



**CO₂ ADSORPSİYONU İÇİN BİTKİSEL KAYNAKLI
AKTİF KÖMÜR ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

Sedanur ARMUT

Yüksek Lisans Tezi

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Özlem KORKUT

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
TEMEL İŞLEMLER VE TERMODİNAMİK BİLİM DALI

**CO₂ ADSORPSİYONU İÇİN BİTKİSEL KAYNAKLI AKTİF KÖMÜR ÜRETİMİ VE
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

(Production And Performance of Plant-Derived Activated Charcoal For CO₂ Adsorption)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEDANUR ARMUT

Danışman: Prof. Dr. Özlem KORKUT

Erzurum
Eylül, 2025



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof.Dr. Özlem KORKUT danışmanlığında Sedanur ARMUT tarafından hazırlanan “**CO2 ADSORPSİYONU İÇİN BİTKİSEL KAYNAKLI AKTİF KÖMÜR ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ**” başlıklı çalışma 12/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği - Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Bilim Dalı'nda **Yüksek Lisans** tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr. Aysun TÜRKMEN <i>GİRESUN ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi (Danışman):	Prof.Dr. Özlem KORKUT <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza
Jüri Üyesi:	Prof.Dr. Bahar BAYRAK <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	e-imza

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

19/09/2025
Prof.Dr. Alper NUHOĞLU
Enstitü Müdürü
e-imza

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Özlem KORKUT danışmanlığında sunulan “CO₂ Adsorpsiyonu İçin Bitkisel Kaynaklı Aktif Kömür Üretimi ve Performansının İncelenmesi ” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	10	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	11	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	15	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sedanur ARMUT	Prof. Dr. Özlem KORKUT
12.8.2025	12.8.2025
İmza:Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez sürecinin her aşamasında bilgi, tecrübe ve desteğiyle yanımda olan, yol gösterici tutumuyla beni her zaman motive eden değerli danışmanım Prof. Dr. Özlem KORKUT'a en derin saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisiyle çalışmak, akademik gelişimim açısından benim için büyük bir şans olmuştur.

Ayrıca tez sürecine katkılarıyla değer katan kıymetli hocalarım Doç.Dr. Jale NAKTİYOK'a ve Prof.Dr. Bahar BAYRAK'a, numune analizlerim için Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) ve çalışanlarına, bu süreçte katkıda bulunan tüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, sabırları, sevgileri ve fedakarlıklarıyla beni bu noktaya getiren canım aileme sonsuz teşekkür ederim. Varlıklarıyla bana güç verdikleri ve her zaman inandıkları için minnettarım.

Son olarak bu çalışmaya FYL-2024-14747 numaralı Yüksek Lisans Tez Projesi ile finansal destek sağlayan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Sedanur ARMUT

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CO₂ ADSORPSİYONU İÇİN BİTKİSEL KAYNAKLI AKTİF KÖMÜR ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Sedanur ARMUT

Eylül 2025

Amaç: Dünyamızı tehdit eden en önemli sorunlardan biri iklim değişikliği ve küresel ısınmadır. Bu sorunun ana nedeni ise atmosfere salınan sera gazlarıdır. Sera gazlarını en büyük oranla CO₂ oluşturmaktadır. Son yıllarda CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Bu çalışmada Erzurum ve yöresinde kendiliğinden yetiştiği doğal ortamından toplanmış ve farklı konsantrasyonlardaki ZnCl₂ çözeltisiyle muamele edilmiş sütleğen (*Euphorbia stricta* L.) bitkisinden, farklı sıcaklıklarda N₂ atmosferi altında gerçekleştirilen piroliz sonucunda, uygun yüzey özelliklerine ve yüksek CO₂ adsorplama kapasitesine sahip aktif kömür üretimi amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışma için öncelikle yabani olarak yetişen sütleğen bitkisi çiçeklenme döneminden sonra toplanmıştır. Bitki kurutma, öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilmiştir. Aktif kömür elde etmek için 0,5M, 1,0M veya 3,0M konsantrasyonlarındaki ZnCl₂ çözeltileriyle muamele edildikten sonra 350 °C, 500 °C ve 600 °C sıcaklıklarında piroliz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin BET, SEM, EDX ve FTIR analizleri ile yüzey özellikleri, kimyasal yapıları ve CO₂ adsorpsiyon kapasiteleri belirlenmiştir.

Bulgular: ZnCl₂ aktivasyonunun numunelerin yüzey alanı büyüklüğü, gözenek boyutu, por hacmi gibi yüzey özelliklerinin yanı sıra CO₂ adsorplama kabiliyeti üzerinde de belirleyici bir etkiye sahip olduğu fakat aktivasyon sıcaklığının gözenek boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. En iyi CO₂ adsorplama performansını 37,74 cm³/g değeri ile 1M'lık ZnCl₂ ile aktive edilerek 600°C' de piroliz edilen numune göstermiştir..

Sonuçlar: Sonuç olarak düşük maliyetli ve kolay elde edilebilir sütleğen (*Euphorbia stricta* L.) bitkisinin 1 M ZnCl₂ ile aktivasyonunun ardından inert ortamda 600 °C de karbonizasyonu ile elde edilen aktif kömürün CO₂ adsorpsiyonunun yanı sıra farklı maddelerin adsorpsiyonunda da kullanılabilecek, uygun yüzey özelliklerine sahip bir adsorbent olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, piroliz, CO₂, sütleğen(*Euphorbia stricta* L.)

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

PRODUCTION AND PERFORMANCE OF PLANT-DERIVED ACTIVATED CHARCOAL FOR CO₂ ADSORPTION

Sedanur ARMUT

September 2025

Purpose: One of the most important problems threatening our world is climate change and global warming. The main cause of this problem is greenhouse gases released into the atmosphere. The greenhouse gases are predominantly CO₂. In recent years, efforts to reduce CO₂ emissions have gained significant importance. This study aimed to produce activated charcoal with suitable surface properties and high CO₂ adsorption capacity from euphorbia (*Euphorbia stricta* L.), collected from its natural habitat in Erzurum, treated with ZnCl₂ solutions at different concentrations and pyrolysed under a N₂ atmosphere at different temperatures.

Method: For this study, wild-growing euphorbia plants were collected after flowering. The plants were dried, ground, and sieved. To obtain activated charcoal, the samples were treated with ZnCl₂ solutions at concentrations of 0,5M, 1,0M veya 3,0M followed by pyrolysis at temperatures of 350°C, 500°C and 600°C. Surface properties, chemical structures, and CO₂ adsorption capacities were determined using BET, SEM, EDX, and FTIR analyses..

Findings: It was observed that ZnCl₂ activation had a decisive effect on the surface properties of the samples such as surface area size, pore size, pore volume as well as CO₂ adsorption ability, but the activation temperature did not have a significant effect on the pore size. The sample activated with 1M ZnCl₂ and pyrolyzed at 600°C showed the best CO₂ adsorption performance with a value of 37,74 cm³/g.

Conclusions: As a result, it is seen that the activated charcoal obtained by the activation of low-cost and easily obtainable spurge (*Euphorbia stricta* L.) plant with 1 M ZnCl₂ and then carbonization at 600 °C in an inert environment is an adsorbent with suitable surface properties that can be used in the adsorption of different substances as well as CO₂ adsorption.

Keywords: Adsorption, pyrolysis, CO₂, euphorbia (*Euphorbia stricta* L.)

İÇİNDEKİLER

İçindekiler Tablosu

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	iii
ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	ix
Simgeler.....	ix
BİRİNCİ BÖLÜM.....	10
GİRİŞ.....	10
İKİNCİ BÖLÜM	12
KURAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR.....	12
1.Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojisi (CCS).....	12
1.1.Yanma Öncesi Karbon Yakalama.....	13
1.2. Oksi-Yakıt Yanmasıyla Karbon Yakalama.....	13
1.3.Yanma Sonrası Karbon Yakalama	13
1.3.1. Membran Ayırma	14
1.3.2. Adsorpsiyon	14
2. Adsorpsiyon İzotermi.....	15
2.1. Langmuir İzotermi	16
2.2. Freundlich İzotermi	16
2.3.Dubinin- Radushkevich İzotermi	17
2.4. Temkin İzoterm Modeli	17
2.5. Jovanovic İzotermi	18
2.6. Halsey İzotermi	18
3. CO ₂ Yakalama Malzemeleri.....	20
3.1. Zeolitler	20

3.2. Metal Organik Çerçeveler (MOF).....	21
3.3.Karbon Bazlı Adsorbanlar.....	21
3.3.1. Karbon Nanotüpler (CNT)	21
3.3.2. Grafenler	21
3.3.3. Biyokömürler (BC)	22
3.3.4.Aktif Karbonlar (AC).....	22
4.Aktif Karbon Sentezi ve Aktivasyon Yöntemleri	24
4.1.Fiziksel Aktivasyon.....	25
4.2.Kimyasal Aktivasyon	25
4.2.1. Potasyum Hidroksit (KOH) Aktivasyonu	27
4.2.2. Fosforik Asit (H_3PO_4) Aktivasyonu	27
4.2.3. Çinko Klorür ($ZnCl_2$) Aktivasyonu.....	27
4.3. Piroliz	27
5.Pirolizi Etkileyen Faktörler	28
5.1.Sıcaklık.....	28
5.2. Isınma Oranı.....	28
5.3. Reaktör Tipi	28
6.Piroliz Çeşitleri	29
6.1.Yavaş(Geleneksel) Piroliz.....	29
6.2.Hızlı Piroliz	29
6.3.Flaş Piroliz	29
7. Literatür Araştırması	29
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	35
MATERYAL VE YÖNTEM	35
1.Materyallerin Temini ve Hazırlanması	35
2. Aktif Kömürlerin Hazırlanması	37
3. Aktif Kömürün Karakterizasyonu.....	39
3.1.BET Analizi	40
3.2. FT-IR Analizi	40
3.3. SEM Analizi.....	40
4. Bitkinin Karakterizasyonu	40
4.1.Elementel Analiz.....	40
4.2 Termogravimetrik Analiz.....	40
4.3. CO_2 Adsorpsiyon Deneyleri.....	40
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	41

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	41
1. Elementel Analiz	41
2. Termogravimetrik Analiz	42
3. BET Analizi	43
3.2. Sıcaklığın Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi	45
4. CO ₂ Adsorpsiyon İşlemi	47
4.1. ZnCl ₂ Konsatrasyonunun CO ₂ Adsorpsiyonuna Etkisi	47
4.2. Piroliz Sıcaklığının CO ₂ Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi	48
4. FT-IR Analizi	49
BEŞİNCİ BÖLÜM	54
SONUÇ ve ÖNERİLER	54
KAYNAKÇA	56
ÖZGEÇMİŞ	60

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Fiziksel adsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyonun karşılaştırılması.	15
Tablo 2. Kimyasal ve fiziksel aktivasyon yöntemleri arasındaki farklar (Katheresan vd, 2018).	25
Tablo 3. Yavaş ve hızlı piroliz arasındaki farklar (Sipra vd, 2018).....	29
Tablo 4. Farklı aktifleştirici ajanlar kullanılarak üretilen aktif karbonların BET karşılaştırmaları.....	31
Tablo 5. Sütleğen bitkisinin kısmi ve elementel analizi	41
Tablo 6. 350 °C de Piroliz Edilmiş Numunelerin BET analiz sonuçları	43
Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda üretilen aktif kömürlerin BET analizleri	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Karbon yakalama için kullanılan yöntemler	12
Şekil 2. Oksi-yakıt yanmasıyla karbon yakalama işlemi (Malini vd, 2023)	13
Şekil 3. Yanma sonrası CO ₂ yakalama işlemi (Malini vd, 2023).....	14
Şekil 4. Adsorpsiyon izotermi (kırmızı oklar adsorpsiyon, mavi oklar desorpsiyonu temsil etmektedir) (Jarosław Serafin vd, 2024)	19
Şekil 5. Aktif karbon, grafen ve zeolit	20
Şekil 6. Aktif karbon ön işlem adımlarının şematik diyagramı. (Dziejarski vd, 2023)	23
Şekil 7. Sütlegén (Euphorbia stricta L.) bitkisinin kök, gövde ve çiçek kısımları.....	36
Şekil 8. Sütlegén bitkisinin öğütme eleme işlemleri	36
Şekil 9. Aktif kömür üretim aşamaları	37
Şekil 10. Piroliz işleminin gerçekleştirildiği fırın	38
Şekil 11. Bitkinin ZnCl ₂ çözeltisi ile muamelesi ve süzülmesi işlemi	39
Şekil 12. 0,5 M'lık, 1 M'lık ve 3 M'lık ZnCl ₂ çözeltisiyle hazırlanan aktif kömürler	39
Şekil 13. Sütlegén bitkisine ait azot ortamında TG-DSC eğrileri	43
Şekil 14. Sütlegén bitkisi, piroliz bitki, 1 M ve 3M ZnCl ₂ ile aktive edilmiş aktif kömürlerin por dağılımları	45
Şekil 15. Farklı sıcaklıkta pirolize olmuş numunelerin gözenek dağılımları.....	46
Şekil 16. Piroliz bitki, 1 M ve 3M ZnCl ₂ ile aktive edilmiş aktif kömürlerin CO ₂ adsorpsiyon izotermi	47
Şekil 17. 1 M ZnCl ₂ ile aktive edilerek farklı sıcaklıkta piroliz edilmiş aktif kömürlerin CO ₂ adsorpsiyon izotermi	48
Şekil 18. Bitkiye piroliz ve ZnCl ₂ ' ün farklı konsantrasyonları ile aktivasyondan sonra piroliz işlemlerinin etkisini gösteren FTIR grafikleri.....	49
Şekil 19. 1 M ZnCl ₂ ile aktivasyondan sonra farklı sıcaklıklarda piroliz sonrası elde edilen aktif kömürlerin FTIR grafikleri	50
Şekil 20. Farklı konsantrasyondaki ZnCl ₂ ile hazırlanmış numunelerin EDX görüntüleri.....	51
Şekil 21. Farklı sıcaklıklardaki aktif kömürlerin EDX sonuçları.....	52
Şekil 22. Farklı sıcaklıklarda 1 M ZnCl ₂ eşliğinde piroliz olmuş bitkinin SEM görüntüleri...	52

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat derece
K	Kelvin
cm	Santimetre
g	Gram
m	Metre
M	Molarite

Kısaltmalar

CCTUS	Karbon yakalama, taşıma ve depolama teknolojisi
PCC	Yanma sonrası yakalama
CNT	Karbonnanotüp
BC	Biyokömür
AC	Aktif karbon
BET	Brunauer, Emmett, Teller
FT-IR	Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDX	Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektrometresi
BJH	Barrett, Joyner ve Halenda Yöntemi
IUPAC	Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği dünyanın karşı karşıya kaldığı en büyük sorunlardandır. Dünyada sanayileşmeyle birlikte sera gazı salınımı artmaya başlamıştır. Teknolojinin giderek gelişmesi ve hızlı nüfus artışıyla paralel olarak enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Bu da atmosfere daha fazla sera gazı salınması anlamına gelmektedir. Sera gazlarının atmosferde birikmesiyle dünya yüzeyi ısınmaktadır. Karbondioksit (CO_2), sera gazları içerisinde en büyük tehlikeyi oluşturan gazlardan biridir. Atmosferdeki CO_2 seviyelerindeki artış çevre ve insan üzerinde çeşitli etkiler ortaya çıkarmıştır. Bu etkiler arasında; yükselen deniz seviyeleri, aşırı hava olaylarının görülmesi, yağış düzenindeki değişiklikler, tarım ve halk sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri yer almaktadır (Dzierjarski vd, 2023).

Dünya çapındaki CO_2 emisyonlarının %40'ından fazlası fosil yakıt tesislerinden elektrik üretimi nedeniyle meydana gelmektedir. Enerji santrallerinin dışında rafineriler, amonyak, çimento, demir çelik fabrikaları CO_2 üreten başlıca endüstriyel kaynaklardır. (Blomen 2009). 1950'den bu yana atmosferik CO_2 seviyeleri endüstriyel faaliyetlerin bir sonucu olarak 280 ppm'den 419 ppm'ye yükselmiştir. Atmosferdeki CO_2 seviyelerindeki böylesine hızlı bir artış, 20. yüzyılda ortalama Dünya sıcaklığının yaklaşık 2 °C artmasına neden olmuştur. CO_2 emisyonları azaltılmazsa, atmosferik CO_2 seviyelerinin 2100 yılına kadar 550 ppm'ye çıkacağı tahmin edilmektedir. (Vorokhta vd, 2023). Bu emisyonları azaltmak için yeni teknolojiler araştırılmaktadır. Karbon yakalama, taşıma ve depolama teknolojisi (CCTUS) en çok araştırılan yöntemdir. Karbon yakalama ve depolama teknikleri genel olarak üç başlık altında incelenebilir. Bunlar; yanma öncesi yakalama (Pre-Combustion CO_2 Capture), yanma sonrası yakalama (Post-Combustion CO_2 Capture) ve Oksi-yakıt yanmayla karbon yakalamadır (Oxy-fuel). Bu yöntemler içinde yanma sonrası karbon yakalama diğerlerine göre daha yüksek verime sahiptir ve mevcut tesislere kolayca uyarlanabilir (Leung 2014). Yanma sonrasında, adsorpsiyon, membran veya absorpsiyon yoluyla karbondioksit yakalanabilir. Bu alternatifler arasında katı bazlı adsorpsiyon, düşük başlangıç yatırımı, kullanım kolaylığı, hızlı adsorpsiyon kinetiği ve adsorbent rejenerasyonu için minimum enerji gereksinimi gibi avantajlara sahiptir (Abolghasemi 2023). Bu nedenle CO_2 yakalamak için kullanılabilecek ucuz ve verimli adsorban malzemeleri birçok çalışmanın konusu olmuştur.

Bu çalışmada katı bir adsorbent kullanılarak adsorpsiyon yöntemiyle karbondioksit yakalama işlemi incelenmiştir. Bunun için Erzurum ve yöresinde doğal olarak yetişen sütleğen bitkisi (*Euphorbia stricta* L.) kullanılmıştır. Sütleğen bitkisinden direkt piroliz, çeşitli konsantrasyonlarda $ZnCl_2$ çözeltisi ile muamele edildikten sonra piroliz ve farklı sıcaklıklarda piroliz işlemleri ile farklı aktif kömür numuneleri üretilmiştir. Üretilen aktif kömürlerin yüzey alanlarının ve gözenek boyutlarının nasıl değiştiğini gözlemlemek için N_2 ortamında, CO_2 adsorpsiyonu performansını belirlemek için karbondioksit ortamında BET analizleri yapılmıştır. Karakterizasyonu desteklemek için FTIR, EDX ve SEM analizleri de incelenmiştir.

