikleri Ve Uygulama Alanları. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye.
- Köysüren, H. N., Köysüren, Ö., 2018. Povinil alkol kompozit nanoliflerin hazırlanması ve katı-faz polivinil alkolün fotokatalitik bozunması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1411-1418.
- Lee, M. S., Lee, S. Y., Park, S., 2015. Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotubes impregnated with polyethyleneimine for carbon dioxide capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 3415-3421.
- Li, L., Wang, Z., Ma, P., Bai, H., Dong, W., Chen, M., 2015. Preparation of polyvinyl alcohol/chitosan hydrogel compounded with graphene oxide to enhance the adsorption properties for Cu (II) in aqueous solution. *Journal of Polymer Research*, 22 (8), 150.
- Lourenço, M.A.O., Fontana, M., Jagdale, P., Pirri, C.F., Bocchini, S., 2021. Improved CO₂ adsorption properties through amine functionalization of multi-walled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128763.
- Lu, C., Bai, H., Wu, B., Su, F., ve Hwang, J. F., 2008. Comparative Study of CO₂ Capture by Carbon Nanotubes, Activated Carbons, and Zeolites. *Energy & Fuels*, 22, 3050-3056.
- Mahdavinia, G. R., Massoudi, A., Baghban, A., Shokri, E., 2014. Study of adsorption of cationic dye on magnetic kappa-carrageenan/PVA nanocomposite hydrogels. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (3), 1578-1587.
- Maroto-Valer, M.M., Lu, Z., Zhang, Y., Tang, Z., 2008. Sorbents for CO₂ capture from high carbon fly ashes. *Waste Management*, 28 (11), 2320-2328.
- Osler, K., Twala, N., Oluwasina, O.O., Daramola, M.O., 2017. Synthesis and Performance Evaluation of Chitosan/Carbon Nanotube (Chitosan/MWCNT) Composite Adsorbent for Post-combustion Carbon Dioxide Capture. *Energy Procedia*, 114, 2330-2335.
- Öner, G., Önal, H. Y., Pekbey, Y., 2017. Karbon nanotüp katkılı camlifi-epoksi kompozitlerin termal ve eğilme özelliklerinin araştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 8 (4), 805-816.
- Özkutlu, M., 2014. İyonik Sıvı - Amin İkili Sisteminin CO₂ Absorpsiyonu Kinetiği. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Plaza, M. G., García, S., Rubiera, F., Pis J. J., Pevida, C., 2010. Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies. *Chemical Engineering Journal*, 163 (1-2), 41-47.
- Qasem, N. A., Ben-Mansour, R., Habib, M. A., 2017. Enhancement of adsorption carbon capture capacity of 13X with optimal incorporation of carbon nanotubes. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 8 (3), 219-230.
- Rahimi, K., Riahi, S., Abbasi, M., Fakhroueian, Z., 2019. Modification of multi-walled carbon nanotubes by 1, 3-diaminopropane to increase CO₂ adsorption capacity. *Journal of Environmental Management*, 242, 81-89.

- Sevilla, M., Fuertes, A. B., 2011. Sustainable porous carbons with a superior performance for CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*, 4 (5), 1765-1771.
- Sharma, H., Dhir, A., 2020. Capture of carbon dioxide using solid carbonaceous and non-carbonaceous adsorbents: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 851-873.
- Shawky, H. A., El-Aassar, A.H.M., Abo-Zeid, D.E., 2011. Chitosan/Carbon Nanotube Composite Beads: Preparation, Characterization, and Cost Evaluation for Mercury Removal from Wastewater of Some Industrial Cities in Egypt. *Journal of Applied Polymer Science*, 125, E93-E101.
- Shen, J., Huang, W., Wu, L., Hu, Y., Ye, M., 2007. Study on amino-functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering*, 464 (1-2), 151-156.
