

# **KARBON YAPILARDA ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU**

**Fatma OĞUZ ERDOĞAN**

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Kimya Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

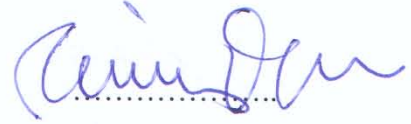
**ZONGULDAK**



## KABUL:

Fatma OĞUZ ERDOĞAN tarafından hazırlanan “KARBON YAPILARDA ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 24/06/2010.

Başkan : Prof. Dr. Timur DOĞU (ODTÜ)



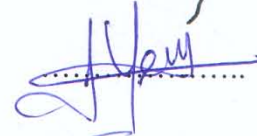
Üye : Prof. Dr. Gülşen DOĞU (Gazi Üniv.)  
(Ortak Danışman)



Üye : Prof. Dr. Türkan KOPAÇ (ZKÜ)  
(Tez Danışmanı)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Jülide YENER (ZKÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Emre HANHAN (ZKÜ)



## ONAY:

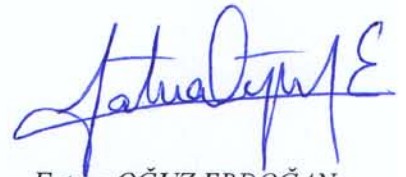
Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 15../7../2010.



Prof. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu, ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Fatma OĞUZ ERDOĞAN



## **ÖZET**

### **Doktora Tezi**

## **KARBON YAPILARDA ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU**

**Fatma OĞUZ ERDOĞAN**

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Kimya Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Prof. Dr. Türkan KOPAÇ**

**Prof. Dr. Gülşen DOĞU**

**Haziran 2010, 237 sayfa**

Aktif karbon; geniş yüzey alanı, gözenekli yapısı ve yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle hem sıvı hem de gaz ve buharların adsorpsiyonunda en geniş kullanım alanına sahip adsorbenttir. Bu çalışmada Zonguldak bitümlü kömürlerinin aktif karbon üretiminde hammadde olarak kullanılması ve elde edilen aktif karbonların özelliklerinin üretim şartlarıyla ilişkisi incelenmiştir. Bu amaçla; Kozlu (K1) ve Karadon (K2) İşletmelerinden temin edilen bitümlü kömürlerin farklı koşullardaki (farklı gaz, akış hızı, sıcaklık, ve KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub> gibi farklı aktivasyon kimyasalı ve miktarı) fiziksel ve kimyasal aktivasyonları sonucunda elde edilen ürünlerin ne ölçüde aktif karbon özellikleri taşıdıkları ve bu aşamalarda ne gibi değişikliklere uğradıkları deneysel bir sistematik çerçevesinde incelenmiştir. Deneysel çalışmada öncelik optimum akış hızı, optimum aktivasyon süresi ve optimum kimyasal aktivasyon ajanı miktarının belirlenmesine verilmiştir. Elde edilen aktif karbonların yüzey alanları ve gözenek yapıları 77 K'de N<sub>2</sub> gazı ile BET, Langmuir ve t-metod (de Boer) yöntemleriyle belirlenmiştir. Fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonlarda en yüksek BET yüzey alanı Kozlu kömüründe 415 m<sup>2</sup>/g (N<sub>2</sub> ile 700 °C'de) ve 251 m<sup>2</sup>/g (CO<sub>2</sub> ile 800 °C'de)

## ÖZET (devam ediyor)

olarak elde edilirken Karadon kömüründe ise 311 m<sup>2</sup>/g (N<sub>2</sub> ile 600 °C’de) ve 69 m<sup>2</sup>/g (CO<sub>2</sub> ile 800 °C’de) olarak elde edilmiştir. Kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonlarda en yüksek BET yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi Kozlu kömüründe 1904 m<sup>2</sup>/g ve 0.94 cc/g (KOH ile 800 °C’de) iken Karadon kömüründe ise sırasıyla 1659 m<sup>2</sup>/g ve 0.76 cc/g (KOH ile 700 °C’de) olarak belirlenmiştir. Bu inceleme sonucunda Zonguldak kömüründen yüksek yüzey alanlı ve geniş mikro gözenek hacmine sahip aktif karbonlar başarılı bir şekilde elde edilebilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında Zonguldak bitümlü kömüründen elde edilen aktif karbonlar üzerine etanol, aseton ve izopropanolün buhar fazından adsorpsiyonu incelenmiş ve bu aktif karbonların adsorplama kapasiteleri ticari aktif karbon ile karşılaştırılmıştır. Oda sıcaklığında kömür numuneleri, ticari aktif karbon ve kömürden elde edilen aktif karbonlarda bu organik buharların adsorpsiyonuna ait veriler BET, Langmuir, Freundlich, DR (Dubinin-Radushkevich), DA (Dubinin-Astakhov), Harkins-Jura, Henderson, Halsey ve Smith gibi farklı matematik modellerle karşılaştırılmış ve izoterm parametreleri belirlenmiştir. Etanolün adsorpsiyonunda en yüksek adsorplama kapasitesi ticari aktif karbon için % 21 iken Kozlu kömüründen elde edilen en yüksek yüzey alanlı aktif karbonda % 43.5 ve Karadon kömüründen elde edilen en yüksek yüzey alanlı aktif karbonda ise % 38 olarak belirlenmiştir. Aseton adsorpsiyonunda bu değerler sırasıyla % 28.8, 44 ve 46, izopropanol adsorpsiyonunda ise % 28, 39.7 ve 38.8 olarak belirlenmiştir. Zonguldak bitümlü kömüründen elde edilen aktif karbonların uçucu buharları ticari aktif karbondan daha fazla adsorpladığı gözlemlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde Zonguldak bitümlü kömüründen fiziksel ve kimyasal olarak elde edilen aktif karbonlar üzerinde hidrojenin adsorpsiyonu atmosferik basınçta ve 77 K’de incelenmiştir. K1 kömüründen hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek adsorplama kapasiteleri K1\_700 isimli aktif karbonda % 2.04, K1\_Z\_800 isimli aktif karbonda % 2.6 olarak bulunmuştur. K2 kömüründen hazırlanan aktif karbonlar arasında K2\_K\_600 % 2.83, K2\_K\_700 % 5.43, K2\_N\_700 % 4.09, K2\_N\_800 % 4.5, K2\_Z\_400 % 5.2 adsorplamışlardır. Buradan hidrojen adsorpsiyonu için K2 kömüründen elde edilen aktif karbonların, K1 kömüründen elde edilen aktif karbonlardan oldukça etkin oldukları gözlemlenmiştir.

## **ÖZET (devam ediyor)**

**Anahtar Sözcükler :** Aktif karbon, Kömür, Organik buhar, Hidrojen, Adsorpsiyon, Adsorpsiyon izotermeleri.

**Bilim Kodu :** 405.04.01



## **ABSTRACT**

**Ph.D. Thesis**

### **ORGANIC VAPOR ADSORPTION ON CARBONOUS STRUCTURES**

**Fatma OĞUZ ERDOĞAN**

**Zonguldak Karaelmas University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Chemistry**

**Thesis Advisors:**

**Prof. Dr. Türkan KOPAÇ**

**Prof. Dr. Gülşen DOĞU**

**June 2010, 237 pages**

Activated carbon is an adsorbent which has the most common use for adsorption of liquids, gases and vapors due to its large surface area, porous structure and high adsorption capacity. In this study, the usage of Zonguldak bituminous coals as raw material in the production of activated carbon and the relationship between properties of obtained activated carbons with the production conditions have been investigated. For this purpose, the properties of activated carbons obtained by the physical and chemical activations of bituminous coals supplied from the Kozlu and the Karadon mines, at different conditions (such as different gas, flow rate, temperature, and different activation chemicals such as KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, and different amounts of activation chemicals) and the changes during these stages have been investigated in an experimental systematic framework. In the experimental study the priority was given to the determination of optimal flow rate, activation time and amount of activation chemical. The surface area and the pore structures of obtained activated carbons were surface areas for physically activated carbons were found as 415 m<sup>2</sup>/g (with N<sub>2</sub>, at 700°C) and 251 m<sup>2</sup>/g (with CO<sub>2</sub>, at 800°C) for Kozlu coal and 311 m<sup>2</sup>/g (with N<sub>2</sub>, at 600°C) and 69 m<sup>2</sup>/g,

## ABSTRACT (continued)

determined by the BET, Langmuir and t-methods (de Boer) with N<sub>2</sub> at 77 K. The highest BET for Karadon coal. For chemically activated carbons the highest BET surface area and micropore volume were found as 1904 m<sup>2</sup>/g and 0.94 cc/g (with KOH, at 800°C) for Kozlu coal, and 1659 m<sup>2</sup>/g and 0.76 cc/g (with KOH, at 700°C) for Karadon coal. Eventually, activated carbons with high surface area and micropore volumes have been successfully obtained from Zonguldak coals.

In the second part of the study, the adsorption of ethanol, acetone and isopropanol vapors on the obtained activated carbons at room temperature have been investigated and the adsorption capacities of these activated carbons have been compared with the commercial activated carbon. Adsorption equilibrium data of these organic vapors on coal samples, commercial activated carbon and activated carbons obtained were compared with mathematical models such as BET, Langmuir, Freundlich, DR (Dubinin Radushkevich), DA (Dubinin-Astakhov), Harkins-Jura, Henderson, Halsey and Smith isotherm parameters were determined. The highest adsorption capacities for ethanol adsorption were found as 21% for commercial activated carbon, 43.5% for activated carbon with the highest surface area from Kozlu coal, 38% for activated carbon with the highest surface area from Karadon coal. For acetone adsorption, these values were found as 28.8%, 44% and 46% and for isopropanol adsorption 28%, 39.7% and 38.8%, respectively. It was observed that the adsorption capacity of activated carbons obtained from Zonguldak bituminous coals for volatile vapors was higher than commercial activated carbon.

In the third part of the study, the hydrogen adsorption on physically and chemically activated carbons from Zonguldak bituminous coals has been investigated at atmospheric pressure and 77 K. The highest adsorption capacities through activated carbons from K1 coal are 2.04% for K1\_700 activated carbon and 2.6% for K1\_Z\_800 activated carbon. For K2 coal the highest capacities are 2.83% for K2\_K\_600, 5.43% for K2\_K\_700, 4.09% for K2\_N\_700, 4.5% for K2\_N\_800 and 5.2% for K2\_Z\_400. The activated carbon produced from K2 coals were found to be highly active as compared to K1 coals for hydrogen adsorption.

## **ABSTRACT (continued)**

**Keywords** : Activated carbon, coal, organic vapor, hydrogen, adsorption, adsorption isotherms.

**Science Code** : 405.04.01



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yürüten, anlayış ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyerek bana yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Türkan KOPAÇ’a (ZKÜ), kendisiyle birlikte çalışmaktan onur duyduğumu belirtir, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ortak danışmanlığımı üstlenen, bilimsel destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Gülşen DOĞU’ya (Gazi Üniv.) ve tez çalışmam boyunca özgün fikirleri ile tez çalışmalarına katkıda bulunan değerli hocam Prof. Dr. Timur DOĞU’ya (ODTÜ), kendileriyle birlikte çalışmaktan onur duyduğumu belirtir sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitesi toplantılarında bilgi ve deneyimlerini paylaştan Yrd. Doç. Dr. Jülide YENER’e (ZKÜ) teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın yapılabilmesi için gerekli imkanların sağlanmasına katkıda bulunan DPT ve ZKÜ Araştırma Fonu’na ayrıca Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’nde görev yapmakta olan hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana her bakımdan yardımcı olan, desteklerini ve sevgilerini her zaman yanımda hissettiğim çok değerli ailelerimiz Oğuz ve Erdoğan ailelerine, ayrıca varlığıyla hayatımı yeniden şekillendiren, bana her zaman mutluluk, huzur ve güç veren sevgili eşim Taner’e sonsuz teşekkürler.



## İÇİNDEKİLER

|                                                           | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------|--------------|
| KABUL .....                                               | ii           |
| ÖZET .....                                                | iii          |
| ABSTRACT .....                                            | vii          |
| TEŞEKKÜR .....                                            | xi           |
| İÇİNDEKİLER.....                                          | xiii         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                      | xix          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                   | xxvii        |
| EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....                                | xxxv         |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                       | xxxvii       |
| <br>BÖLÜM 1 GİRİŞ.....                                    | <br>1        |
| <br>BÖLÜM 2 AKTİF KARBON .....                            | <br>5        |
| 2.1 AKTİF KARBON HAKKINDA GENEL BİLGİLER.....             | 5            |
| 2.2 AKTİF KARBON ÜRETİMİ.....                             | 8            |
| 2.2.1 Karbonizasyon.....                                  | 8            |
| 2.2.2 Aktivasyon.....                                     | 10           |
| 2.2.2.1 Fiziksel Aktivasyon .....                         | 10           |
| 2.2.2.2 Kimyasal Aktivasyon.....                          | 11           |
| 2.3 AKTİF KARBONUN FİZİKSEL VE KİMYASAL YAPISI .....      | 12           |
| 2.3.1 Aktif Karbonun Fiziksel Yapısı .....                | 12           |
| 2.3.2 Aktif Karbonun Kimyasal Yapısı.....                 | 15           |
| 2.3.3 Oksijen İçeren Fonksiyonel Gruplar .....            | 15           |
| 2.3.4 Hidrojen İçeren Fonksiyonel Gruplar.....            | 17           |
| 2.3.5 Aktif Karbonun Gözenek Yapısı .....                 | 17           |
| 2.4 AKTİF KARBONUN SEM VE TEM GÖRÜNTÜLERİNİN YAPISI ..... | 19           |
| 2.5 AKTİF KARBONUN KULLANIM ALANLARI.....                 | 24           |
| 2.5.1 Aktif Karbonun Sıvı Fazda Kullanımı .....           | 24           |
| 2.5.2 Aktif Karbonun Gaz ve Buhar Fazda Kullanımı.....    | 26           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                                                  | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| BÖLÜM 3 TEORİ.....                                                               | 29           |
| 3.1 ADSORPSİYON .....                                                            | 29           |
| 3.2 ADSORPSİYON İZOTERMLERİ .....                                                | 32           |
| 3.2.1 Adsorpsiyon Histerezesi Türleri.....                                       | 34           |
| 3.2.2 Langmuir Adsorpsiyon İzotermi .....                                        | 35           |
| 3.2.3 BET (Brunauer, Emmett, Teller) Adsorpsiyon İzotermi.....                   | 36           |
| 3.2.4 Freundlich İzotermi .....                                                  | 38           |
| 3.2.5 DR (Dubinin-Radushkevich) İzotermi .....                                   | 39           |
| 3.2.6 DA (Dubinin- Astakhov) İzotermi .....                                      | 40           |
| 3.2.7 Harkins-Jura İzotermi.....                                                 | 40           |
| 3.2.8 Henderson İzotermi .....                                                   | 41           |
| 3.2.9 Halsey İzotermi .....                                                      | 41           |
| 3.2.10 Smith İzotermi.....                                                       | 41           |
| <br>BÖLÜM 4 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLER (VOCs) .....                                | <br>43       |
| 4.1 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN TANIMI .....                                      | 43           |
| 4.2 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN KAYNAKLARI.....                                   | 44           |
| 4.2.1 Antropojenik Kaynaklar .....                                               | 44           |
| 4.2.2 Biojenik Kaynaklar.....                                                    | 45           |
| 4.3 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN ÇEVREYE VE İNSAN SAĞLIĞINA<br>ETKİLERİ .....      | <br>45       |
| <br>BÖLÜM 5 LİTERATÜR .....                                                      | <br>49       |
| 5.1 AKTİF KARBONUN SENTEZİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR .....                           | 49           |
| 5.2 AKTİF KARBON ÜZERİNE UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN<br>ADSORPSİYONU .....        | <br>54       |
| 5.3 AKTİF KARBON ÜZERİNE HİDROJEN ADSORPSİYONU .....                             | 59           |
| <br>BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                             | <br>63       |
| 6.1 DENEYLERDE KULLANILAN CİHAZLAR .....                                         | 63           |
| 6.1.1 Gaz Sorpsiyonu ile Yüzey Alanı ve Gözenek Boyutu Dağılımı Ölçüm Cihazı.... | 63           |
| 6.1.2 Piknometre.....                                                            | 63           |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

|                                                                                                                                                                               | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 6.1.3 Gazlar ve Tüp Fırın .....                                                                                                                                               | 63    |
| 6.1.4 FT-IR Cihazı.....                                                                                                                                                       | 63    |
| 6.1.5 Element Analiz ve TGA Cihazı.....                                                                                                                                       | 64    |
| 6.2 DENEYLERDE KULLANILAN KÖMÜRÜN ÖZELLİKLERİ .....                                                                                                                           | 64    |
| 6.3 DENEYSEL ŞARTLAR .....                                                                                                                                                    | 66    |
| 6.4 FİZİKSEL YÖNTEMLE AKTİF KARBON ÜRETİMİ .....                                                                                                                              | 66    |
| 6.5 KİMYASAL YÖNTEMLE AKTİF KARBON ÜRETİMİ.....                                                                                                                               | 67    |
| 6.6 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE ODA SICAĞINDA ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU DENEYLERİ.....                                                                        | 68    |
| 6.7 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE 77 K'de HİDROJEN ADSORPSİYONU DENEYLERİ.....                                                                                   | 68    |
| BÖLÜM 7 DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....                                                                                                                            | 69    |
| 7.1 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİNİN KARAKTERİZASYONU....                                                                                                                | 69    |
| 7.1.1 N <sub>2</sub> Gazı ile 77 K'de Adsorpsiyon-Desorpsiyon Deneyleri.....                                                                                                  | 69    |
| 7.1.1.1 Optimum Akış Hızının Belirlenmesi Amacıyla Elde Edilen Aktif Karbonlar .....                                                                                          | 69    |
| 7.1.1.2 Optimum Aktivasyon Süresinin Belirlenmesi Amacıyla Elde Edilen Aktif Karbonlar.....                                                                                   | 72    |
| 7.1.1.3 Fiziksel Yöntemle Elde Edilen Aktif Karbonlar.....                                                                                                                    | 75    |
| 7.1.1.4 Kimyasal Yöntemle Elde Edilen Aktif Karbonlar.....                                                                                                                    | 84    |
| 7.1.2 Helyum Piknometresi ile Yoğunluk Ölçümleri.....                                                                                                                         | 106   |
| 7.1.3 Elde Edilen Aktif Karbonların Element Analizleri .....                                                                                                                  | 107   |
| 7.1.4 Elde Edilen Aktif Karbonların FT-IR Analizleri.....                                                                                                                     | 109   |
| 7.1.5 Elde Edilen Aktif Karbonların TGA Analizleri .....                                                                                                                      | 112   |
| 7.2 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU .....                                                                                                          | 128   |
| 7.3 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAĞINDA İZOPROPİL ALKOL ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ.....                                                | 128   |
| 7.3.1 K1 ve K2 Kömüründen N <sub>2</sub> Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri ..... | 128   |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....       | 134 |
| 7.3.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....      | 139 |
| 7.3.4 K1 ve K2 Kömüründen $ZnCl_2$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....  | 144 |
| 7.3.5 K1 ve K2 Kömüründen $H_3PO_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri ..... | 149 |
| 7.4 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA ASETON ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ...                                                   | 154 |
| 7.4.1 K1 ve K2 Kömüründen $N_2$ Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri..                  | 155 |
| 7.4.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....                | 158 |
| 7.4.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....               | 163 |
| 7.4.4 K1 ve K2 Kömüründen $ZnCl_2$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....           | 168 |
| 7.4.5 K1 ve K2 Kömüründen $H_3PO_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....          | 173 |
| 7.5 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA ETANOL ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ...                                                   | 178 |
| 7.5.1 K1 ve K2 Kömüründen $N_2$ Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri ..                 | 179 |
| 7.5.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....                | 182 |
| 7.5.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri .....               | 186 |