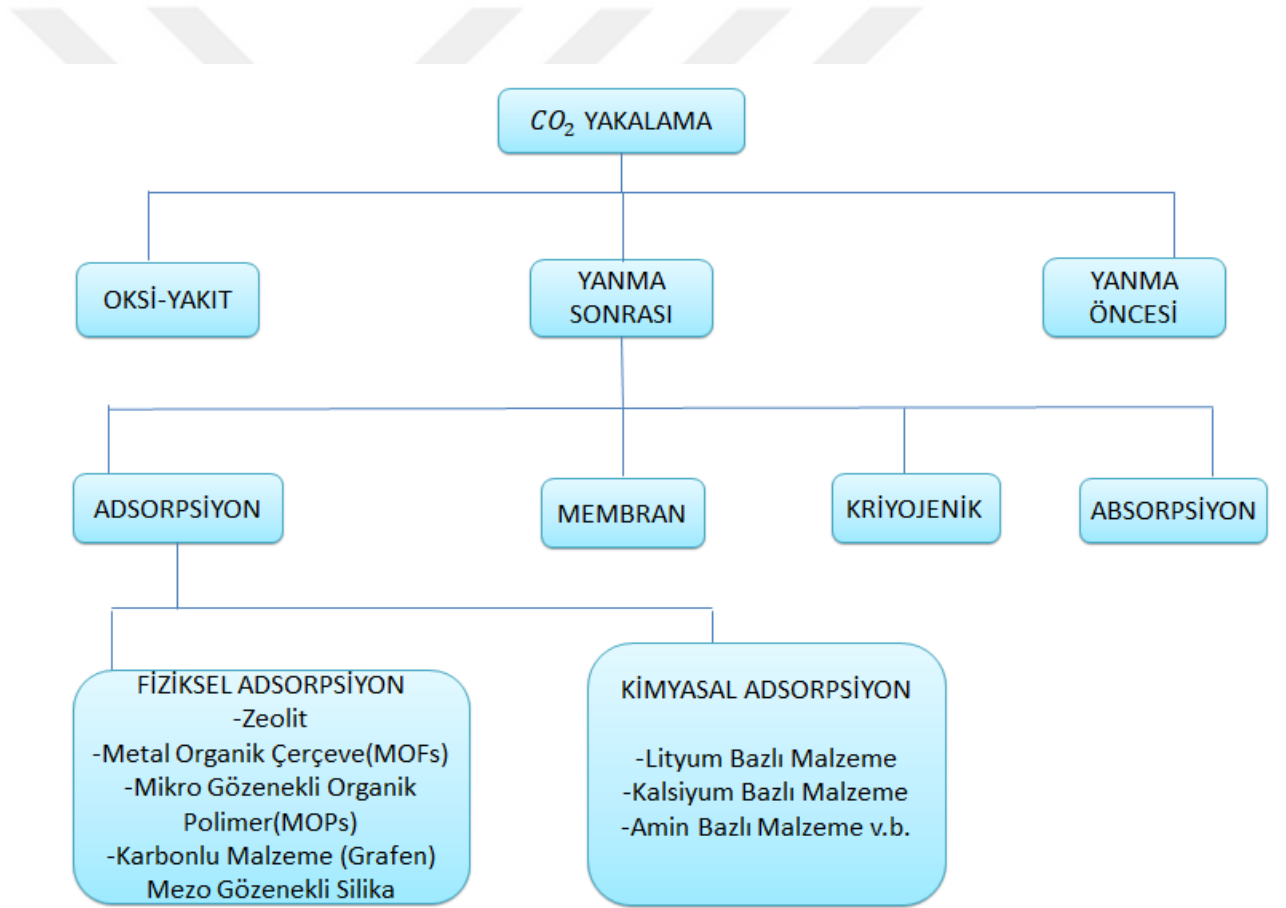


İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ARAŞTIRMALAR

1.Karbon Yakalama ve Depolama Teknolojisi (CCS)

CO₂ salınımının ciddi boyutlara gelmesiyle ülkeler bu duruma önlem almaya başlamıştır ve hem politik çalışmalar hem de bilimsel araştırma çalışmaları hız kazanmıştır. Dünyadaki karbon salınımlarını azaltmaya yönelik geliştiren yöntemler karbon yakalama ve depolama teknolojisi (CCS) olarak adlandırılır. Bu yöntemler yanma öncesi, yanma sonrası ve oksî-yakıt olarak sınıflandırılır. Adsorpsiyon, absorpsiyon membran ve kriyojenik ayırma en çok kullanılan yöntemlerdir (Yay vd, 2018). Şekil 1’de karbon yakalama yöntemleri gösterilmiştir.



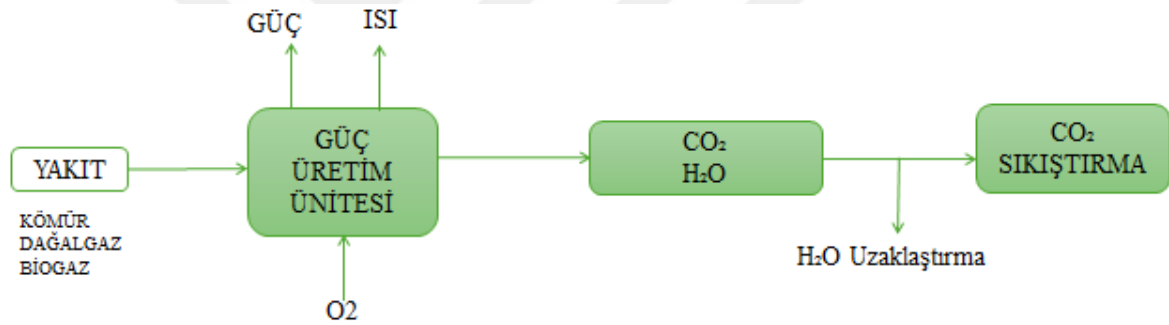
Şekil 1. Karbon yakalama için kullanılan yöntemler

1.1. Yanma Öncesi Karbon Yakalama

Yanma öncesi karbon yakalama, yüksek CO₂ içeriği (%15-16 mol), yüksek basınç (toplam basınç 20-70 bar) ve yüksek sıcaklık (300° C- 500° C) içeren yanma işleminden önce CO₂ 'in yakalanmasını ifade eder. Bu tür bir teknoloji, kısmi oksidasyon, yeniden şekillendirme ve su-gaz değişimi reaksiyonu dahil olmak üzere bir dizi reaksiyon yoluyla sentez gazı oluşumuna odaklanan yeni bir entegre gazlaştırma tesisini kapsar.

1.2. Oksi-Yakıt Yanmasıyla Karbon Yakalama

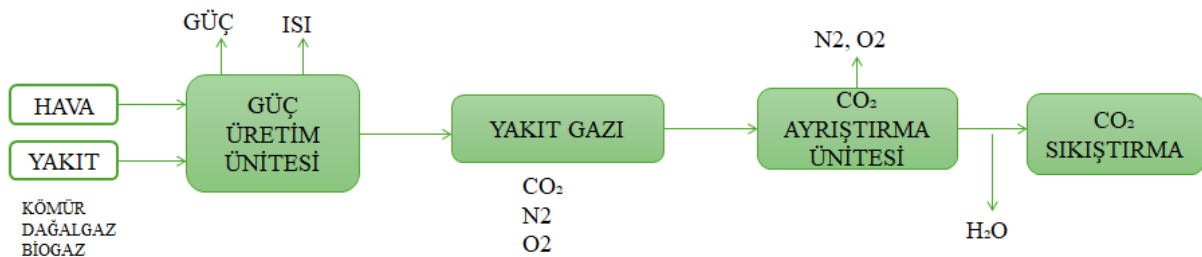
Oksijen yakıtlı yanma, özellikle enerji santrallerinde kullanılan karbon yakalama ve depolama teknolojilerinden biridir. Burada hava yerine oksijen kullanılır ve hava ayırma ünitesi ile havadan uzaklaştırılır. Oksi-yakıt yanma yöntemi, baca gazını geri dönüştürerek daha düşük alev sıcaklığına ulaştığı için oldukça verimli bir enerji tasarrufu sağlayan yanma teknolojisi olarak kabul edilir. Şekil 2 oksi-yakıt yanmasıyla karbon yakalama işlemini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2. Oksi-yakıt yanmasıyla karbon yakalama işlemi (Malini vd, 2023)

1.3. Yanma Sonrası Karbon Yakalama

CO₂'nin yanma sonrasında baca gazlarından ayrıldığı en avantajlı yöntemdir. Bu işlemde baca gazı, CO₂'nin uzaklaştırıldığı bir gaz ayırma ünitesinden geçirilir. CO₂ açısından zengin olan gaz akımı, sıkıştırmaya tabi tutulurken, N₂ ve O₂ gibi kalan baca gazları atmosfere salınır. Şekil 3, yanma sonrası CO₂ yakalama işlemini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3. Yanma sonrası CO₂ yakalama işlemi (Malini vd, 2023)

Yanma sonrası yakalama (PCC) aşağıdaki potansiyel faydalar nedeniyle mevcut kömürle çalışan elektrik santrallerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için uygulanabilir, yakın vadeli teknoloji olarak kabul edilmektedir:

- Rekabetçi teknolojilere göre daha düşük teknoloji riski taşıyan, ticari olarak temin edilebilen ve gelişmiş bir teknolojidir.
- Kısmi iyileştirmeden tam yakalama kapasitesine kadar çeşitli CO₂ azaltımları elde etmek için mevcut enerji santrallerine sonradan takılabilir veya yeni altyapıyla entegre edilebilir.
- Yenilenebilir teknolojiler potansiyel olarak PCC ile entegre edilebilir.
- PCC eritme ocakları, fırınlar, çelik fabrikaları ve kömür ve gazla çalışan elektrik santralleri gibi çeşitli kaynaklardan CO₂ yakalamak için kullanılabilir (Yu, 2018)

1.3.1. Membran Ayırma

Yanma sonrası karbon yakalamada değerlendirilebilecek alternatiflerden biri membran ayırma prosesidir. Membran ayırma, orta düzeyde maliyeti, kimyasal veya rejenerasyon adımının olmaması, daha az çevresel etkisi, işletme açısından basitliği gibi avantajlarıyla umut verici bir yaklaşım olarak kabul edilir. Bu teknoloji, geleneksel amin- çözücü prosesine potansiyel bir alternatif olarak tanımlanmış olsa da, yanma sonrası karbon yakalama için membran ayırma prosesi henüz kapsamlı bir şekilde ticarileştirilmemiştir (Chai vd, 2023).

1.3.2. Adsorpsiyon

Adsorpsiyon, adsorbat moleküllerinin adsorban üzerine adsorpsiyonunu içeren bir yüzey olgusudur. Adsorpsiyon sürecini içeren temel prensip değişken yüzey enerjisidir. Yüzey enerjisini stabilize etme isteği, adsorban yüzeyi ile adsorbat molekülleri arasında etkileşimlere neden olur. Kirleticilerin adsorban üzerine adsorpsiyonu, sıcaklık, çözelti pH'ı, adsorbat konsantrasyonu, temas süresi, bir arada bulunan iyonlar, maksimum kullanılabilir yüzey alanı, gözenek boyutu ve gözenek dağılımı dahil olmak üzere adsorbanın yüzey özellikleri gibi bir takım faktöre bağlıdır.

Adsorpsiyon, adsorbat ve adsorban molekülleri arasındaki etkileşim türüne göre fiziksel ve kimyasal olmak üzere ikiye ayrılır. Kimyasal adsorpsiyon, iki faz arasında elektron alışverişini içeren kimyasal etkileşimlerle gerçekleşir, böylece kalıcı bağlar oluşur. Bununla birlikte fiziksel adsorpsiyonda zayıf van der Waals etkileşimleri söz konusudur (Sharma vd, 2022).

Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonun karşılaştırması Tablo 1’de verilmiştir. (Atkins, 1998)

Tablo 1.Fiziksel adsorpsiyon ve kimyasal adsorpsiyonun karşılaştırılması.

Fiziksel Adsorpsiyon	Kimyasal Adsorpsiyon
Zayıf van der waals etkileşimleri vardır. Tersinirdir. Adsorbe olan molekül, yüzey üzerinde hareketli bir konumdadır. Yeteri kadar düşük sıcaklıklarda herhangi bir adsorban-adsorplanan ikilisi arasında oluşabilir. Genellikle hızlı ve ekzotermik bir olaydır. Entalpi değerleri genel olarak 20 kJ/mol dolaylarındadır.	Daha kuvvetli kimyasal bağlar vardır. Tersinmezdir. Yüzeye tutunan yapılar, adsorbent yüzeyinin atomlarını doygun hale getirmek amacıyla parçalanabilmektedir. Genellikle ekzotermik bir olaydır. Entalpi değerleri genel olarak 200 kJ/mol dolaylarındadır.

Adsorpsiyonla karbon yakalama yüksek verimlilik ve düşük maliyetli olmasıyla en çok tercih edilen yöntemdir. Çeşitli adsorban malzemeleri mevcuttur ve ucuz, verimli yeni malzemeler araştırılmaktadır. Katı adsorbanlar pek çok avantaja sahiptir bu yüzden de daha çok tercih edilmektedir. Özellikle gözenekli karbon malzemeler CO₂ yakalamada ümit verici sonuçlar göstermiştir.

2. Adsorpsiyon İzotermi

Bir adsorbanın yüzeyine adsorbe edilen hedefin konsantrasyonları arasındaki ilişki adsorpsiyon izotermi ile tanımlanır. Adsorbanların çeşitli koşullar altındaki kapasiteleri ve verimlilikleri, adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için önemli olan adsorpsiyon izotermi kullanılarak anlaşılabilir.

Adsorpsiyon izotermi, adsorbanın yüzeyine adsorbat alımının miktarı ile sabit sıcaklık koşulları altında denge konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren grafiksel çizimlerdir. Bu gösterimler adsorpsiyon sürecinin kapsamlı bir değerlendirmesini kolaylaştırır ve bir adsorbanın kapasitesinin, etkinliğinin ve adsorpsiyon mekanizmasının değerlendirilmesine olanak tanır. Kullanılabilecek bir çok izoterm modeli vardır.

2.1. Langmuir İzotermi

Öncelikle gaz-katı faz adsorpsiyonunu tanımlamak için tasarlanan Langmuir adsorpsiyonu, çeşitli adsorbanların adsorpsiyon kapasitesini ölçmek ve karşılaştırmak için kullanılır. Langmuir izotermi, adsorpsiyon ve desorpsiyonun göreceli oranlarını dengeleyerek yüzey kaplamasını hesaba katar. Adsorpsiyon, adsorban yüzeyinin açık olan kısmıyla orantılıyken desorpsiyon, adsorban yüzeyinin kapalı olan kısmıyla orantılıdır. Langmuir denklemi aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_e} + \frac{C_e}{q_m}$$

Burada C_e denge durumundaki adsorbat konsantrasyonudur. Langmuir izoterminin temel özellikleri, ayırma faktörü R_L adı verilen boyutsal olmayan bir sabitle ifade edilebilir.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

Burada C_0 adsorbatın başlangıç konsantrasyonudur,

K_L Langmuir sabitidir ve adsorbanın uygun alanı ve gözenekliliğinin değişimiyle ilişkilendirilebilir; bu da büyük yüzey alanı ve gözenek hacminin daha yüksek adsorpsiyon kapasitesiyle sonuçlanacağı anlamına gelir.

2.2. Freundlich İzotermi

Freundlich izotermi, heterojen yüzeylerde meydana gelen adsorpsiyon süreçlerine uygulanabilir. Freundlich izoterminin doğrusal biçimi aşağıdaki gibidir:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

Burada K_F adsorpsiyon kapasitesidir,

$1/n$ adsorpsiyon yoğunluğudur; ayrıca enerjinin göreceli dağılımını ve adsorbat bölgelerinin heterojenliğini gösterir (Ayawei vd, 2017).

Günümüzde Freundlich izotermi, özellikle aktif karbon ve moleküler elekler üzerindeki organik bileşikler veya yüksek etkileşimli türler için heterojen sistemlerde yaygın olarak

uygulanmaktadır. Eğim aralığı 0 ile 1 arasında olup, adsorpsiyon yoğunluğunun veya yüzey heterojenliğinin bir ölçüsüdür ve değeri sıfıra yaklaştıkça daha heterojen hale gelir (Foo vd, 2010).

2.3.Dubinin- Radushkevich İzotermi

Dubinin-Radushkevich izoterm modeli, genellikle heterojen yüzeyler üzerine Gauss enerji dağılımına sahip adsorpsiyon mekanizmasını ifade etmek için uygulanan adsorpsiyon modelidir. Bu izoterm, gerçekçi olmayan asimptotik davranış sergilediği ve düşük basınçta Henry yasalarını tahmin etmediği için yalnızca ara adsorbat konsantrasyon aralığı için uygundur. Yaklaşım genellikle metal iyonlarının fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonu arasındaki farkı belirlemek için uygulanır.

Dubinin-Radushkevich izotermi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta E^2$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2B}}$$

Burada ε Polanyi potansiyeli ,

β Dubinin-Radushkevich sabiti,

R gaz sabiti ($8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T mutlak sıcaklık ve

E ortalama adsorpsiyon enerjisidir. (Ayawei vd, 2017)

2.4. Temkin İzoterm Modeli

Temkin izoterm modeli, dolaylı adsorban/adsorbat etkileşimlerinin adsorpsiyon süreci üzerindeki etkilerini hesaba katar; ayrıca tabakadaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısının yüzey kaplamasının artması sonucu doğrusal olarak azaldığı varsayılır. Temkin izotermi yalnızca ara iyon konsantrasyonları aralığı için geçerlidir.

Temkin izoterm modelinin doğrusal biçimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$q_e = \frac{Rt}{b} \ln K_T + \frac{RT}{b} \ln C_e$$

Burada b, adsorpsiyon ısısıyla ilişkili olan Temkin sabitidir (Jmol^{-1}) ,

K_T Temkin izoterm sabitidir (Ayawei vd , 2017).

2.5. Jovanovic İzotermi

Jovanovic modeli, Langmuir modelinde yer alan varsayımlara dayanmaktadır, ancak buna ek olarak adsorbat ile adsorban arasında bazı mekanik temasların olasılığı da vardır. Jovanovic izoterminin doğrusal biçimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\ln q_e = \ln q_{\max} - K_J C_e$$

Burada q_e denge durumunda adsorban içindeki adsorbat miktarı,

$q_{\max}$, q_e 'nin C_e 'ye göre grafiğinden elde edilen maksimum adsorbat alımıdır,

K_J Jovanovic sabitidir (Ayawei vd, 2017).

2.6. Halsey İzotermi

Halsey izotermi, yüzeyden nispeten büyük bir mesafede çok katmanlı adsorpsiyonu değerlendirmek için kullanılır. Adsorpsiyon izotermi aşağıdaki gibi verilebilir.

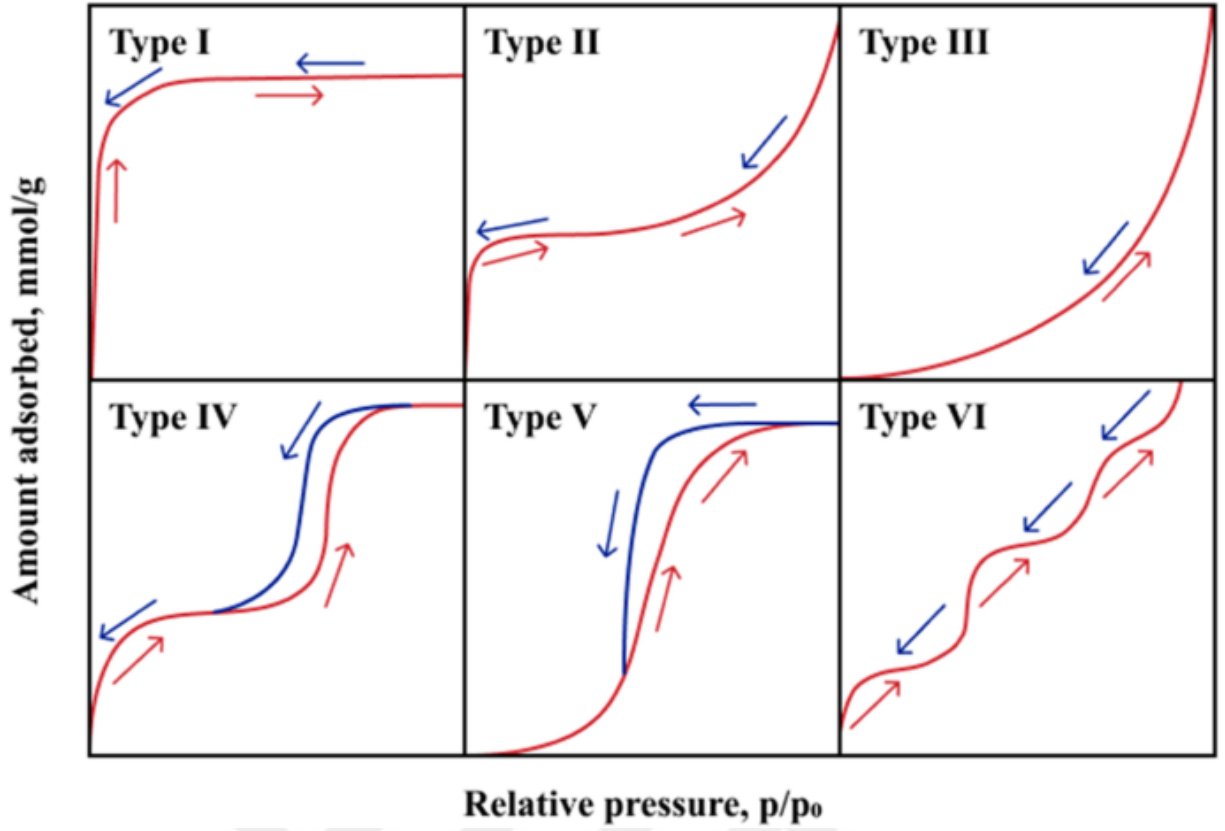
$$q_e = \frac{1}{n_H} \ln K_H - \frac{1}{n_H} \ln C_{qe}$$

Burada K_H ve n_H Halsey izoterm sabitidir ve

$\ln q_e$ 'nin $\ln C_e$ 'ye göre eğimi ve kesim noktasından elde edilebilir.