- Shukrullah, S., Mohamed, N. M., Shaharun, M. S., Ullah, S., Naz, M. Y., 2016. Effective CO₂ adsorption on pristine and chemically functionalized MWCNTs. In *AIP Conference Proceedings*, 1787 (1), 050025.
- Sreńscek-Nazzal, J., Narkiewicz, U., Morawski, A. W., Wróbel, R. J., & Michalkiewicz, B. 2015. Comparison of optimized isotherm models and error functions for carbon dioxide adsorption on activated carbon. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60 (11) 3148-3158.
- Su, F., Lu, C., Chen, H. S., 2011. Adsorption, desorption, and thermodynamic studies of CO₂ with high-amine-loaded multiwalled carbon nanotubes. *Langmuir*, 27 (13), 8090-8098.
- Sun, N., Sun, C., Liu, H., Liu, J., Stevens, L., Drage, T., ... Sun, Y., 2013. Synthesis, characterization and evaluation of activated spherical carbon materials for CO₂ capture. *Fuel*, 113, 854-862.
- Thote, J.A., Iyer, K.S., Chatti, R., Labhsetwar, N.K., Biniwale, R.B., Rayalu, S.S., 2010. In Situ Nitrogen Enriched Carbon for Carbon Dioxide Capture. *Carbon*, 48, 396-402.
- Tiwari, D., Goel, C., Bhunia, H., Bajpai, P. K., 2017. Melamine-formaldehyde derived porous carbons for adsorption of CO₂ capture. *Journal of Environmental Management*, 197, 415-427.
- Wickramaratne, N. P., Jaroniec, M., 2013. Activated carbon spheres for CO₂ adsorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (5), 1849-1855.
- Wickramatne, N., Jaroniec, M., 2013. Importance of small micropores in CO₂ capture by phenolic resin-based activated carbon spheres. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 112-116.
- Yaumi, A. L., Bakar, M. A., Hameed, B. H., 2017. Recent advances in functionalized composite solid materials for carbon dioxide capture. *Energy*, 124, 461-480.
- Yazaydin, A. O., Snurr, R. Q., Park, T. H., Koh, K., Liu, J., LeVan, M. D., ... Low, J. J., 2009. Screening of metal-organic frameworks for carbon dioxide capture from flue gas using a combined experimental and modeling approach. *Journal of the American Chemical Society*, 131 (51), 18198-18199.
- Ye, Q., Jiang, J., Wang, C., Liu, Y., Pan, H., Shi, Y., 2012. Adsorption of low-concentration carbon dioxide on amine-modified carbon nanotubes at ambient temperature. *Energy & Fuels*, 26 (4), 2497-2504.
- Yong, Z., Mata, V., Rodrigues, A. E., 2002. Adsorption of carbon dioxide at high temperature—a review. *Separation and Purification Technology*, 26 (2-3), 195-205.
- Zainab, G., Iqbal, N., Babar, A. A., Huang, C., Wang, X., Yu, J., Ding, B., 2017. Free-standing, spider-web-like polyamide/carbon nanotube composite nanofibrous membrane impregnated with polyethyleneimine for CO₂ capture. *Composites Communications*, 6, 41-47.
- Zhou Z., Balijepalli S. K., Nguyen-Sorenson A. H., Anderson C. M., Park J. L., ve Stowers K. J., 2018. Steam-stable covalently bonded polyethyleneimine modified multiwall carbon nanotubes for carbon dioxide capture. *Energy & Fuels*, 32(11), 11701-11709.
- Zhou, Z., Wang, Z., Zuo, R., Zhou, Y., Cao, X., Cheng, K., 2012. The surface structure and chemical characters of activated carbon fibers modified by plasma. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7(S2), 245-252.
- Zohdi S., Anbia M., Salehi S., 2019. Improved CO₂ adsorption capacity and CO₂/CH₄ and CO₂/N₂ selectivity in novel hollow silica particles by modification with multi-walled carbon nanotubes containing amine groups. *Polyhedron*, 166, 175-185.