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

### Sayfa

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.5.4 K1 ve K2 Kömüründen $ZnCl_2$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri .....  | 190 |
| 7.5.5 K1 ve K2 Kömüründen $H_3PO_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri ..... | 193 |
| 7.6 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE 77 K'DE HİDROJEN SORPSİYONU İZOTERMLERİ VE SORPSİYON KAPASİTELERİ.....                                                          | 196 |
| BÖLÜM 8 SONUÇLAR.....                                                                                                                                               | 215 |
| KAYNAKLAR.....                                                                                                                                                      | 219 |
| EK AÇIKLAMALAR A .....                                                                                                                                              | 229 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                                      | 237 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1  | Çin kömüründen aktif karbon üretim şeması ..... 9                                                                                                                     |
| 2.2  | Grafitin yapısı (Li 2007) ..... 13                                                                                                                                    |
| 2.3  | Elmasın yapısı (Li 2007)..... 14                                                                                                                                      |
| 2.4  | C <sub>60</sub> 'ın yapısı (Li 2007) ..... 14                                                                                                                         |
| 2.5  | Karbon nanotüpün yapısı (Li 2007) ..... 15                                                                                                                            |
| 2.6  | Karbon yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel gruplar (Marsh and Rodeiguez-Reinoso 2006) ..... 16                                                                     |
| 2.7  | Karbonlu adsorbentlerin şematik olarak gözenek boyutu gösterimi (Zhang 2004)... 19                                                                                    |
| 2.8  | a) 900°C'de CO <sub>2</sub> ile fiziksel aktivasyon ile b) 500°C'de ZnCl <sub>2</sub> ile kimyasal aktivasyon yoluyla hazırlanan karbonların SEM görüntüleri ..... 20 |
| 2.9  | Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun yüzeyinin SEM mikrografi (w = 250 µm) ..... 21                                                                         |
| 2.10 | Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun yüzeyinin SEM mikrografi (w = 10 µm). ..... 22                                                                         |
| 2.11 | Ticari aktif karbon kesitinin TEM mikrografi (w = 2.0 µm) ..... 23                                                                                                    |
| 2.12 | Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun bir parçasının TEM mikrografi (w = 500 µm) ..... 23                                                                    |
| 2.13 | Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun bir parçasının TEM mikrografi (w = 100 µm) ..... 24                                                                    |
| 3.1  | IUPAC'ın gaz adsorpsiyon izoterm sınıflandırması (IUPAC 1984, 1995) ..... 32                                                                                          |
| 3.2  | Adsorpsiyon histerezisi sınıflandırması (IUPAC 1984, 1995) ..... 35                                                                                                   |
| 6.1  | Demineralizasyon işlemi basamakları..... 65                                                                                                                           |
| 6.2  | Deney düzeneği ..... 67                                                                                                                                               |
| 7.1  | Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 70             |
| 7.2  | Akış hızının BET yüzey alanına etkisi..... 72                                                                                                                         |
| 7.3  | Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 73     |
| 7.4  | Aktivasyon süresinin BET yüzey alanına etkisi..... 75                                                                                                                 |
| 7.5  | K1 kömüründen farklı sıcaklıklarda fizksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 76    |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                               |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.6  | K2 kömüründen farklı sıcaklıklarda fizksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 78                                  |
| 7.7  | K1 kömüründen 400, 500, 600 ve 700°C'de CO <sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği ... 79           |
| 7.8  | K1 kömüründen 800 ve 900°C'de CO <sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 80                    |
| 7.9  | K2 kömüründen 400, 500, 600 ve 900°C'de CO <sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği ... 82           |
| 7.10 | K2 kömüründen 700 ve 800°C'de CO <sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 82                    |
| 7.11 | Optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 85                             |
| 7.12 | K1 kömüründen KOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 88                          |
| 7.13 | K1_K_800 numunesinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 88                                                                                                        |
| 7.14 | K2 kömüründen KOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 91                          |
| 7.15 | K1 kömüründen NaOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği ... 93                          |
| 7.16 | K2 kömüründen NaOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği ... 95                          |
| 7.17 | K1 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 97            |
| 7.18 | K2 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği..... 100           |
| 7.19 | K1 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği . 102 |
| 7.20 | K2 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N <sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği . 105 |
| 7.21 | Kozlu kömürünün (K1) FTIR spektrumu ..... 109                                                                                                                                                       |
| 7.22 | K1_K_600 numunesinin FTIR spektrumu..... 110                                                                                                                                                        |
| 7.23 | K1_K_700 numunesinin FTIR spektrumu..... 111                                                                                                                                                        |
| 7.24 | K1_K_800 numunesinin FTIR spektrumu..... 111                                                                                                                                                        |
| 7.25 | K1 numunesine ait TGA eğrileri..... 112                                                                                                                                                             |
| 7.26 | K2 numunesine ait TGA eğrileri..... 113                                                                                                                                                             |
| 7.27 | K1_600 numunesine ait TGA eğrileri..... 113                                                                                                                                                         |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.28 | K2_600 numunesine ait TGA eğrileri..... 114                                                                                                                                               |
| 7.29 | K1_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 115                                                                                                                                               |
| 7.30 | K2_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 116                                                                                                                                               |
| 7.31 | K1_K_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 116                                                                                                                                             |
| 7.32 | K2_K_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 117                                                                                                                                             |
| 7.33 | K1_K_800 numunesine ait TGA eğrileri..... 118                                                                                                                                             |
| 7.34 | K2_K_800 numunesine ait TGA eğrileri..... 119                                                                                                                                             |
| 7.35 | K1_N_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 120                                                                                                                                             |
| 7.36 | K2_N_700 numunesine ait TGA eğrileri..... 121                                                                                                                                             |
| 7.37 | K1_N_800 numunesine ait TGA eğrileri..... 122                                                                                                                                             |
| 7.38 | K2_N_600 numunesine ait TGA eğrileri..... 123                                                                                                                                             |
| 7.39 | K1_Z_500 numunesine ait TGA eğrileri ..... 123                                                                                                                                            |
| 7.40 | K2_Z_500 numunesine ait TGA eğrileri ..... 124                                                                                                                                            |
| 7.41 | K1_Z_600 numunesine ait TGA eğrileri ..... 125                                                                                                                                            |
| 7.42 | K2_Z_400 numunesine ait TGA eğrileri ..... 126                                                                                                                                            |
| 7.43 | K1_P_500 numunesine ait TGA eğrileri ..... 127                                                                                                                                            |
| 7.44 | K2_P_500 numunesine ait TGA eğrileri ..... 127                                                                                                                                            |
| 7.45 | Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 129                                                                                        |
| 7.46 | K1 kömürü, K1 kömüründen azot kullanarak fiziksel olarak elde edilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 129 |
| 7.47 | K2 kömürü ve K2 kömüründen azot kullanarak fiziksel olarak elde edilen aktif karbonların üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 131                        |
| 7.48 | K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 135            |
| 7.49 | K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 136            |
| 7.50 | K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 140           |
| 7.51 | K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 141           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                                    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.52 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 145                      |
| 7.53 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 146                      |
| 7.54 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 150                     |
| 7.55 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi ..... 151                     |
| 7.56 | Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi. 155                                                                                                                     |
| 7.57 | K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden azot kullanarak $600^{\circ}C$ 'de fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi..... 156 |
| 7.58 | K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 159                                    |
| 7.59 | K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 160                                    |
| 7.60 | K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 164                                   |
| 7.61 | K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 165                                   |
| 7.62 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 169                               |
| 7.63 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 170                               |
| 7.64 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 174                              |
| 7.65 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi ..... 175                              |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                             |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.66 | Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi . 179                                                                                             |
| 7.67 | K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden azot kullanarak fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi..... 180                      |
| 7.68 | K1 ve K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi ..... 183       |
| 7.69 | K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi ..... 186            |
| 7.70 | K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi ..... 187            |
| 7.71 | K1 ve K2 kömüründen $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi ..... 190  |
| 7.72 | K1 ve K2 kömüründen $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi ..... 194 |
| 7.73 | K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de $H_2$ izotermi ..... 197                                                                       |
| 7.74 | K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği..... 198                                                      |
| 7.75 | K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de $H_2$ izotermi ..... 198                                                                       |
| 7.76 | K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği..... 199                                                      |
| 7.77 | K1 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de $H_2$ izotermi..... 200                                                                    |
| 7.78 | K1 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 200                                                 |
| 7.79 | K2 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de $H_2$ izotermi..... 201                                                                    |
| 7.80 | K2 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 201                                                 |
| 7.81 | K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de $H_2$ izotermi..... 202                                                                   |
| 7.82 | K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 203                                                |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.83 | K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 203                                                     |
| 7.84 | K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 204                                           |
| 7.85 | K1 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 205                                        |
| 7.86 | K1 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 205                              |
| 7.87 | K2 kömüründen 500, 600, 700 ve 800°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 206                                             |
| 7.88 | K2 kömüründen 400 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 207                                                       |
| 7.89 | K2 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> kullanılarak 500, 600, 700 ve 800°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 207          |
| 7.90 | K2 kömüründen ZnCl <sub>2</sub> kullanılarak 400 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de hidrojen sorpsiyon grafiği..... 208                     |
| 7.91 | K1 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 209           |
| 7.92 | K1 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 209 |
| 7.93 | K2 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi..... 210           |
| 7.94 | K2 kömüründen H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C'de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği ..... 210 |
| 7.95 | K2 kömüründen optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbonların 77 K'de H <sub>2</sub> izotermi ..... 211                                     |
| 7.96 | K2 kömüründen optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği..... 212                             |
| A.1  | K1_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 230                                                                                                                         |
| A.2  | K2_600 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 230                                                                                                                         |
| A.3  | K1_CO2_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı..... 231                                                                                                                      |
| A.4  | K2_CO2_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı..... 231                                                                                                                      |
| A.5  | K1_K_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 232                                                                                                                       |
| A.6  | K2_K_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 232                                                                                                                       |
| A.7  | K1_N_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 233                                                                                                                       |
| A.8  | K2_N_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı ..... 233                                                                                                                       |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

| <u>No</u> |                                                     | <u>Sayfa</u> |
|-----------|-----------------------------------------------------|--------------|
| A.9       | K1_Z_500 numunesinin gözenek boyutu dağılımı .....  | 234          |
| A.10      | K2_Z_400 numunesinin gözenek boyutu dağılımı .....  | 234          |
| A.11      | K1_P_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı .....  | 235          |
| A.12      | K2_P_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı .....  | 235          |
| A.13      | Ticari aktif karbonun gözenek boyutu dağılımı ..... | 236          |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>No</u> | <u>Sayfa</u>                                                                                                                                |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.1       | Aktif karbonun gözenek yapıları..... 17                                                                                                     |
| 2.2       | Aktif karbon üzerine organik bileşiklerin adsorpsiyonunun DA eşitliği parametreleri ..... 27                                                |
| 4.1       | Uçuculuklarına göre organik bileşikler ..... 43                                                                                             |
| 4.2       | Kapalı ortamlarda (ev, bina, ofis gb) bulunan uçucu organik bileşikler ..... 45                                                             |
| 6.1       | Zonguldak kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları ..... 64                                                                                |
| 6.2       | Demineralizasyon işlemleri yapılmış kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları ... 65                                                        |
| 6.3       | Kömür numunelerinin element analiz sonuçları ..... 66                                                                                       |
| 7.1       | Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları ..... 70                     |
| 7.2       | Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 71                    |
| 7.3       | Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 72         |
| 7.4       | Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları ..... 73             |
| 7.5       | Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 74            |
| 7.6       | Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 74 |
| 7.7       | Fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları..... 75                                               |
| 7.8       | K1 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 77                               |
| 7.9       | K1 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 77                     |
| 7.10      | K2 ve K2 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 78                         |
| 7.11      | K2 ve K2 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ ) ..... 79              |
| 7.12      | K1 kömüründen CO <sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 81     |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                              |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.13 | K1 kömüründen CO <sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 81                                                 |
| 7.14 | K2 kömüründen CO <sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 83                                                            |
| 7.15 | K2 kömüründen CO <sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 84                                                 |
| 7.16 | Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları ..... 85                                                                     |
| 7.17 | Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 86                                                                    |
| 7.18 | Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 86                                                         |
| 7.19 | Kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları..... 87                                                                                                      |
| 7.20 | K1 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 89            |
| 7.21 | K1 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 90  |
| 7.22 | K2 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 91            |
| 7.23 | K2 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 92  |
| 7.24 | K1 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 93           |
| 7.25 | K1 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 94 |
| 7.26 | K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 96           |
| 7.27 | K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 97 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.28 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 98                         |
| 7.29 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 99              |
| 7.30 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları..... 101                        |
| 7.31 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 101             |
| 7.32 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 103                           |
| 7.33 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 104                 |
| 7.34 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ..... 105                           |
| 7.35 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ )..... 106                 |
| 7.36 | Karbon numunelerinin yoğunlukları ..... 107                                                                                                                                                                              |
| 7.37 | Karbon numunelerinin element analiz sonuçları ..... 108                                                                                                                                                                  |
| 7.38 | Ticari aktif karbon, K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 130          |
| 7.39 | Ticari aktif karbon, K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 131          |
| 7.40 | Kullanılan adsorpsiyon modelleri ..... 132                                                                                                                                                                               |
| 7.41 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 133 |
| 7.42 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 134      |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.43 | K1 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 136          |
| 7.44 | K2 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 137          |
| 7.45 | K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri..... 138      |
| 7.46 | K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 139           |
| 7.47 | K1 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 141         |
| 7.48 | K2 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 142         |
| 7.49 | K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri..... 143     |
| 7.50 | K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 144          |
| 7.51 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 146     |
| 7.52 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 147     |
| 7.53 | K1 ve K2 kömürlerinden $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri..... 148 |
| 7.54 | K1 ve K2 kömürlerinden $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 149      |
| 7.55 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 150    |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.56 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 152                                    |
| 7.57 | K1 ve K2 kömürlerinden $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri..... 153                                |
| 7.58 | K1 ve K2 kömürlerinden $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 154                                     |
| 7.59 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 156                        |
| 7.60 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $600^\circ C$ 'de $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri..... 157 |
| 7.61 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $600^\circ C$ 'de $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 158     |
| 7.62 | K1 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 159                                                   |
| 7.63 | K2 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 161                                                   |
| 7.64 | K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 162                                              |
| 7.65 | K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 163                                                   |
| 7.66 | K1 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 164                                                  |
| 7.67 | K2 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 166                                                  |
| 7.68 | K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 167                                             |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.69 | K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 168                                         |
| 7.70 | K1 kömüründen $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 169                                     |
| 7.71 | K2 kömüründen $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 171                                     |
| 7.72 | K1 ve K2 kömürlerinden $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 172                                |
| 7.73 | K1 ve K2 kömürlerinden $ZnCl_2$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 173                                     |
| 7.74 | K1 kömüründen $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 174                                    |
| 7.75 | K2 kömüründen $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 176                                    |
| 7.76 | K1 ve K2 kömürlerinden $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 176                               |
| 7.77 | K1 ve K2 kömürlerinden $H_3PO_4$ kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 178                                    |
| 7.78 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $N_2$ gazı ile fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri..... 180 |
| 7.79 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 181         |
| 7.80 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $N_2$ gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 182               |
| 7.81 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri ..... 184            |

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

| No   | Sayfa                                                                                                                                                                                                             |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.82 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 184          |
| 7.83 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri..... 185                |
| 7.84 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri..... 187      |
| 7.85 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 188         |
| 7.86 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 189              |
| 7.87 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri..... 191  |
| 7.88 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 192     |
| 7.89 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $ZnCl_2$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 193          |
| 7.90 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve $P/P_0=0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % $W_m$ değerleri..... 194 |
| 7.91 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri ..... 195    |
| 7.92 | Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden $H_3PO_4$ ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri ..... 196         |
| 7.93 | Numunelerin yüzde hidrojen sorpsiyonu değerleri ( $P/P_0 = 0.999$ ) ..... 213                                                                                                                                     |



## EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

**No**

**Sayfa**

|   |                                                   |     |
|---|---------------------------------------------------|-----|
| A | AKTİF KARBONLARIN GÖZENEK BOYUTU DAĞILIMLARI..... | 229 |
|---|---------------------------------------------------|-----|



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|              |                                                                                 |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| A            | : Harkins-Jura izotermi sabiti                                                  |
| A            | : DR izoterm modelinde adsorpsiyon serbest enerjisi                             |
| $A_{CS}$     | : Kesit alanı                                                                   |
| B            | : Harkins-Jura izotermi sabiti                                                  |
| C            | : BET, Langmuir ve Halsey izotermi sabiti                                       |
| E            | : DA izoterm modelinde karakteristik enerji                                     |
| i            | : BET izoterm modelinde kesim noktası                                           |
| k            | : Henderson izoterm modeli sabiti                                               |
| K            | : Freundlich izoterm modeli sabiti                                              |
| M            | : Adsorbatın molekül ağırlığı, g/mol                                            |
| n            | : DA izoterm modelinde tam sayı olmayan bir değerdir                            |
| n            | : Freundlich, Henderson ve Halsey izotermi sabiti                               |
| N            | : Avagadro sayısı, $6.02 \times 10^{23}$ tanecik/mol                            |
| P            | : Basınç, atm, Pa, psia, mmHg                                                   |
| $P_0$        | : Doyma basıncı, mmHg                                                           |
| $P/P_0$ ve P | : Bağlı basınç                                                                  |
| $r^2$        | : Korelasyon katsayısı                                                          |
| R            | : İdeal gaz sabiti, $8.314 \times 10^7$ erg/mol.K, $8.314 \times 10^3$ kJ/mol.K |
| s            | : BET izoterm modelinde eğim                                                    |
| $S_t$        | : Toplam yüzey alanı, $m^2/g$                                                   |
| T            | : Sıcaklık, K, °C                                                               |
| V            | : Adsorplanan hacim, cc/g                                                       |
| V            | : Smith izoterm modeli sabiti                                                   |
| V            | : DR izoterm modelinde sıvı adsorbatın adsorpsiyon hacmi sabiti                 |
| $V_b$        | : Smith izoterm modeli sabiti                                                   |
| $V_0$        | : DR izoterm modelinde mikrogözenek hacmidir                                    |
| W            | : Belirli bir bağli basınçta ve sıcaklıktaki adsorplanan miktar                 |
| $W_m$        | : Tek tabakada adsorplanan adsorbatın ağırlığı, g/g                             |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

|          |                                                      |
|----------|------------------------------------------------------|
| $W_0$    | : Toplam adsorplanan miktar                          |
| $\beta$  | : DR izoterm modelinde affinite sabitidir            |
| $\rho$   | : sıvı adsorbatın yoğunluğu, g/mL                    |
| $\tau$   | : bir molekülün yüzeyinde ortalama tutunma süresi, s |
| $\tau_0$ | : molekülün titreşim süresi, s                       |
| $Q$      | : molekül başına adsorpsiyon enerjisi, kJ/mol        |

## KISALTMALAR

|          |                                                     |
|----------|-----------------------------------------------------|
| BDDT     | : Brunauer, Deming, Deming, Teller                  |
| BET      | : Brunauer, Emmet, Teller                           |
| BJH      | : Barrett, Joyner, Halenda                          |
| CAAA     | : Clean Air Act Amendment                           |
| Cyclo-C6 | : Siklo hekzan                                      |
| DA       | : Dubinin-Astakhov                                  |
| DR       | : Dubinin-Radushkevich                              |
| DRK      | : Dubinin-Radushkevich-Kaganer                      |
| DWNT     | : Çift Duvarlı Karbon Nanotüp                       |
| GAB      | : Guggenheim-Anderson-de Boer                       |
| IR       | : Infrared Spektroskopisi                           |
| IUPAC    | : International Union of Pure and Applied Chemistry |
| MFI      | : Bir zeolit tipi                                   |
| MEK      | : Metil etil keton                                  |
| MTBE     | : Metil tersiyer bütül eter                         |
| MWNT     | : Çok Duvarlı Karbon Nanotüp                        |
| PAN      | : Peroksi asetil nitrat                             |
| SEM      | : Taramalı Elektron Mikroskopi                      |
| SWNT     | : Tek Duvarlı Karbon Nanotüp                        |
| TCA      | : 1, 1, 1 trikloro etan                             |
| TCE      | : Trikloro etilen                                   |
| TEM      | : Transmisyon Elektron Mikroskopi                   |

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)**

|      |                            |
|------|----------------------------|
| TGA  | : Termogravimetrik Analiz  |
| TTK  | : Türkiye Taşkömürü Kurumu |
| VOCs | : Uçucu organik bileşikler |



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Aktif karbon, kullanımı MÖ 3000’li yıllara dayanan, herhangi bir şekilde yapısal formül veya kimyasal analiz ile tanımlanamayan, oldukça geniş iç yüzey alanına sahip karbonlu adsorbent olarak tanımlanmaktadır. Aktif karbonlar, yüzey alanı, gözenek boyutu dağılımı, mekanik dayanıklılık ve kimyasal yüzey özelliklerinden ötürü hem sıvı hem de gaz ve buhar adsorpsiyonu için mükemmel adsorbentlerdir. Aktif karbonlar gıda, kimya, maden, eczacılık, nükleer, petrol, otomobil, kağıt endüstrisi, atık gaz, sıvı ve buharların temizlenmesi gibi geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu kullanım alanlarının yanında yüksek yüzey alanlı süper aktif karbonlar gaz depolama ve saflaştırma işlemlerinde kullanılmaktadırlar.

Aktif karbon laboratuvar ölçekli olarak çok çeşitli organik maddelerden üretilmektedir. Kullanılacak hammaddenin düşük inorganik içerikli, yüksek karbon içeriğine sahip bol bulunan ve ucuz olmasına dikkat edilmektedir. Hammadde üretilcek aktif karbonun özelliklerini belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Ticari aktif karbon üretiminde, odun, petrol koku, kömür, antrasit, karbon siyahı ve bitümlü kömürler hammadde olarak kullanılırlar. Bu hammaddelerin dışında tarımsal atıklar ve yan ürünler de aktif karbon üretiminde kullanılmaktadır.

Aktif karbon fiziksel veya kimyasal aktivasyonla veya bu iki yöntemin birlikte kullanılmasıyla üretilir. Fiziksel aktivasyon, karbon esaslı hammaddenin çeşitli gazlarla uygun gaz akış hızı ve sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutulmasıyla gerçekleştirilir. Kimyasal aktivasyon ise hammaddenin bir aktivasyon kimyasalı varlığında (KOH, NaOH, LiOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub> gibi) karbonizasyon ve aktivasyon işlemlerinin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesinden oluşur.

Aktif karbonun karbon esaslı bir malzeme olması nedeniyle, karbon içeriği yüksek, bölgesel olarak rezervi bol olan ve bu bölgede bulunan hammaddeye farklı bir tüketim özelliği katabilecek hammaddelerden üretilmesi, ekonomik bakımdan bir şehrin doğal zenginliklerinin

etkin kullanılması açısından oldukça önemlidir. Bu açıdan düşünüldüğünde Zonguldak şehri bu konuda değerlendirilebilir bir şansa sahiptir. Zonguldak kömür havzası, Karadeniz sahilinin 50 mil devamınca güneybatıda Ereğli ve kuzeydoğuda Çatalağzı arasında uzanır. Zonguldak Taşkömürü batıdan doğuya doğru Armutçuk, Kozlu, Üzülmüş ve Karadon İşletmeleri'nden çıkarılmaktadır ve bu taşkömürü demir-çelik endüstrisi, elektrik üretimi ve sanayide kullanılmaktadır. Bu çalışmada ilk amaç, Zonguldak İşletmeleri'nden çıkarılan kömürlerin aktif karbon üretiminde hammadde olarak kullanılabilme özelliklerinin incelenmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçla; Kozlu ve Karadon İşletmeleri'nden temin edilen bitümlü kömürlerin farklı koşullardaki (farklı gaz, akış hızı, sıcaklık) fiziksel aktivasyonları ve farklı aktivasyon kimyasalı varlığında (KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub>) farklı koşullardaki (farklı aktivasyon kimyasalı miktarı, gaz akış hızı, sıcaklık) kimyasal aktivasyonları sonuçlarında elde edilen ürünlerin ne ölçüde aktif karbon özellikleri taşıdıkları ve bu aşamalarda ne gibi değişikliklere uğradıkları deneysel bir sistematik çerçevesinde incelenmiştir.

Çalışmada hedeflenen ikinci amaç ise; seçilen bazı organik buharların çalışmada elde edilen aktif karbonlar üzerine adsorpsiyonunun incelenmesi olarak belirlenmiştir. Çünkü günümüzde her geçen gün büyüyen ve doğal kaynaklarımızı ve dünyamızı kullanılamaz hale getiren çevre kirliliğine tüm dikkatlerimizi toplamalı ve daha fazla zaman kaybetmeden gerekli önlemleri almalıyız. Çevre kirliliği denildiğinde hava, su ve toprak kirlilikleri aklı gelmektedir. Hava kirliliğinin büyük bir kısmını endüstriyel prosesler sonucu ve araçların egzozlarından çıkan kirli gazlar ve organik buharlar oluşturmaktadır. Bu nedenle çevreye salınan bu kirli gazların ve organik buharların giderilmesi çok önemlidir. Organik buharların giderilmesinde ve geri kazanılmasında en etkin yöntemlerden biri yüksek yüzey alanına sahip gözenekli katıların kullanıldığı adsorpsiyon yöntemidir.

Çalışmanın diğer bir amacı ise, elde edilen aktif karbon örneklerinin hidrojeni adsorplama kapasitelerinin araştırılmasıdır. Hidrojenin son yıllarda artan enerji ihtiyacını karşılayacak en temiz yakıtlardan biri olduğu düşünülmektedir. Fosil yakıtlar gibi sera gazlarına ve çevre kirliliğine neden olmadığı için ideal bir enerji kaynağıdır.

Bu çalışmada, hem dış hem de iç ortam kirleticisi olan organik buharlardan etanol, aseton, izopropanolün ve hidrojenin Zonguldak bitümlü kömüründen elde edilen aktif karbonlar üzerine adsorpsiyonu incelenmiştir. Bir sistematik çerçevesinde elde edilen aktif karbonların

organik buharları ve hidrojeni adsorplama kapasiteleri birbirleriyle ve ticari aktif karbonla karşılaştırılmıştır ve elde edilen aktif karbonların ticari aktif karbona üstünlükleri açıkça gözlemlenmiştir. Ayrıca aktif karbon örneklerinin organik buharları adsorplama kapasitelerinin aktivasyon şartları ile ilişkisi belirlenmiş ve BET, Langmuir, Freundlich, DR (Dubinin-Radushkevich), DA (Dubinin-Astakhov), Harkins-Jura, Henderson, Halsey ve Smith gibi farklı matematik modellere uygunlukları araştırılmıştır.



## BÖLÜM 2

### AKTİF KARBON

#### 2.1 AKTİF KARBON HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Aktif karbon, son derece genişletilmiş gözeneklilik ve yüzey alanı gösteren, geniş bir aralığa sahip amorf karbon maddeler şeklinde tanımlanabilir. Aktif karbonlar granüler ve toz olmak üzere iki farklı formda elde edilebilirler. Bazı özel uygulamalar için küresel ve fibröz gibi değişik formlarda da hazırlanabilmektedirler. Granüler aktif karbonlar geniş iç yüzey alanı ve küçük gözeneklere, toz aktif karbonlar ise daha geniş gözenek çaplarına ve daha küçük iç yüzey alanlarına sahiptirler. Fibröz aktif karbonlar (aktif karbon fiberler) geniş yüzey alanına sahiptirler ve bu karbonların geniş gözenek yüzdeleri yüksektir (Bansal and Goyal 2005, Lillo-Ródenas et al. 2007).