Fowler ve Guggenheim yaptıkları çalışmada çam kozalağından ürettikleri aktif karbon tarafından metil turuncu adsorpsiyonunun denge çalışmalarında Halsey izotermi kullanmıştır ve elde edilen deneysel verilerin Halsey izoterm modeliyle uyumlu olduğu görülmüştür. (Ayawei vd, 2017).

Literatürde temel olarak tanımlanmış altı adsorpsiyon izotermi mevcuttur. Bu izotermier Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Adsorpsiyon izotermi (kırmızı oklar adsorpsiyon, mavi oklar desorpsiyonu temsil etmektedir) (Jarosław Serafin vd, 2024)

Tip I izoterm, mikro gözenekli adsorbanları tanımlamak için kullanılır (gözenek boyutları adsorbat moleküllerinin gözenek boyutlarına benzer) ve Langmuir izoterm modeline karşılık gelir. İzoterm eğrisi, Langmuir'in artan bağıl basınçla asimptotik olarak maksimum değere (bire eşit) yaklaştığı ve bunun da tek katmanlı adsorpsiyonun sonunu gösterdiği fikrinin genel konseptini doğrular. Başka bir deyişle, adsorban yüzeyinde yalnızca bir gaz molekülünün (adsorbat) adsorplayabileceği belirli sayıda aktif merkez/bölge bulunur.

Tip II izotermi, gözeneksiz ya da mezogözenekli/makrogözenekli adsorbanlarda gözlenen, tersinir ve sınırsız çok katmanlı gaz adsorpsiyonunun en yaygın tipidir. İzoterm eğrisi, birbirini izleyen üç karakteristik aşamaya ayrılabilir. İlk aşama, düşük bağıl basınçlarda gerçekleşir ve Langmuir izoterminin öngördüğü şekilde yüzeyde tek tabakalı adsorpsiyonun meydana geldiği varsayılır. Bu izoterm, Brunauer, Emmett ve Teller tarafından geliştirilen BET modeli ile açıklanmaktadır. İzoterm eğrisinin belirli bölümlerinde gözlenen farklılıklar ise, özellikle gözenekli yapıya sahip adsorbanlarda meydana gelen kılcık yoğunlaşma olgusundan kaynaklanmaktadır.

Tip III izotermi, adsorban–adsorbat etkileşimlerinin zayıf, adsorbat molekülleri arasındaki çekimlerin ise daha baskın olduğu durumları tanımlar. Yüzeyde biriken moleküller

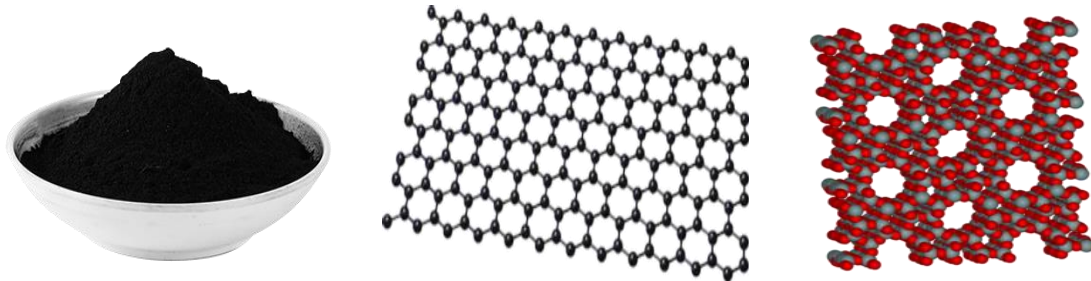
arttıkça aralarındaki etkileşim kuvvetlenir ve bu durum, yüksek bağıl basınçlarda adsorpsiyon miktarının artmasına yol açar.

Tip IV ve V izotermi esas olarak mezogözenekli yapıya sahip adsorbanlarda görülür. Tip IV izoterminin seyri BET izoterm modeline benzerdir. Düşük bağıl basınçlarda, gaz moleküllerinin adsorban yüzeyine kademeli olarak adsorpsiyonu gerçekleşir ve eğrinin dönüm noktası tek tabaka oluşumunun tamamlandığını gösterir. Çok tabakalı adsorpsiyon süreci yalnızca daha yüksek bağıl basınç değerlerinde başlar. Öte yandan, V tipi izoterm genellikle adsorpsiyon ısısının yüzey kaplama derecesine bağlı olmadığı homojen adsorban yüzeylerde görülür.

Tip VI izotermi, oldukça homojen gözeneksiz bir yüzeyde katman katman adsorpsiyonu temsil eder. Her katmanın kapasitesi, adım yüksekliği ile gösterilir ve adımın keskinliği sistem ve sıcaklık tarafından belirlenir. (Jarosław Serafin, et al., 2024)

3. CO₂ Yakalama Malzemeleri

Literatürde CO₂ 'in seçici olarak yakalanması için kullanılan sayısız materyal bulunmaktadır. Karbon bazlı malzemeler, grafen ve grafen bazlı malzemeler, organik polimerler, zeolitler, metal organik çerçeveler bu malzemelere örnek verilebilir (Petrovic vd, 2021).



Şekil 5. Aktif karbon, grafen ve zeolit

3.1. Zeolitler

Zeolitler doğal olarak oluşan mikro gözenekli kristal silikat çerçeve malzemeleridir; laboratuvar da sentezlenebilirler. 0,5- 1,2 nm'lik düzgün gözenek boyutlarına sahiptirler ve gaz moleküllerini adsorbe etmek için birbirine bağlanan kanallar veya kafesler oluştururlar. Bu nedenle gaz ayırma ve arıtma için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Zeolitler tipik olarak 2 barın üzerindeki basınçlarda kullanılır ve genellikle 573 K'nin üzerinde çok yüksek rejenerasyon sıcaklıkları gerektirir. Bu nedenle CO₂ rejenerasyonu büyük enerji kaybına neden olur. Ayrıca zeolitlerin adsorpsiyon performansları, nemi kolayca emdikleri için azalır.

3.2. Metal Organik Çerçevesler (MOF)

MOF' lar yüksek özgül yüzey alanı ($10,000 \text{ m}^2/\text{g}$) ve düzenli gözenek dağılımı ile diğer malzemelerden ayrılır. Mükemmel seçicilikleri ve üstün adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle oldukça popülerdir. Yüksek üretim maliyeti, nem hassasiyeti, yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun olmama, düşük basınçlarda zayıf adsorplama kapasitesi gibi dezavantajları vardır (Lee vd, 2015).

3.3.Karbon Bazlı Adsorbanlar

Karbonun farklı formlardaki varlığı, çeşitli konfigürasyonlarda kararlı kimyasal bağların oluşumuna izin veren benzersiz elektronik yapısıyla açıklanabilir. Karbonun benzersizliği, tek, çift veya üçlü bağlar oluşturabilmesinden; halkalı veya halkasız zincirler oluşturarak birbiriyle bağ kurma konusunda olağanüstü bir yeteneğe sahip olmasından; düz veya dallanmış zincirler oluşturabilmesinden; ayrıca diğer metalik olmayan elementlerle de bağ yapabilmesinden kaynaklanır (Sabzehmeidani vd, 2021).

Karbon bazlı adsorbanlar, çeşitli morfolojilere, yapılara ve öncül kaynaklara sahip çeşitli malzemelerden oluşur. Bu malzemeler; aktif karbonlar, hidrokömür, biyokömür, grafen, fullerener ve karbon nanotüpler gibi çeşitli temel gruplara ayrılabilir. Karbon bazlı malzemeler sıra dışı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Öncelikle düşük maliyetlidirler, çeşitli yapısal formları vardır (toz, lifler, aerogeller, kompozitler, levhalar gibi), yüksek yüzey alanına sahiptirler, sıcaklık ve basınçtaki hızlı değişimlere karşı yüksek dirence sahiptirler (Dzierjarski vd, 2023). Bu adsorbanlar içinde aktif karbonlar önemli bir yere sahiptirler.

3.3.1. Karbon Nanotüpler (CNT)

CNT'ler, çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda potansiyel olarak uygulanabilir olmalarını sağlayan ayırt edici özelliklere sahip karbon moleküllerinin silindirik allotroplarıdır. İnanılmaz bir mukavemetin yanı sıra benzersiz elektriksel, mekanik ve termal özellikler gösterir. Karbon nanotüplerin, tıp, nanoteknoloji, yüksek mukavemetli kompozitler, enerji depolama ve enerji dönüşüm cihazları, adsorbanlar ve katalizörler gibi pekçok uygulama alanı mevcuttur (Sabzehmeidani vd, 2021).

3.3.2. Grafenler

Karbon atomlarının tek katmanı olarak grafen, iki boyutlu (2D) sıkı paketlenmiş bir petek kristal kafes sağlar. Grafenin altıgen yapısı, karbon atomunun 2s orbitalinin ve 2p orbitalinin sp^2 hidridizasyonu için temel bir yapı taşı olarak bilinir. Ayrıca, grafen elektronların 2D maddelerde hapsedilmesi nedeniyle geleneksel bir kuantum Hall etkisini gösteren tek

katmanlı 2D altıgen bir kristaldir. Grafenler, transistörler, şeffaf elektrotlar, ultrakapasitörler, yakıt hücreleri, hidrojen depolama ve adsorbanlar dahil olmak üzere birçok potansiyel uygulamaya sahiptir (Sabzehmeidani vd, 2021).

3.3.3. Biyokömürler (BC)

Biyokömür, çeşitli tarımsal ve endüstriyel biyokütlelerden oksijen sınırlı koşullar altında çeşitli sıcaklıklarda piroliz yoluyla üretilen karbonlu katı bir kalıntıdır. BC, kömür ve aktif kömür organik materyalden üretilen üç karbon formudur. Benzer bileşimler ve üretim yaklaşımlarıyla çok fazla örtüşme gösterirler, ancak pratik uygulamaları açısından farklılık gösterirler. BC, toprak iyileştirme ve çevreden kirleticilerin uzaklaştırılması için kullanılmaktadır (Sabzehmeidani vd, 2021).

3.3.4. Aktif Karbonlar (AC)

Aktif karbon, esas olarak elementel karbondan oluşan bir malzemedir; bu karbon, amorf yapıdadır ve kısmen ince kristal grafit formundadır. Karakteristik özelliği, kütleye göre oldukça geniş bir yüzey alanıdır ve bu yüzey alanı yaklaşık $3000 \text{ m}^2/\text{g}$ ' a kadar ulaşabilir. Aktif karbon, ağırlıkça yaklaşık %85 ila %95 oranında elementel karbon içerir; geri kalan bileşenleri arasında oksijen, hidrojen, kükürt, azot ve halojenler gibi heteroatomlar bulunur. Aktif karbonun kristal kenarları ve köşelerinde bulunan karbon atomlarına bağlı heteroatomlar, adsorpsiyon kapasitesini artırabilen reaktif fonksiyonel gruplar oluşturur. Bu yüzey bağlantıları genellikle karbon–oksijen, karbon–azot veya karbon–kükürt türündedir. En önemli fonksiyonel gruplar, malzemenin iç yapısında bulunan hidrofobik (polar olmayan) karaktere ek olarak, dış yüzeye hidrofilik (polar) özellik kazandıran oksijen atomlarını içerir. Kristaller arası boşluklarda bulunan heteroatomlar ise genellikle düşük reaktivite gösterir. Buna karşılık yüzeydeki heteroatomlar, aromatik bileşiklerde görülenlere benzer fonksiyonel gruplar oluşturur ve benzer kimyasal aktivite sergiler. (Jarosław Serafin vd, 2024)

Genel olarak, aktif karbon yüzeyinin oksidasyonu, asidik bileşiklerin sorpsiyon derecesini azaltırken, alkali bileşiklerin sorpsiyonunu artırır. Bu nedenle aktif karbonların yüzeyi, hem hidrofilik hem de hidrofobik özelliklerin bir arada bulunduğu ikili bir yapıya sahiptir. Bu yapı, özellikle atmosferdeki zararlı kirleticiler de dahil olmak üzere çok çeşitli gazların adsorplanmasını mümkün kılar.

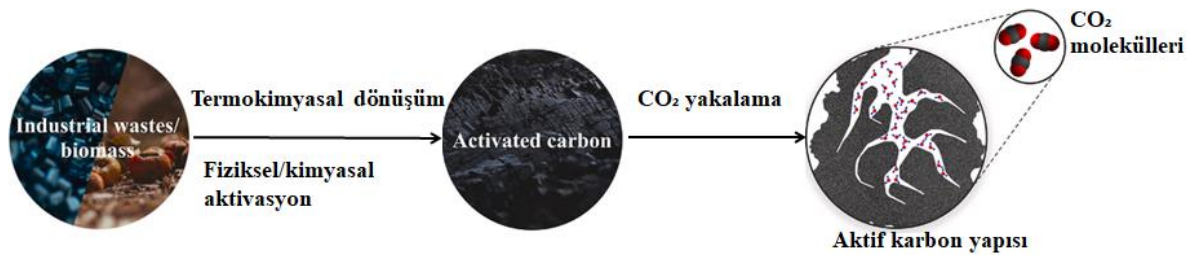
Aktif karbonun, endüstriyel proseslerin ayrılması ve arıtılması, çoğunlukla kimya, gıda, ve ilaç endüstrilerinde organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesi gibi pek çok uygulamaları vardır. Ayrıca, yüzey alanı, gözenek boyutu, hacim ve gözenek boyutu dağılımı gibi dokusal özellikleri, istenilen uygulamaya göre uyarlanabilir. Aktif karbonların hava

temizleme, cıva giderme, CO₂ yakalama uygulamaları için uygun adsorbanlar olduğu kanıtlanmıştır. CO₂ yakalama uygulamalarında kullanılan aktif karbonlar ümit verici sonuçlar vermiştir ve bu nedenle bu alanda çok daha fazla araştırma yapılmaktadır (Abuelnoor vd, 2021).

Aktif karbon, birkaç kriter nedeniyle CO₂ yakalama için en iyi adsorbanlardan biri olarak kabul edilir. Bu kriterler şunlardır:

- Yüksek yüzey alanı: aktif karbon CO₂ adsorpsiyonu için bol miktarda yer sağlayan yüksek bir yüzey alanına sahiptir.
- İyi gelişmiş gözeneklilik: aktif karbonun mikro gözenekli yapısı, CO₂ gibi küçük gaz moleküllerinin etkili bir şekilde adsorpsiyonuna olanak tanır.
- Kimyasal kararlılık: aktif karbon kimyasal olarak inerttir ve bu da onu diğer kimyasallarla reaksiyona girmeden çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun hale getirir.
- Termo-mekanik kararlılık: yüksek sıcaklıklar ve mekanik stres altında yapısal bütünlüğünü korur.
- Rejenerasyon kolaylığı: aktif karbon, nispeten basit süreçlerle rejenerasyona tabi tutulabilir, bu da yeniden kullanımını ve sürdürülebilirliğini sağlar.
- Maliyet verimliliği: Çeşitli öncüllerden aktif karbon üretimi ekonomik olarak uygulanabilir ve bu da onu büyük ölçekli uygulamalar için maliyet açısından etkili bir çözüm haline getirir.

Aktif karbonlar, yenilenebilir kaynaklardan veya biyokütle kalıntılarından fiziksel veya kimyasal aktivasyon süreçleri yoluyla üretilir.



Şekil 6. Aktif karbon ön işlem adımlarının şematik diyagramı. (Dziejarski vd, 2023)

Aktif karbon üretmek için kullanılan hammaddeler arasında hindistan cevizi kabukları, çam kozalakları, talaş ve pirinç kabukları, mısır koçanları ve fındık kabukları gibi tarımsal atıklar bulunur (Yahia vd, 2024). Düşük maliyetli aktif karbonların geliştirilmesi için malzeme seçimi bazı faktörlere bağlıdır. Malzeme tercihen kolay temin edilebilmeli, ucuz olmalı ve doğaya zarar vermemelidir. Ayrıca yüzeyin iyi bir şekilde geliştirilmesi için yapısal ve dokusal

özelliklere sahip, yüksek sabit karbon içerikli ve düşük kül miktarına sahip malzemeler tercih edilir. Ahşap ve odunsu biyokütle, otsu ve tarımsal atık, endüstriyel biyokütle atığı ve karışımlardan birçok yararlı ve ilginç malzeme elde edilmiştir. Aktif karbon üretiminde önemli bir husus da, çekirdek, saplar, kabuklar, çiçekler, meyveler, tohumlar, taşlar, kabuklar ve yapraklar dahil olmak üzere bitkilerin çeşitli kısımlarının kullanılmasıdır (González-Garcia, 2018).

Aktif karbonlar genellikle iyi gelişmiş bir gözenekli yapıya sahiptir. Mikro gözenekler (çapları 2 nm'den küçük gözenekler), mezo gözenekler (çapları 2 ila 50 nm arasında olan gözenekler) ve makro gözenekler (çapları 50 nm'den büyük gözenekler) içerebilirler. (Jarosław Serafin vd, 2024)

4.Aktif Karbon Sentezi ve Aktivasyon Yöntemleri

Aktif karbonlar çeşitli farklı yöntem ve teknikler kullanılarak hazırlanabilir. İşlemi başlatmak için karbonizasyon gerçekleşmelidir ve bu tüm teknikler için gereklidir. Ancak, aktivasyon işlemi ve maddeler kullanılan öncüye göre değişebilir. Amaç bu malzemelerin etkili, çevre dostu ve ekonomik sentezi için optimum bir sıcaklık ve teknik bulmaktır (Abuelnoor vd, 2021). AC sentezi iki temel prosedürden oluşur: karbonizasyon ve aktivasyon. Karbonizasyonun amacı, 300-900° C sıcaklık aralığında karbon öncüllerinin pirolizi yoluyla ham maddelerin uçucu içeriğini azaltmak ve yüksek sabit karbon içeriğiyle yüksek gözenekliliğe sahip kömür oluşturmaktır. Aktivasyonun amacı, yeni gözenekler açarak ve mevcut gözenekleri geliştirerek AC'nin özgül yüzey alanını veya gözenek hacmini iyileştirmektir. Bunun dışında, aktivasyon belli belirsiz özelliklerle AC' nin yüzey kimyasal doğasını değiştirebilir. Aktivasyonun AC'nin özellikleri açısından karbonizasyondan daha önemli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, aktivasyonuna daha fazla dikkat edilmektedir (Gao vd, 2020).

Aktif karbon, kuru ham öncünün doğrudan aktivasyonu yoluyla veya ilk karbonizasyon ve ardından aktivasyonu içeren iki aşamalı bir işlemle hazırlanabilir. İki aşamalı işlemde ceviz kabukları, odun, kemik ve kömür gibi kurutulmuş ham organik maddeler ilk olarak yüksek sıcaklıklarda karbonize edilmelidir. Karbonizasyon işleminde, malzeme oksijen yokluğunda hidrokarbonların buharlaşması ve uzaklaştırılması için damıtma cihazında kırmızı nokta sıcaklığına (700 °C'nin altında) maruz bırakılmalıdır. Genel olarak, karbonizasyon işlemi pirolitik bir işlemdir ve ürünü karbonize malzeme, kömür veya biyokömür olarak bilinir. Aktif karbon aktive edildikten sonra, gözenekliliği daha da geliştirmek ve aktif karbondaki ince katı boşlukların oluşumuna yol açan yapılar oluşturmak için çeşitli aktivasyon yöntemleri kullanılır. (Zoha Heidarinejad vd, 2020).