Karbonize edilmiş odun kömürü formundaki aktif karbonlar yüzyıllar önce kullanılmıştır. Mısırlılar MÖ 1500 yıllarında bu charcoal'ları tıbbi amaçlar için ve saflaştırma ajanı olarak kullanmışlardır. Eski çağlarda Hindistan'da içme suları charcoal'lar kullanılarak saflaştırılmıştır. Aktif karbonların ilk endüstriyel üretimi, şeker endüstrisinde kullanılmak üzere yaklaşık 1900 yıllarında başlamıştır. Bu aktif karbonlar metal klorürler varlığında sebze kökenli malzemelerin karbonizasyonu ya da kömürleşen maddelerin CO<sub>2</sub> veya buharla aktivasyonu ile hazırlanmışlardır. Daha iyi kalitede gaz adsorplayan karbonlar I. Dünya Savaşı sırasında zararlı gaz ve buharlara karşı korunmak amacıyla gaz maskelerinde kullanılmışlardır (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Aktif karbonlar eşsiz ve çok yönlü adsorbentlerdir, geniş ölçüde evsel ve endüstriyel atık sulardan sakıncalı koku, renk, tat ve diğer organik ve inorganik safsızlıkların uzaklaştırılmasında; çözücü geri kazanımında, yerleşim alanlarında hava arıtımında, lokantalarda, gıda işlemede kullanılmalarının yanında kimyasal endüstrilerde çeşitli şuruplar ve farmasötik ürünlerden renk gideriminde, endüstriyel kökenli ve otomobil egzozları kaynaklı hava kirleticilerinin kontrolünde, birçok kimyasal, farmasötik ve gıda ürünlerinin

saflaştırılmasında ve çok çeşitli gaz fazı uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Gittikçe artan diğer bir kullanım alanı da hidrometalurjide altın, gümüş ve diğer metallerin geri kazanımında katalizör görevini üstlenmesidir. Çok iyi bilinen diğer bir kullanım alanı ise tıpta bazı hastalıklarda bakteriyel enfeksiyonların ve toksinlerin giderilmesidir. Üretilen aktif karbonların hemen hemen % 80'i (~ 300000 ton/yıl) sıvı faz uygulamaları için tüketilirken, yaklaşık % 20'si ise gaz fazı uygulamaları için tüketilmektedir (Guo and Luo 2000a, Galiatsatuo et al. 2002, Bansal and Goyal 2005, Mohanty et al. 2005, Kula et al. 2007).

Aktif karbonun en büyük yapıtışı % 85-95 miktarıyla karbondur. Aktif karbon hidrojen, azot, kükürt ve oksijen gibi diğer elementleri de içermektedir. Bu hetero atomlar ham madde kaynağından ya da aktivasyon sırasında veya diğer hazırlanma prosedürlerinden türetilir. Tipik bir aktif karbonun elementel bileşimi % 88 C, % 0.5 H, % 0.5 N, % 1 S ve % 6-7 O ve külü oluşturan inorganik kısımdan ibarettir (Bansal and Goyal 2005).

Aktif karbonlar genellikle gelişmiş iç yüzeye sahiptirler ve farklı boyutta ve şekilde gözeneklerden oluşmuş çoklu bir dağılıma sahip gözenek yapısı ile karakterize edilirler. Gözenek şekillerini hesaplamak için birkaç farklı yöntem kullanılır. Aktif karbonun bir nanometre ile binlerce nanometre uzunluğunda gözeneklere sahip olduğu kabul edilir. Dubinin tarafından önerilen ve IUPAC tarafından kabul edilen gözenek sınıflandırması gözeneklerin genişliğine bağlıdır ve 3 sınıfa ayrılmıştır. Gözenek çapı 2 nm'den daha küçükler mikro gözenekler, 2 ile 50 nm arasında olanlar mezo gözenekler ve 50 nm'den daha büyükler ise makro gözenekler olarak adlandırılmıştır. Mikro gözenekler geniş bir yüzey alanı (aktif karbonun toplam yüzey alanının yaklaşık % 95'i) oluşturur ve adsorbatın moleküler boyutları mikro gözeneklere girmesine engel olacak kadar büyük değilse verilen aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesini mikro gözenek hacmi belirler. Mikro gözenekler kılcal yoğunlaşmanın (capillary condensation) başlangıcından önce düşük bağıl buhar basıncında dolar. Mezo gözenekler karbonun toplam yüzey alanının yaklaşık % 5'ini oluştururlar ve kılcal yoğunlaşmanın meydana gelmesi ile daha yüksek bağıl basınçta dolarlar. Aktif karbonlarda adsorpsiyon prosesinde makro gözenekler büyük bir öneme sahip değildirler çünkü yüzey alanına katkıları en fazla  $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dır. Onlar adsorbat moleküllerinin mikro ve mezo gözeneklere geçişinde kanal görevi görürler (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Tüm gözenekler duvarlara sahip olduğu için iki tip yüzeyden oluşurlar, bunlar iç ya da mikro gözenek yüzey ve dış yüzey olarak adlandırılırlar. İç ya da mikro gözenek yüzey gözeneklerin duvarlarını temsil eder ve pek çok aktif karbonda birkaç bin  $\text{m}^2/\text{g}$ 'ı bulabilen yüksek yüzey alanına sahiptir. Dış yüzey ise mezo ve makro gözeneklerin duvarlarını oluşturur ve mikro gözenek yüzeye kıyasla yüzey alanları çok daha küçüktür, pek çok aktif karbonda 10-200  $\text{m}^2/\text{g}$  arasında değişir (Hu et al. 2003, Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Kristalimsi ve gözenekli yapıda olmasının yanında bir aktif karbonun yüzeyi kimyasal bir yapıya sahiptir. Aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi, fiziksel ya da gözenekli yapısıyla belirlenir, fakat karbon yüzeyinin kimyasal yapısı tarafından fazlaca etkilenir. Aktif karbonlarda aromatik tabakaların düzensiz sıralanması karbon iskeletinde elektron bulutlarının düzenlenmesinde değişikliğe neden olur ve bunun sonucunda eşleşmemiş elektronlar ve tamamen doymamış değerlikler (valens) oluşur ki bunlar şüphesiz aktif karbonların adsorpsiyon özelliklerini etkiler. Aktif karbonlar her zaman belirli miktar oksijen ve hidrojen içerir. Buna ek olarak bazen küçük miktarlarda azot da içerebilir. X-ışını kırınım çalışmaları bu hetero atomların aromatik tabakaların kenarlarına ve köşelerine ve ya kusurlu pozisyonlardaki karbon atomlarına bağlandığını, karbon-oksijen, karbon-hidrojen ve karbon-azot yüzey bileşiklerini oluşturduklarını göstermiştir. Kenarlar başlıca adsorplama yüzeyini oluştururken bu yüzey bileşikleri aktif karbonların yüzey karakteristiklerini ve yüzey özelliklerini modifiye ederler (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Karbon-oksijen yüzey grupları aktif karbonların ıslanabilirlik, polarite ve asitlik gibi yüzey karakteristikleri ile katalitik, elektriksel ve kimyasal reaktivite gibi fiziko kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli yüzey gruplarıdır. Gerçekte bu bağlanmış oksijen karbonu belirli açılardan kullanışlı ve etkin kılan özelliğin kaynağıdır. Örneğin, aktif karbon yüzeyinde oksijenin varlığı su ve diğer polar gazların ve buharların depolanması sırasında aktif karbonun adsorpsiyon kapasitelerinde önemli bir etkiye sahiptir. Karbon-oksijen yüzey gruplarının tanımlanması ve tahminleri; desorpsiyon, alkalilerle nötralizasyon, potansiyel, termometrik ve radyometrik titrasyonlar gibi çeşitli fiziksel, kimyasal ve fiziko kimyasal tekniklerle, ve IR spektroskopisi, X-ışını fotoelektron spektroskopisi gibi spektroskopik metodlarla gerçekleştirilebilmesine rağmen bu kimyasal grupların doğası tam olarak aydınlatılamamıştır. Yüzey grupları sıradan organik bileşikler gibi düşünülemez çünkü bunlar farklı ortamlarda

farklı davranışlar gösterirler (Hu et al. 2003, Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Aktif karbonun yapısını oluşturan aromatik tabakalar boyutları sınırlandırmıştır ve bu yüzden kenarları vardır. Kusurlu pozisyonlarda bulunan karbon atomları eşleşmemiş elektronlara ve tam dolu olmayan valenslere ve yüksek potansiyel enerjiye sahiptir. Bu karbon atomları yüksek derecede reaktiftir ve aktif bölgeler ve ya aktif merkezler olarak adlandırılır ve karbonların yüzey reaktivitesini, yüzey reaksiyonlarını ve katalitik reaksiyonlarını belirler. Aktif karbona metaller ve bunların oksitlerinin emdirilmesi sonucu belirli endüstriyel prosesler için çok iyi katalizörler elde edilebilir. Bazı organik ve anorganik kimyasallar aktif karbonların yüzey davranışlarını ve adsorpsiyon karakteristiklerini modifiye eder ve bunları, zararlı gazların ve buharların kemisorpsiyon ve katalitik bozunma ile uzaklaştırılmalarında faydalı hale getirir (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

## **2.2 AKTİF KARBON ÜRETİMİ**

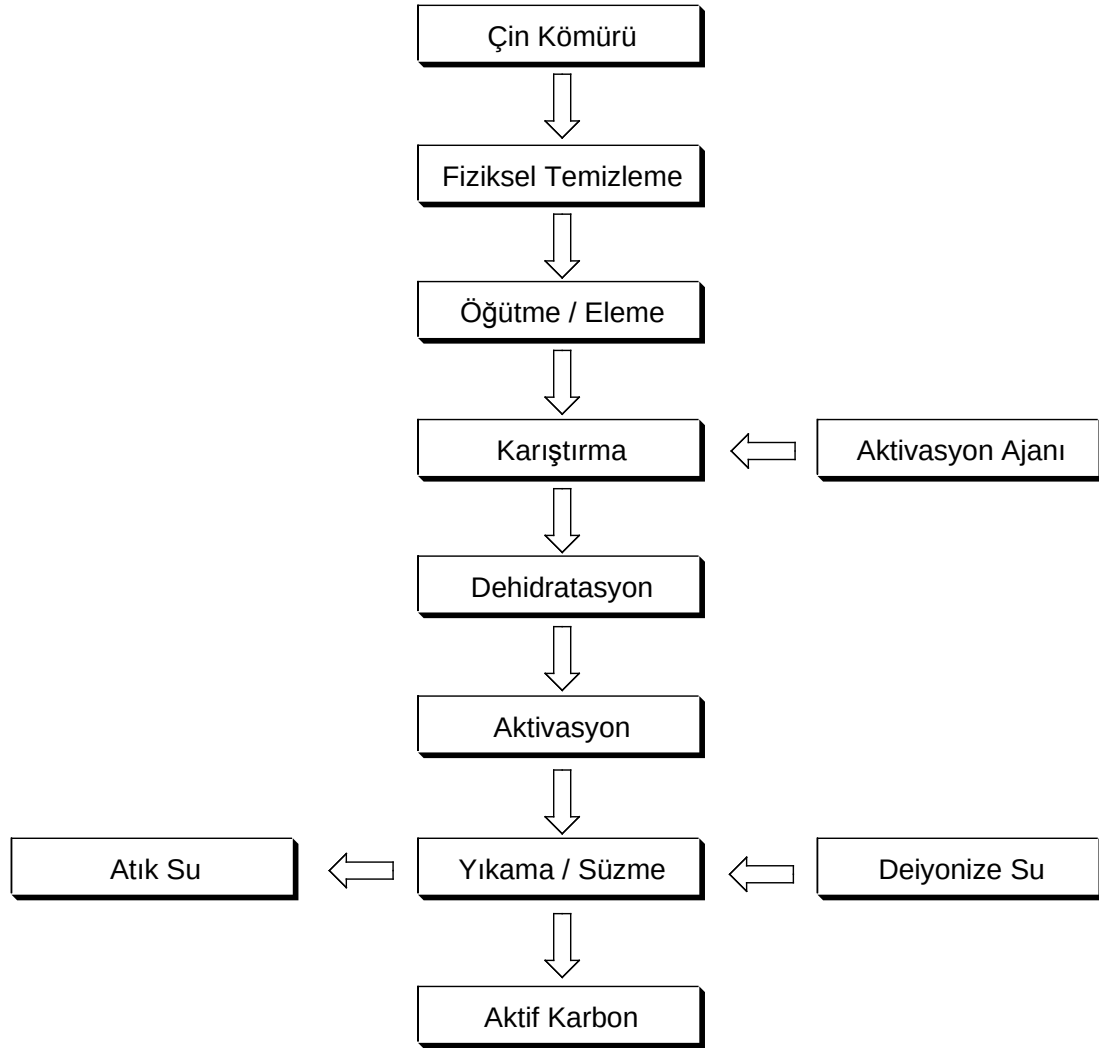
Aktif karbon üretimi için literatürde farklı üretim şemalarına rastlanmaktadır. Zou and Han 2001 yılında Çin kömüründen, Şekil 2.1’de verilen üretim şemasını kullanarak yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde etmişlerdir.

Aktif karbon üretimi, karbonizasyon ve aktivasyon olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

### **2.2.1 Karbonizasyon**

Karbonizasyon, hammadde içerisindeki nemin ve uçucu maddenin inert ortamda giderilmesi sonucunda temel gözenek yapısının oluşturulması esasına dayanır. Karbonlu maddenin karbonizasyonu sırasında (hiç bir aktifleştirici madde ilave edilmeden ve havasız ortamda) karbon dışındaki elementlerin büyük bir kısmı ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $S_2$  ve  $N_2$ ) pirolitik bozunma ile gaz halinde ortamdan uzaklaştırılırlar. Saf karbonun serbest atomları, saf grafit kristalleri olarak bilinen, kristalografik atom şekilleri haline gelirler. Bu kristallerin dizilişleri düzenli değildir. Bu sebepten kristaller arasında boşluklar kalır. Ayrışma sonucunda meydana gelen katranlı maddeler kristaller arasındaki boşlukları doldururlar. Bu nedenle, karbonizasyon sonucu elde

edilen karbonlu maddeler çok düşük adsorplama kapasitesine sahiptirler (Çiçek 1998, Bansal and Goyal 2005).



Şekil 2.1 Çin kömüründen aktif karbon üretim şeması (Zou and Han 2001).

Karbonizasyon sıcaklığı gözenek hacmini etkileyebilmektedir. Kaliteli ve verimli karbonize ürün elde etmek için önemli parametreler vardır. Bunlar; ısıtma hızı, sıcaklık, karbonizasyon süresi ve hammaddenin doğal ve fiziksel durumudur. Düşük ısıtma hızı ile düşük uçucu madde giderme ve yüksek char verimi elde edilebilmektedir. Çünkü dehidrasyon artmakta ve polimerik bileşenler daha kararlı olmaktadır (İlgar 2001, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Karbonizasyon iki önemli aşamada gerçekleşir. Bu aşamalardan ilki, yumuşama periyodudur. Bu aşamada sıcaklık kontrolü elde edilen charın özelliklerini etkiler. Bu aşamadan sonra char sertleşir ve sertleşmiş char gözeneklilik gelişiminde önemli rol oynar. Yumuşak kömür kullanıldığında, bu ilk aşama süresince sıcaklık oldukça yavaş arttırılmalıdır. Çünkü gaz çıkışı granüllerdeki gözeneklerin bozunmasına sebep olur. Odun, hindistan cevizi, lignin ve petrol koku kullanıldığında ise düşük ısıtma hızıyla yoğun ve sert char elde edilir. Düşük yoğunluklu maddeler kullanıldığında hindistan cevizinden elde edilen karbona benzer mikro gözenek hacmine sahip aktif karbon elde edilir. Odundan elde edilen charda da düşük ısıtma hızıyla yeterli gözenek hacmi elde edilir fakat sert kömürde bu durum gözenek yapısının bozulmasına sebep olur. Bu durumun oluşmaması için yavaş karbonizasyon aşaması atlanmalı ve aktivasyon yapılmalıdır (Ilgar 2001).

### **2.2.2 Aktivasyon**

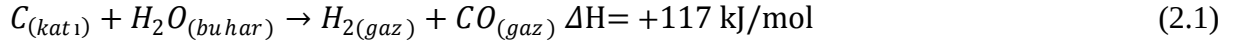
Aktivasyon işleminde karbonizasyon süresince oluşmuş gözeneklerin hacmi ve yarıçapı artar ve yeni gözenekler oluşur. Gözeneklerin yapısını ve boyutlarını karbonizasyonun şartları ve hammaddenin yapısı belirler. Aktivasyon işleminde kullanılan kimyasallar düzgün yapıdaki karbon tabakaları deforme ederek gözenek yapısının oluşumunu sağlarlar. Reaksiyon devam ettikçe gözeneklerin gelişmesi ve komşu gözenekler arasındaki duvarların yıkılması sonucunda daha büyük gözenekler oluşabilmektedir. Aktivasyon işleminde kullanılan hammadde, kimyasal madde ve aktivasyon süresine bağlı olarak mikro, mezo ve makro gözeneklerin yapısı değişiklikler gösterebilmektedir. Aktivasyon derecesi (burn-off) aktivasyon işlemi esnasında orijinal karbonize edilmiş maddenin ağırlığındaki yüzde azalma olarak tanımlanmaktadır. Aktivasyon işlemi fiziksel ve kimyasal olmak üzere 2 şekilde gerçekleşmektedir (Ilgar 2001, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

#### **2.2.2.1 Fiziksel Aktivasyon**

Aktivasyon işlemindeki aktivasyon derecesi aktivasyon sıcaklığına ve kullanılan gaza bağlıdır. Aktivasyonda kullanılan maddenin aktif oksijen içeriği, karbon iskeletin reaktif kısmını etkilemektedir. Karbon iskeletin bozunması, yüzeyin farklı bölümlerinde farklı hızlarda meydana gelmektedir. Fiziksel aktivasyonda; endüstriyel uygulamalarda en çok su buharı, CO<sub>2</sub>, hava veya bu gazlardan ikisinin karışımı kullanılmakla beraber klor, kükürt

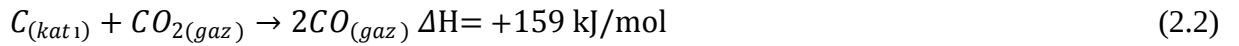
buharları, SO<sub>2</sub> ve amonyak aktivasyon amacıyla kullanılabilir (Bapat 1999, Ilgar 2001).

Buhar ile gerçekleştirilen aktivasyonda, karbonun su buharı ile olan tepkimesi aşağıdaki gibi yazılabilir ve bu en temel tepkime endotermiktir ve kontrolü kolaydır:



Buhar ile aktivasyon, oksijensiz ortamda 800-1000°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. İşlemin oksijensiz ortamda yapılmasının nedeni, bu sıcaklıklarda oksijenin karbon yüzeyine hücum etmesi ve ürün miktarını azaltmasıdır. Karbonun buhar ile reaksiyonu, alkali metal oksit ve bazı metallerin karbonatları ile katalizlenebilmektedir. Fiziksel aktivasyonda; çok düşük kısmi basınçlarda moleküler oksijen kullanılmadığı sürece, karbon-oksijen reaksiyonunun yüksek derecede ekzotermik olması ve bu durumun reaksiyonun kontrolünü olanaksız hale getirmesinden ötürü oksijen normalde aktivasyon ajanı olarak kullanılmaz (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Karbondiyoksit ile gerçekleştirilen aktivasyonda ise, karbonun CO<sub>2</sub> ile olan tepkimesi aşağıdaki gibi yazılabilir ve bu tepkime de endotermik ve kontrolü kolay bir tepkime dir:



CO<sub>2</sub> ile aktivasyon, buhar ile gerçekleştirilen aktivasyondan daha yüksek sıcaklık gerektirmektedir (850-1100°C). CO<sub>2</sub> ile aktivasyon için alkali metal karbonatları katalizör olarak kullanılabilir (Ilgar 2001, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

#### 2.2.2.2 Kimyasal Aktivasyon

Kimyasal aktivasyon işleminin esası, kimyasal aktivasyon ajanı ile muamele edilmiş hammaddenin belirli bir sıcaklıkta bozundurulmasına dayanmaktadır. Hammadde aktivasyon ajanı ile düşük sıcaklıklarda karıştırılır. Bu sırada, selülozik yapı ve diğer bazı bileşenler parçalanmaktadır. Bu hammadde ve kimyasal ajan karışımı, havasız ortamda fırında ısıtılır ve pirolitik parçalanma sağlanır. Fırından alınan karışımdan aktivasyon ajanı

uzaklaştırılmaktadır. KOH ve NaOH gibi alkali metal hidroksitler, çinko klorür, potasyum sülfat, fosforik asit, sülfirik asit, magnezyum klorür, kalsiyum klorür gibi kimyasal maddeler en yaygın kullanılan aktivasyon ajanları arasındadır. Bu maddeler aromatik yapıdaki karbon iskeleti parçalayarak gözenekli yapının oluşmasını sağlamaktadırlar (Bapat 1999).

Kimyasal aktivasyondaki önemli faktör, hammaddenin kimyasal ajan miktarına oranıdır. 1/2, 1/3, 1/4 ve 1/5 gibi farklı oranlarda yapılmış çalışmalar mevcuttur ve bu çalışmalarda kimyasal ajan miktarının elde edilen aktif karbonun yüzey alanına ve mikro gözenekliliğine etkisi incelenmiştir. Kimyasal aktivasyon genellikle 400-1000°C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir (Bapat 1999, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

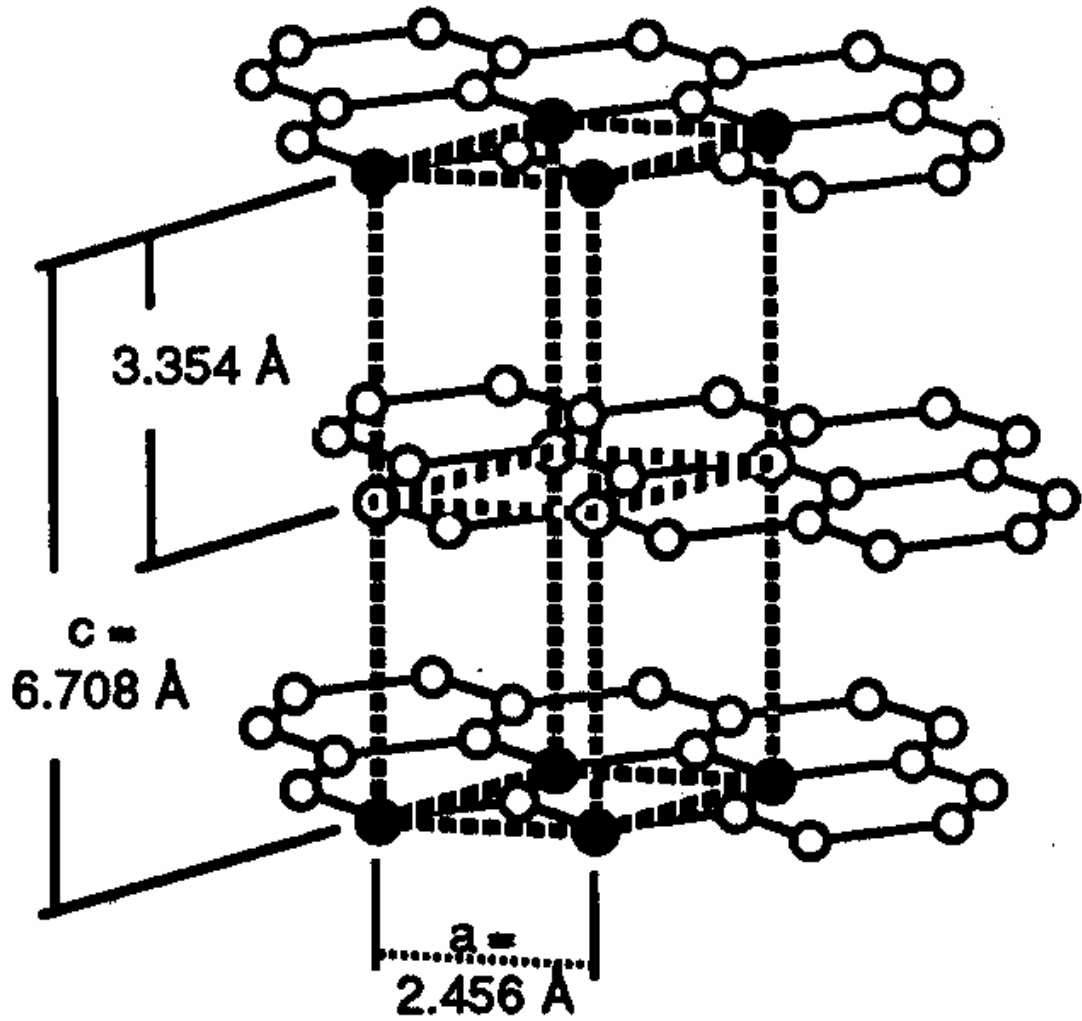
## **2.3 AKTİF KARBONUN FİZİKSEL VE KİMYASAL YAPISI**