AC üretmek için iki ana aktivasyon tekniği kullanılmaktadır: fiziksel aktivasyon ve kimyasal aktivasyon (Gao vd, 2020).

4.1.Fiziksel Aktivasyon

Fiziksel aktivasyon, ham maddenin daha yüksek bir sıcaklıkta, inert bir atmosfer altında karbonizasyonunu veya pirolizini içerir (Olorundare vd, 2012). İşlem, doğrudan yaklaşım ve iki adımlı yaklaşım olmak üzere iki ayrı şekilde sınıflandırılabilir. Doğrudan yöntemde, termokimyasal dönüşüm, reaksiyon tamamlanana kadar azot akışının varlığında gerçekleştirilir. Daha sonra azot akışı durdurulur ve aktivasyon gazı hemen sıcaklığa sokulur. İkinci yöntemde, aktivasyon işlemi iki adıma ayrılır. Bu sırada sürekli bir azot akışı kaynağı korunurken hammaddenin dönüşümü gerçekleştirilir. Bahsedilen işlem, yeterli miktarda karbonlu malzeme üretilip daha sonra toplanana kadar devam eder (Dzierjarski vd, 2023).

4.2.Kimyasal Aktivasyon

Kimyasal aktivasyon, kömürün kimyasal reaktiflerle reaksiyona girmesini ve ardından nötr koşullar altında ısıtma işlemine tabi tutulmasını içerir. Bu yöntem, 450–900 °C sıcaklık aralığında aktif karbonların üretilmesini sağlar. En yaygın kullanılan kimyasal aktivasyon prosedürü, kuru karıştırma olarak bilinen tek adımlı yaklaşım ve ıslak emdirme olarak adlandırılan iki adımlı yaklaşımdır. İkisi arasındaki fark, aktivasyon reaksiyonunun gerçekleştirildiği ortam ve nihai ürüne ulaşmak için gereken ardışık adım sayısı ile ilgilidir. Islak emdirme yöntemi, bir aktive edici maddenin doymuş bir çözeltisine bir aktif karbon öncüsünün eklenmesini, ardından ısıtma ve kurutmayı içerir. Kurutulmuş karışım daha sonra bir fırında nitrojen gazı atmosferi altında aktive edilir. Daha sonra, aktive edilmiş malzeme, kurutma adımından önce bir yıkama işleminden geçer. Öte yandan, kuru karıştırma yaklaşımı, katı bir aktive edici maddenin belirli ham maddeyle karıştırılmasını içerir. Daha sonra, azot gazı atmosferinde, karışım tek bir adımda doğrudan karbonizasyona ve aktivasyona tabi tutulur (Dzierjarski vd, 2023). Fiziksel ve kimyasal aktivasyon arasındaki farklar Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Kimyasal ve fiziksel aktivasyon yöntemleri arasındaki farklar (Katheresan vd, 2018).

Kimyasal Aktivasyon	Fiziksel Aktivasyon
---------------------	---------------------

Aktivasyon zamanı	Kısa	Uzun
Yan ürünler	Hiçbiri	Gözeneksiz kömür
Adım sayısı	1	2
Gereklilik	Karbon aktivasyon kimyasalları (H ₃ PO ₄ , KOH, K ₂ CO ₃ , NaOH, ZnCl ₂)	İnert ve oksitleyici gazlar (karbondioksit ve azot)
Adımlar	1. Kimyasallarla emdirilmiş hammadde 2. Azot gazı akışı altında ısıtılmış (1 ve 2 aynı anda gerçekleştirilir)	1. Hammaddenin piroliz işlemiyle karbonizasyonu 2. Hava, karbondioksit, buhar veya oksitleyici gazların bir karışımıyla aktivasyonu
Ortam	İnert (azot)	İnert (azot)
Sıcaklık	Düşük (450-900 °C)	Yüksek (600-1200 °C)
Yıkama	Gerekli (ortadan kaldırılması gereken diğer kimyasalların varlığı)	Gerekli değil (aktivasyon için kimyasal kullanılmadı)
Avantajları	-Daha az yanmış aktif karbon	-Mezogözenekli yapı -Daha geniş gözenek boyutu
Son ürün	Aktif karbon (geniş yüzey alanına sahip gözenekli yapı)	

Kimyasal aktivasyon süreci sırasında birçok kimyasal, aktive edici ajan olarak kullanılmıştır. Asit-baz teorisine ve aktivasyon mekanizmasına göre, aktive edici ajanlar alkali, asidik ve nötr olmak üzere üç türe ayrılabilir.

Alkali aktive edici ajanlar: KOH, NaOH, K₂CO₃, Na₂CO₃ ve K₃PO₄

Asidik aktive edici ajanlar: H₃PO₄, H₂SO₄, HNO₃

Nötr aktive edici ajanlar: FeCl₃, ZnCl₂, K₂SO₄, NaNH₂, NH₄Cl

Bu ajanlar arasında KOH, son derece yüksek özgül yüzey alanına sahip AC hazırlamak için en etkili aktive edici ajandır. Bu nedenle çok sayıda araştırmacı KOH aktivasyonunun çeşitli gözenek oluşum mekanizmalarını incelemiştir. KOH'un aktive edici reaksiyonun sıcaklığını düşürebileceği, karbon olmayan bileşenlerin uzaklaştırılmasını hızlandırabileceği ve piroliz reaksiyon hızını artırabileceği ortaya konmuştur (Gao vd, 2020).

4.2.1. Potasyum Hidroksit (KOH) Aktivasyonu

KOH kullanılarak biyokütlenin aktivasyonu, artırılmış gözeneklilik derecesine sahip aktif gözenekli karbon malzemeleri sentezlemek için yaygın ve etkili bir yöntemdir. Bu tür malzemeler çoğunlukla mikro gözeneklidir ve algler, kiraz çekirdekleri, mısır, köknar ağacı, üzüm çekirdeği ve talaş gibi çeşitli farklı biyokütle öncülleri geçmişte bu amaç için kullanılmıştır. KOH ile aktive edilmiş gözenekli karbonların dokusal parameteleri, aktivasyon dozu, sıcaklık, kalış süresi ve kurutma süreleri gibi deneysel koşullara göre değişir. (Gurwinder Singh vd, 2019).

4.2.2. Fosforik Asit (H_3PO_4) Aktivasyonu

Fosforik asit , karbonda gözeneklilik oluşturmak için kullanılan bir diğer aktive edici maddedir. Aktivasyon sırasında H_3PO_4 , biyokütlerde bulunan biyopolimerlerin pirolitik yollarını etkileyerek karbon yapısında gözenekliliğe ve fosfor açısından zengin fonksiyonel grupların oluşumuna neden olur (Gurwinder Singh vd, 2019)

4.2.3. Çinko Klorür ($ZnCl_2$) Aktivasyonu

Aktifleştirici reaktifler arasında çinko klorür, aktif karbon üretmek için yaygın olarak kullanılır. Çinko klorür, aktivasyon sırasında bu madde emdirilmiş numuneler için bir sönümlleme maddesi görevi görür. Uçucu maddelerin çinko klorür ile doyurulmuş gözeneklerden hareketi bozulmaz ve bundan sonra aktivasyon süreci sırasında uçucu maddeler aktif karbon yüzeyinden salınır. Çinko klorürün kütle oranının artması, uçucu maddelerin daha kolay salınmasına neden olur, böylece aktif karbon üzerindeki azot Emilimi artar (Heidarinejad vd, 2020).

4.3. Piroliz

Piroliz, oksijenin yokluğunda materyalin termal bozunması sonucu gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüşmesidir. Termal bozunma, büyük zincirli hidrokarbonların yüksek sıcaklıklarda (300-600) küçük zincirli hidrokarbonlara parçalanmasını içerir.

Piroliz sırasında gerçekleşen birincil reaksiyon, biyokütle bileşenlerinin termal bozunması ve uçucu maddelerin salınmasıdır. Bozunma 300°C civarında başlar. Sıcaklık 300°C'ye ulaştığında ve yükseldiğinde, karbon olmayan malzemeler (N, H, O) uzaklaşır ve bu da numunedeki karbon konsantrasyonunun artmasını ve karbon açısından zengin bir malzemenin oluşmasını sağlar.

5. Pirolizi Etkileyen Faktörler

Piroliz sonucunda oluşan ürünler, hammadde türü, reaktör sistemi, temas süresi, sıcaklık, basınç, katalizörlerin etkisi gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak verim ve bileşim açısından farklılık gösterir (Sipra vd, 2018).

5.1. Sıcaklık

Sıcaklık, piroliz sırasında biyokütle ayrışması için mevcut ısı miktarını esas olarak etkileyen parametredir. Farklı piroliz ürünlerindeki verim değişimlerini etkiler (Azeta vd, 2021). Sıcaklığın ayrıca kömürleşme verimleri ve özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Daha yüksek sıcaklıklar tüm piroliz reaksiyonlarında daha düşük kömürleşme verimiyle sonuçlanır. Bunun temel nedeni daha yüksek sıcaklıklarda kömürleşmeden daha uçucu malzemenin sıyrılması ve dolayısıyla verimde azalmaya neden olmasıdır. Ancak, daha düşük sıcaklıkların olumsuz bir etkisi de vardır ve bu, biyokütlenin eksik ayrışmasına ve kömürleşme içeriğinde daha yüksek miktarda pirolize edilmemiş katıya yol açabilir. Sıcaklık ayrıca kömürleşme bileşimini de etkiler ve daha yüksek sıcaklıklarda üretilen kömürleşmenin daha yüksek kabon içeriğine sahip olması sağlanır (Sharma vd, 2015).

5.2. Isınma Oranı

Biyokütle piroliz türünü (flaş, hızlı ve yavaş piroliz) tanımlayan temel parametre ısıtma hızıdır. Piroliz sırasında biyokütle ısıtma hızındaki artış, biyokütlenin maksimum ayrışma hızını iyileştirir. Hızlı piroliz, kısa buhar kalma süreleri ile yüksek ısıtma hızları (10-200°C) ile karakterize edilirken, yavaş piroliz işlemi daha uzun kalma süreleri ile daha düşük ısıtma hızlarına (5-20°C) sahiptir. Flaş piroliz, maksimum yağ verimi ile sonuçlanabilen daha yüksek ısıtma hızları (>1000° C) ve kısa buhar kalma süresi ile tanımlanır. Daha yüksek ısıtma hızı, biyo-kömürdeki gözenek yapılarını büyülterek adsorpsiyon kapasitesini artırır.

5.3. Reaktör Tipi

Piroliz işleminde kullanılan reaktör, işlemde kullanılacak piroliz türüne göre belirlenir. Yavaş piroliz işlemleri için genellikle tambur, döner, vidalı beslemeli/burgulu reaktörler kullanılır. Öte yandan, hızlı piroliz işlemi, akışkan yataklı reaktör, tandem mikro reaktör ve bazen sabit yataklı reaktörler gibi çeşitli reaktör türlerinin kullanımını gerektirir. Pirolizde kullanılan diğer reaktör tipleri arasında dolaşımli akışkan yataklı, mikrodalga, ablatif, burgulu, döner koni, vakum ve ısıtmada yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanma avantajına sahip güneş reaktörü bulunur (Azeta vd, 2021).

6. Piroliz Çeşitleri

6.1. Yavaş(Geleneksel) Piroliz

Yavaş (geleneksel) piroliz, karbonizasyon olarak da bilinir. Nispeten düşük bir sıcaklıkta, yavaş bir ısıtma hızı ve uzun katı kalma süresiyle gerçekleşir ve böylece katı, sıvı ve gaz ürünlerinin önemli oranlarda oluşmasını sağlar. Bu işlemde, biyokütle, sıvı ve gaz ürünlerinin minimum olduğu ve kömür üretiminin en üst düzeye çıkarıldığı yaklaşık 5 ila 7°C düşük ısıtma hızlarıyla pirolize edilir.

6.2. Hızlı Piroliz

Hızlı piroliz, endüstriyel yakıt ve ulaşım yakıtı uygulamalarında büyük potansiyele sahip tercih edilen ürün olarak biyo-yag ile biyokütle dönüşümü için ilgi çekici bir teknolojidir. Hızlı bir piroliz işleminin temel özellikleri, ince öğütülmüş biyokütle beslemesi, dikkatlice kontrol edilen sıcaklık ve biyo-yag elde etmek için piroliz buharının hızla soğutulmasını gerektiren çok yüksek ısı transferi ve ısıtma oranlarıdır. Hızlı piroliz, yüksek sıcaklıklarda (400-500° C), 5 saniyeden kısa buhar kalma süresinde ve 10-200°C /s'lik görünür bir ısıtma oranında yüksek sıvı verimi üretir. Tablo 3.'de yavaş ve hızlı piroliz arasındaki farklar verilmiştir.

Tablo 3. Yavaş ve hızlı piroliz arasındaki farklar (Sipra vd, 2018)

Yavaş piroliz	Hızlı piroliz
Daha uzun kalma süresi	Daha kısa kalma süresi
Yavaş ısıtma oranları	Yüksek ısıtma oranları
Sıcaklık aralığı:227-677°C	Sıcaklık aralığı:577-977°C

6.3. Flaş Piroliz

Flaş piroliz, çok yüksek sıcaklıklarda, yüksek ısıtma oranlarında ve çok kısa temas sürelerinde küçük parçacık boyutlarındaki biyoküteller için gerçekleştirilir. Çoğunlukla gaz halindeki ürünler verir (Azeta vd, 2021).

7. Literatür Araştırması

Literatürde birçok, farklı aktifleştirici ajan kullanılarak üretilen aktif karbon çalışması mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur. Tablo 4'de literatürde yer alan, farklı aktifleştirici ajanlar kullanılarak üretilmiş aktif karbonların BET yüzey alanı karşılaştırılması verilmiştir.

Işıl ve ark. (2014), üzüm sapından $ZnCl_2$ aktivasyonu ile aktif karbon hazırlamışlardır. Üzüm saplarının farklı sıcaklıklar için (500, 600 ve 700° C), 2 saat piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Piroliz olmuş numuneler çinko bileşiklerini uzaklaştırmak için 3 M HCl ile yıkanmıştır. Aktif karbonlar karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sabit bir aktivasyon süresi için artan karbonizasyon sıcaklığıyla numunelerin BET yüzey alanının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Karbonizasyon süresinin BET yüzey alanı üzerine etkisi de araştırılmıştır. Bunun için 700° C’ de 30-150 dakika aralığında inceleme yapılmıştır. BET yüzey alanı karbonizasyon süresinin artmasıyla 120 dakikaya kadar ani bir şekilde artmış ve bundan sonra çok fazla değişmemiştir. Sonuç olarak üzüm sapından aktif karbon üretiminde en iyi BET yüzey alanı, sıcaklık olarak 700°C ‘de, saat olarak 120 dakikada ve 1/2 (üzüm sapı/ $ZnCl_2$) oranında 1411 m²/g olarak elde edilmiştir.

Chong Lua ve ark. (2005), çinko klorür aktivasyonu ile fıstık kabuğundan hazırlanan aktif karbonun özelliklerini araştırmıştır. Emprenye oranı, aktivasyon sıcaklığı, tutma süresi ve aktivasyon koşulu (azot gazı veya vakum) gibi farklı parametrelerin yüzey alanı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Fıstık kabuklarına 1:4 ve 3:2 oranlarında $ZnCl_2$ emdirilerek 110°C ‘lik bir fırında kurutulmuştur. Piroliz işlemi 150 cm³/dk akış hızında N₂ gazı altında gerçekleştirilmiştir. Karbonizasyon sıcaklığı 350°C’den 800°C’ye kadar arttırılarak BET yüzey alanındaki değişimler incelenmiştir. En yüksek yüzey alanına sahip sıcaklığın 400°C olduğu görülmüştür. Aktivasyon bekleme süresi için 0,5 , 1, 2 ve 3 saat aralıklarında deneyler yapılmıştır. Tutma süresinin 0,5’ten 1 saate çıkarılması, uçucu maddenin artan salınımı nedeniyle BET yüzey alanını arttırmış ancak 3 saate kadar daha fazla arttırılması bu değeri sürekli olarak azaltmıştır. Dolayısıyla en iyi BET yüzey alanı 1 saat için elde edilmiştir.

Zhang ve ark. (2015), N₂ atmosferi altında aktive edici madde olarak $ZnCl_2$ kullanılarak atık patates kalıntısından aktif karbon hazırlamıştır. Bunun için patates kalıntısı kurutulup öğütülerek elekten geçirilmiştir. Hazırlanan numune $ZnCl_2$ çözeltisi ile muamele edilerek 24 saat boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur. Bir fırında 10°C/dk ısıtma hızında piroliz yapılmıştır. Karbonizasyon sıcaklığı 400 ile 800°C aralığında değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında karbonizasyon sıcaklığı 400’den 600°C’ ye kadar arttırıldığında BET yüzey alanında arttığı fakat 600’den 800°C’ye kadar arttırıldığında yüzey alanının kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Buradan hareketle 600°C’nin üzerinde $ZnCl_2$ ’ün bir aktivasyon maddesi olarak çalışmadığı ve yüzey alanının ısı büzülme nedeniyle azaldığı kanısına varılmıştır.

Oliveira ve ark. (2009), $ZnCl_2$ ’ü başka bir aktive edici madde olan $FeCl_3$ ile karşılaştırmak için kahve kabuklarını kullanarak bir çalışma yapmıştır. Bunun için kahve kabukları 24 saat

boyunca kurutulup 1:1 kütle oranında $ZnCl_2$ ile muamele edilmiştir. Daha sonra 100 ml/dk N_2 akışı altında $550^\circ C$ 'de 3 saat boyunca pirolize edilmiştir. Aynı işlemler kahve kalıntısının $FeCl_3$ ile muamele edilmesiyle tekrarlanmıştır. Sadece piroliz sıcaklığı değiştirilmiştir ve $280^\circ C$ 'de piroliz edilmiştir. Demir tuzu, literatürde yaygın olarak tanımlanan aktifleştirici maddelerle kullanılan sıcaklıkların çok altında bir aktivasyon sıcaklığıyla, yüksek özgül yüzey alanına ($965\text{ m}^2/\text{g}$) ve çok küçük gözeneklere sahip bir malzemenin hazırlanmasına olanak sağlamıştır. Karakterizasyon çalışmaları, demir emdirilmiş malzemede bulunan bileşenlerin $280^\circ C$ 'lik bir sıcaklıkta tam bir pirolizinin olduğunu göstermiştir.

Sych ve ark.(2012), fosforik asitle kimyasal aktivasyon yoluyla mısır koçanından aktif karbonlar hazırlamıştır. Mısır koçanı öğütülmüş ve 0,5-1,0 mm parçacık boyutu elde edilene kadar elenmiştir. Kurutulmuş mısır koçanı, 50 ml H_3PO_4 çözeltisi ile emdirilmiştir. Mısır koçanı 1 saat ıslatılmış ve ardından 2 saat boyunca $180^\circ C$ 'de havada kurutulmuştur. Emprenye edilmiş mısır koçanı boru şeklindeki kuvars reaktöre yerleştirilmiş ve argon akışında ($0,5\text{ l/dak}$) $400^\circ C$ 'de 1 saat boyunca ısıtılma tabi tutulmuştur. BET yüzey alanı ve tüm gözenek hacimleri (toplam, mikro gözenek ve mezo gözenek), $1,0$ 'a kadar emdirme oranının artmasıyla artmış ve daha fazla fosforik asit eklenmesiyle azalmıştır.

Auta ve ark.(2011), aktive edici madde olarak potasyum asetat kullanarak atık çaydan aktif karbon üretmişlerdir. Aktive edici maddenin emdirilme oranı (0,3-2,5), aktivasyon sıcaklığı ($500-800^\circ C$) ve aktivasyon süresi (60-150 dakika) olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda BET yüzey alanı $854\text{ m}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur ve bu da atık çaydan bazı geleneksel ticari aktif karbonlarla karşılaştırılabilir yüksek verimli aktif karbon hazırlanabileceğini göstermektedir.

Tablo 4. Farklı aktifleştirici ajanlar kullanılarak üretilen aktif karbonların BET karşılaştırmaları

Hammadde	Aktifleştirici Ajan	Sıcaklık ($^\circ C$)	Süre (h)	BET (m^2/g)	Referans
Üzüm sapı	$ZnCl_2$	700	2	1411	(Özdemir vd, 2014)
Antep fıstığı kabuğu	$ZnCl_2$	400	1	1635	(Chong Lua vd, 2005)
Atık patates	$ZnCl_2$	600	1	1357	(Zhang vd, 2015)
Kahve kabukları	$FeCl_3$	280	1	965	(Oliveira vd , 2009)

Mısır koçanı	H ₃ PO ₄	400	1	2081	(Sych vd, 2012)
Erik çekirdekleri	NaOH	780	1	1887	(Tseng, 2007)
Atık çay	KCH ₃ COO	800	2	854	(Auta vd,2011)

Aktif karbonun yapısı oldukça heterojendir. Aktif karbondaki gazların adsorpsiyon kinetiği, aktif karbonun yüzey heterojenliği doğru bir şekilde ele alınmadan basit bir homojen modelle iyi bir şekilde yorumlanamaz. Heterojen gözenekli bir partiküldeki adsorpsiyon kinetiği için çeşitli modeller incelenmiştir (Shizhang Qiao vd, 2000).

Gözenekli malzemelerin en önemli dokusal özellikleri arasında, her gözenek boyutu için gözenek hacimlerini tanımlayan Gözenek Boyut Dağılımı (PSD) bulunur. Nanogözenekli malzemelerin PSD'sini elde etmek için en çok kullanılan yöntemler, farklı teorileri uygulamak için önemli araştırmaların yürütüldüğü 77 K' deki N₂ adsorpsiyon-desorpsiyon deneysel izoterm verilerine dayanmaktadır. PSD'yi değerlendirmek için kullanılan yöntemler iki gruba ayrılabilir: moleküler teorileri kullananlar(mikroskobik yöntemler) ve kılcal yoğunlaşma teorisine dayananlar (makroskopik yöntemler) (Jhonny Villarroel-Rocha vd, 2014).

Liu ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada kömür katranı bazlı 1–2 mm çapında aktif karbon makroküreler geliştirmiş ve KOH aktivasyonu ile yüksek oranda ultra-mikrogözenek (<0,8 nm) yapısı elde etmişlerdir. aktif karbon, adsorpsiyon mekanizması olarak ağırlıklı biçimde fiziksel adsorpsiyona dayandığından, özellikle yüksek sıcaklık ve düşük CO₂ kısmi basınçlarında tutma kapasitesi önemli ölçüde azalmaktadır. Literatürde 25 °C ve 0,15 bar koşullarında CO₂ tutma kapasitesi 1,5–1,8 mmol/g seviyelerine ulaşmıştır. Yapılan çalışmada iki numune hazırlanmıştır; PAC0,5-700 ve PAC1-700. K ile muamele edilmiş katran karbonları, özellikle 0,8 nm'nin altındaki dar mikrogözenekler olmak üzere iyi gelişmiş bir mikrogözeneklilik sunmaktadır. Temelde, 1,1 ve 1,2 nm civarında küçük bir tepe dışında, hazırlanan her iki numune de çift tepe mikrogözenek dağılımı göstermiştir, yani PAC0,5-700 için 0,36 ve 0,52 nm; PAC1,0-700 için ise 0,38 ve 0,61 nm. KOH/karbon oranı arttıkça, gözenek boyutu dağılımlarındaki tepeler daha büyük çaplara doğru hafifçe kaymış, bu da geliştirilmiş aktivasyonun bir sonucu olarak dar mikrogözeneklerin genişlemesinden kaynaklanmış olabilir. (Jingjing Liu vd, 2018)

Guo ve ark.(2009), yaptıkları çalışmada 600°C karbonizasyon sıcaklığında 2 saat CO₂ aktivasyonu ile elde edilen karbonize Hindistan cevizi kabuğu kömüründen elde edilen aktif karbonun dokusal karakterizasyonu incelemişlerdir. Aktivasyon sıcaklığının, aktivasyon

süresinin ve CO₂ akış hızının BET yüzey alanı, toplam hacim, mikro gözenek hacmi ve hazırlanan aktif karbonların verimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. 600° C karbonizasyon sıcaklığında 2 saat boyunca CO₂ aktivasyonu ile elde edilen karbonize Hindistan cevizi kabuğu kömürleşmesinden elde edilen aktif karbonlar hazırlanmıştır. BET yüzey alanı 1700 m²/g maksimum değerine şu koşullarda ulaşabilmiştir: aktivasyon sıcaklığı 900° C, aktivasyon süresi 240 dakika, CO₂ akış hızı 800 cm³/dakika. Hazırlanan aktif karbonların toplam hacmi ve mikro gözenek hacmi sırasıyla 1,135 ve 0,882 cm³/g olarak bulunmuştur. Hazırlanan aktif karbonun gözeneklilik özellikleri üzerinde aktivasyon sıcaklığı, aktivasyon süresi ve CO₂ akış hızının etkilerine ilişkin sonuçlar incelendiğinde; (i) aktivasyon sıcaklığının artırılmasının gözenek oluşumu, gözeneklerin genişlemesi ve mezogözenekliğin artması için uygun olduğu; (ii) aktivasyon süresinin artırılmasının mikrogözenek ve mezogözeneklerin artması için uygun olduğu; ancak daha uzun aktivasyon süresinin gözeneklerin çökmesine neden olacağı; (iii) CO₂ akış hızının artırılmasının aktif merkezler arasındaki reaksiyonlar için uygun olduğu, akış hızının daha da artırılmasının numunelerin yanmasına neden olacağı ve gözenek oluşumuna hiçbir katkısı olmadığı ortaya çıkmıştır. (Shenghui Guo vd, 2009)

Saka (2012), yaptığı çalışmada meşe palamudu kabuğundan çinko klorür ile 600° C’de N₂ atmosferinde kimyasal aktivasyonla aktif karbon üretmiştir ve özelliklerini incelemiştir. Bunun için meşe palamudu Mardin’den toplanmıştır. 17 g meşe palamudu kabuğu farklı ZnCl₂ konsantrasyonları (%20,30,40 ve 50) içeren çözeltilere daldırılmıştır ve belli bir süre bekletilmiştir. Elde edilen aktif karbonlar daha sonra azot atmosferi altında 300, 400, 500 ve 600° C ‘de 15, 30, 45 ve 60 dakika boyunca kimyasal olarak aktive edilmiştir. Aktif karbonların özgül yüzey alanı, gözenek hacmi ve gözenek çapı açısından karakterizasyonu BET yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Mikro gözenek hacmi, t-Plot mikro gözenek hacmi kullanılarak hesaplanmıştır. Gözenek boyutu dağılımı, Barrett-Joyner-Halenda (BJH) modeli kullanılarak belirlenmiştir. 600° C aktivasyon sıcaklığında, 30 dk aktivasyon süresi ve 24 saat emdirme süresi ile üretilen aktif karbonlar için maksimum BET yüzey alanının 1289 m²/g olduğu bulunmuştur. Elde edilen aktif karbonun mikro gözenek hacmi, t-plot yöntemine göre 0,201 cm³/g’ dır. BJH adsorpsiyon ortalama gözenek genişliği 2,669 nm olarak bulunmuştur. (Saka, 2012)

Güneş ve Jiang (2010), yaptıkları çalışmada kauçuk çekirdeği kabuğunun fiziksel aktivasyonlu aktif karbon üretimi için hammadde olarak kullanımını araştırmıştır. Üretilen aktif karbonlar, azot adsorpsiyon izotermi, taramalı elektron mikroskobu, termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetrik yöntemlerle karakterize edilmiştir. Hazırlanan aktif karbonun gözenek

yapısı üzerinde aktive etme sıcaklığının önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıkta, gözenek yapısı esas olarak mikro gözeneklerden oluşuyordu; ancak karbonizasyon sıcaklığının artmasıyla mezo gözenek oluşumu artmış ve ayrıca aktif karbonun toplam gözenek hacmi de artmıştır. Mikro gözenek bağıl oranı azalmış ancak mezo gözenek bağıl oranı artmıştır. Aktifleştirici madde ile karbon arasındaki reaksiyon hızının sıcaklık arttıkça geometrik olarak arttığı öğrenilmiştir. (Kang Güneş vd, 2010)

Literatürde birçok malzemeden aktif karbon üretimi ve CO₂ adsorplama kapasiteleri araştırılmıştır ve yapılan çalışmalar aktif karbonların yüksek oranda CO₂ adsorplama kapasitesine sahip olduklarını göstermiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Li ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada pirinç kabuğundan aktif karbon üretmişlerdir. Elde edilen malzeme daha sonra CO₂ adsorpsiyon kapasitesi, kinetiği ve rejenerasyonu açısından incelenmiştir. Çalışmalar, aktif karbonun mikro gözenekler ve mezo gözeneklerden oluşan çift gözenekli bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. BET özgül yüzey alanı, mezo gözenek hacmi ve mikro gözenek hacmi sırasıyla 1097 m²/g, 0,49 cm³/g ve 0,34 cm³/g olarak bulunmuştur. Geliştirilen aktif karbon 25° C ve 1 bar'da 3,1 mmol/g'a ulaşan yüksek bir CO₂ adsorpsiyon kapasitesi göstermiştir.

Ogunbenro ve ark.(2018), ümit verici bir adsorban materyal olarak hurma meyvelerinden aktif karbon hazırlanmasını araştırmıştır. AC sentezi, bir fırında pirolizi ve ardından 600 ila 900 °C arasındaki sıcaklıklarda karbondioksit ortamında aktive edilmiştir. Örnekler arasında, 800 °C' de pirolize edilen ve 900 °C'de 1 saat aktive edilen örnek, 3,21 mmol/g' a ulaşan en yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesini sergilemiştir. BET yüzey alanı 798,38 m²/g, mikro gözenek alanı 712,87 m²/g, mikro gözenek hacmi 0,28 cm³/g olarak bulunmuştur.

Ouzzine ve ark.(2021), yaptıkları çalışmada nar kabuğundan aktif karbon hazırlamıştır. CO₂ adsorpsiyonu için optimum koşullar, aktivasyon sıcaklığının kontrol edilmesiyle değerlendirilmiştir. Aktive edici madde olarak KOH kullanılmıştır. Aktif karbonlar 600-900 °C aralığındaki aktivasyon sıcaklıklarında sentezlenmiştir. En iyi CO₂ adsorpsiyon kapasitesi, 800° C' de ve 1 bar basınçta hazırlanan aktif karbon için 4,44 mmol/g olarak elde edilmiştir. BET yüzey alanı 2141 m²/g, toplam gözenek hacmi ise 1,28 cm³/g olarak bulunmuştur.

Ello ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada CO₂ yakalama için palmye kabuklarından mikro gözenekli aktif karbon hazırlamışlardır. Aktive edici madde olarak KOH kullanılmıştır. Elde edilen aktif karbonların mikro gözenek hacimleri ve BET yüzey alanları, 0,16 cm³/g, 365 m²/g ile 0,82 cm³/g, 1890 m²/g arasında değişmiştir. En iyi CO₂ adsorpsiyon kapasitesi 6,3 mmol/g olarak elde edilmiştir.

Sevilla ve ark. (2015), KOH ile aktifleştirilmiş aktif karbonlar üretmek için okalıptüs talaşı, selüloz ve patates nişastasını kullanmışlardır. KOH oranı ve aktivasyon sıcaklığı bakımından farklılık gösteren birkaç aktif karbon hazırlamışlardır. 600° C'lik aktivasyon sıcaklığında elde edilen aktif karbon örnekleri en yüksek CO₂ adsorplama kapasitesini göstermiştir (4,8 mmol/g).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

1. Materyallerin Temini ve Hazırlanması

Tez çalışmasında kullanılan sütleğen bitkisi (*Euphorbia stricta* L.) Erzurum'un doğal ortamından toplandı. Toplanan bitkiler oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Kuruyan bitkilerin kök, gövde ve çiçek kısımları ayrıldı. Ağırlıkça % 74,2 gövde, %16,5 kök ve %9,3 çiçek elde edildi. Bu kısımlar tek tek öğütücüde öğütüldü ve 0.63 mm elekten geçirildi. Bitkinin nemini tamamen uzaklaştırmak için hava üfleme bir fırında 100 °C'de 1 saat kurutuldu. Her bir deneme için hazırlanan numunelerin ağırlıkça % 75 gövde, % 15 kök ve %10 çiçekli kısımdan oluşmaları sağlandı. Deneylerde kullanılan çinko klorür (ZnCl₂) TEKKİM firmasından temin edildi.



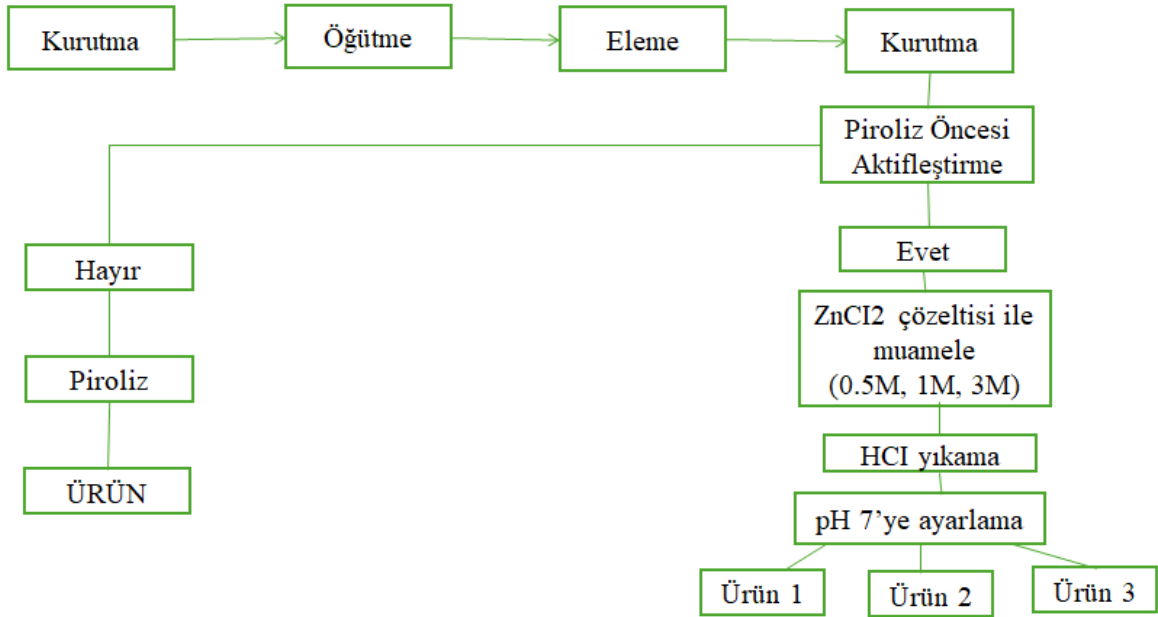
Şekil 7.Sütleğen(*Euphorbia stricta* L.)bitkisinin kök, gövde ve çiçek kısımları



Şekil 8.Sütleğen bitkisinin öğütme eleme işlemleri

2. Aktif Kömürlerin Hazırlanması

Literatürde aktif kömür hazırlamak için kullanılan pekçok malzeme mevcuttur. Üretilen sayısız malzemeden aktif kömürün CO₂ adsorplama kapasiteleri incelenmiştir ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada aktif kömür üretmek için sütleğen bitkisi kullanılmıştır. Bitkinin pirolizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada bitki direkt piroliz edilmiştir. İkinci aşamada ise aktifleştirici madde kullanılarak piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için farklı derişimlerdeki ZnCl₂ çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 9.Aktif kömür üretim aşamaları

Doğrudan Piroliz

Aktif kömür üretiminin birinci aşamasında analize hazır hale getirilen bitkinin 30 gramı piroliz öncesi aktifleştirme olmadan direkt olarak piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Piroliz işlemi için bir labotatuvar fırını (Carbolite CWF1200) kullanılmıştır. 30 g sütleğen bitkisi inert azot atmosferi altında 350°C' de 2 saat boyunca pirolize edilmiştir.



Şekil 10. Piroliz işleminin gerçekleştirildiği fırın

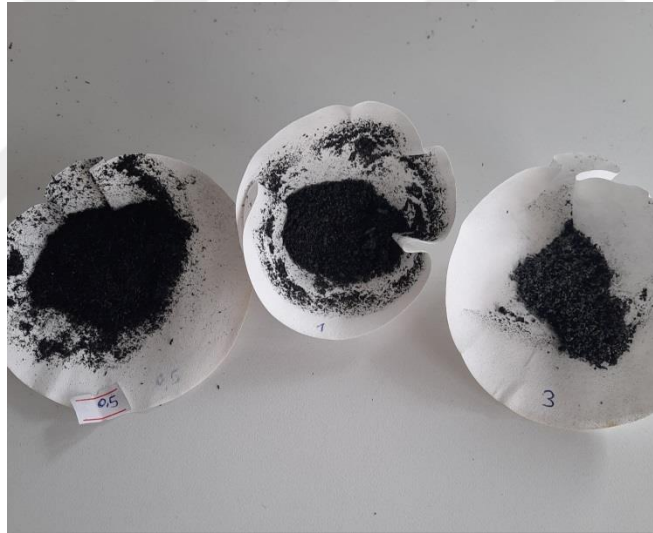
ZnCl₂ ile muameleden sonra piroliz

20 g bitki (3 g kök, 15 g gövde, 2 g çiçek) alınarak üzerine 100 ml, 0,5 M'lık hazırlanmış olan ZnCl₂ çözeltisi ilave edilmiştir. 1g bitki / 5ml çözelti oranı kullanılarak manyetik karıştırıcı ile 40° C' de 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra süzülüp 2 saat boyunca 150° C'de kurutulmuştur. Kurutulan bitki numunesi 350° C'de 2 saat piroliz edilmiştir. Elde edilen aktif kömürün pH'ı 7'ye ayarlanmıştır.

Aynı işlemler 1M ve 3M'lık ZnCl₂ çözeltileri kullanılarak tekrarlanmıştır. 1M'lık ZnCl₂ çözeltisi hazırlamak için 13,6 g ZnCl₂ alınarak 100 ml'ye tamamlanmıştır. 3M'lık ZnCl₂ çözeltisi için 40,8 g ZnCl₂ alınarak 100 ml'ye tamamlanmıştır. Böylece üç tane ürün elde edilmiştir. Elde edilen ürünler Şekil 11' de gösterilmiştir.



Şekil 11.Bitkinin $ZnCl_2$ çözeltisi ile muamelesi ve süzülmesi işlemi



Şekil 12.0,5 M'lık, 1 M'lık ve 3 M'lık $ZnCl_2$ çözeltisiyle hazırlanan aktif kömürler

3. Aktif Kömürün Karakterizasyonu

Hazırlanan aktif kömür Brunauer, Emmett ve Teller (BET) , Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FT-IR) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir.

3.1.BET Analizi

Hazırlanan aktif kömürlerin yüzey alanlarındaki değişimleri gözlemlemek amacıyla BET analiz cihazı (Micromeritics) kullanılmıştır. BET yüzey alanı 77 K'de N₂ ve 298 K'de karbondioksit adsorpsiyon izotermi kullanılarak elde edilmiştir.

3.2. FT-IR Analizi

Aktif kömürlerin yapısındaki fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometre cihazı kullanılmıştır. FT-IR spektrumları 400 cm⁻¹ ile 4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında kaydedilmiştir.

3.3. SEM Analizi

Numunelerin yüzey özelliklerini ve morfolojisini incelemek için Zeiss Sigma 300 markalı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

4. Bitkinin Karakterizasyonu

4.1.Elementel Analiz

Sütleğen bitkisinin kısmi analizi (nem ve kül miktarı) bir konvektif fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nem tayini için bitki numunesinden 1 g alınarak 105° C'de 24 saat boyunca fırında bekletilmiş ve soğutulduktan sonra tartılmıştır. Kül analizi için 575°C kül fırınına 1 g numune yerleştirilmiş ve 4 saat boyunca bekletilmiştir. Soğutulduktan sonra tartılmıştır. Bitkinin elementel analizinde % C, H, N, S miktarları ölçülmüştür.