### **2.3.1 Aktif Karbonun Fiziksel Yapısı**

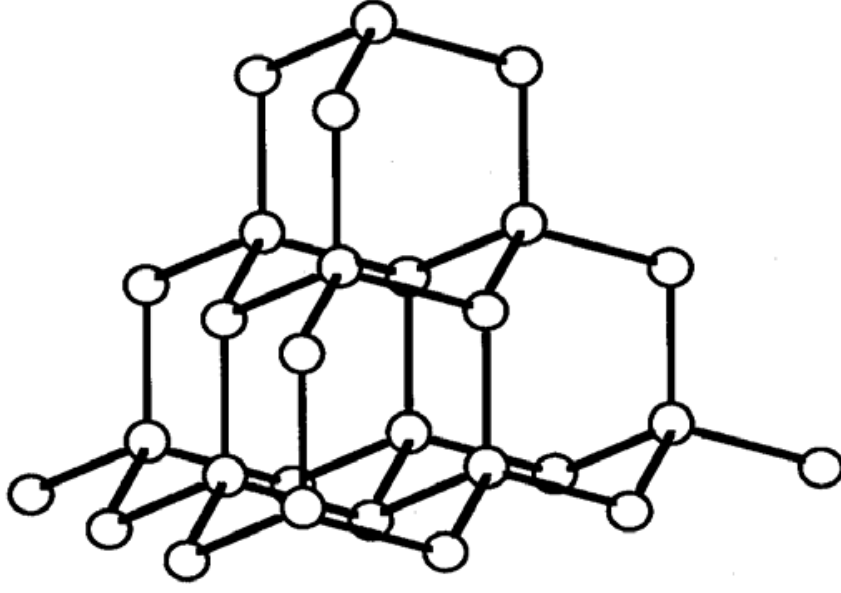
Karbon canlılarda en çok bulunan elementtir. Doğada karbon üç izotopu ( $^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ) halinde bulunabilir. Karbonun izotopları dışında, fiziksel özellikleri farklılık gösteren 4 tane allotropu vardır. Bunlar elmas, grafit, amorf ve yeni bir üye olan fullerendir. Bunlardan elmas ve grafit kristal yapıda; kok, odun kömürü ve kömür gibi şekilleri ise amorf yapıdadır. Grafitte karbon atomları hegzagonal halkalar oluşturur. Her karbon atomu diğer üç karbon atomuna  $\text{sp}^2$  hibritleşmesi yaparak sigma bağları ile bağlanır. Her karbon atomunun üç elektronu tabaka üzerinde bağ yapmaktaki kullanılırken dördüncü elektron serbestçe hareket edebilecek durumdadır. Karbon atomlarının dördüncü elektronları p bağlarında kullanılır. Karbon atomları arasında zayıf bir bağın bulunması tabakaların birbiri üzerinden kolayca kayabilmesi nedeniyle grafit yumuşak bir maddedir. Şekil 2.2’de grafitin yapısı görülmektedir. Elmasta ise (Şekil 2.3), karbon atomları  $\text{sp}^3$  hibritleşmesi yaparak tetrahedral bir düzen oluştururlar. Karbon atomları arasındaki bağlar çok kuvvetli olduğu için çok sert ve kararlı bir yapıya sahiptirler. Fullerenler, 1985 yılında Kroto ve grubu tarafından keşfedilen (Şekil 2.4) ve genellikle altı karbon atomunun düzlemsel olarak birbiri ile bağlanarak oluşturduğu içi boş küresel, silindirik ve halkasal yapılardır.  $\text{C}_{60}$  futbol topuna benzemektedir. 1991 yılında ise Iijima yeni bir karbon türü olan nanotüpleri (Şekil 2.5) keşfetmiştir. Genel olarak karbon nanotüpleri içiçe geçmiş tabaka sayılarına göre tek duvarlı (SWNT), çift duvarlı (DWNT), çok duvarlı (MWNT) şeklinde isimlendirilir. Uzunlukları ve çapları üretim yöntemlerine göre değişmekle birlikte SWNT’lerin çapı 1 nm civarında iken, MWNT’lerin iç

Çapları 1.5 ile 15 nm arasında, dış çapları ise 2.5 ile 30 nm arasında değişmektedir (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodr guez-Reinoso 2006, Li 2007).

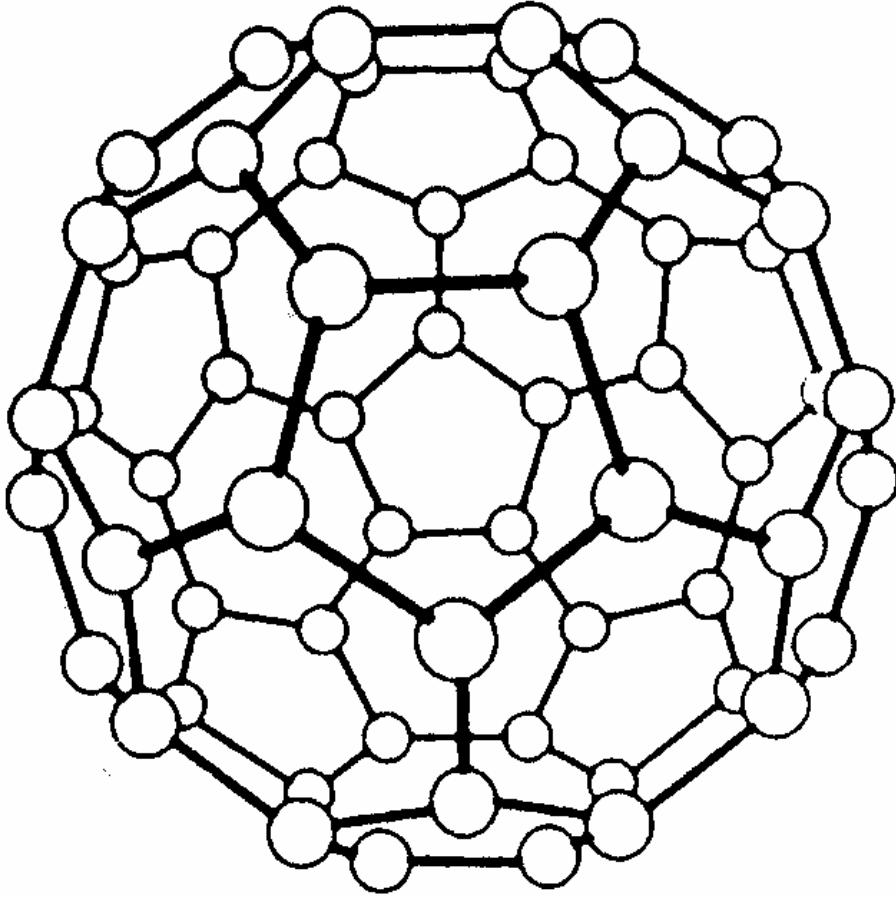
Aktif karbonun yapısı grafitteki gibi tabakalar halindedir. Bu tabakalar hegzagonal düzlemler şeklinde mikro kristallerden oluşmuştur. Ancak düzlemler grafitteki gibi düzenli değildir, gelişigüzel yönelmiştir. Bu düzensiz yapı nedeniyle oluşan boşluklar adsorpsiyon prosesinde büyük bir öneme sahip olan gözenekleri meydana getirmektedir (Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodr guez-Reinoso 2006, Li 2007).



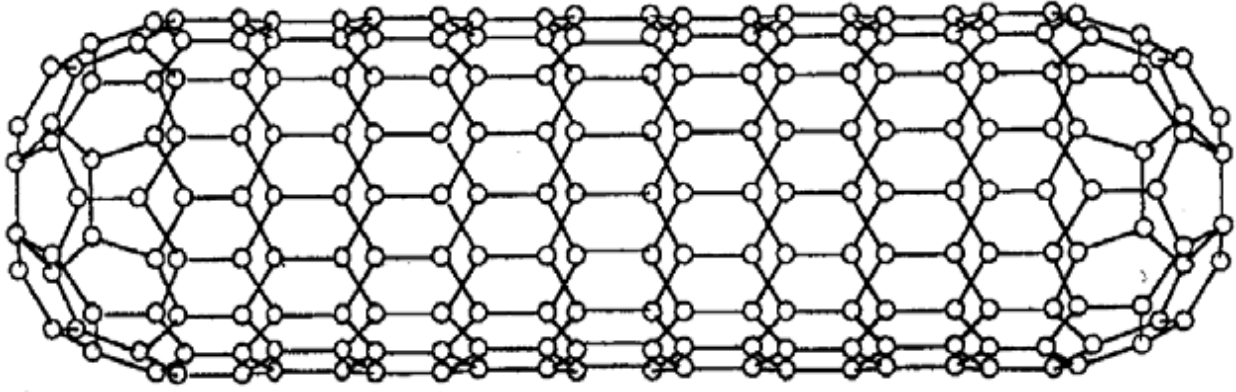
şekil 2.2 Grafitin yapısı (Li 2007).



Şekil 2.3 Elmasın yapısı (Li 2007).



Şekil 2.4 C<sub>60</sub>'ın yapısı (Li 2007).



Şekil 2.5 Karbon nanotüpün yapısı (Li 2007).

### 2.3.2 Aktif Karbonun Kimyasal Yapısı

Aktif karbonun adsorplama özellikleri sadece gözenek yapısıyla değil kimyasal bileşimiyle de belirlenir. Yapısında polar ve polarize olabilen maddelerin yani eşleşmemiş elektronların varlığı aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerini etkilemektedir. Aktif karbon 2 tip yapı içerir. Bunlardan ilki oksijen ve hidrojenle kimyasal bağ yapmış elementlerdir. Bu elementler hammaddeden gelebilmekte ya da karbonizasyon sonucunda ortaya çıkmakta ve aktivasyon süresince yüzeyle kimyasal bağ yapmaktadır (Bansal and Goyal 2005).

Aktif karbonun yapısında bulunan ikinci önemli yapı ise küldür. Tipik bir aktif karbonun elementel bileşimi % 88 C, % 0.5 H, % 0.5 N, % 1 S ve % 6-7 O ve külü oluşturan inorganik kısımdan ibarettir. Bu değerler aktif karbonun kalitesi ve özellikleri hakkında çok fazla bilgi vermezler (Bansal and Goyal 2005).

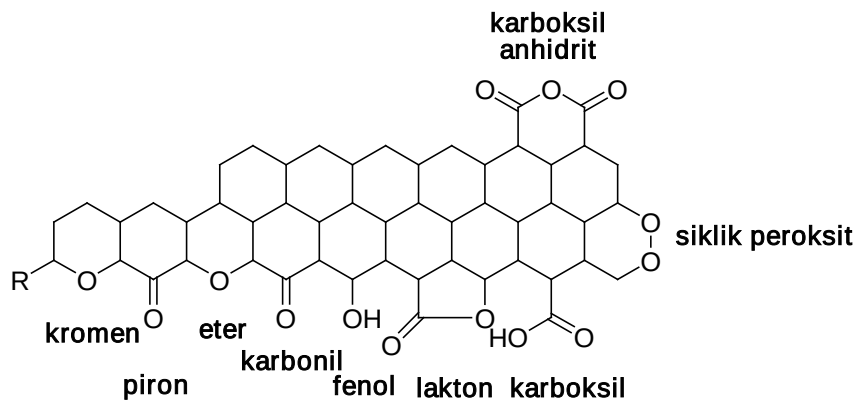
### 2.3.3 Oksijen İçeren Fonksiyonel Gruplar

Hammaddenin oksijeni düzenlenmede önemli bir etkiye sahiptir. Adsorbentler yüksek oksijen içerikli maddelerden hazırlanırlar ve paralel grafit tabakalar arasındaki mesafe oldukça küçüktür. Ayrıca karbonizasyonun gidişatı ve gerekli karbonizasyon sıcaklığı hammaddenin oksijen içeriğine oldukça bağlıdır. Diğer taraftan eğer oksitleyici gazlar oksijen içeriyorsa, bu oksijen kimyasal olarak adsorplanabilir veya tabakaların kenarlarında yüzey oksitleri olarak bağlanabilir. Aktif karbonun yüzeyinde kimyasal olarak adsorplanmış oksijenin varlığı, aktif karbonun su buharını ve diğer polar adsorbantların buharlarını adsorplama kapasitesi üzerine

önemli etkiye sahiptir. Aktif karbonun oksijen içeriği aktivasyon sıcaklığı ile ilişkili olarak %1 ile %25 arasında değişim gösterir. Aktivasyon sıcaklığı arttıkça oksijen miktarı azalır (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

200–500 °C gibi düşük sıcaklıklarda elde edilmiş aktif karbonlar L-karbon diye isimlendirilir ve genellikle asidik yüzey oksitleri geliştirirler. Asidik yüzey oksitleri başlıca fenolik hidroksil gruplarını içerebilirler. Sulu çözeltide klorür, permanganat, persülfat, hidrojen peroksit ve nitrik asit gibi oksitleyici ajanlar kullanarak kimyasal işlemle hazırlanmış aktif karbonlar L-karbonlar gibi karakteristik özellikler geliştirirler. 800–1000°C gibi yüksek sıcaklıklarda hazırlanmış aktif karbonlar H-karbon diye isimlendirilirler ve bazik yüzey oksitleri geliştirirler. Elektrolitlerin adsorpsiyonu bazik ya da asidik yüzey oksitlerin varlığı tarafından etkilenir. Yüzey oksijen komplekslerin varlığı aktif karbon yüzeyine polar bir karakter verir. Bu durumda, aktif karbonun polar organik bileşikleri adsorpsiyonunda imtiyazlı duruma gelmesini sağlar. Elektrokinetik çalışmalar; H-karbonların pozitif yüzey potansiyeli, L-karbonların ise negatif yüzey potansiyeline sahip olduklarını göstermiştir (Cheremisinov and Ellerbusch 1978).

Aktif karbonun yapısındaki grafit kristallerinin kenar bölgelerinde bulunan bu oksijen içeren fonksiyonel gruplar, önemli reaksiyon merkezleri görevi görmektedirler. Bu fonksiyonel gruplar arasında en çok rastlananlar; karboksil grupları, fenolik-OH grupları, lakton halkaları, siklik peroksitler, karboksilik asit anhidritleri, karbonil, eter, piron ve kinon türünden yapı taşlarıdır (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).



Şekil 2.6 Karbon yüzeyindeki oksijen içeren fonksiyonel gruplar (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

### 2.3.4 Hidrojen İçeren Fonksiyonel Gruplar

Aktivasyon öncesi hammadde hidrokarbon zincirleri ve halkaları şeklinde hidrojen içerir. Bu hidrojenlerin çoğu 950 °C'nin altındaki sıcaklıklardaki aktivasyon süresince uzaklaşırlar fakat bazıları aktivasyondan sonra dahi kalabilirler ve çok yüksek sıcaklıklara ulaşılmadıkça yapıdan ayrılmazlar. Bu çok yüksek sıcaklıklardaki hidrojen adsorplama gücündeki azalmayla paraleldir. Hidrojen oksijenden daha güçlü kimyasal olarak adsorplanır. İnfrared spektroskopisi çalışmaları hidrojenin aromatik ve alifatik formlarda bulunduğunu gösterir. Bu aromatik hidrojenin, aromatik temel yüzeyin kenarlarındaki karbon atomlarına kovalent bağlı olduğu önerilmiştir. Alifatik hidrojenin ise kenardaki aromatik halkalara bağlı alisiklik halkalar ve alifatik zincirlerin yapısında bulunduğu önerilmiştir. Aktif karbonun yapısında hidrojen ve oksijene ek olarak kükürt, azot, klor ve diğer elementler de bulunabilir (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

### 2.3.5 Aktif Karbonun Gözenek Yapısı

Aktivasyon prosesi boyunca, elementel kristaller arasındaki boşluklardan çeşitli karbonlu bileşikler temizlenir, basit kristallerin grafit tabakalarındaki karbon uzaklaştırılır ve organize olmayan karbon yapısı oluşur. Bunun sonucunda meydana gelen boşluklar gözenek olarak adlandırılır. Çizelge 2.1'de Dubinin tarafından önerilen ve IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) tarafından benimsenmiş aktif karbonun gözenek yapıları ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 Aktif karbonun gözenek yapıları (Ruthven 1984).

| Gözenek Türü                       | Mikro Gözenek | Mezo Gözenek | Makro Gözenek |
|------------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| Gözenek Çapı (nm)                  | < 2           | 2-50         | >50           |
| Gözenek Hacmi (cm <sup>3</sup> /g) | 0.15-0.5      | 0.02-0.1     | 0.2-0.5       |
| Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g)    | 100-1000      | 10-100       | 0.5-2         |

Bir aktif karbonun gözenek yapısı değişen gözenek büyüklükleri tarafından oluşturulur. Gözenek çapı 2 nm'den küçük olan gözeneklere mikro gözenekler denir. Katının bir gramında bulunan gözeneklerin toplam hacmine özgül gözenek hacmi, bu gözeneklerin sahip olduğu duvarların toplam yüzeyine ise özgül yüzey alanı denir. Gözenek hacimleri yaklaşık 0.2-0.6

$\text{cm}^3/\text{g}$ 'dır ve karbonun toplam yüzey alanının yaklaşık % 95'ini oluştururlar. Mikro gözenekler adsorpsiyon prosesinde büyük öneme sahiptirler (Zhang 2004, Bansal and Goyal 2005).

Gözenek çapı 2 nm ile 50 nm arasında değişen gözeneklere mezo gözenekler ya da geçiş gözenekleri denmektedir. Mezo gözenekler kılcal yoğunlaşmanın gerçekleştiği gözenekler olmalarının yanında adsorplanan madde için mikro gözeneklere giden geçitler olarak da davranırlar. Gözenek hacimleri  $0.02\text{-}0.1 \text{ cm}^3/\text{g}$ , spesifik yüzey alanları  $10\text{-}100 \text{ m}^2/\text{g}$  arasındadır. Mezo gözeneklerin etkin gözenek çapları 4-20 nm'ye kadar düşebilir (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

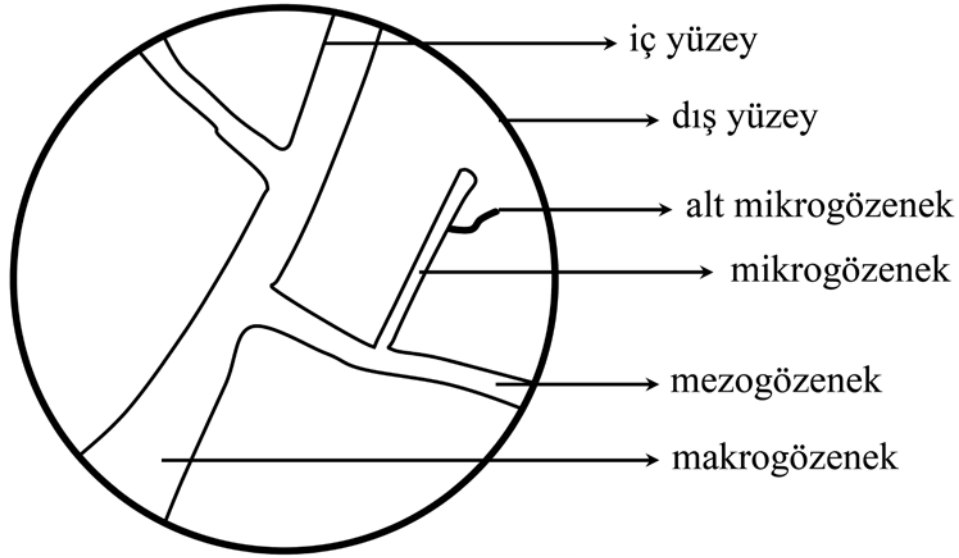
Gözenek çapları 50 nm'den daha büyük gözenekler kılcal yoğunlaşma ile doldurulamayacak kadar büyük olup makro gözenek olarak adlandırılmışlardır. Bunların yüzey alanları  $0.5\text{-}2 \text{ m}^2/\text{g}$  ve gözenek hacimleri  $0.2\text{-}0.8 \text{ cm}^3/\text{g}$  arasındadır. Makro gözenekler büyük boşluklara sahip olduğu için difüzyonu kolaylaştırır ve adsorplanacak maddenin, karbonun mezo ve mikro gözeneklere ulaşmasını sağlar. Makro gözenekler granüle aktif karbonların direncini azaltır. Şekil 2.7'de aktif karbonun yapısında bulunan gözenekler görülmektedir (Zhang 2004, Bansal and Goyal 2005, Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Bazı çalışmalarda gözenek çapı 0.8 nm'den küçük gözenekler alt mikro gözenek olarak adlandırılmaktadır. Gözenekler küçüldükçe duvar sayısı artacağından özgül yüzey alanı da artacaktır. Özgül yüzey alanının büyüklüğü özgül gözenek hacminin büyüklüğünden çok gözeneklerin büyüklüğüne bağlıdır. Gözeneklerin büyüklük dağılımına adsorbentin gözenek boyut dağılımı denir. Bir adsorbentin adsorplama gücü bu adsorbentin doğasının yanında özgül yüzey alanı, özgül gözenek hacmi ve gözenek boyut dağılımına bağlı olarak değişmektedir (Zhang 2004).

Aktif karbonda; gazların ve buharların adsorpsiyonu için mikro gözenekli bir karbon yeterli olurken çözeltilerden adsorpsiyon için mikro gözeneklere ek olarak, gelişkin bir mezo- ve makro gözeneklilik de gereklidir. Bir aktif karbonun adsorplama kapasitesi üzerine sadece gözenek yapısı değil aktif karbon yüzeyinin kimyasal doğası da etkilidir (Bansal and Goyal 2005).

Aktif karbonun adsorbent olarak kullanımında, gözenek boyutu aralıklarına bağlı olarak yüzey alanı ya da gözenek hacminin dağılımı önemlidir. Öyle ki gözenek boyutu

adsorplanacak molekül büyüklüğüne ne kadar yakın ise adsorbent ile adsoplanan arasındaki çekim kuvveti o kadar büyük olur. Bu sebepten ötürü, adsorbentin çözelti adsorpsiyonu uygulamalarında yüzey alanı adsorpsiyon açısından tek başına yeterli bir ölçüt değildir. Bu durumda önemli olan yüzey alanının gözenek boyutu dağılımıdır (Bansal and Goyal 2005).

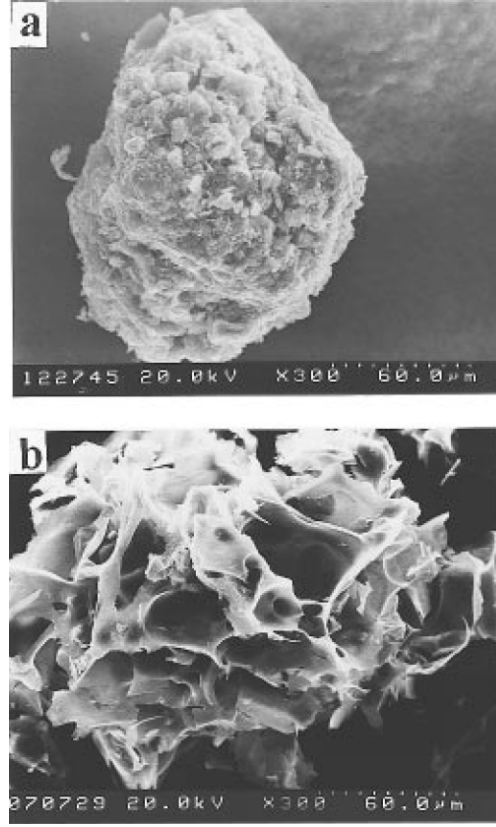


Şekil 2.7 Karbonlu adsorbentlerin şematik olarak gözenek boyutu gösterimi (Zhang 2004).