4.2 Termogravimetrik Analiz

Sütleğen bitkisinin termal davranışını belirlemek için SDT650 marka termogravimetrik analiz cihazı (TGA-DSC) kullanılmıştır. Analiz 40°C-800°C sıcaklık aralığında, 10°C/dakika ısıtma hızında ve azot ortamında yapılmıştır.

4.3. CO₂ Adsorpsiyon Deneyleri

CO₂ adsorpsiyonu deneyleri, malzemelerin mikro gözenekli yapısının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada belirli bir miktar numune, BET cihazına yerleştirilmiş ve CO₂ gazı ile adsorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için yine BET analiz cihazı (Micromeritics) kullanılmıştır. Adsorpsiyon süreci sırasında, CO₂ moleküllerinin malzeme yüzeyine tutunması ölçülerek adsorpsiyon izotermi elde edilmiştir. Elde edilen izotermelerde malzemenin mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek yüzey alanı hakkında bilgi vermektedir. CO₂ gazının küçük molekül boyutu, özellikle 2 nm'den küçük mikro gözeneklerin incelenmesine olanak

sağlamaktadır. Böylelikle malzemenin gözenek dağılımı ve yüzey özellikleri ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir. CO₂ adsorpsiyon izotermi, basınca karşılık tutulan gaz miktarının değişimini göstermektedir. Bu grafikler aracılığıyla malzemenin mikro gözenek hacmi ve yüzey alanı hesaplanabilmekte, ayrıca gözenek boyutu ve dağılımı hakkında bilgi edinilebilmektedir. Düşük basınç bölgelerindeki hızlı artış, özellikle mikro gözeneklerin dolumunu işaret ederken; yüksek basınç değerlerinde ulaşılan plato kısmı, malzemenin maksimum CO₂ tutma kapasitesini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, malzemenin gözenek yapısının yanı sıra gaz depolama potansiyelini değerlendirmek açısından da önem taşımaktadır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

1. Elementel Analiz

Aktif kömür üretiminde kullanılacak olan Sütleğen bitkisinin ilk olarak elementel analizi ve kısmi analizi (nem tayini, kül tayini) yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Sütleğen bitkisinin kısmi ve elementel analizi

Kısmi Analiz	(%)
Nem	9,15
Kül	16,19
Elementel Analiz	(%)
C	44,71
H	5,24
N	0,38
S	0,01

2. Termogravimetrik Analiz

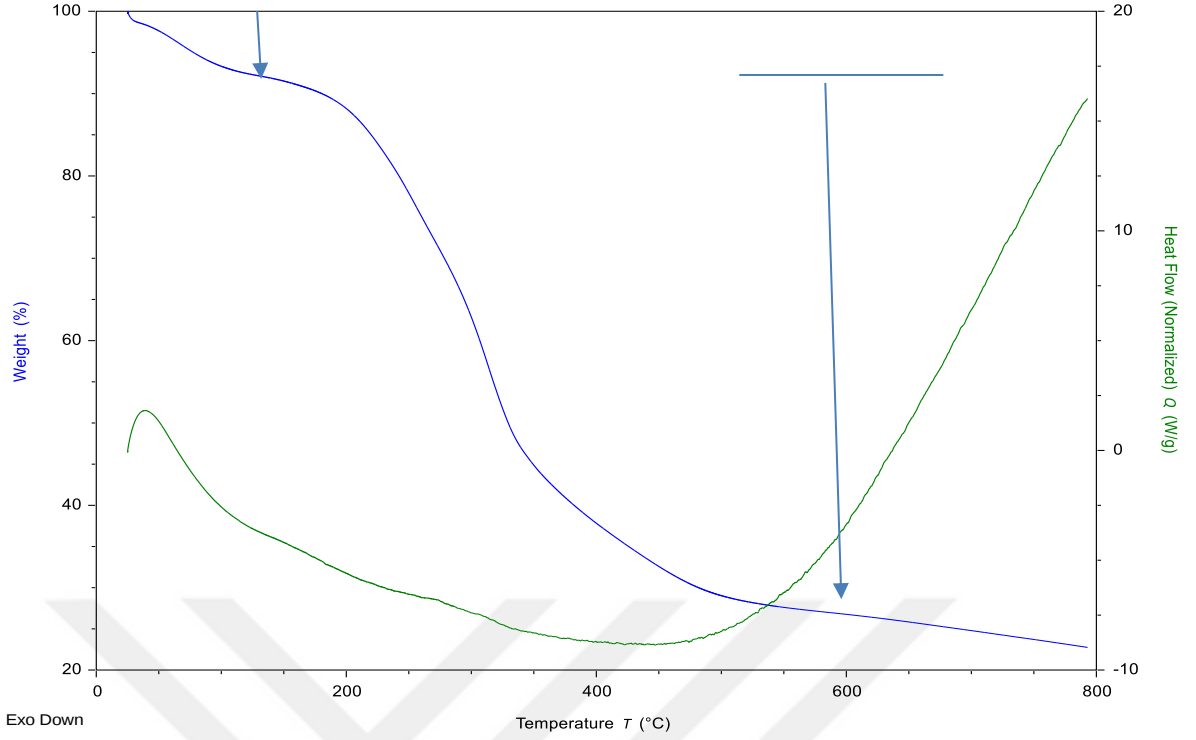
Organik maddelerden aktif kömür üretiminde, termogravimetrik analiz (TGA) hammaddenin termal bozunma davranışını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle azot atmosferinde gerçekleştirilen TG analizi, piroliz sürecinde meydana gelen kütle kayıplarını ölçmektedir. Organik madde ısıtıldıkça bitki önce fiziksel suyunu kaybeder, ardından uçucu organik bileşenler ayrışır ve geriye karbon zengini bir katı kalır. TGA eğrisi üzerinden, karbonizasyonun hangi sıcaklık aralığında gerçekleştiği, geride kalan karbon miktarı ve dolayısıyla ham aktif kömür verimi belirlenebilir. Bu veriler aktif kömür üretiminde optimum karbonizasyon sıcaklığının saptanması ve üretim verimliliğinin tahmin edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Şekil 13'te sütleğen bitkisinin azot atmosferinde elde edilen TG-DSC eğrileri görülmektedir. Bu grafiğe göre sütleğen bitkisinin azot atmosferindeki pirolizi iki bölgeye ayrılmaktadır.

Birinci bölge 25-180°C: Burada yaklaşık olarak %7 oranında ağırlık kaybı belirlenmiştir. Bu değer sütleğen bitkisinin nem yüzdesine yakındır (Tablo 5). Bu bölgede, bitkiden serbest ve bağlı su uzaklaşmaktadır.

İkinci bölge 180-600°C: En fazla ağırlık kaybı bu bölgede gerçekleşmektedir. Bu bölgede daha düşük sıcaklıklarda hemiselülozun parçalanmasıyla kademeli bir kütle kaybı gözlenir. Piroliz sırasında sırasıyla hemiselüloz ve selüloz, daha yüksek sıcaklıklarda ise lignin bozunmaktadır. Bu aralıkta ağırlık kaybı yaklaşık % 63' tür. 600 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli bir ağırlık kaybı gözlenmemiştir. Bu nedenle 600 °C' nin üzerindeki sıcaklıkların aktivasyon için daha uygun olduğu söylenebilir (Özdemir vd, 2014).

Bununla birlikte DSC eğrisinde büyük bir endotermik pik görülmektedir. Hem düşük sıcaklıklarda suyun buharlaşması hemde artan sıcaklıklarla bitkinin pirolizi endotermik proseslerdir.



Şekil 13. S tle en bitkisine ait azot ortamında TG-DSC eğrileri

3. BET Analizi

Aktif kömürlerin ve diğer adsorbanların yüzey alan büyüklükleri, adsorpsiyon yeteneği açısından son derece önemlidir. Yüzey alanı ve gözenek özelliklerindeki değişimler, başlangıç materyali ve yapısı, seçilen aktivasyon yöntemi ve kullanılan ajanlar, sıcaklık ve piroliz süresi gibi çok sayıda faktöre bağlıdır (Gündoğdu vd, 2013).

3.1. $ZnCl_2$ Konsantrasyonunun Yüzey  zellikleri  zerine Etkisi

S tle en bitkisinden inert ortamda 350  C' de piroliz ile elde edilen aktif kömürlerin yüzey özellikleri bir gaz adsorpsiyon cihazında 77 K'de N_2 adsorpsiyonu ile karakterize edildi. Bunun için    t lm   olan bitkinin kendisi, direkt piroliz olmuş, 1 M $ZnCl_2$ ile muamele edildikten sonra piroliz olmuş ve 3M $ZnCl_2$ ile muamele edildikten sonra piroliz olmuş olan numunelerden belirli miktarlarda alınarak analize gönderilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 6' da kar ıla tırılmı tır.

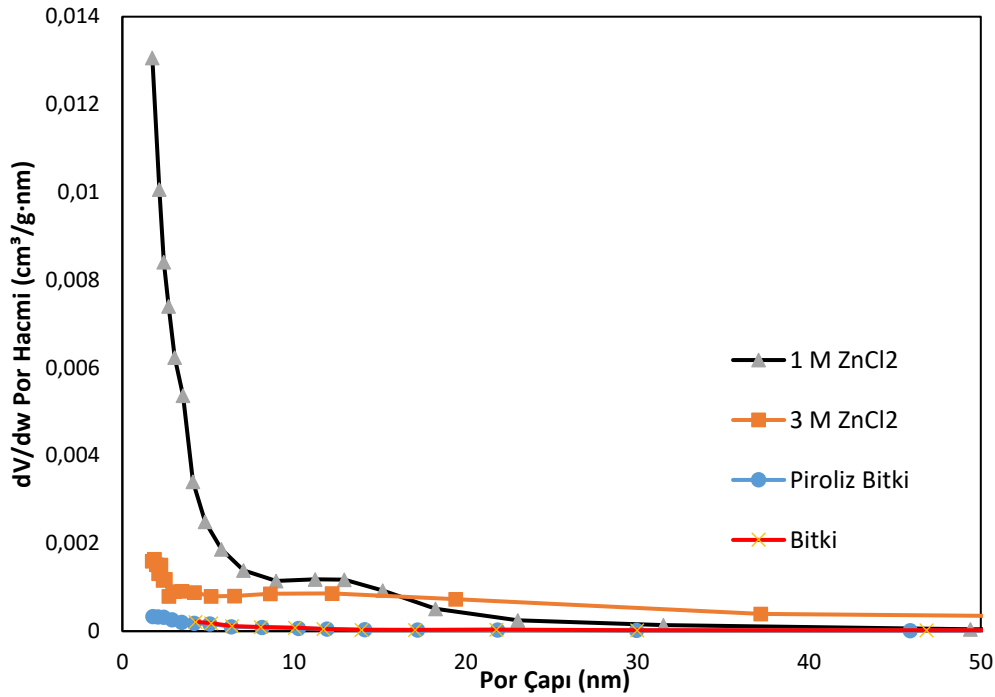
Tablo 6. 350  C de Piroliz Edilmiş Numunelerin BET analiz sonuçları

Numune	BET yüzey alanı (m^2/g)	Mikropor hacmi (cm^3/g)	Mikropor alanı (m^2/g)
--------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------

Bitki	0.031	0.00000	0.00000
P.Bitki	1.76	0.000674	0.0002
1 M ZnCl ₂	164.5172	0.056465	110.3791
3 M ZnCl ₂	27.15	0.005805	11.7949

Doğal sütleğen bitkisinin yüzey alanı ve mikropor hacmi neredeyse sıfırdır, bu da malzemenin gözeneksiz veya çok düşük gözenekli olduğunu göstermektedir. 350°C’de piroliz edilmiş bitkide ise sınırlı bir artış gözlenmiş, mikropor hacmi ve yüzey alanı düşük kalmıştır. 1 M ZnCl₂ ile aktivasyon uygulanmış numune, BET yüzey alanı ve mikropor hacmi açısından oldukça belirgin bir artış göstermiştir; bu durum ZnCl₂ aktivasyonunun gözenek oluşumunu etkin biçimde artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak 3 M ZnCl₂ ile işlenen numune, beklenenden daha düşük yüzey alanı ve mikropor hacmine sahiptir; bu durum yüksek ZnCl₂ konsantrasyonunun gözenek yapısını kısmen bozmuş olabileceğine işaret etmektedir.

Numunelerin gözenek yapısını daha iyi anlamak için por boyut dağılımları Şekil 14’de gösterilmektedir.



Şekil 14. Sütleğen bitkisi, piroliz bitki, 1 M ve 3M ZnCl₂ ile aktive edilmiş aktif kömürlerin por dağılımları

Şekil 14 incelendiği zaman ZnCl₂ ile aktivasyon yönteminde, ZnCl₂ derişiminin numunelerin gözenek boyut dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. 1 M ZnCl₂ ile aktive edilen numune, 2 nm'nin altında yoğunlaşan belirgin bir mikropor dağılımı sergilemiştir. Bu yoğun mikropor yapısı, yüksek bir adsorbent kapasitenin elde edilebileceğini işaret etmektedir. Buna karşılık, 3 M ZnCl₂ ile aktive edilen numunede mikropor hacminin azaldığı, bunun yerine 5–20 nm aralığında mezopor yoğunlaşmasının arttığı gözlenmektedir. Bu durum, CO₂ gibi küçük moleküller için uygun mikropor yapısının azalması nedeniyle adsorpsiyon kapasitesinin sınırlı kalabileceğini göstermektedir.

Piroliz edilen sütleğen bitkisi, oldukça düşük por hacmine sahip olup yalnızca sınırlı düzeyde gözenek oluşumu göstermiştir. Tablo 6'da bitkinin BET yüzey alanı 0.031 m²/g olduğu görülmektedir. Bitkide neredeyse hiç gözenek yapısı gelişmediği için belirgin bir por dağılımı da gözlenmemiştir. Bu sonuç, yalnızca piroliz işleminin veya aktivasyonsuz kullanımın gözenekli yapı oluşturmak için yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır.

3.2. Sıcaklığın Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi

Pirolizi etkileyen en önemli parametrelerden biri sıcaklıktır. Sıcaklık değişiminin etkisini gözlemlemek için sütleğen bitkisi, Bölüm 3.1' de en iyi yüzey özelliklerine sahip numune üretimini sağlayan 1 M ZnCl₂ çözeltisi ile muamele edilerek, 350°C, 500°C ve 600°C

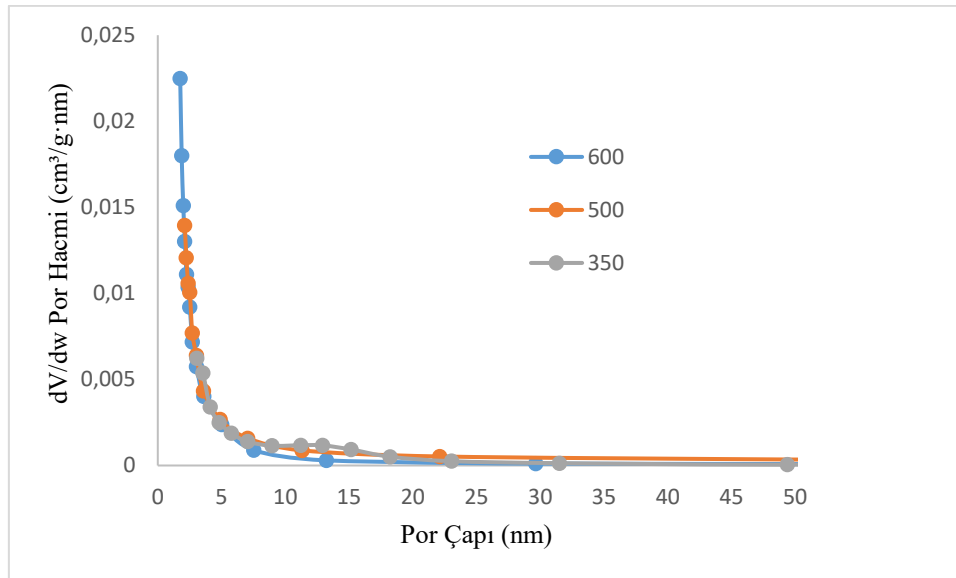
sıcaklıklarda piroliz edildi. Elde edilen aktif kömürlerin yüzey özellikleri bir gaz adsorpsiyon cihazında 77 K’de N₂ adsorpsiyonu ile karakterize edildi. Bunun için farklı sıcaklıklarda hazırlanmış olan numunelerden belli miktarda alınarak analize gönderildi. Elde edilen sonuçlar tablo 7’ gösterilmiştir.

Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda üretilen aktif kömürlerin BET analizleri

Numune	BET (m ² /g)	Mikropor alanı (m ² /g)	Mikropor hacmi (cm ³ /g)
350°C	164,5172	110,3791	0,056465
500°C	160,4580	90,2802	0,144899
600°C	106,3699	42,6159	0,090747

350°C için gözeneklerin oluşmaya başladığı daha önce Tablo 6’ da sunulan analiz sonucu ile görülmektedir. Sıcaklığın 350 °C ve 500 °C’ lere kadar çıkarılmasıyla BET yüzey alanında ve mikropor hacminde kayda değer bir değişimin gerçekleşmediği görülmektedir. Ancak 500 – 600 °C arasında yaklaşık %50 değerinde azalma olmuştur.

Numunelerin gözenek yapısının sıcaklığa bağlı değişimini incelemek için Şekil 15 grafik edilmiştir.



Şekil 15. Farklı sıcaklıkta pirolize olmuş numunelerin gözenek dağılımları

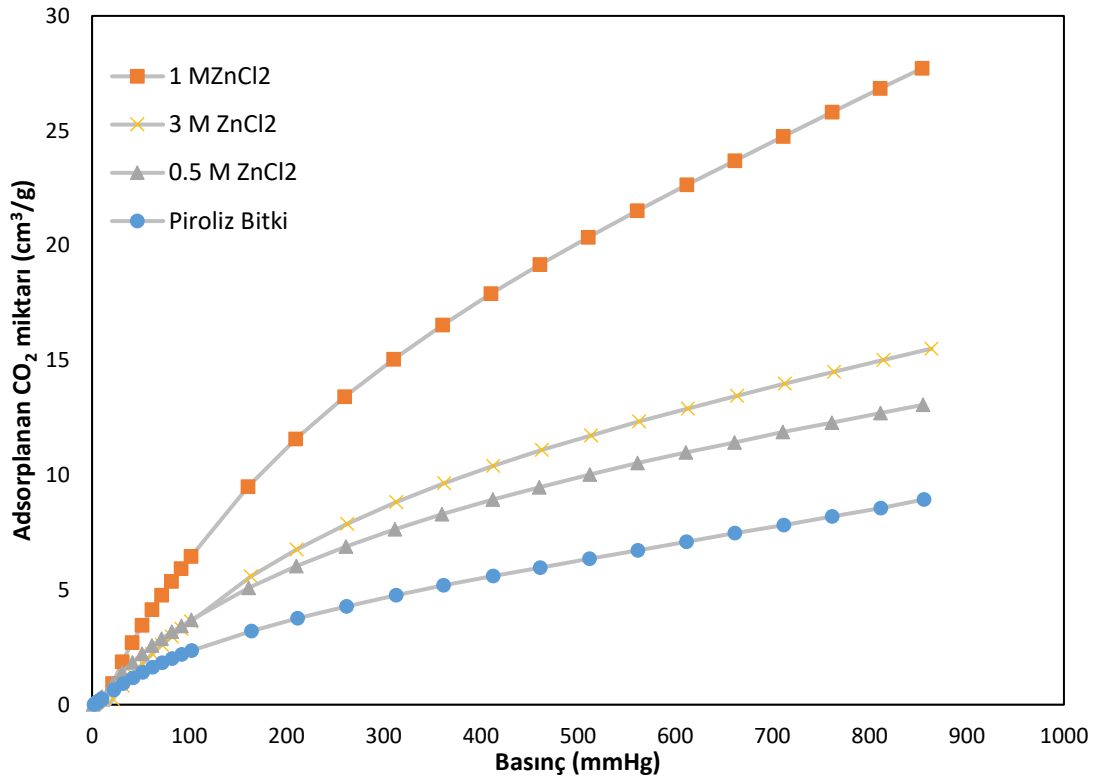
Hazırlanan aktif kömürlerin aktivasyon sıcaklığına bağlı olarak por dağılımları yaklaşık 2-7 nm arasında yoğunlaşmıştır. Özellikle 600 °C’ de por çapı dağılımı diğerlerine nazaran

daha fazla 2-5 nm arasında yoğunlaşmıştır. Bu sıcaklıkta numunede daha fazla mikropor oluştuğu söylenebilir.

4. CO₂ Adsorpsiyon İşlemi

Piroliz bitki ve farklı konsantrasyonlarda ZnCl₂ kullanılarak gerçekleştirilen kimyasal aktivasyon yöntemiyle üretilen aktif kömürler, CO₂ adsorpsiyonu deneylerinde kullanılmıştır. Adsorpsiyon süreci sırasında, CO₂ moleküllerinin malzeme yüzeyine tutunması ölçülerek adsorpsiyon izotermi elde edilmiştir.

4.1. ZnCl₂ Konsantrasyonunun CO₂ Adsorpsiyonuna Etkisi



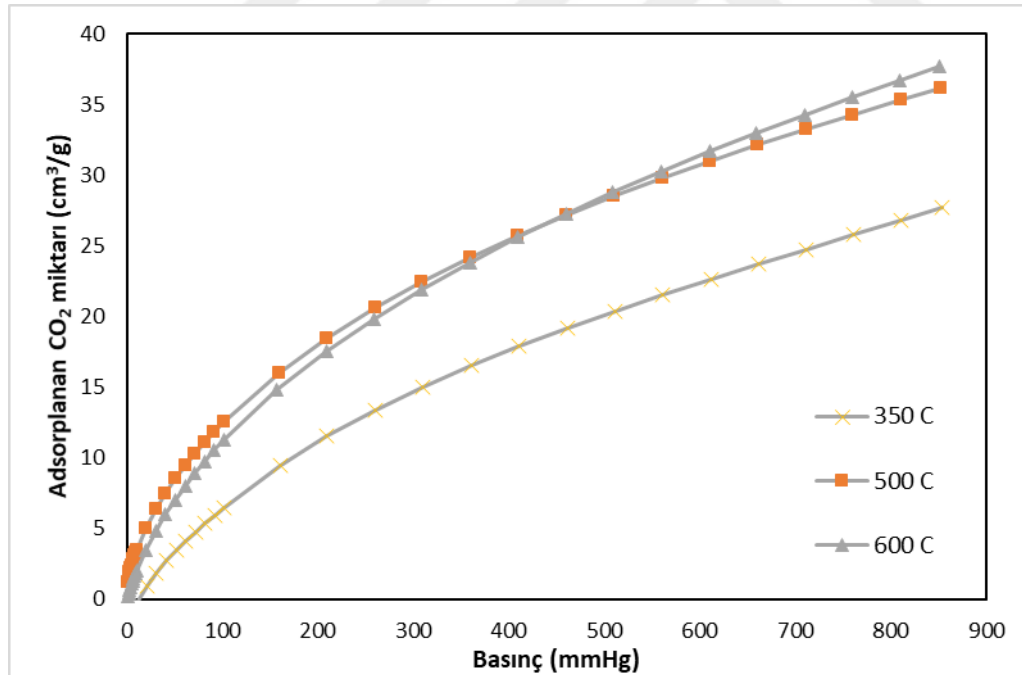
Şekil 16. Piroliz bitki, 1 M ve 3M ZnCl₂ ile aktive edilmiş aktif kömürlerin CO₂ adsorpsiyon izotermi

Şekil 16 incelendiğinde, ZnCl₂ ile kimyasal aktivasyon uygulanmış numunelerin yalnızca piroliz sonrası elde edilen örneğe (piroliz bitki) kıyasla belirgin ölçüde yüksek CO₂ adsorpsiyon kapasitesi sergilediği açıkça görülmektedir. Özellikle 1 M ZnCl₂ ile aktive edilen numune, yaklaşık 900 mmHg basınçta 27–28 cm³/g değerlerine ulaşarak en yüksek adsorpsiyon performansını sergilemiştir. Buna karşın, 0.5 M ve 3 M ZnCl₂ ile aktive edilen örnekler sırasıyla ~13 cm³/g ve ~15 cm³/g seviyelerine ulaşmış; sadece piroliz yöntemiyle hazırlanan numune ise ~9 cm³/g gibi düşük bir kapasite göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar, ZnCl_2 konsantrasyonunun CO_2 adsorpsiyon performansında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Literatürde de benzer şekilde, düşük ZnCl_2 oranlarının yüksek mikroporozite ve başarılı gaz tutma kapasitesiyle ilişkilendirildiği ifade edilmiştir. Bataklık kökenli (peat-derived) karbonlarda belirli oranlarda ZnCl_2 ile optimal olarak mikroporlar oluşturmuş ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağlamıştır. Öte yandan, aşırı yüksek ZnCl_2 miktarlarının gözenek gelişimini engelleyebileceği veya gözeneklerin ZnO gibi oluşumlarla tıkanmasına yol açabileceği de bu çalışmada bildirilmiştir. (Möller vd, 2023)

1 M ZnCl_2 aktivasyonu hem gözenekli yapı oluşumu hem de CO_2 tutma kapasitesi açısından en verimli koşul olarak değerlendirilmektedir. Daha düşük konsantrasyonlar yeterli gözenek gelişimi sağlamazken, daha yüksek konsantrasyonlarda adsorpsiyon kapasitesindeki azalma, gözenek tıkanması veya yapısal bozulma gibi olası nedenlerle de açıklanabilir. Bu bulgular, literatürdeki diğer çalışmalarla tutarlılık göstermekte ve optimum ZnCl_2 derişiminin, yapısal ve fonksiyonel olarak ideal olduğu sonucunu desteklemektedir (Pelech vd, 2022).

4.2. Piroliz Sıcaklığının CO_2 Adsorpsiyonu Üzerine Etkisi



Şekil 17.1 1 M ZnCl_2 ile aktive edilerek farklı sıcaklıkta piroliz edilmiş aktif kömürlerin CO_2 adsorpsiyon izotermi

Şekil 17 incelendiğinde, piroliz sıcaklığının CO_2 adsorpsiyon kapasitesi üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. 600°C'de aktive edilen numune, yaklaşık 900 mmHg basınçta 37–38 cm^3/g kapasiteye ulaşarak en yüksek performansı sergilemiştir. 500°C'de

hazırlanan örnek ise benzer şekilde yüksek bir kapasite (35–36 cm³/g) göstermiş, ancak 600°C'ye kıyasla biraz daha düşük kalmıştır.

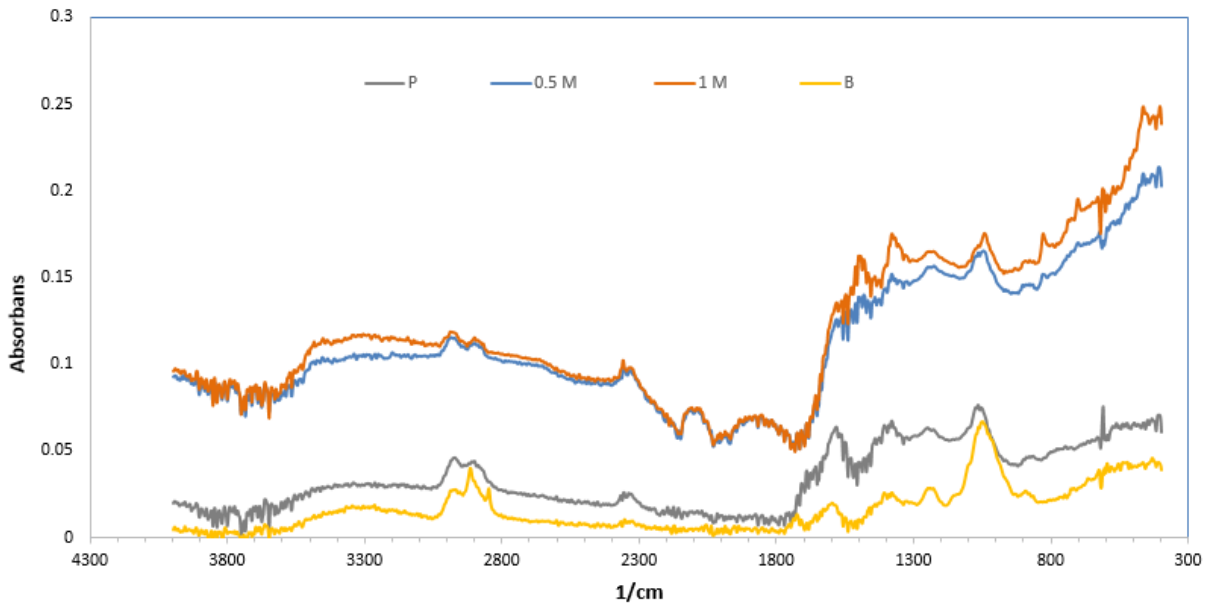
Bununla birlikte, 350°C'de aktive edilen örnek, yaklaşık 27 cm³/g kapasiteye ulaşmış ve diğer örneklerle göre daha düşük bir adsorpsiyon sergilemiştir. Bu sonuç, kimyasal aktivasyonun yanı sıra sıcaklık kontrolünün de CO₂ tutma kapasitesi açısından belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürde de benzer şekilde, 500–600°C aralığının aktif karbon üretimi için optimum koşullar sağladığı rapor edilmiştir (Guo vd, 2022).

Sonuç olarak, 500°C kabul edilebilir bir performans sağlarken, 600°C aktivasyonu CO₂ tutma kapasitesi açısından optimum koşul olarak değerlendirilmektedir.

4. FT-IR Analizi

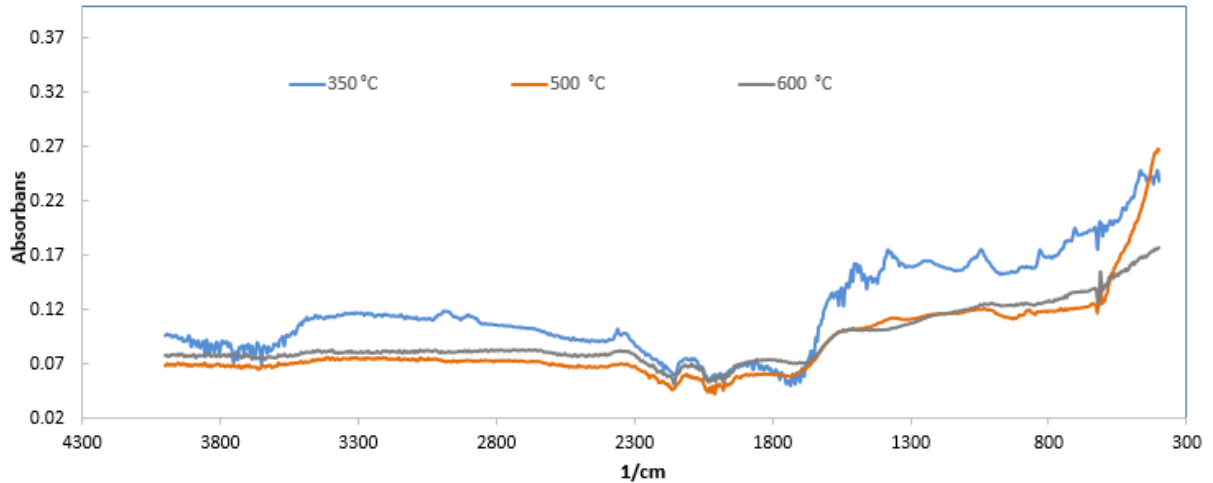
Aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi sadece gözenek yapısıyla değil aynı zamanda yüzeyinin kimyasal yapısıyla da tanımlanır. Aktif karbon yapısında birçok heteroatom (oksijen, hidrojen, azot vb.) tek atomlar veya fonksiyonel gruplar halinde bulunur. Oksijen, karbon matrisindeki en baskın heteroatomdur. Karbon-oksijen yüzey bileşikler, aktif karbonun yüzey reaksiyonları ve yüzey davranışları üzerinde etkisi olan en önemli merkezlerdir. Aktif karbonun adsorpsiyon özellikleri, yüzey gruplarının değiştirilmesiyle kontrol edilebilir (Gündoğdu vd, 2013).



Şekil 18. Bitkiye piroliz ve ZnCl₂' ün farklı konsantrasyonları ile aktivasyondan sonra piroliz işlemlerinin etkisini gösteren FTIR grafikleri

İnfrared spektroskopisinde 600-1500 cm^{-1} aralığı parmak izi bölgesi olarak kabul edilmektedir. Bu bölgede eğriler arasında çok büyük farklar yoktur ancak 0,5 ve 1 M ZnCl_2 ile muamele edilmiş numunelerde ağır atomları ve kristal yapıları temsil ettiği bilinen 100 - 400 uzak infrared bölgesinde ve metal karbonil gruplarını temsil eden 1860 - 2070 bölgelerinde çinkonun karbon yapısına yerleşiminden dolayı yeni pikler oluşmuştur.

1010–850 cm^{-1} aralığındaki bağlar metal=O gerilme titreşimlerine karşılık gelirken, 800–600 cm^{-1} aralığındaki bağlar metal–H bükülme titreşimlerine karşılık gelir (Stuart, 2004). Şekil 18’ de en üstteki 0,5 ve 1 M çözeltilerle aktive olmuş numuneler için sırasıyla 692 ve 698 cm^{-1} bölgesinde görülen piklerin Zn-H bağlarına ait olduğunu, 823 ve 846 cm^{-1} bölgesindeki piklerin ise Zn=O piklerini temsil ettiğini söyleyebiliriz. ZnCl_2 aktivasyonu ile oluşan bu bağların, özellikle 1 M ürününde CO_2 adsorplama kapasitesini artıran önemli bir etken olduğu söylenebilir.

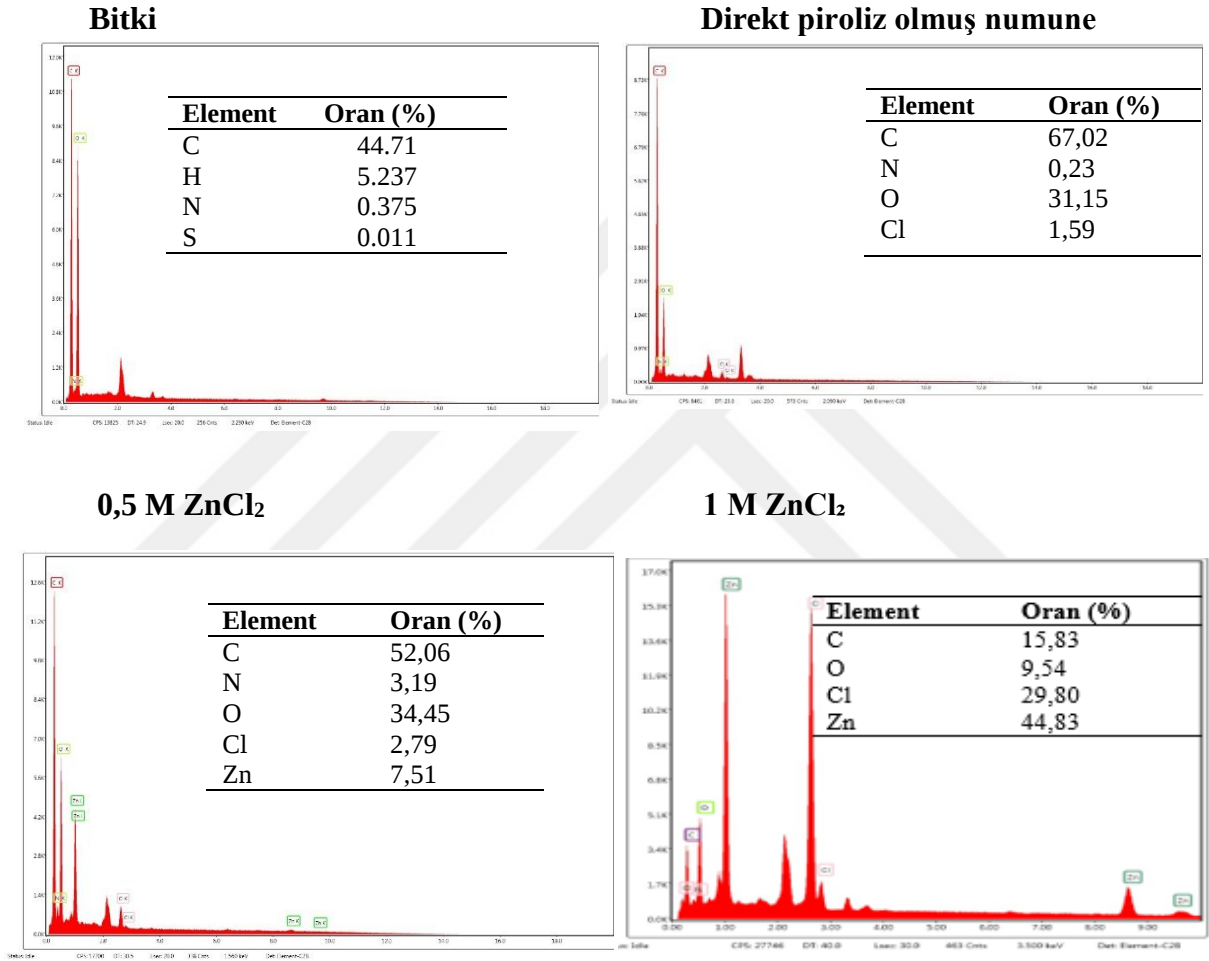


Şekil 19.1 M ZnCl_2 ile aktivasyondan sonra farklı sıcaklıklarda piroliz sonrası elde edilen aktif kömürlerin FTIR grafikleri

Şekil 19’ da görüldüğü gibi 350 °C de pirolize olan bitkide özellikle 1200 – 1600 cm^{-1} aralığındaki aromatik yapılar ve ester gruplarıyla ilişkilendirilebilen C=C ve C=O bağlarına ait piklerin ve 2850 – 2965 cm^{-1} aralığında alkan, aldehit, metil gibi gruplarda bulunabilen C-H titreşimine ait belirgin bantların daha yüksek sıcaklıklarda uçuculaşma nedeniyle kayboldukları görülmektedir (Zama vd, 2017). Şekil 18’ de olduğu gibi, bu şekilde de metal karbonil gruplarını temsil eden 1860 - 2070 bölgelerinde çinkonun karbon yapısına yerleşimini gösteren pikler mevcuttur. Bu şekilde yerleşen Zn atomları piroliz sırasında gözenekliliğin oluşmasında etkili rol almıştır.