## 2.4 AKTİF KARBONUN SEM VE TEM GÖRÜNTÜLERİNİN YAPISI

Aktif karbonların taramalı elektron mikroskobu yani SEM (scanning electron microscopy) ve transmisyon elektron mikroskobu TEM (transmissing electron microscopy) ile görüntüleri alınabilmekte ve karbonun fiziksel yapısı hakkında daha fazla bilgi elde edilebilmektedir. Literatürde bu çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır. Teng and Hsu (1998) yaptıkları bir çalışmada 2 tür Avustralya bitümlü kömüründen (a. Blackwater (BW), b. Mt. Thorley (MT)) çinko klorür aktivasyonu ile aktif karbon hazırlamışlardır. Şekil 2.8’de bu iki bitümlü kömürden elde edilen aktif karbonların SEM görüntüleri verilmiştir.

Teng and Hsu (1998) tarafından yapılan çalışmada bitümlü kömürlerden yüksek gözenekli aktif karbonların elde edilmesinde  $ZnCl_2$ ’ün uygun bir aktivasyon ajanı olduğu belirtilmiştir. Bu ajanla elde edilen karbonların yüzey alanı ve gözenek hacmi sırasıyla  $1300 \text{ m}^2/\text{g}$  ve  $0.83 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak bulunmuştur.



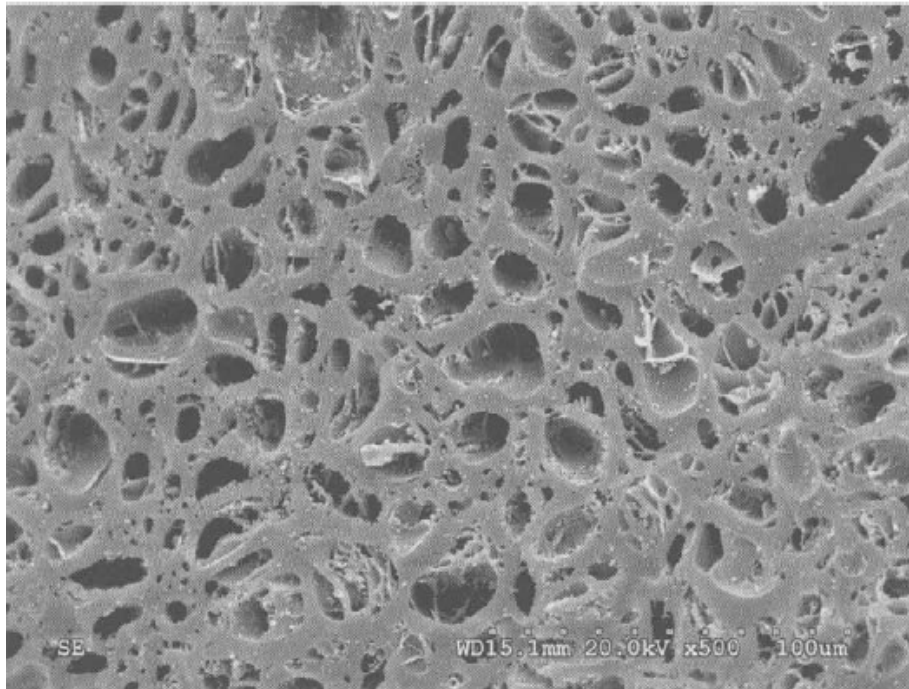
Şekil 2.8 a) 900°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel aktivasyon ile b) 500°C’de ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal aktivasyon yoluyla hazırlanan karbonların SEM görüntüleri (Teng and Hsu 1998).

Teng and Hsu yaptıkları çalışmada ZnCl<sub>2</sub> ile karbonizasyonu takip eden yıkama prosesinin, elde edilen charın yüzey özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu açıklamışlardır. Yüksek gözenekli karbonların elde edilmesinde asitle yıkama işleminin gerekli bir adım olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri charın gözenekliliğinin, 500°C’ye kadar artan karbonizasyon sıcaklığı ile birlikte arttığı, sonra artan sıcaklıkla birlikte tekrar düşmeye başladığını açıklamışlardır. Sıcaklıkla birlikte yüzey yapısı değişiminin analizinde ZnCl<sub>2</sub> emdirilmesiyle indüklenen çapraz bağların, başlangıçta kömürde bulunan oksijenle indüklenenlerden termal olarak daha kararsız olduğunu belirtmişlerdir. Daha düşük O/C oranına sahip kömürler için maksimum yüzey alanı ve gözenek hacmi değerlerini elde etmişler ve bu kömürlerde, oluşumu ZnCl<sub>2</sub> tarafından artırılmış çapraz bağlar için daha fazla alan (site) bulunduğu ve bunun da daha yüksek gözeneklilik sağladığını öne sürmüşlerdir. O/C oranı düşük olan kömürlerden elde edilen karbonların daha yüksek oranda mezo gözeneğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Karbon hammaddelerinin tanecik boyutlarındaki artışın, elde edilen karbonların yüzey alanlarında ve gözenek hacimlerinde azalmaya neden olduğunu ve bu durumu, büyük taneciklerin daha düşük dış yüzey alanına sahip olması nedeniyle kimyasal

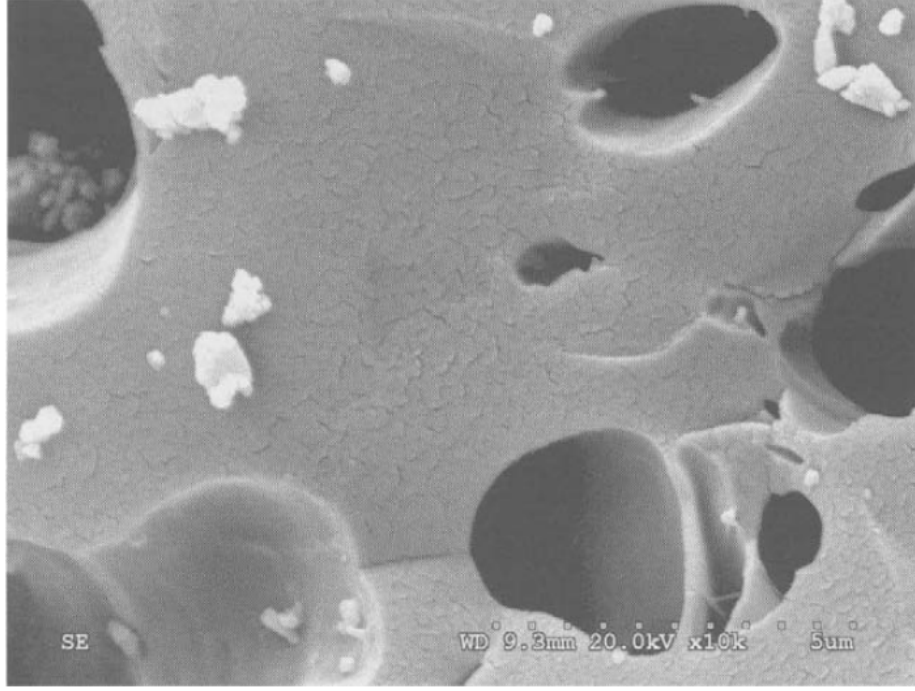
ajanla daha az temas yüzeyi oluşturması ile açıklamışlardır. Elde edilen karbonların yüzey özellikleri üzerine karbonizasyon zamanının etkilerini incelediklerinde, yüksek gözenekli karbon hazırlamak için karbonizasyonun 500°C’de ve 1 saat süreyle yapılması gerektiğini önermişlerdir.

Teng and Hsu 700°C’de karbonizasyon süresinin uzunluğu ile gözenekliliğin azaldığını açıklamışlardır. şekil 2.8’de verilen SEM mikrografları ile; kimyasal olarak aktifleştirilmiş ( $ZnCl_2$  ile muamele) karbonun dış yüzeyinin oyuklarla dolu olduğunu, fiziksel olarak aktifleştirilmiş ( $CO_2$ -gazlaştırma) karbonun ise bozulmamış bir dış yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Rodríguez-Reinoso et al. (2005) şekil 2.9 ve 2.10’da SEM mikrografları verilen aktif karbonu elde etmişlerdir. Bu aktif karbonu zeytin çekirdeğinden karbonizasyonla hazırlamışlar ve mikro gözenek hacminin  $0.31 \text{ cm}^3/\text{g}$  olduğunu belirtmişlerdir. şekil 2.10’daki çatlakların karbonizasyonda oluşan büzölme çatlakları olduğu ve adsorpsiyon çalışmalarında ölçülen mikro gözenek hacimlerinin aktivasyon esnasında oluştuğunu belirtmişlerdir.



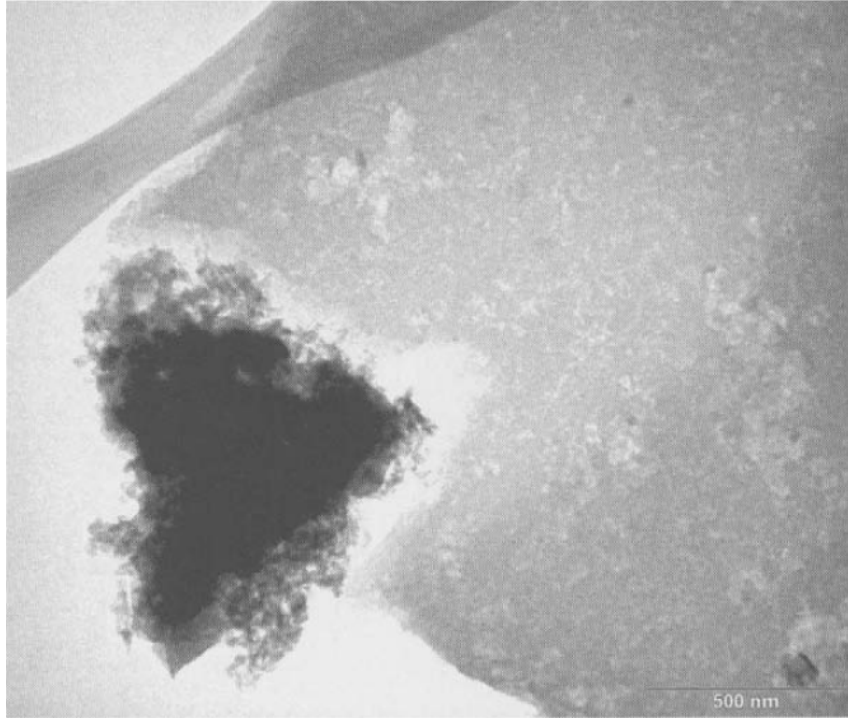
şekil 2.9 Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun yüzeyinin SEM mikrografı ( $w = 250 \text{ }\mu\text{m}$ ) (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).



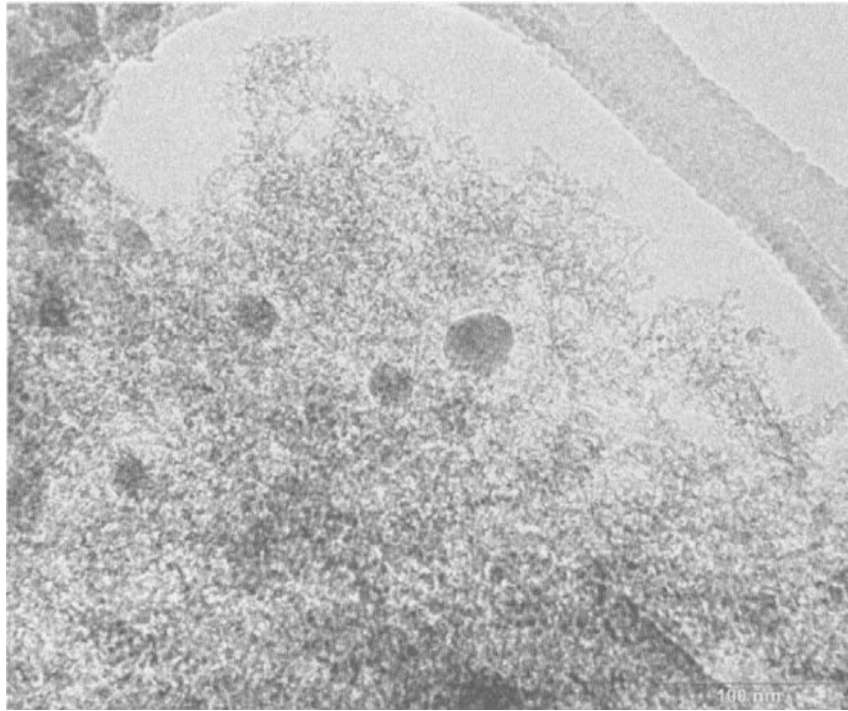
Şekil 2.10 Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun yüzeyinin SEM mikrografı (w = 10 µm) (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).

Şekil 2.11’de ticari aktif karbonun TEM mikrografı verilmiştir. Bu şekil daha büyük bir mobil katalitik partikül ile meydana gelen, yaklaşık 1 µm boyutunda olup karbon partikülünün kenarında yer alan oyulmayı göstermektedir. Burada 50-100 nm boyutunda kanal oluşumları da gözlemlenmektedir. Bu partiküllerdeki aktif metalin demir olduğu belirtilmektedir. Bu kanal oluşumu yaklaşık makro gözeneklilik (> 50 nm) boyutuna sahip olduğu ve adsorpsiyon kapasitesine katkıda bulunmamasına rağmen adsorplanacak maddenin partikülün iç kısımlarına taşınmasına yardımcı olduğu açıklanmaktadır (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).

Şekil 2.12’de zeytin çekirdeğinden karbondioksit ve su buharı kullanarak üretilmiş aktif karbonun TEM mikrografı verilmiştir. Bu mikrografın maddenin küreciklerinin (20-50 nm boyutundaki) gazifikasyona karşı dirençli olduğunu gösterdiği açıklanmaktadır (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).

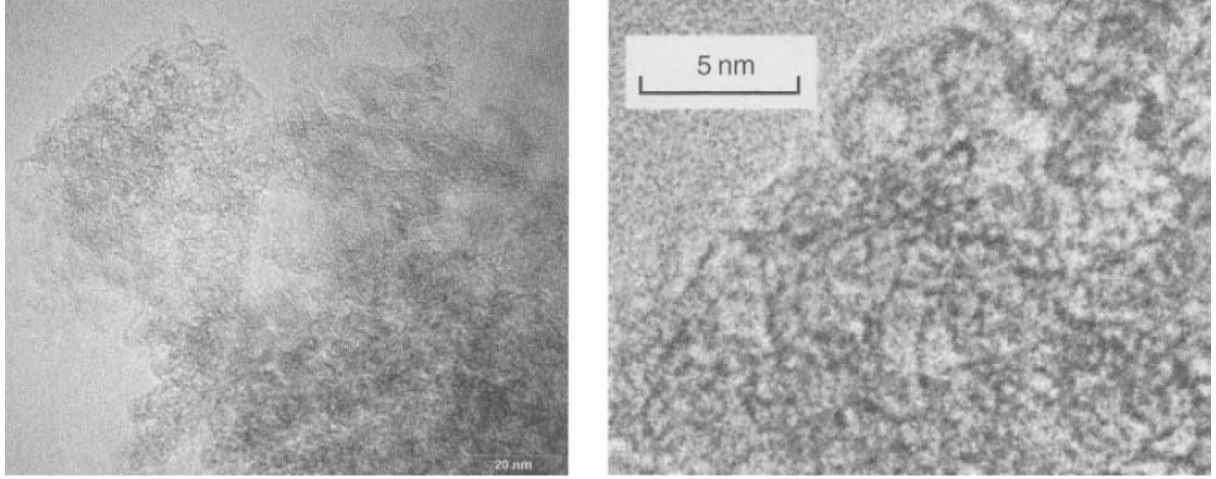


Şekil 2.11 Ticari aktif karbon kesitinin TEM mikrografi ( $w = 2.0 \mu\text{m}$ ) (Marsh and Rodríguez-Reinoso 2006).



Şekil 2.12 Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun bir parçasının TEM mikrografi ( $w = 500\mu\text{m}$ ) (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).

Şekil 2.13 daha yüksek büyütmelelerde, aktif karbonda bulunan yapılar olan üç boyutlu dantelimsi yapıyı göstermektedir. Bu dantelimsi yapıdaki farklılıklar aktif karbonun adsorpsiyon karakteristiklerindeki farklılıkları meydana getirir (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).



Şekil 2.13 Zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonun bir parçasının TEM mikrografları (w = 100µm) (Rodríguez-Reinoso et al. 2005).

## 2.5 AKTİF KARBONUN KULLANIM ALANLARI

Aktif karbonun mikro gözenekli yapısı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve oldukça yüksek reaktivitesi sayesinde eşsiz ve çok amaçlı bir adsorbent olması nedeniyle kullanım alanları gün geçtikçe artış göstermiştir. Aktif karbonlar sanayide en yaygın renk giderme basamağında kullanılmaktadırlar. Özellikle tekstil sanayinde atık sularındaki renk giderilmesi çevresel problemlerin en aza indirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Renkli atık sular, su kaynaklarına ulaştıklarında güneş ışığının bitkiler üzerindeki fotosentetik aktivite etkisinin azalmasına neden olur. Dolayısıyla anaerobik şartlar gelişeceğinden, aerobik deniz canlılarının birçoğunun ölümüne neden olabilirler. Aktif karbonlar şeker endüstrisinde; atık sularda bulunan melanoidinin uzaklaştırılmasında da kullanılırlar.

### 2.5.1 Aktif Karbonun Sıvı Fazda Kullanımı

Sıvı fazda kullanılan aktif karbonlar toz veya granül halde olan aktif karbonlardır. Sıvı fazda aktif karbonlar en fazla su arıtımında kullanılırlar. Dünyanın dörtte üçü sularla kaplı olmasına

rağmen su rezervinin ancak % 2.6'sı tatlı sulardan oluşur. Yeryüzündeki su kaynakları kısıtlı olduğundan kullanılmış suların tekrar kullanımı söz konusu olmaktadır. Su arıtmanın temel amacı, kimyasal ve bakteriyolojik açıdan temiz olan suyu elde etmektir. Eğer atık suların verildiği kaynaklardan endüstriyel kullanıma sahip sular ve içme suları sağlanıyor ise dikkatli ve hassas bir çalışma ile berrak, kokusuz, lezzetli ve sağlığa zarar verecek organizmalardan ve de metal iyonlarından arındırılmış suyun elde edilmesi gerekmektedir. Suya bu özelliklerin verilmesi için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerden biri veya hepsi uygulanmaktadır. İçme suyu arıtımında adsorpsiyon işlemi kimyasal pıhtılaşma-yumaklaştırma ve yüzdürme-çökelme arıtma üniteleri ardından, atık su arıtımında ise biyolojik arıtmadan sonra uygulanmaktadır. Adsorpsiyon yöntemi ile; su arıtımında çözünmüş halde tat ve kokuya sebep olan klorlu hidrokarbon bileşikleri, bazı ağır metallerin giderimi, atık su arıtımında ise çürümeyen biyolojik atıkların, yüzey aktif maddelerin, tarım ilaçları ve bazı zehirli metal iyonları gibi atıkların giderimi sağlanmaktadır. Aktif karbon kullanarak su arıtımı işlemi uzun yıllar öncesine dayanmasına rağmen günümüzde de bu konuyla ilgili akademik çalışmalar yapılmaya devam etmektedir (Hassler 1963).

Gonzalez-Serrano et al. (2004)  $H_3PO_4$  kullanılarak hazırlanan aktif karbon üzerine su kirleticilerinden olan fenol, 2,4,5-triklorofenol ve Cr (VI) adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Bao et al. (1999) ise granüler aktif karbon kullanarak sudan brom iyonunun adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Spahis et al. (2008)  $ZnCl_2$  ve KOH kullanılarak zeytin çekirdeğinden hazırlanan aktif karbonla su kirleticilerinden olan siklo hekzan, benzen ve  $CCl_4$  adsorpsiyonunu incelemişlerdir.

Literatürde aktif karbon kullanarak toksik metal iyonlarının giderilmesi çalışmalarına sıklıkla rastlanmaktadır. Üçer et al. (2006) aktif karbon üzerine Cu (II), Cd (II), Zn (II), Mn(II) ve Fe (III) iyonlarının adsorpsiyonunu incelemişler ve adsorpsiyonunu Langmuir izoterm modeline uygun olduğunu açıklamışlardır.

Aktif karbon sanayide birçok işlem basamaklarında renk giderici ve kimyasal saflaştırıcı olarak geniş kullanım alanına sahiptir. Özellikle I. Dünya Savaşı öncesinde aktif karbonlar hidroksimetilfurfural (HMF) gibi renk maddelerinin ve köpürmeye neden olan maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılmıştır. Aktif karbonun diğer önemli uygulama alanlarından biri ise, yemeklik yağlardan kötü koku, tat ve rengin giderilmesidir (Hassler 1963).

Özellikle tekstil sanayisi atıkları su kaynaklarını kirletmektedirler bu nedenle bu atıkların aktif karbonla adsorpsiyon yöntemiyle giderilmesi çalışmalarına sıklıkla rastlanmaktadır. Wang and Zhu (2007) bazik boyalardan olan metilen mavisi, crystal violet ve rhodamine B'nin  $\text{HNO}_3$  ve  $\text{HCl}$  ile modifiye edilmiş aktif karbon üzerine adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Metilen mavisi adsorpsiyonu  $\text{AC} > \text{AC-HCl} > \text{AC-HNO}_3$  derecelenirken, crystal violet ve rhodamine B adsorpsiyonlarında ise  $\text{AC-HCl} > \text{AC} > \text{AC-HNO}_3$  şeklinde derecelendikleri açıklanmıştır. Yener et al. (2008) metilen mavisinin hem granüler hemde toz aktif karbon üzerine adsorpsiyonunu dinamik yöntemle incelemişlerdir. Al-Degs et al. (2008) 3 farklı boyanın sıvı fazdan aktif karbon üzerine adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Bu adsorpsiyona pH ve sıcaklığın etkisini araştırmışlar ve pH 7 ve sıcaklık 298 K olduğunda maksimum adsorpsiyon değerlerine ulaşıldığını açıklamışlardır.

İlaç sanayinde aktif karbon ilacın ve ara ürünlerin saf ve renkten bağımsız olarak üretilmesini sağlar. Aktif karbon içecek sanayisinde; alkollü içeceklerden fuzel yağının uzaklaştırılması, kanyak üretimi esnasında istenmeyen tatların giderilmesinde ve birada meydana gelen renkli maddeleri ve fenolü uzaklaştırmak için kullanılır. Aktif karbon petrokimya endüstrisinde yağ ve hidrokarbonların uzaklaştırılmasında kullanılır. Endüstriyel atık sularda ve yüzme havuzlarında istenmeyen kirleticilerin uzaklaştırılmasında aktif karbon kullanılmaktadır (Hassler 1963).

Son yıllarda aktif karbonun kullanım alanlarından biri de maden cevherlerinden altın eldesidir. Sodyum siyanitte çözünmüş altın aktif karbonla geri kazanılabilmektedir (Yalçın ve Arol 1993).

## **2.5.2 Aktif Karbonun Gaz ve Buhar Fazda Kullanımı**

Çözücü buharlarının çoğu hava ile karıştırıldığında yanıcı özellik göstermektedir. Kimyasalın cinsine bağlı olarak değişen hava/kimyasal buharı oranı kritik miktarın üstüne çıktığında yanıcılık görülmektedir. Bu durum da buhar konsantrasyonu belli bir değerin altında tutulmalıdır. Aktif karbon kullanarak çözücü geri kazanılması etkili ve hızlı bir yöntemdir ve çözücünün % 85-95'i geri kazanılabilmektedir. Aseton, benzen, etil alkol, etil asetat, eter, izopropil alkol, metil alkol, metil asetat, petrol naftası, tetrakloro etilen, trikloroetilen, toluen, ksilen gibi çözücülerin aktif karbon kullanarak geri kazanımı mümkündür. Aktif karbon endüstride organik buharların adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.

Literatürde organik buharların adsorpsiyonu ile ilgili birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Lu et al. (2006) 3 farklı tip aktif karbon üzerine organik buharların adsorpsiyonunu incelemişler ve bu yöntemin oldukça etkili olduğunu açıklamışlardır. Carvalho et al. (2006) ticari aktif karbon ve mantardan kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon üzerine organik bileşiklerden metil etil keton (MEK), 1,1,1 trikloro etan (TCA), siklo hekzan (cyclo-C6), etanol ve tri kloro etilen (TCE) adsorpsiyonunu incelemişlerdir. 25 °C’de Dubinin-Astakhov (DA) eşitliği parametrelerini belirlemişlerdir. Bu değerler aşağıda Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Aktif karbon üzerine organik bileşiklerin adsorpsiyonunun DA eşitliği parametreleri (Carvalho et al. 2006).

| Buhar           | E (kJ/mol) | W <sub>0</sub> ( cm <sup>3</sup> /g) | n   |
|-----------------|------------|--------------------------------------|-----|
| <b>TCE</b>      | 21.4       | 0.34                                 | 1.5 |
| <b>MEK</b>      | 37.4       | 0.34                                 | 0.8 |
| <b>Cyclo-C6</b> | 19.4       | 0.30                                 | 1.4 |
| <b>Etanol</b>   | 13.9       | 0.30                                 | 1.6 |
| <b>TCA</b>      | 22.1       | 0.29                                 | 1.5 |

Lee and Reucroft (1999a) kömür ve odundan kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların CCl<sub>4</sub> ve asetonu adsorpsiyonunu incelemişler ve DR eşitliği parametrelerini belirlemişlerdir. Yapılan çalışmaların bazılarında organik buhar adsorpsiyonu ile gazların adsorpsiyonunu birlikte çalışılmıştır. Dawson et al. (2006) yüksek yüzey alanlı karbon üzerine N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve hekzan adsorpsiyonunu incelemişlerdir.

Sigara endüstrisinde aktif karbon filtreler tat ve kokunun kontrolünde ve zararlı maddelerin giderilmesinde kullanılmaktadır. Aktif karbon endüstriyel gaz maskelerinde ve endüstride SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub> gibi gazların uzaklaştırılmasında da kullanılmaktadır. Lee and Reucroft (1999b) kömür ve odundan kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların NH<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub>S’i düşük bağıl basınç aralığında adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Kopaç (1999) moleküler elek 13X ve aktif karbon üzerine SO<sub>2</sub>’nin adsorpsiyonunu dinamik yöntemle incelemiştir.

Atık gazların saflaştırılmasında, petrol rafinerilerinde, doğal gaz depolanması ve saflaştırılmasında aktif karbon sıklıkla kullanılmaktadır. Aktif karbon katalizör olarak kullanılmasının yanında radyoaktif çekirdeklerin adsorpsiyonunda ve istenmeyen kokuların giderilmesinde koku gidericisi olarak kullanılmaktadır (İlgar 2001).

Aktif karbon hidrojen, metan ve doğal gaz gibi alternatif enerji amaçlı depolama çalışmalarında kullanılmıştır. Erdoğan and Kopaç (2007) aktif karbon üzerine hidrojenin adsorpsiyonunu dinamik yöntemle incelemişlerdir. Li et al. (2004) 0-12 MPa basınç 273-333 K sıcaklık aralığında metanın adsorpsiyonunu volumetrik olarak araştırmışlardır. Sun et al. (1997) ise Illinois kömüründen ve atık lastiklerden kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların doğal gazı adsorpsiyonunu incelemişlerdir.

## BÖLÜM 3

### TEORİ

#### 3.1 ADSORPSİYON

Adsorpsiyon hareket eden sıvı veya gaz fazında bulunan moleküllerin, nispeten sabit olan yüzey moleküllerine bağlanmasıdır. Başka bir deyişle, bir yüzey veya arakesit üzerinde moleküllerin tutunması, birikmesi ve derişiminin artması olarak tanımlanabilir. Adsorpsiyon üzerine ilk sistematik araştırmayı 1814 yılında Saussure yapmış, adsorpsiyon terimi ise 1881 yılında Kayser tarafından ileri sürülmüştür (Ruthven 1984).

Adsorpsiyon olayında gaz veya buharın tutunduğu katıya adsorbent (veya adsorplayıcı), katı yüzeyine tutunan hareket eden gaza veya buhara adsorplanan denir. Sabit basınç altında bir gaz adsorbent ile temas ederse gazın hacminin küçüldüğü, aynı işlem sabit hacimde yapılırsa bu kez gazın basıncının düştüğü gözlenir. Bu durum gazın bir kısmının katı tarafından tutulduğunu gösterir. Bu olay gaz moleküllerinin katı içerisine girmesi ise absorbsiyon, yüzeyde tutunması ise adsorpsiyon olarak adlandırılır (Ruthven 1984).

Bazı katılar gözenekli yapıya sahip olduklarından iç yüzey alanları, dış yüzey alanlarından daha büyüktür. Katının iç yüzeyindeki adsorpsiyon dış yüzeyindeki gibi kolay gerçekleşmez. Çünkü gaz molekülleri içeri girerken atomları, molekülleri veya iyonları ile etkileşir. Bu durumda iç boşluklarda kılcal kondensasyon adı verilen yoğunlaşma olayı gerçekleşir.

Adsorpsiyon olayı fiziksel adsorpsiyon (veya van der Waals adsorpsiyonu) veya kimyasal adsorpsiyon (veya kemisorpsiyon) şeklinde gerçekleşebilir. Fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan maddeyi adsorbent yüzeyine bağlı tutan kuvvetler van der Waals kuvvetleridir. Van der Waals kuvvetleri uzak mesafeden etkilidir fakat zayıf kuvvetlerdir. Fiziksel adsorpsiyonun entalpisi tipik olarak 20 kJ/mol civarındadır. Böyle küçük entalpi değişimi bağ parçalanmasına neden olmak için yetersizdir ve bu nedenle fiziksel olarak adsorplanmış bir

molekül kendi kimliğini korur. Fiziksel adsorpsiyon düşük sıcaklıklarda gözlenir ve genellikle sıcaklık arttırıldığında adsorpsiyon miktarı düşer (Ruthven 1984).

Kimyasal adsorpsiyonda ise moleküller veya atomlar genellikle bir kovalent bağ oluşumuyla yüzeye tutunurlar ve adsorplanan moleküllerin ara yüzey içerisinde serbest olarak hareket edemeyecekleri düşünülür. Kimyasal adsorpsiyon entalpisi fiziksel adsorpsiyon entalpisinden çok daha büyüktür ve tipik değerler 200 kJ/mol civarındadır. Sıcaklık arttıkça kimyasal adsorpsiyon artar (Ruthven 1984, Atkins 2001).

Fiziksel adsorpsiyon tersinir bir olaydır, yani sıcaklığın artması veya basıncın azalmasıyla desorpsiyon (adsorplanan moleküllerin yüzeyden ayrılması) meydana gelir. Kimyasal adsorpsiyon ise genellikle tersinmez bir olaydır. Kimyasal olarak adsorplanmış bir gazın desorpsiyon ürünleri, adsorbent ile adsorplanan arasındaki bir kimyasal tepkime ürünü olabilir. Fiziksel adsorpsiyon tek tabaka veya çok tabakalı biçimde olabilirken, kimyasal adsorpsiyon en fazla tek tabaka biçiminde olabilir. Yeteri kadar düşük sıcaklıklarda fiziksel adsorpsiyon herhangi bir adsorbent ile adsorplanan ikilisi arasında meydana gelebilir ve bu olay ikilinin türüne bağlı değildir. Kimyasal adsorpsiyon ise ikili sistemin türüne bağlıdır ve ikili arasında özel bir kimyasal ilgiyi gerektirir (Ruthven 1984).

Gözenekli adsorbentler dışındaki adsorbentlerde fiziksel adsorpsiyon dengesi çok hızlı kurulur ve tersinirdir. Gözenekli adsorbentlerde ise dengenin kurulması bazen saatlerce sürebilir. Adsorpsiyon gerçekleşirken katı yüzeyi ile gaz veya buhar molekülleri esnek veya esnek olmayan çarpışma yaparlar. Esnek çarpışmada herhangi bir enerji değişimi olmaksızın molekül geri sıçrar. Esnek olmayan çarpışmada ise molekül, katı yüzeyinde belirli bir süre temas halinde kalır. Bir molekülün yüzeyinde ortalama tutunma süresi,

$$\tau = \tau_0 e^{Q/RT} \quad (3.1)$$

Frankel denklemi ile verilir. Burada,  $\tau_0$  molekülün titreşim süresi olup  $10^{-13}$  s dolayındadır.  $Q$  ise, molekül başına adsorpsiyon enerjisidir.  $\tau \geq \tau_0$  ise adsorpsiyonun olduğu kabul edilir. Kimyasal adsorpsiyonda  $Q$  değerleri fiziksel adsorpsiyona göre daha büyük olduğundan,  $\tau$  değerleri de daha büyük olur ve daha hızlı gerçekleşir (Yörükoğulları 1997).

Bir gazın bir katı üzerindeki adsorpsiyonu kendiliğinden oluşmakta olup, sistemin serbest enerjisindeki azalmanın eşliğinde cereyan eder. Adsorplanmış gaz daha düzenli bir duruma geçtiği için entropide bir azalma olur ve

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (3.2)$$

denklemlerine göre adsorpsiyon olayı daima ısı veren (ekzotermik) bir olaydır. Adsorbent ile adsorplanan molekül arasındaki kimyasal benzerlik adsorpsiyonun derecesini etkiler (Yörükoğulları 1997).

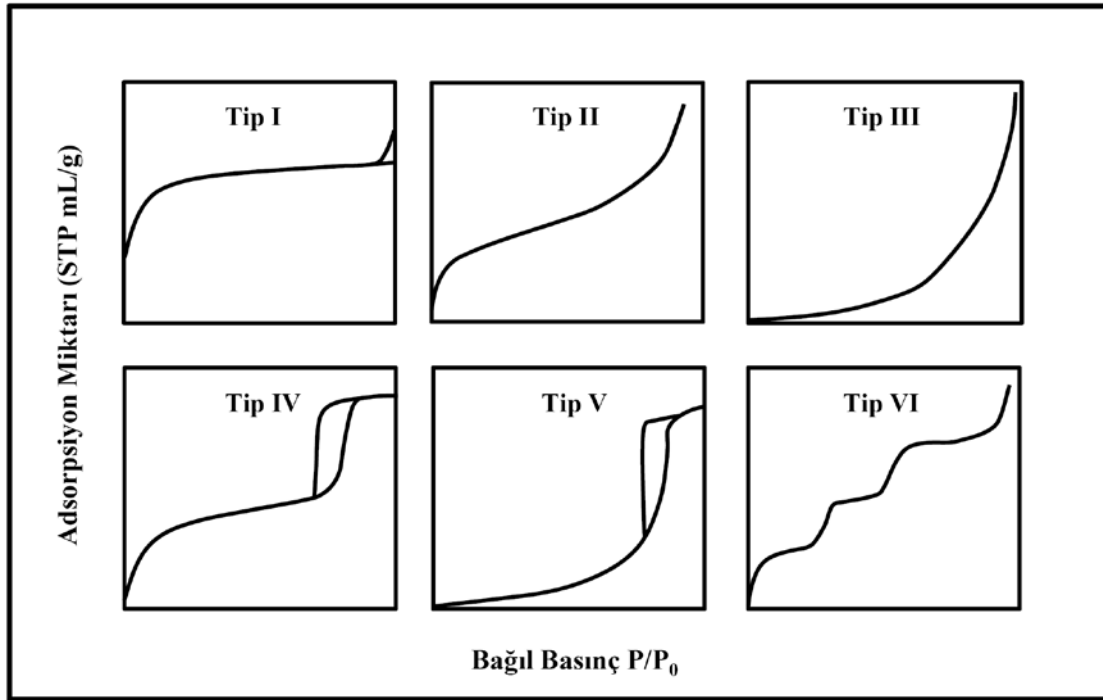
Fiziksel adsorpsiyonda etkin olan kuvvetler van der Waals kuvvetleridir. Temelde elektrostatik kökenli ve çekici karakterli bu kuvvetler, dispersiyon (dağılma) kuvvetleri olarak da adlandırılır. Dispersiyon kuvvetlerinin doğası ilk kez 1930 yılında London tarafından belirtilmiştir. London, kuantum mekaniğini kullanarak atomda veya molekülde elektronun salınım hareketi yapan bir dipol momentine sahip olduğunu varsaymıştır. Dipol momenti, herhangi bir anda çekirdek etrafında bulunan elektronların dağılımındaki simetrinin bozulması sonucu oluşmaktadır. Geçici oluşan bu dipol momentinin, geniş bir zaman aralığında ortalama değeri ise sıfır olmaktadır. Katının yüzeyine yaklaşan bir molekülün ani dipolü, katı yüzeyindeki bir atomu indüklemesi sonucu oluşan her iki moment birbirini çekecek şekilde etkileşirler (Noll et al. 1991).

Dipol-dipol etkileşmelerine ek olarak, fiziksel adsorpsiyona katkıda bulunan diğer dispersiyon etkileşmeleri; iyon-dipol, iyon-indüklenmiş dipol ve kuadrupol-kuadrupol etkileşmeleridir. Dipol-dipol etkileşmeleri polar katı ile polar bir adsorbat arasında görülürken, iyon-dipol etkileşmeleri, iyonik bir katı ile elektriksel olarak nötral fakat polar adsorbat arasında görülür. İyon-indüklenmiş dipol etkileşmeleri polar bir katı ile polarizlenebilir adsorbat arasında görülür. Kuadrupol etkileşmesi CO<sub>2</sub> gibi elektronegatifliği farklı atomları bünyesinde bulunduran simetrik yapıli moleküllerde görülür. Bu molekül dipol momenti içermemesine karşın, kuadrupol (  $\text{O}^- \text{C}^+ \text{O}^-$  ) momente sahip olması nedeniyle polar yüzeyle etkileşmeye girer (Lowell et al. 2004).

### 3.2 ADSORPSİYON İZOTERMLERİ

Adsorpsiyon gerçekleşirken gaz ile adsorbent temas ettiğinde, adsorplanmadan gaz fazında kalan gaz derişimi ile katı yüzeyinde tutunan gaz derişimi arasında dinamik bir denge vardır. Adsorpsiyon dengesinin belirlenmesi için, sabit sıcaklıkta gaz fazında dengede kalan adsorbatın derişimine karşı, adsorbentin birim ağırlığına adsorbat miktarı grafiğe geçirilerek adsorpsiyon izotermi adı verilen eğriler çizilir. Gazlar için bu derişim genellikle kısmi basınç olarak verilir. Adsorpsiyon dengesi verileri izotermeler haricinde izobarlar ve izosterler cinsinden de çizilebilir. Bir adsorpsiyon süreci, en iyi şekilde izotermelerden anlaşılabilir (Gregg and Sing 1982).

Adsorpsiyon izotermeleri, ilk olarak 1940 yılında S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Deming ve E. Teller tafafından BDDT sınıflandırması ismiyle beş ayrı sınıf (I-V) olarak önerildi. 1945 yılında bazen Brunauer sınıflandırması olarak da anıldı. 1985 yılında IUPAC tarafından yapılan fiziksel adsorpsiyon izotermelerinin sınıflandırılmasında Tip VI izotermine de eklenmiş olduğu gözlemlendi. Bu sınıflandırma Şekil 3.1’de verilmiştir (Rouquerol et al. 1999).



Şekil 3.1 IUPAC’ın gaz adsorpsiyon izoterm sınıflandırması (IUPAC; 1984, 1995).

Tip I izotermi monomoleküler yani tek tabakalı adsorpsiyonda gözlemlenen izoterm tipidir. Mikro gözenekli adsorbentlerde fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon izotermi bu şekildedir. Langmuir izoterm modeli ile açıklanabilir. Adsorpsiyon bağıl basınç yaklaşık 0.5 iken tamamlanmış olur. 77 K'de azotun aktif karbon üzerinde adsorpsiyonu bu izoterm tipine örnek olarak verilebilir (Gregg and Sing 1982).

Tip II izotermi çok tabakalı fiziksel adsorpsiyonu gösterir. Genellikle gözenekli olmayan katılarda bu izoterm tipi görülmektedir. İlk tabakanın adsorpsiyon ısısı yoğunlaşma ısısından büyük olan ve kılcal yoğunlaşmanın az olduğu adsorpsiyon izoterm modelidir. Tek tabaka tamamlanmadan diğer tabakalar kondenzasyon şeklinde oluşmaya başlar. Tek tabakadan sonraki diğer tabakaların oluşması daha yüksek bağıl basınçlarda gözlenir (Gregg and Sing 1982).

Tip III izotermi gözeneksiz ve makro gözenekli katılarda görülür ve bu izoterm çok yaygın olmayan bir izoterm türüdür. Bu izoterm tipinde katı ile gaz arasında zayıf bir etkileşim vardır. Adsorbentle adsorbat arasındaki zayıf etkileşim düşük basınçlarda düşük bir adsorpsiyon gerçekleşmesine yol açar. Fakat bir molekül adsorbent yüzeyine tutunduğunda, adsorpsiyon olayında yürütücü rolü üstlenir ve daha yüksek basınçlarda adsorpsiyonun daha hızlı ilerlemesine yol açar. Bu izoterm hem polar hem de polar olmayan moleküllerin adsorpsiyonunda gözlemlenebilir ve adsorbat ile adsorbent arasındaki kuvvetler her iki durumda da zayıf olacaktır. İlk tabakanın adsorpsiyon ısısı yoğunlaşma ısısından daha düşük olan ve kılcal yoğunlaşmanın az olduğu adsorpsiyon izotermi Tip III izotermine benzer. Bu izotermi örnek olarak; polietilen üzerine azotun adsorpsiyonu ya da grafit üzerine su buharının adsorpsiyonu verilebilir (Gregg and Sing 1982, Lowell et al. 2004).

Tip IV izotermi mezo gözeneklerin varlığında görülür. Düşük basınçlarda bu izoterm Tip II izotermiyle aynı eğrileri verebilir fakat basınç arttıkça eğriler farklılaşır. İlk tabakanın adsorpsiyon ısısı yoğunlaşma ısısından büyük olan ve kılcal yoğunlaşmanın çok olduğu bir izoterm modelidir. Tip IV izoterminin karakteristik özelliği adsorpsiyon histerezisi olmasıdır. Tip IV izotermi sıklıkla rastlanan izotermi ve adsorpsiyon histerezisi sistemden sisteme değişebilir.

Tip V izotermi de Tip III izotermi gibi zayıf adsorbent-adsorbat etkileşimlerini içerir. Bu izoterm tipinde ilk tabakanın adsorpsiyon ısısı yoğunlaşma ısısından küçüktür ve kılcal

yoğunlaşma çoktur. Adsorplama gücü daha düşük olan mezo gözenekli adsorbentlerde görülür. Bir Tip V izotermi gözeneklerin dolma ve boşalma mekanizmasıyla ilgili adsorpsiyon histerezisine sahiptir. Bu izoterm göreceli olarak nadir görünen bir izoterm tipidir (Gregg and Sing 1982, Rouquerol et al. 1984).

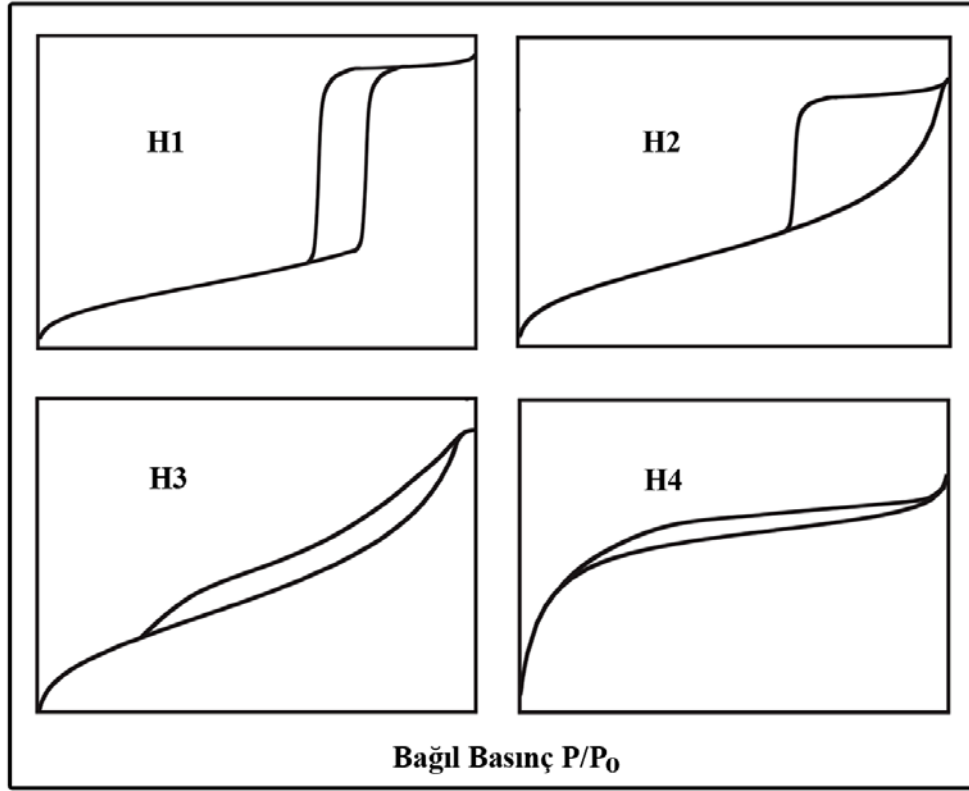
Tip VI izotermi göreceli olarak nadir görülen basamaklı bir izoterm türüdür. Basamakların keskinliği adsorbent yüzeyinin homojenliğine, adsorbata ve sıcaklığa bağlıdır. Bu izoterm tipi gözeneksiz bir yüzeyde çok tabakalı adsorpsiyon şeklinde, küresel simetrik polar olmayan adsorbanların adsorpsiyonunda görülür. Tip VI izotermine örnek vermek gerekirse, sıvı azot sıcaklığında grafitel yapıdaki karbon üzerine argon ve kripton adsorpsiyonu verilebilir (Gregg and Sing 1982, Rouquerol et al. 1984, Lowell et al. 2004).

Adsorpsiyon izotermi için pek çok matematiksel model geliştirilmiştir (Gregg and Sing 1982). Bu çalışmada deneysel adsorpsiyon izoterm verileri Langmuir, BET, Freundlich, DR, DA, Harkins-Jura, Henderson, Halsey, Smith adsorpsiyon izoterm modelleri ile değerlendirildiği için bu bölümde bu izoterm modellerinden kısaca bahsedilecektir.

### **3.2.1 Adsorpsiyon Histerezisi Türleri**

Geniş bir kanıya göre; bir mezo gözenekli adsorbentin adsorpsiyon histerezisi ile yapı (gözenek boyutu dağılımı, gözenek geometrisi ve bağlanırlık) arasında bir korelasyon olduğu belirtilmektedir. Şekil 3.2’de adsorpsiyon histerezisi sınıflandırması görülmektedir. Literatürde çok farklı adsorpsiyon histerezisi türleri vardır, fakat en genel sınıflandırma 1985’te IUPAC tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırmada H1, H2, ve H3 tiplerini 1958 yılında de Boer önermiştir. H1 Tipi (orijinali Tip A olarak bilinir) gözenekli maddelerin silindirik gözenek kanallarından ya da homojen kürelerin yığılmasıyla oluştuğunu ifade eder. Örneğin MCM-41’deki açık uçlu boru şeklindeki gözeneklerde görülebilir. H2 histerezisine sebep olan maddelere sıklıkla rastlanmasına rağmen bunların gözenek boyutu dağılımı ve şekilleri çok iyi tanımlanmamıştır. Bu tip histerezis bir uzun hemem hemen yassı bir düzlük ve dik bir desorpsiyon eğrisi içermektedir. Bu tip bir çok inorganik oksit jellerde görülmektedir. H3 Tip histerezis yüksek bağıl basınçlarda adsorpsiyonu sınırlandırmaz. Burada yarık şekilli gözeneklere neden olan düz partiküllerin toplamalarında gözlemlenir. Bu histerezis 77 K’de azot için bağıl basıncın 0.4-0.45 olduğu aralıkta görülebilir. H4 Tip histerezis ince yarık gözeneklerin yanında mikro gözenek bölgesini de kapsayan gözenekleri

içerir. Bu histerezis aktif karbon üzerinde azot sorpsiyon izoterminde görülebilir (Gregg and Sing 1982, Rouquerol et al. 1984, Lowell et al. 2004, Condon 2006).



Şekil 3.2 Adsorpsiyon histerezisi sınıflandırması.