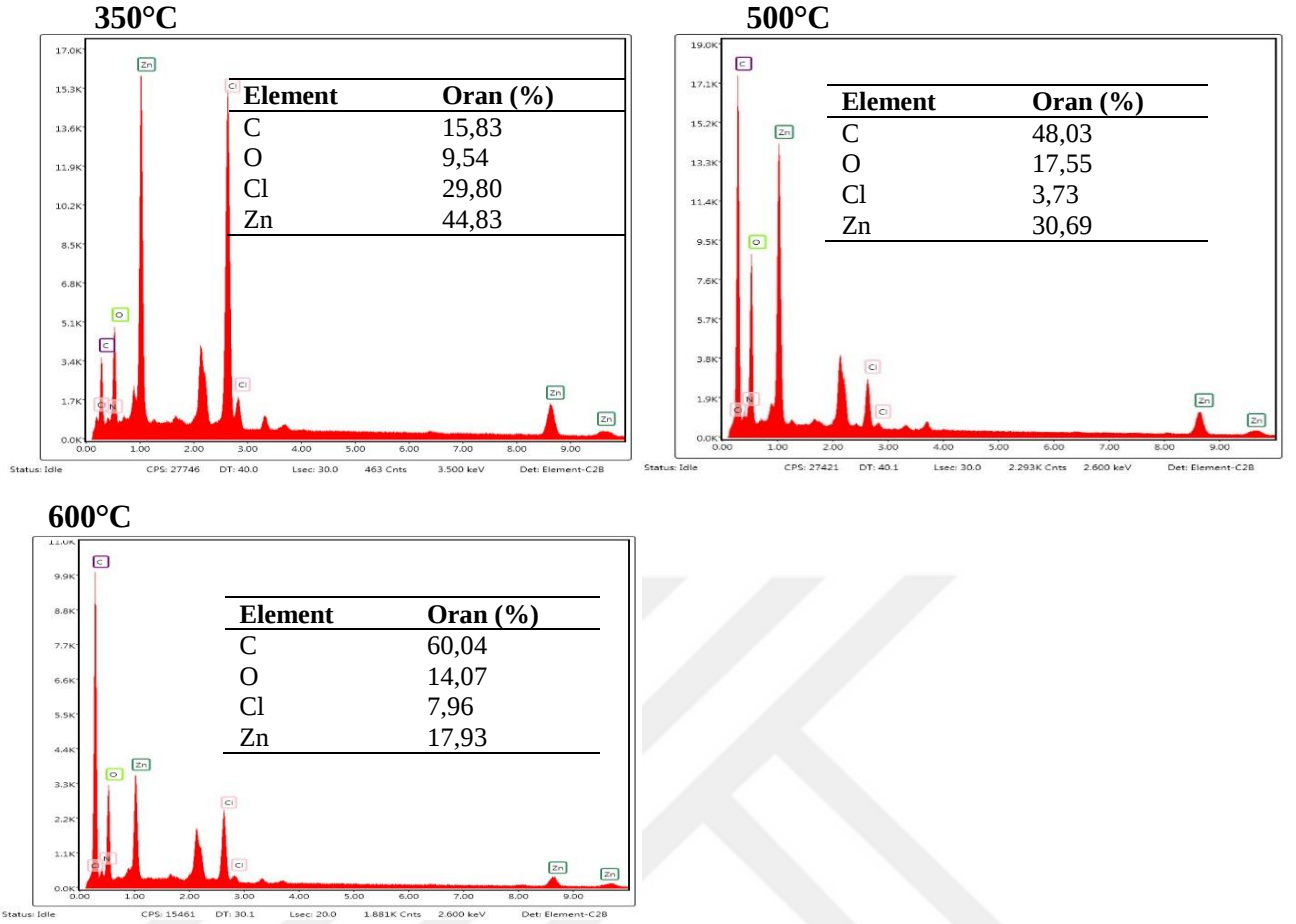
5. EDX Analizi

Ürünlerin element yapısı EDX analiziyle incelenmiştir. Şekil 20’ de sütleğen bitkisine, direkt piroliz olmuş, 0,5 M $ZnCl_2$ ile hazırlanmış ve 1M $ZnCl_2$ ile hazırlanmış olan numunelere ait EDX görüntüleri ve sonuçları sunulmuştur. Karbon içeriğinin beklenildiği gibi yapıya dahil olan $ZnCl_2$ nedeniyle azaldığı görülmüştür.



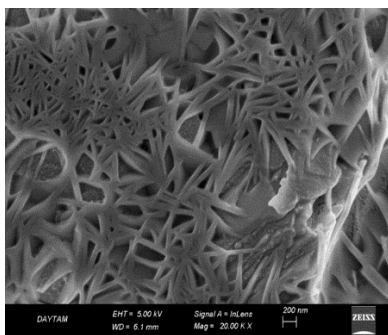
Şekil 20.Farklı konsantrasyondaki $ZnCl_2$ ile hazırlanmış numunelerin EDX görüntüleri

Sıcaklığın etkisini belirlemek için 1 M $ZnCl_2$ ile muamele edildikten sonra 350° C, 500° C ve 600° C de piroliz edilmiş aktif kömürlerin elementel yapısı EDX ile analiz edilmiştir ve elde edilen sonuçlar Şekil 21’de sunulmuştur. Karbon miktarları uçucu maddelerin uzaklaşması nedeniyle piroliz sıcaklığının artması ile artmaktadır. Erime sıcaklığı yaklaşık 420 °C olan Zn miktarının artan sıcaklıkla azaldığı görülmektedir.

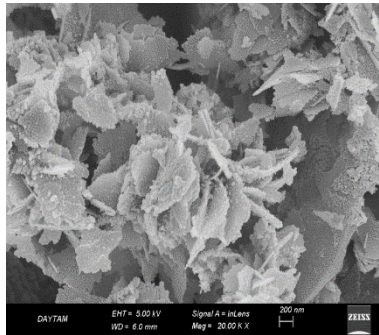


Şekil 21.Farklı sıcaklıklardaki aktif kömürlerin EDX sonuçları

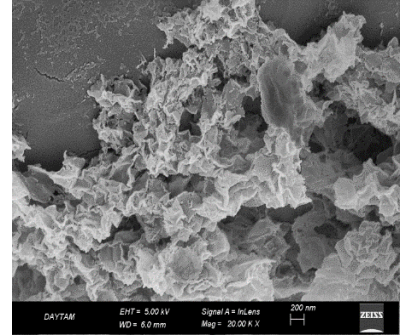
6. SEM Analizi



350°C



500°C



600°C

Şekil 22. Farklı sıcaklıklarda 1 M ZnCl_2 eşliğinde piroliz olmuş bitkinin SEM görüntüleri

Şekil 22’de 1 M ZnCl_2 eşliğinde piroliz olmuş sütleğen bitkinin SEM görüntüleri bulunmaktadır. Bunları sırasıyla inceleyecek olursak;

350°C: Düşük sıcaklıkta piroliz edilen örnekte oldukça düzenli ve iskeletimsi bir yapı gözlenmektedir. Gözenekler henüz tam olarak gelişmemiş olup, ZnCl_2 ’ün aktivasyon etkisi sınırlı kalmıştır. Bu sıcaklıkta karbonizasyon tam gerçekleşmediği için, yüzey yapısı daha kompakt ve gözenekler kapalıdır.

500°C: Yüzeyde belirgin bir dönüşüm gözlenmekte, tabakalı ve parçacıklı morfoloji ortaya çıkmaktadır. ZnCl_2 ’ün etkisiyle gözenekli yapılar oluşmaya başlamış, yüzey alanında kayda değer bir artış gerçekleşmiştir. Bu sıcaklık, aktif karbon yapısının gelişimi için kritik bir aşama olarak değerlendirilebilir.

600°C: Yüksek sıcaklığın etkisiyle gözenek oluşumu daha ileri seviyeye taşınmış, yüzey daha düzensiz, çatlaklı ve kırık yapılar kazanmıştır. ZnCl_2 ’ün aktivasyon etkisi maksimum seviyeye yaklaşarak gözenek hacmi ve gözenek çeşitliliğinde artış sağlamıştır. Yüzeyin parçalı yapısı, yüksek adsorpsiyon kapasitesiyle ilişkilendirilebilir.

SEM görüntüleri ile desteklenen CO_2 adsorpsiyon sonuçları da (Şekil 16), piroliz sıcaklığının aktif kömürlerin adsorpsiyon kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. 350°C’de piroliz edilen örnek, sınırlı gözenek gelişimi nedeniyle en düşük CO_2 tutma kapasitesine sahiptir. 500°C ve 600°C’de piroliz edilen aktif kömürler daha gelişmiş gözenekli yapıları sayesinde yüksek adsorpsiyon kapasiteleri sergilemiştir. Bu bulgular, optimum aktif kömür üretimi için orta sıcaklık aralıklarının (500–600°C) uygun olabileceğini ortaya koymaktadır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, sütleğen bitkisinden (*Euphorbia stricta* L.) aktivasyon çözeltisi olarak kullanılan $ZnCl_2$ ün konsantrasyonları ve karbonizasyon sıcaklıkları değiştirilerek farklı çalışma koşulları altında aktif kömür üretimi gerçekleştirilmiş ve bu aktif kömürün CO_2 adsorplama kapasitesi araştırılmıştır. Sütleğen bitkisi Erzurum ve yöresinde kendiliğinde yetişebilen bir bitkidir. Literatürde bu bitkiden aktif kömür elde edilmesine ilişkin yayınlanmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu da çalışmanın yeni, uygulanabilir ve düşük maliyetli adsorbent üretimi arayışlarına katkı sağlamasına olanak tanımaktadır. Üretilen aktif kömür numunelerinin yüzey karakterizasyonu ve CO_2 adsorpsiyonu analizlerinin yorumlanması ile elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

1)Sütleğen bitkisinden aktif kömür üretiminde aktive edici madde kullanımı aktif kömürün yüzey alanını yaklaşık % 92.5 artırmıştır. En yüksek yüzey alanı 1 M $ZnCl_2$ ile aktive edilmiş aktif kömür için $164.5172 \text{ m}^2/\text{g}$ değerinde elde edilmiştir. . Literatürde farklı aktive edici ajanlar kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur.(Özdemir vd, 2014; Chong Lua vd, 2005; Zhang vd, 2015; Oliveira vd, 2009; Sych vd, 2012; Tseng, 2007). Bu çalışmada $ZnCl_2$ kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

2)Yapılan analizlerde $ZnCl_2$ derişiminin CO_2 adsorplama kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir. En iyi performansı $27\text{-}28 \text{ cm}^3/\text{g}$ 'la, 1M $ZnCl_2$ ile hazırlanan numune göstermiştir. $ZnCl_2$ miktarının 3 M' a çıkarılmasının, CO_2 adsorplama performansını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Literatürde de düşük $ZnCl_2$ oranlarının başarılı adsorplama performansı gösterdiği bildirilmiştir (Möller vd, 2023).

3)Yapılan analizlerde sıcaklığın, bikiinin yüzey özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için 1 M $ZnCl_2$ çözeltisi ile hazırlanan numuneler 350°C , 500°C ve 600°C sıcaklıklarında piroliz edilmiştir. 600°C de her ne kadar yüzey alanı azalmış görünse de en fazla mikropor oluşumunun bu sıcaklıkta meydana geldiği görülmüştür.

3) Sıcaklığın CO_2 adsorpsiyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için 350°C , 500°C , 600°C de piroliz işlemleri uygulanmıştır. En iyi CO_2 adsorplama performansını $37\text{-}38 \text{ cm}^3/\text{g}$ 'la 600°C deki numune göstermiştir. 500°C deki numune de $35\text{-}36 \text{ cm}^3/\text{g}$ 'la iyi bir performans göstermiştir.

4) Aktive edici madde oranının artması mikropor alanında önemli bir düşüşe sebep olmuştur. 1M $ZnCl_2$ ile aktive edilmiş numunenin mikropor alanı 110,3791 m²/g iken, 3M $ZnCl_2$ ile hazırlanan numunenin mikropor alanı 11,7949 m²/g'a düşmüştür. Bu durum yüksek $ZnCl_2$ konsantrasyonunun gözenek yapısını kısmen bozabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak düşük maliyetli ve kolay elde edilebilir sütleğen (*Euphorbia stricta* L.) bitkisinin 1 M $ZnCl_2$ ile aktivasyonunun ardından inert ortamda 600 °C de karbonizasyonu ile elde edilen aktif kömürün CO₂ adsorpsiyonunun yanı sıra farklı maddelerin adsorpsiyonunda da kullanılabilecek, uygun yüzey özelliklerine sahip bir adsorbent olduğu görülmektedir.



KAYNAKÇA

- Abuelnoor, N., AlHajaj, A., Khaleel, M., Vega, L. F., & Abu-Zahra, M. R. (2021). Activated carbons from biomass-based sources for CO₂ capture applications. *Chemosphere*, 282, 131111.
- Auta, M., & Hameed, B. H. (2011). Optimized waste tea activated carbon for adsorption of Methylene Blue and Acid Blue 29 dyes using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 175, 233-243.
- Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of chemistry*, 2017(1), 3039817.
- Azeta, O., Ayeni, AO, Agboola, O. ve Elehinafe, FB (2021). Hindistan cevizi biyokütlesinin pirolizinden sürdürülebilir enerji üretimi üzerine bir inceleme. *Scientific African* , 13 , e00909.
- Barbara Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, 2004 John Wiley & Sons, Ltd, Print ISBN:9780470854273, Online ISBN:9780470011140, DOI:10.1002/0470011149
- Chai, Y. H., Rashidi, N. A., Mohamed, M., Chin, B. L. F., & Yusup, S. (2023). Basic principles of CO₂ capture and conversion technologies. In *Nanomaterials for Carbon Dioxide Capture and Conversion Technologies* (pp. 25-61). Elsevier.
- Dziejarski, B., Serafin, J., Andersson, K., & Krzyżyńska, R. (2023). CO₂ capture materials: a review of current trends and future challenges. *Materials Today Sustainability*, 24, 100483.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical engineering journal*, 156(1), 2-10.
- González-García, P. (2018). Lignoselülozik öncüllerden aktif karbon: Sentez yöntemleri, karakterizasyon teknikleri ve uygulamalarının bir incelemesi. *Yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji incelemeleri* , 82 , 1393-1414.
- Guo, S., Li, Y., Wang, Y., Wang, L., Sun, Y. ve Liu, L. (2022). CO₂ yakalama için biyokömür bazlı adsorbanlardaki son gelişmeler. *Karbon Yakalama Bilimi ve Teknolojisi* ,
- Gündoğdu, A., Duran, C., Şentürk, HB, Soylak, M., İmamoğlu, M. ve Önal, Y. (2013). Çay endüstrisi atıklarından üretilen yeni bir aktif karbonun fizikokimyasal özellikleri. *Analitik ve Uygulamalı Piroliz Dergisi* , 104 , 249-259.
- Heidarinejad, Z., Dehghani, MH, Heidari, M., Javedan, G., Ali, I. ve Sillanpää, M. (2020). Aktif karbon hazırlama ve aktivasyon yöntemleri: bir inceleme. *Çevre Kimyası Mektupları* , 18 (2), 393-415.
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 4676-4697.

- Lee, S. Y., & Park, S. J. (2015). A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23, 1-11.
- Lua, AC ve Yang, T. (2005). Azot ve vakum koşulları altında çinko klorür aktivasyonu ile fıstık kabuğundan hazırlanan aktif karbonun özellikleri. *Koloid ve arayüz bilimi dergisi* , 290 (2), 505-513.
- Malini, K., Selvakumar, D., & Kumar, N. S. (2023). Enhanced CO₂ uptake of mesoporous activated carbon derived from chitosan/casein coacervate. *Chemical Papers*, 77(8), 4179-4192.
- Möller, E., Palm, R., Tuul, K., Härmas, M., Koppel, M., Aruväli, J., ... & Lust, E. (2023). Peat-Derived ZnCl₂-Activated Ultramicroporous Carbon Materials for Hydrogen Adsorption. *Nanomaterials*, 13(21), 2883.
- Oliveira, L. C., Pereira, E., Guimaraes, I. R., Vallone, A., Pereira, M., Mesquita, J. P., & Sapag, K. (2009). Preparation of activated carbons from coffee husks utilizing FeCl₃ and ZnCl₂ as activating agents. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 87-94.
- Olorundare, OF, Krause, RWM, Okonkwo, JO ve Mamba, BB (2012). Mısır püskülünden elde edilen aktif karbonun sudaki ağır metallerin giderilmesinde potansiyel uygulaması. *Dünya Fiziği ve Kimyası, A/B/C Kısımları* , 50 , 104-110.
- Ozdemir, I., Şahin, M., Orhan, R., & Erdem, M. (2014). Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation. *Fuel processing technology*, 125, 200-206.
- Petrovic, B., Gorbounov, M., & Soltani, S. M. (2021). Influence of surface modification on selective CO₂ adsorption: A technical review on mechanisms and methods. *Microporous and mesoporous materials*, 312, 110751.
- Pełech, I., Staciwa, P., Sibera, D., Kusiak-Nejman, E., Morawski, A. W., Kapica-Kozar, J., & Narkiewicz, U. (2022). The effect of the modification of carbon spheres with ZnCl₂ on the adsorption properties towards CO₂. *Molecules*, 27(4), 1387.
- Qiao, S. ve Hu, X. (2000). Aktif karbon içindeki gazların ikili adsorpsiyon kinetiğinde gözenek boyutu dağılımının rolü. *Yüzey Bilimi ve Kataliz Çalışmaları* , 128 , 401-410.
- Sabzehmeidani, MM, Mahnaee, S., Ghaedi, M., Heidari, H. ve Roy, VA (2021). Karbon bazlı

malzemeler: İnorganik ve organik bileşikler için adsorbanların incelenmesi. *Materials Advances* , 2 (2), 598-627.

Selim, MM, Tounsi, A., Gomaa, H., Hu, N. ve Shenashen, M. (2024). Atıksu içindeki yeni ortaya çıkan kirleticilerin ele alınması: Adsorpsiyon izotermelerinden ve adsorbanlardan elde edilen bilgiler: Kapsamlı bir inceleme. *Alexandria Mühendislik Dergisi* , 100 , 61-71.

Serafin, J., Román-Martínez, MC, Saidi, M., Gallego, AR, Atlas, S. ve Ouzzine, M. (2024).

Argan hamuru keki atığının değerlendirilmesi: Kimyasal olarak aktifleştirilmiş karbonda geliştirilmiş CO₂ adsorpsiyonu. *Analitik ve Uygulamalı Piroliz Dergisi* , 181 , 106637.

Shafeeyan, MS, Daud, WMAW, Houshmand, A. ve Shamiri, A. (2010). Karbondioksit adsorpsiyonu için aktif karbonun yüzey modifikasyonu üzerine bir inceleme. *Analitik ve Uygulamalı Piroliz Dergisi* , 89 (2), 143-151.

Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 1081-1096.

Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Lai, C. W., Naushad, M., Shehnaz, ... & Stadler, F. J.

(2022). Activated carbon as superadsorbent and sustainable material for diverse applications. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 4184809.

Sipra, AT, Gao, N. ve Sarwar, H. (2018). Biyoyakıt üretimi için belediye katı atık (MSW)

pirolizi: MSW bileşenleri ve katalizörlerinin etkilerine ilişkin bir inceleme. *Yakıt işleme teknolojisi* , 175 , 131-147.

Sych, N. V., Trofymenko, S. I., Poddubnaya, O. I., Tsyba, M. M., Sapsay, V. I., Klymchuk,

D. O., & Puziy, A. M. (2012). Porous structure and surface chemistry of phosphoric acid activated carbon from corncob. *Applied surface science*, 261, 75-82.

Tseng, R. L. (2007). Physical and chemical properties and adsorption type of activated carbon prepared from plum kernels by NaOH activation. *Journal of hazardous materials*, 147(3), 1020-1027.

Vorokhta, M., Nováková, J., Dopita, M., Khalakhan, I., Kopecký, V. ve Švábová, M. (2023).

CO₂ yakalama için aktifleştirilmiş üç boyutlu olarak sıralanmış mikro-gözenekli karbonlar. *Material Today Sürdürülebilirlik* , 24 , 100509.

- Yay, B., & Gizli, N. (2019). A review on silica aerogels for CO₂ capture applications. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(7), 907-913.
- Yu, H. (2018). Su bazlı amonyak bazlı yanma sonrası CO₂ yakalama teknolojilerindeki son gelişmeler. Çin Kimya Mühendisliği Dergisi , 26 (11), 2255-2265.
- Zama, EF; Zhu, YG; Reid, BJ; Sun, GX , The role of biochar properties in influencing the sorption and desorption of Pb (II), Cd (II) and As (III) in aqueous solution, J. Clean. Prod. 2017 , 148 , 127–136.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sedanur ARMUT
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Nenehatun Kız Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Temel İşlemler Ve Termodinamik Bilim Dalı (2025)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Armut, S., Korkut, Ö. CO ₂ Adsorpsiyonu İçin Bitkisel Kaynaklı Aktif Kömür Üretimi ve Performansının İncelenmesi, 35.ULUSAL KİMYA KONGRESİ, Diyarbakır, Türkiye, 9 - 12 Eylül 2024, ss.134, (Özet Bildiri)	