### 3.2.2 Langmuir Adsorpsiyon İzotermi

Langmuir tarafından 1915 yılında verilen bu kuramsal bağıntı her basınç aralığında kullanılabilir. Langmuir bir gazın bir katı yüzeyi tarafından adsorpsiyonunun tek tabakadan öteye gidemeyeceğini öne sürmüştür. Adsorpsiyonda birbirine ters iki etki düşünülebilir; bunlardan ilki gazın yüzeyde tutulması iken ikincisi ise yüzeyde tutulan gaz moleküllerinin yüzeyden uzaklaşmasıdır. Langmuir denklemi hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon için kullanılabilir (Gregg and Sing 1982, Ruthven 1984, Bansal and Goyal 2005).

Bir adsorbentte mezo ve makro gözenekler yokken mikro gözenekler varsa Tip I adsorpsiyonu, ya da Langmuir izotermi gözlenebilir. Langmuir denklemi (Denklem 3.3) adsorbatın tek tabaka adsorpsiyonu gösterir ve bu model BET izoterm modelinin kısıtlanmış şeklidir.

$$\frac{W}{W_m} = \frac{C(P/P_0)}{1+C(P/P_0)} \quad (3.3)$$

Burada W belirli P/P<sub>0</sub>'da adsorbatın ağırlığı, W<sub>m</sub> ise adsorbatın tek tabakadaki ağırlığıdır. C ise adsorpsiyon enerjisiyle ilgili bir sabittir. Denklem 3.4 Langmuir denkleminin doğrusal formudur.

$$\frac{P/P_0}{W} = \frac{1}{CW_m} + \frac{P/P_0}{W_m} \quad (3.4)$$

(P/P<sub>0</sub>)/W'ye karşı P/P<sub>0</sub> grafiğe geçirildiğinde doğrunun eğimi 1/W<sub>m</sub>, doğrunun y eksenini kestiği noktadan ise 1/CW<sub>m</sub> hesaplanabilir. W<sub>m</sub> değeri kullanılarak toplam yüzey alanı hesaplanır. Bu yöntem mikro, mezo ve makro gözenekleri bir arada içeren karma adsorbentler için çok uygun değildir (Quantachrome Instruments 2002).

### 3.2.3 BET ( Brunauer, Emmett, Teller) Adsorpsiyon İzotermi

Brunauer, Emmett ve Teller 1938 yılında tek tabakalı adsorpsiyonu kapsayan Langmuir denklemini çok tabakalı adsorpsiyon için genişletmişlerdir. BET izotermi, Tip II adsorpsiyon eğrisine uymaktadır. BET kuramına göre ilk tabaka dışındaki bütün tabakalarda adsorplanan miktarlar aynıdır. Burada ilk tabaka dolmadan ikinci tabaka oluşmaya başlar, ikinci tabaka dolmadan üçüncü tabaka oluşmaya başlar ve adsorpsiyon prosesi bu şekilde devam eder. Adsorpsiyonun tek tabaka kapasitesi bu izoterm eğrisinden de hesaplanabilir. (Gregg and Sing 1982, Ruthven 1984, Lowell and Shields 1984).

BET denkleminin türetilmesine kaynak olan fiziksel bir model, bazı önemli varsayımlarla, daha sonraları Hill tarafından düzenlenmiş biçimiyle şöyle verilmiştir:

- I- Adsorbentin yüzeyi üniform (tekdüze) olup ilk tabakadaki gaz molekülleri birbiriyle eşdeğer olan adsorpsiyon bölgelerinde adsorplanırlar.
- II- İlk tabakada adsorplanmış olan moleküller yerleşmiş olup, yüzey üzerinde serbestçe hareket edemezler.

- III-** Her bir tabakada adsorplanmış olan her bir molekül, bir sonraki tabakada gaz moleküllerinin adsorpsiyonu için bir yer sağlarlar.
- IV-** Verilen bir tabakada moleküller arasında hiçbir etkileşme yoktur.
- V-** İkinci ve daha sonraki tabakalardaki bütün moleküllerin sıvı haldeki moleküller gibi olduğu ve aynı enerjiye sahip oldukları kabul edilmiştir. Yüzeyle doğrudan etkileşimde bulunan birinci tabakadaki moleküller ise farklı enerjilere sahiptir (Oğuz 2001).

Adsorbentlerin çoğu düşük sıcaklıklarda çok tabakalı adsorpsiyon yapar. Gazlar için BET izoterm eşitliği genellikle;

$$\frac{1}{W((P_0/P)-1)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1}{W_m C} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (3.5)$$

doğrusal biçimiyle kullanılır. Burada W belirli bir bağıl basınçta adsorplanan gazın miktarıdır,  $W_m$  ise tek tabakayı oluşturan adsorbatın miktarıdır. C ise BET denklemi sabiti olup ilk tabakada adsorplanan gazın enerjisi ile ilgili ve adsorbent/adsorbat etkileşiminin büyüklüğünü belirtir (Quantachrome Instruments 2002).

Çok tabakalı fiziksel adsorpsiyon yalnızca adsorbatın kaynama sıcaklığına yakın sıcaklıklarda meydana gelir. BET kuramı düşük bağıl basınçlarda ( $P/P_0=0.05-0.30$  aralığında) güvenilir bir kuramdır. Katı maddelerin yüzey alanlarının belirlenmesinde en geniş kullanılan metod BET kuramıdır. Çok noktalı BET metodunda azot gazı adsorbat olarak kullanıldığında BET denklemi  $P/P_0$  0.05 ile 0.3 arasında doğrusal bir değişim verir (Quantachrome Instruments 2002).

Standart çok noktalı BET metodu en az üç noktaya ihtiyaç duyar ve adsorbentin üzerinde tek tabaka adsorplanan ağırlığı eğimden (s), ve kesim noktasından (i) bulunabilir.

$$s = \frac{C-1}{W_m C}, i = \frac{1}{W_m C} \quad (3.6)$$

Buradan tek tabakada adsorplanan adsorbatın ağırlığı bulunur (Denklem 3.7).

$$W_m = \frac{1}{s+i} \quad (3.7)$$

$W_m$  (tek tabakada adsorplanan adsorbatın ağırlığı) bulunduktan sonra yüzey alanı hesaplanır. Burada adsorplanan molekülünün kesit alanının ( $A_{CS}$ ) bilinmelidir. Örneğin toplam yüzey alanı ( $S_t$ ), Avagadro sayısı ( $N$ ) ve adsorbatın moleküler ağırlığı ( $M$ ) olmak üzere Denklem 3.6'dan bulunur (Quantachrome Instruments 2002).

$$S_t = \frac{W_m N A_{CS}}{M} \quad (3.8)$$

### 3.2.4 Freundlich İzotermi

Bu denklem, Freundlich tarafından 1907 yılında verilmiştir. Aslında bu izoterm empirik bir izotermdir. Buna göre, düşük basınçlarda adsorplanmış hacim, basıncın birinci kuvvetiyle orantılı olup Henry yasasıyla özdeşleşir:

$$V = k_1 P \quad (3.9)$$

Yüksek basınçlarda, adsorplanmış hacim basınçtan bağımsızdır:

$$V = k_2 \quad (3.10)$$

Orta basınçlarda ise adsorpsiyon, basıncın 0 ile 1 arasındaki kuvvetiyle orantılıdır  $n \geq 1$  olmak koşuluyla;

$$V = P^{1/n} \quad (3.11)$$

olup Freundlich izotermi denklemidir. Bu denklemin doğrusal biçimi;

$$\log V = \log k + \frac{1}{n} \log P \quad (3.12)$$

olup eğimden ve doğrunun y eksenini kesim noktasından  $n$  ve  $k$ 'nın değerleri bulunabilir. Freundlich denklemi orta basınç aralığında kullanılabilir ve hem fiziksel adsorpsiyonda hem

de kimyasal adsorpsiyonda kullanılabilir. Freundlich izoterm denkleminde yüzey alanı bir parametre olarak bulunmaz. Bu nedenle bu denklem kullanılarak yüzey alanı hesaplanmaz (Condon 2006).

### 3.2.5 DR (Dubinin-Radushkevich) İzotermi

Gözenekli adsorbentler için yaygınca kullanılan diğer bir denklem Dubinin–Radushkevich (DR) izotermidir ve 1947 yılında önerilmiştir. Sonraları bu denklem gözeneksiz yüzeyler için DR–Kaganer (DRK) izotermi olarak düzenlenmiştir. DR denklemini mikro gözenekli karbonların adsorpsiyon çalışmaları için Polanyi'nin potansiyel teorisi baz alınarak empirik olarak geliştirilmiştir (Quantachrome Instruments 2002).

$$V = V_0 \exp \left[ - \left( \frac{A}{\beta E_0} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

Burada A, Dubinin'in ilk çalışmalarında adsorpsiyon potansiyeli ( $\epsilon$ ) olarak ifade ettiği adsorpsiyon serbest enerjisidir,

$$A = \epsilon = RT \ln \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

Denklemdaki  $V_0$  mikrogözenek hacmini,  $E_0$  ise adsorpsiyonun karakteristik enerjisidir.  $\beta$  affinite sabitidir ve adsorplanan maddenin molar hacminin benzen hacmine bölünmesiyle bulunabilir.

$$\beta = \frac{v}{v_{C_6H_6}}$$

Denklemin doğrusal şekli aşağıdaki gibidir ve  $[\log(P_0/P)]^2$  ye karşı  $\log V$  grafiği çizildiğinde grafiğin eğim ve kesim noktasından  $V_0$  ve  $E_0$  parametreleri bulunabilir (Quantachrome Instruments 2002).

$$\log V = \log V_0 - 2.303 \left( \frac{RT}{\beta E_0} \right)^2 \log \left( \frac{P_0}{P} \right)^2 \quad (3.14)$$

### 3.2.6 DA (Dubinin-Astakhov) İzotermi

Çok fazla mikro gözenekli adsorbentler için DR eşitliği kullanılabilir. Buna rağmen eğer mikro gözenekli adsorbentler heterojen dağılımlı ya da aktif karbon ise DR eşitliği hatalara neden olabilir. Bunun için mikrogözenekli maddelerin geniş aralığında adsorpsiyonu tanımlamak için DA eşitliği önerilmiştir. DA eşitliğinde n 1.5 ile 3 arasında değişir, zeolit gibi çok iyi mikro gözenekli adsorbentler için 5-6 değerine de ulaşabilir. DA eşitliği aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesinde yaygınca kullanılır. DA eşitliği aşağıda verilmiştir (Quantachrome Instruments, 2002).

$$W = W_0 \exp \left[ - \left( \frac{-RT \ln P / P_0}{E} \right)^n \right] \quad (3.15)$$

burada;

W= belirli bir bağıl basınçta ve sıcaklıktaki adsorplanan miktar

W<sub>0</sub>= toplam adsorplanan miktar

R= gaz sabiti

T=sıcaklık (K)

E= karakteristik enerji

n= tam sayı olmayan değerdir.

### 3.2.7 Harkins-Jura İzotermi

Harkins-Jura adsorpsiyon izotermi:

$$\ln \left( \frac{P}{P_0} \right) = A - \frac{B}{W^2} \quad (3.16)$$

bağıntısıyla verilir. Tip II izotermi veren sistemler, (0.2-0.8) bağıl basınç aralığında (1/W<sup>2</sup>) değerlerine karşı log (P/P<sub>0</sub>) grafiğe alındığında bir doğru verirler. Grafik çizgisel değil ise adsorplanmış film yoğunlaşmamış demektir. Bu durumda sağlıklı bir sonuç elde edebilmek için deneyin yoğunlaşmış bir fazın elde edilebileceği daha düşük bir sıcaklıkta yapılması uygundur. Harkins-Jura denklemi kullanılarak yüzey alanı hesaplanabilir.

$$S_t = \frac{1}{M} \left( \frac{2NRT}{\beta} \right)^{1/2} B^{1/2} \quad (3.17)$$

$$S_t = KB^{1/2} \text{ ve } K = \frac{1}{M} \left( \frac{2NRT}{\beta} \right)^{1/2} \text{ dir.}$$

burada K Harkins-Jura sabitidir ve bu sabitin adsorbentten bağımsız olduğu ve sadece adsorbata bağlı olduğu varsayılır (Lowell and Shields, 1984).

### 3.2.8 Henderson İzotermi

Henderson izotermi aşağıdaki gibidir ve  $\ln W$ 'ye karşı  $\ln[-\ln(1-P/P_0)]$  grafiği çizilirse n ve k sabitleri doğrunun eğiminden ve y eksenini kestiği noktadan bulunabilir (Polatoğlu 2006).

$$\ln[-\ln(1 - P/P_0)] = \ln k + n \ln W \quad (3.18)$$

### 3.2.9 Halsey İzotermi

Halsey izotermi aşağıdaki gibidir ve  $\ln[\ln(P_0/P)]$ 'ye karşı  $\ln W$  grafiğe geçirilirse n ve C sabitleri doğrunun eğiminden ve y eksenini kestiği noktadan bulunabilir (Polatoğlu 2006).

$$\ln W = [(1/n) \ln C] - (1/n) \ln[\ln(P_0/P)] \quad (3.19)$$

### 3.2.10 Smith İzotermi

Smith izotermi aşağıdaki gibidir ve  $\ln(1 - P/P_0)$ 'ye karşı  $W$  grafiğe geçirilirse V ve  $V_b$  sabitleri doğrunun eğiminden ve y eksenini kestiği noktadan bulunabilir (Polatoğlu 2006).

$$W = V_b - V \ln(1 - P/P_0) \quad (3.20)$$



## BÖLÜM 4

### UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLER (VOCs)

#### 4.1 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN TANIMI

Uçucu organik bileşikler (volatile organic compounds) normal oda sıcaklığında buharlaşabilen ve çoğunlukla karbon ve hidrojenden oluşmuş kimyasallardır. Bazı uçucu organik bileşiklerde karbon atomuna klor, flor ve brom atomlarından biri veya birkaçı bağlanmış olabilir. Bu halojenler oksijen ve azot atomuyla da bağ yapmış olabilir (Kara 2004, Yılmaz 2006, Koppmann 2007). Organik bileşiklerin uçuculuklarına göre sınıflandırılması Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Uçuculuklarına göre organik bileşikler (Yılmaz 2006, Koppmann 2007).

| Organik Bileşik               | Kaynama Noktası (°C) | Buhar Basıncı 25 °C’de (mmHg) |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Yüksek uçucu org. bileşikler  | 0-100                | >380                          |
| Uçucu organik bileşikler      | 50-150               | 0-380                         |
| Yarı uçucu organik bileşikler | 240-400              | $10^{-7}$ -0.1                |
| Uçucu olmayan org. bileşikler | >400                 | $< 10^{-7}$                   |

Uçucu organik bileşikler polar ve polar olmayanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Polar organik bileşikler karbon ve hidrojenden başka oksijen, kükürt ve azot içerirler. Polar olmayanlar ise sadece karbon ve hidrojenden oluşmuşlardır. Polar olmayan hidrokarbonları ppb (milyarda bir) seviyelerinde ölçmek mümkünken, polar olan hidrokarbonlar kimyasal olarak reaktif olduklarından metallerle etkileşirler ve suda çözünürlükleri yüksektir ve bu yüzden düşük konsantrasyonlarının belirlenmesi güçtür (Yılmaz 2006, Koppmann 2007).

Uçucu organik bileşiklerin sayısı çok fazladır. Amerika Birleşik Devletlerinde 1990 yılında yayınlanan CAAA (Clean Air Act Amendment)’da toplam 189 tehlikeli hava kirleticisinden

bahsedilmektedir. Bu kirleticilerin 97 tanesi uçucu organik bileşik, 73 tanesi yarı uçucu organik bileşikken 19 tanesi de inorganiktir (Atasoy 2001).

## **4.2 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN KAYNAKLARI**

Uçucu organik bileşikler birçok kaynaktan atmosfere yayılırlar, insanlara bitkilere ve atmosferin normal olması gereken bileşimine zarar verirler. Bu olumsuz etkilerden dolayı bu kimyasalların yerine eğer uygunsa daha zararsız olan kimyasallar kullanılmakta ya da bu kimyasallar atmosfere salınmadan önce adsorpsiyon, absorpsiyon, termal yakma ve yoğunlaştırma gibi yöntemlerle yok edilmektedir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan adsorpsiyondur. Çünkü adsorpsiyonla çok küçük miktarlardaki organik bileşikleri gidermek ya da geri kazanmak mümkündür. Uçucu organik bileşikler antropojenik kaynaklardan (insan faaliyetleri) ve doğal yollardan atmosfere salınırlar (Koppmann 2007).

### **4.2.1 Antropojenik Kaynaklar**

Uçucu organik bileşikler birçok endüstriyel proseslerde üretilir veya kullanılırlar. Ayrıca bu bileşikler evsel işlemlerde de kullanılırlar. Uçucu organik bileşikler düşük sıcaklıklarda kolaylıkla buharlaşabildiklerinden taşıma, doldurma ve boşaltma esnasında atmosfere önemli miktarlarda yayılırlar. Araçlara yakıt doldurulması ve araçların çalışmaları esnasında atmosfere uçucu organik bileşikler salınır. EPA'nın yapmış olduğu araştırmaya göre ABD'de havaya salınan uçucu organik bileşiklerin % 40'ı ulaşımda kullanılan araçlardan kaynaklanmaktadır. % 60'ı ise çözücü üretimi, kullanımı ve fosil yakıtların yakılması gibi proseslerden havaya salınmaktadır (Kara 2004).

Uçucu organik bileşiklerin üretildiği veya kullanıldığı bazı endüstriler ve açığa çıkan olası uçucu organik bileşikler şöyle sıralanabilir; alkol sentezinde C1-C6 hidrokarbonları, otomobil kaplamada ketonlar, ksilen, toluen ve fenoller, pişirme fırınlarında etanol, konserve kutuları gibi kutu kaplama sanayinde ketonlar, alkoller, aromatik hidrokarbonlar, eterler, elektronik bileşenlerde bütül asetat, ksilen, metal kaplama endüstrisinde alkoller ve ftalatlar, kağıt kaplamada kaynama noktası yüksek organik bileşikler ve lateksler, farmakolojide izopropanol, toluen ve hidrokarbonlar, kauçuk endüstrisinde benzen, toluen, etilen ve ksilen, kuru temizlemede ise perkloroetilen'dir (Yılmaz 2006, Koppmann 2007).

Evlerde, binalarda ve ofislerde de uçucu organik bileşikler rastlanmaktadır. Bunların kaynakları ve bazıları Çizelge 4.2’de verilmiştir (Alyüz ve Veli 2006).

Çizelge 4.2 Kapalı ortamlarda bulunan uçucu organik bileşikler (Alyüz ve Veli 2006).

| Organik Bileşiklerin Kaynakları | Kirleticiler                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Boyalar                         | n-hekzan, n-heptan gibi alifatik hidrokarbonlar, tolüen gibi aromatik hidrokarbonlar, metil klorür, propilen diklorür gibi halojenlenmiş hidrokarbonlar, alkoller, ketonlar, etil asetat (ester), eterler.          |
| Döşeme ve Kumaşlar              | Stiren, bromlanmış aromatikler gibi aromatik hidrokarbonlar, vinil klorür gibi halojenlenmiş hidrokarbonlar, formaldehit (aldehit), eterler ve esterler.                                                            |
| Yapı Malzemeleri                | n-dekan, n-dodekan gibi alifatik hidrokarbonlar, tolüen, etil benzen gibi aromatik hidrokarbonlar, vinil klorür, formaldehit, aseton (keton), eterler ve esterler.                                                  |
| Yapıştırıcı Malzemeler          | Hekzan, heptan gibi hidrokarbonlar, aromatik hidrokarbonlar, halojenlenmiş hidrokarbonlar, etanol gibi alkoller, aminler, aseton ve metil etil keton gibi ketonlar, vinil asetat gibi esterler.                     |
| Ticari Ürünler                  | Alifatik hidrokarbonlar, dallanmış alkanlar, tolüen ve ksilen gibi aromatik hidrokarbonlar, metil klorür gibi hidrokarbonlar, alkoller, aseton ve metil etil keton gibi ketonlar, formaldehit, esterler, terpenler. |

#### 4.2.2 Biyogenik Kaynaklar

Atmosferdeki uçucu organik bileşiklerin yaklaşık yarısı yeşil bitkilerden kaynaklanmaktadır. Bataklıklardan, çürüyen gübrelerden, katı atık alanlarından, kanalizasyon ve atık sularda meydana gelen redoks reaksiyonları sonucu uçucu organik bileşikler oluşup atmosfere yayılırlar. Biyolojik olaylar sonucu dünyada yılda atmosfere yaklaşık 1150 milyon ton uçucu organik bileşik salıverilir. 1995 yılında ABD’de sabit, hareketli ve biyolojik kaynaklardan bir yılda atmosfere yayılan uçucu organik bileşiklerin miktarları sırasıyla 14.5, 8.4 ve 32.7 milyon ton olarak belirlenmiştir (Yılmaz 2006, Koppmann 2007).

### 4.3 UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN ÇEVREYE VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ

Uçucu organik bileşikler birçok kaynaktan (endüstriyel ve evsel) atmosfere yayılırlar, insanlara, bitkilere, toprağa ve atmosferin normal olması gereken bileşimine zarar verirler.

Uçucu organik bileşiklerin bu yaygın kullanımı su ve havanın (iç mekanların havasının da) kirlenmesine neden olmaktadır. Birçok kaynaktan atmosfere salınan uçucu organik bileşikler atmosferin doğal bileşimi ve canlı yaşamı üzerine doğrudan veya dolaylı olarak negatif etkilerde bulunmaktadır (Bansode et al. 2003).

Ekosferde uçucu organik bileşiklerin bulunmasının en önemli etkisi ozon oluşumunda rol alması ve bu bileşiklerin birçoğunun fotokimyasal tepkimelere neden olmasıdır. Atmosferde bulunan bazı hidrokarbonlar fotokimyasal duman-sis oluşumunda etken olmaları nedeniyle önem taşırlar. Fotokimyasal duman-sis canlılar üzerine olumsuz etkileri mevcuttur (Yılmaz 2006).

Ozon, peroksi asetil nitrat (PAN) gibi yüksek derecede reaktif organik oksitleyicilerin veya nitrik asit gibi inorganik bileşiklerin oluşumuna neden olan bir başlangıç kirleticisidir. Fotokimyasal duman-sis güçlü oksitlenme koşulları gerçekleşirse, atmosferde kükürt dioksit bulunması durumunda sülfirik asit ve sülfat partikülleri oluşumuna da sebep olur (Koppmann 2007).

Uçucu organik bileşikler troposfer katmanında ozon oluşumuna neden olurken, yapısında flor, klor, brom veya iyot bulunan halojenli uçucu organik bileşikler stratosferde ozonun parçalanmasına neden olmaktadır. Uçucu organik bileşiklerin troposferde canlı ve malzemeler üzerine olumsuz etkiler yapan ozonu oluşturmaları istenmezken, aksine stratosferde ise zararlı ultraviyole ışınlar karşı koruyucu etkisi olan ozonu parçalayıp yok etmesi istenmemektedir (Koppmann 2007).

Hava kirleticilerin çoğu solunum ve kardiyovasküler (kalp-solunum) sistemleri doğrudan etkilemektedir ve hastalık, ölüm akciğer fonksiyon bozukluklarındaki artışlar SO<sub>2</sub> ve partikül maddelerin artışlarıyla ilişkilendirilmektedir. NO<sub>2</sub> ve ozon da solunum sistemini etkilemektedir. Bu gazlarla uzun süre etki altında kalındığında iltihaplı hastalık, hastalığa duyarlılık, akciğer fonksiyon bozuklukları ve nefes borusu hastalıklarına duyarlılığa neden olur (Alyüz ve Veli 2006).

İç ortam havasına yayılan uçucu organik bileşikler akut ve kronik sağlık sorunlarına neden olmaktadır. İnsanın bir günlük zamanının yaklaşık % 80'i binalarda geçmektedir, bu nedenle iç ortam havasının kalitesinin önemi daha da çarpıcı hale gelmektedir. Uçucu organik

bileşikler özellikle boya, vernik, yapıştırıcı, döşeme, mobilya gibi yapı malzemelerinden kaynaklanabilmektedirler. Düşük konsantrasyonlarda uyuşukluk, baş ağrısı ve yorgunluk gibi şikayetlere neden olan uçucu organik bileşikler maruziyetin kronik hale gelmesi ile kanserojenik etkiler göstermektedirler. Bu bileşiklere sürekli maruziyet solunum yolu hastalıklarına ve astıma sebep olabilmektedirler. Maruz kalınan konsantrasyon arttıkça etkilerin ağırlaştığı, koma ve ölümlere neden olabildiği belirtilmiştir (Yılmaz 2006, Koppmann 2007).

Uçucu organik bileşiklere maruz kalmak akut ve kronik sağlık etkileri oluşturur. Düşük dozlardaki bu organik bileşikler astıma ve diğer bazı solunum yolu hastalıklarına sebep olur. İsveç'te yapılan bir araştırmada 20-45 yaşları arasındaki astım hastalarında bu organik bileşiklere maruziyet ile nefes darlığı şikayetlerinde artış gözlenmiştir. Uçucu organik bileşikler yüksek konsantrasyonlarda, merkezi sinir sistemi üzerinde narkotik etki yaparlar ve bu bileşikler aynı zamanda gözlerde ve soluk borusunda tahrişe sebep olurlar (Alyüz ve Veli 2006).

Bazı uçucu organik bileşikler aşırı konsantrasyonlara ulaştıklarında sinir sistemine ait fonksiyonlarda bozulmalara neden olurlar. Deneysel bir çalışma sonunda,  $25 \text{ g/m}^3$  konsantrasyonda 22 farklı uçucu organik bileşiğe maruz kalan kişilerde uyuşukluk, baş ağrısı ve yorgunluk şikayetlerine rastlanmıştır. Toluene gibi bazı uçucu organik bileşikler  $188 \text{ µg/m}^3$  seviyelerinde uyuşukluğa, baş dönmesine ve zihinsel karışıklığa sebep olurlar. Bu şikayetler insanı kasılmalara, komaya kadar götürebilir ve  $35000 \text{ µg/m}^3$ 'ü geçen değerlerde ölüm olayları görülür (Alyüz ve Veli 2006).

Bu çalışmada uçucu organik bileşiklerden aseton, etanol ve izopropil alkolün karbon yapılar üzerine adsorpsiyonu incelenmiştir.



## BÖLÜM 5

### LİTERATÜR

Aktif karbon en çok kullanılan adsorbent türlerinden biridir. Gözenekli bir yapıda olup, bu yüzden de geniş bir iç yüzey alanına sahiptir. Yapılan aktivasyon işlemleri sonucunda moleküler boyutları ve gözeneklerinin dizilişi ile güçlü bir adsorbent elde edilir. Sağlık açısından zararsız bir karbon ürünüdür. Aktif karbonun iç yüzeyi (aktifleştirilmiş yüzey) çoğunlukla BET yüzeyi olarak ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) şeklinde ifade edilir. Aktif karbonların iç yüzey alanı 500-2500  $\text{m}^2/\text{g}$  dır (Schimmel et al. 2004).

Bu çalışmanın amacı, Zonguldak yöresindeki kömürlerin özellikleri dikkate alınarak, bir sistematik çerçevesinde, mevcut kömürlerin aktif karbon üretiminde hammadde olarak kullanılabilme özelliklerinin araştırılmasıdır. Zonguldak'ta bulunan farklı yataklardan alınan kömürlerin fiziksel ve kimyasal aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan ürünlerin ne ölçüde aktif karbon özelliği taşıdıkları ve bu süreçlerde ne gibi değişikliklere uğradıkları araştırılmıştır. Elde edilen aktif karbonlar organik buhar ve hidrojen adsorpsiyonunda kullanılmıştır ve sonuçlar ticari aktif karbon ile karşılaştırılmıştır.

#### 5.1 AKTİF KARBONUN SENTEZİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Aktif karbon uygulama alanı çok geniş olan ve kullanımı açısından tarihçesi çok eskilere kadar uzanan bir maddedir. En genel anlamında aktif karbon, her hangi bir şekilde yapısal formül veya kimyasal analiz ile tanımlanamayan, ancak oldukça yüksek iç yüzey alanına sahip karbonlu bir malzeme şeklinde tarif edilebilmektedir. Düşük inorganik bileşenli, yüksek karbon içeriğine sahip ucuz maddeler aktif karbon üretmek için uygun hammaddelerdir. Kolay bulunabilmesi ve ucuz olması nedeniyle kömür çeşitleri, en sık kullanılan aktif karbon hammaddeleridir. Aktif karbon üretimi amacıyla kullanılacak ham maddeler çok çeşitlidir. Bunlara endüstriyel ölçekli baktığımızda en fazla kullanılanları; odun, kömür, linyit, hindistan cevizi kabuğu, turbadır (Güzel 1998).

Aktif karbon üretimi, karbonlu ham maddelerin 800°C'nin altında havasız ortamda karbonizasyonu ve karbonize ürünün aktivasyonu olmak üzere iki temel adımı kapsar. Böylece tüm karbon içeren malzemeler, kullanılan hammaddenin yapısına, aktivasyon ajanının özelliğine ve aktivasyon işleminin şartlarına bağlı olarak farklı özelliklerde hedef ürünlere çevrilirler. Karbonizasyon sırasında oksijen ve hidrojen gibi karbon dışı elementlerin çoğu başlangıç malzemesinin pirolitik bozunması ile uçucu gaz ürünler olarak yapıdan uzaklaşır. Geriye kalan karbon yapı belirli düzlemsel yapıda kondanse olmuş aromatik sistemlerin tabakaları halinde kendi aralarında gruplaşır. Bu aromatik gruplar düzensiz olduğundan dolayı aralarda boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklar aktif karbona mükemmel adsorbent olma özelliği vermektedir (Güzel 1998). Aktif karbon üretimi ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır.

DeBarr et al. (1997) yapmış oldukları çalışmada bitümlü Illinois kömüründen aktif karbon üretmişler ve bu adsorbente SO<sub>2</sub> adsorplamışlardır. Elde ettikleri aktif karbonların BET yüzey alanları 490-820 m<sup>2</sup>/g, mikro gözenek hacimleri ise 0.224-0.383 mL/g aralığında değişmiştir. Illian-Gomez et al. (1996) İspanyol kömürlerinden kimyasal aktivasyonla aktif karbon üretmişlerdir. Aktivasyon ajanı olarak KOH ve NaOH kullanmışlardır. Ham kömürün KOH ile aktivasyonu sonucu görünen azot yüzey alanını 2500 m<sup>2</sup>/g, NaOH ile ise 2000 m<sup>2</sup>/g olarak bulmuşlardır. Serrano-Talavera et al. (1997) yaptıkları çalışmada İspanyol kömürlerinden aktif karbon üretmişlerdir. Antrasit aktivasyonu üzerine ön oksitlemenin etkilerini incelemişler ve aşağıdaki sonuçlara ulaşmışlardır. İspanyol antrasitin piroliz üzerine, CO<sub>2</sub> ve buhar içerisindeki aktivasyonunu, kömür gözenekliliğini ve reaktivitesini negatif etkileyen bir takım termoplastik davranış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Hava (200°C, 4 ve 8 saat) ve nitrik asitle (4 ve 15 M) yapılan ön yükseltgeme işlemleri sonucunda; örneklerin oksijen içeriklerinin, hava 4 saat < hava 8 saat < 4 M HNO<sub>3</sub> < 15 M HNO<sub>3</sub> şeklinde arttığını belirlemişlerdir. Bu oksijen içeriğinin, elde edilen kömürün gözenekliliğini dolayısıyla aktivitesini etkilediğini belirtmişlerdir. Hava ile yapılan ön yükseltgeme işleminin gözenekliliği arttırdığını, fakat bu artışın nitrik asitin sağladığından çok daha düşük olduğunu açıklamışlardır. 4 ve 15 M HNO<sub>3</sub> ile elde edilen numunelerin tüm gözeneklerinde dikkate değer bir artış sağlandığını belirlemişlerdir. Elde edilen aktif karbonun BET yüzey alanını 1300 m<sup>2</sup>/g olarak açıklamışlardır.

Sun et al. (1997) yaptıkları çalışmada doğal gaz depolaması için kullanılacak aktif karbonları, Illinois bitümlü kömürleri ve hurda lastiklerden, fiziksel (CO<sub>2</sub> veya buhar) ve kimyasal

(KOH,  $H_3PO_4$  ve  $ZnCl_2$ ) aktivasyon ile elde etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda;  $CO_2$  aktivasyonu ile elde edilen aktif karbonların, buhar aktivasyonu ile elde edilenlerden daha düşük BET yüzey alanına ve mikro gözenek hacmine sahip oldukları bulunmuştur. Illinois kömürlerinin aktifleştirilmesinde, buhar aktivasyonunun,  $CO_2$  aktivasyonuna oranla daha çok mikro gözeneklilik sağladığını belirtmişlerdir. KOH ile aktifleştirilmiş kömür aktif karbonlarının, fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlardan daha yüksek BET yüzey alanına, mikro gözenek hacmine ve gravimetrik metan kapasitesine (g/g) sahip olduklarını açıklamışlardır. Kömür karbonlarıyla kıyasladıklarında, lastik karbonların yüksek yüzdede mezo ve makro gözeneklere sahip olduklarını belirlemişlerdir. Genel olarak, son ürünün mikro gözenek yapısının yüksek oranda başlangıç materyaline bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Teng and Hsu (1999) potasyum hidroksit aktivasyonu ile bitümlü kömürden yüksek gözenekli karbonlar hazırlamışlar ve yüzey alanı ve gözenek hacmini sırasıyla  $3000 \text{ m}^2/\text{g}$  ve  $1.5 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak bulmuşlardır. KOH ile yapılan aktivasyon sonucunda oluşan gözenekli yapıların,  $H_3PO_4$  veya  $ZnCl_2$  ile yapılanlardan termal olarak daha kararlı olduğunu açıklamışlardır. Yüksek gözenekli karbonların hazırlanmasında KOH/kömür oranı için optimum değeri  $700^\circ\text{C}$ 'de 6,  $800^\circ\text{C}$ 'de ise 4.25 olarak bulmuşlardır. Zou and Han (2001) Çin kömüründen yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde etmişlerdir. Ning Xia antrasiti kullanılarak KOH ile aktifleştirilen aktif karbonların gözlenen yüzey alanını  $2100 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlemişlerdir. Optimum aktivasyon ajanı/kömür oranı 5 olarak belirlenmiştir.

Teng and Hsu (1998) çinko klorür aktivasyonu ile bitümlü kömürden aktif karbon hazırlamışlardır. Bunun için iki tür Avustralya bitümlü kömürü (blackwater (BW), Mt. Thorley (MT)) kullanılmıştır.  $ZnCl_2$  ile elde edilen karbonların yüzey alanı ve gözenek hacmi sırasıyla  $1300 \text{ m}^2/\text{g}$  ve  $0.83 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak bulunmuştur. Gañán Gómez et al. (2006) bitümlü kömürden  $ZnCl_2$  kullanarak  $404 \text{ m}^2/\text{g}$  yüzey alanlı ve  $0.174 \text{ cm}^3/\text{g}$  mikro gözenek hacimli aktif karbon elde etmişlerdir. Maciá-Agulló et al. (2004) kömür katranı kökenli karbon fiberlerinden hem fiziksel hem de kimyasal aktivasyonla aktif karbonlar elde etmişlerdir. Fiziksel yöntemle  $CO_2$  kullanarak hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanı  $2487 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir. Bu aktivasyon 22.5 saat süresince  $890^\circ\text{C}$ 'de yapılmıştır. KOH kullanarak hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanı  $2420 \text{ m}^2/\text{g}$  iken, NaOH ile hazırlananlarda ise  $3033 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir.

Lozano-Castelló et al. (2001) KOH kullanarak kimyasal aktivasyonla İspanyol antrasitinden aktif karbon elde etmişlerdir. En yüksek BET yüzey alanını ( $3290 \text{ m}^2/\text{g}$ ) KOH/antrasit oranının 4/1 olduğu aktif karbonda elde etmişlerdir. Deney  $700^\circ\text{C}$ 'de,  $800 \text{ mL}/\text{dak}$  azot akışında 1 saat süresince gerçekleştirilmiştir. Lillo-Ródenas et al. (2001) NaOH kullanarak kimyasal aktivasyonla İspanyol antrasitinden aktif karbon elde etmişlerdir. En yüksek BET yüzey alanını  $2700 \text{ m}^2/\text{g}$  ve mikro gözenek hacmini ise  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada kimyasal ajan olarak KOH kullanıldığında daha yüksek yüzey alanı ve mikro gözeneklilik elde ettiklerini açıklamışlardır. Jibril et al. (2007) KOH kullanarak bitümlü kömürden aktif karbon hazırlamışlardır. Hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanı  $1995 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir. Bu en yüksek yüzey alanlı aktif karbonun mikro gözenek hacmi  $0.78 \text{ cm}^3/\text{g}$  iken mezo gözenek hacmi ise  $0.71 \text{ cm}^3/\text{g}$  olarak bulunmuştur. Zondlo and Velez (2007) antrasit kömüründen 1173 K ile 1248 K arası sıcaklıklarda dönen bir reaktörde aktif karbon elde etmişlerdir. Elde edilen aktif karbonlardan en yüksek yüzey alanı  $104 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir.

Kömürden başka birçok karbon kaynaklarından aktif karbon üretilmektedir. Balcı ve arkadaşları 1994 yılında badem ve fındık kabuklarını kullanarak aktif karbon hazırlamışlardır. Amonyum klorür emdirilmiş örneklerden elde edilen ürünlerin yüzey alanlarının, karbonizasyon sıcaklığı  $700^\circ\text{C}$ 'ye çıkarıldığında  $700 \text{ m}^2/\text{g}$  değerinin üzerine çıktığını açıklamışlardır. Haimour and Emeish (2006) hurma çekirdeğinden fosforik asit kullanarak aktif karbon üretmişlerdir. Elde edilen aktif karbonları iyot sayısı analizi ile karakterize etmişlerdir. Deneysel şartların ( aktivasyon zamanı ve sıcaklığı, kullanılan kimyasal oranının, partikül boyutunun) elde edilen ürünlerin iyot sayılarına etkilerini incelemişlerdir. Yang and Lua (2006) şam fıstığı kabuklarından çinko klorür kullanarak mikro gözenekli yapıda aktif karbonlar elde etmişlerdir. Hu et al. (2003) Hindistan cevizi kabuğundan ve hurma çekirdeğinden KOH ve  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak  $\text{CO}_2$  varlığında mezo gözenekli aktif karbonlar hazırlamışlardır.  $\text{ZnCl}_2$  kullanmanın avantajını yüksek oranda mezo gözenekli ve yüksek verimli aktif karbon elde etmek olarak açıklamışlardır. KOH- $\text{CO}_2$  aktivasyonu ile mezo gözenekli yapı kadar mikro gözenekli yapı da elde ettiklerini açıklamışlardır. Yüksek oranda kimyasal/karbon ve daha uzun süreli aktivasyonla daha yüksek oranda mezo gözenekli aktif karbon elde etmişlerdir.

Guo and Lua (1999) bir Afrika ağacı türü olan oil-palm ağacı meyvesinin çekirdeklerinden ve tropikal katı atıklardan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve KOH kullanarak aktif karbon elde etmişlerdir. En yüksek

yüzey alanlı aktif karbonları % 30 'luk  $H_2SO_4$  ve % 10'luk KOH çözeltilerinden sırasıyla 1562 ve 1408  $m^2/g$  olarak hazırlamışlardır. Guo and Lua (2000b) bir Afrika ağacı türü olan oil-palm ağacı meyvesinin çekirdeklerinden  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$  ve KOH kullanarak aktif karbonlar üretmişlerdir. Mikro gözenek alanı en yüksek olan aktif karbonun % 20'lik  $ZnCl_2$  çözeltisiyle hazırlanan aktif karbon iken en düşük yüzey alanlı aktif karbonun ise % 10 'luk  $H_3PO_4$  ile hazırlanan aktif karbon olduğunu belirtmişlerdir. Park and Jung (2002) polistiren bazlı reçineden KOH aktivasyonu ile aktif karbon elde etmişlerdir. 0, 1, 2, 4 oranlarında KOH/reçine kullanarak elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanına ve mikro gözenek hacmine sahip aktif karbonu 4 oranıyla hazırlanan numunede sırasıyla 1947  $m^2/g$  ve 0.84  $cm^3/g$  olarak belirlemişlerdir.

Molina-Sabio and Rodríguez-Reinoso (2004) zeytin ve şeftali çekirdeği gibi lignoselülozik maddelerden fosforik asit, çinko klorür ve potasyum klorür kullanarak aktif karbon hazırlamışlardır. Elde edilen aktif karbonlarda mikro gözenek hacimleri şöyle sıralanmıştır; KOH için 0.4  $cm^3/g$ ,  $ZnCl_2$  için 0.5  $cm^3/g$ ,  $H_3PO_4$  için 0.6  $cm^3/g$ 'dır. Tseng and Tseng (2005) mısır koçanından KOH kullanarak aktif karbon elde etmişlerdir. KOH / karbon oranı 4 olan aktif karbonun yüzey alanını 2402  $m^2/g$ , 6 olan aktif karbonunkini ise 2595  $m^2/g$  olarak belirlemişlerdir. Lillo-Ródenas et al. (2007) 16 farklı karbonlu yapıdan (linyit, kömür, antrasit, okalıptus odunu, hindistancevizi kabuğu, badem kabuğu, karbon fiber gibi maddeler) NaOH ve KOH kullanarak aktif karbon üretmişlerdir. KOH kullanarak hazırlanan aktif karbonlar arasında; kömür kökenli olanlardan antrasitten elde edilen aktif karbonun en yüksek BET yüzey alanına sahip olduğu (2746  $m^2/g$ ), kömür kökenli olmayan hammaddelerden badem kabuğundan elde edilen aktif karbonun en yüksek BET yüzey alanına (2100  $m^2/g$ ) sahip olduğu belirlenmiştir. NaOH kullanarak hazırlanan aktif karbonlarda ise; kömür kökenli hammaddelerden sub-bitümlü kömürden elde edilen aktif karbonun en yüksek BET yüzey alanına (2372  $m^2/g$ ) sahip olduğu, kömür kökenli olmayan hammaddelerden okalıptus odunundan elde edilen aktif karbonun en yüksek BET yüzey alanına (3167  $m^2/g$ ) sahip olduğu bulunmuştur.

Azevedo et al. (2007) hindistancevizi kabuklarından  $ZnCl_2$  ile kimyasal aktivasyon yöntemini kullanarak mikro gözenekli aktif karbonlar elde etmişlerdir. Elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanı 2114  $m^2/g$  ve en yüksek mikro gözenek hacmi 1.142  $cm^3/g$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu aktif karbonun mikro gözenekliliği % 87.4 olarak belirlenmiştir. Ubago-Pérez et al. (2006) KOH ile zeytin çekirdeğinden aktif karbonlar

hazırlamışlardır. Elde edilen aktif karbonlardan en yüksek BET yüzey alanı  $1484 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir. Skodras et al. (2007) çam ağacı odunundan, meşe ağacı odunundan, 3 tip atık lastikten ve zeytin çekirdeği atıklarından KOH kullanarak aktif karbon elde ettiklerini açıklamışlardır. Bu hammaddeler kullanılarak elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanına ( $1690 \text{ m}^2/\text{g}$ ) sahip aktif karbonun zeytin çekirdeğinden elde edildiğini, en düşük BET yüzey alanına ( $133 \text{ m}^2/\text{g}$ ) sahip aktif karbonun ise atık lastikten elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu hammaddelerden elde edilen aktif karbonların civayı adsorplama kapasitelerini belirlemişlerdir. En yüksek yüzey alanlı aktif karbonun civayı  $869 \text{ ng/mg AC}$  adsorpladığını, en düşük yüzey alanlı aktif karbonun ise  $188 \text{ ng/mg AC}$  adsorpladığını belirtmişlerdir.

Literatürde petrol kokundan hazırlanmış aktif karbonlar da mevcuttur. Otowa et al. (1997) petrol kokundan KOH kullanarak aktif karbon hazırlamışlar ve içme suyu saflaştırma işleminde kullanmışlardır. Bazı çalışmalarda kahveden hazırlanmış aktif karbonlara rastlanmaktadır. Namane et al. (2005)  $\text{ZnCl}_2$  ve  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ile kimyasal aktivasyon yöntemiyle kahve telvesinden aktif karbon elde etmişler ve bu aktif karbonların farklı fenoller, asidik ve bazik boyaları adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Adsorpsiyon verilerinin hem Freundlich hem de Langmuir adsorpsiyon izotermeleriyle uygun olduklarını açıklamışlardır.

Aktif karbon elde edilen başka bir biyolojik kaynak ta gübredir. Qian et al. (2007) sığır gübresinden çinko klorür kullanarak  $2170 \text{ m}^2/\text{g}$  yüzey alanlı ve  $1.70 \text{ cm}^3/\text{g}$  mikro gözenek hacimli aktif karbon elde etmişlerdir.

## **5.2 AKTİF KARBON ÜZERİNE UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN ADSORPSİYONU**

Birçok endüstriyel işlem esnasında ortama yayılan organik buharların kontrolü büyük önem taşımaktadır. Karbon, çevre dostu olmayan türlerin hem gaz hem de sıvı fazdan adsorpsiyonunda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Karbon yapılar üzerine adsorpsiyon işlemi; emisyon azaltmanın son basamaklarında, çok düşük düzeyde kirleticilerin uzaklaştırılması için, diğer metotlarla yüksek konsantrasyonda kirleticilerin uzaklaştırılmasının ardından gerçekleştirilir. Özellikle endüstriyel fabrikalardan ve proseslerden gelen ve uzaklaştırılması gereken çoğu kirleticiler organik türler ve hidrokarbonlardır. Bu işlemin problemlerinden biri, proses akışı içerisindeki diğer türlerle

yarışmalı adsorpsiyonun olmasıdır ki bu adsorpsiyon karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Fletcher et al. 1999).

Fletcher et al. (1999) aktif karbon üzerine n-oktan ve n-nonan buharlarının adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetiğini incelemişlerdir. Bu araştırma, iki n-alkanın bir odun bazlı aktif karbon (BAX950) üzerindeki adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetikleri üzerindeki çalışmayı içermektedir. n-oktan buharının aktif karbon üzerindeki adsorpsiyon ve desorpsiyon karakteristikleri 0-0.97 relatif basınç ( $p/p_o$ ) ve 288-313 K sıcaklık aralığında statik buhar sistemi içerisinde incelenmiştir. n-nonan adsorpsiyonu n-oktan adsorpsiyonu ile benzer adsorpsiyon kinetiği ve aktivasyon enerjisi göstermiştir. Ryu et al. (2002) yaptıkları çalışmada aktif karbon üzerine toluen ve benzinin adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında toluen ve benzin buharlarının aktif karbon üzerindeki adsorpsiyon dengeleri statik volumetrik metotla ölçülmüştür. Denge deneylerinin 298.15, 318.15, 338.15, 358.15, ve 378.15 K'de ve toluen için 3.1 kPa'a, benzin için 8.0 kPa'a kadar basınçta gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Deneysel verileri UNILAN ve Sips modellerini (bunlar genellikle mikrogözenekli aktif karbon gibi mikrogözenekli adsorbentler için kullanılır) kullanarak korrele etmişlerdir. Henry sabitini, adsorbat ve adsorbent arasındaki ilişkileri karakterize etmek için hesaplamışlardır.

Yun et al. (1997) aktif karbon üzerine benzen ve metil benzen buharlarının adsorpsiyon izotermelerini incelemişlerdir. Çalışmalarında; benzen ve metil benzen buharlarının aktif karbon üzerindeki adsorpsiyon izotermi bir statik volumetrik aparat ile elde edilmiştir. Ölçümler 303.15, 313.15, 323.15, 333.15, 343.15 K'de ve benzen için 7 kPa'da, metil benzen için ise 2 kPa'da yapılmıştır. Sisteme giren toplam buhar miktarı ve denge halindeki gaz fazın içerisindeki buhar miktarı uygun P-V-T ölçümleriyle belirlenmiştir. Yun et al. (1998) yaptıkları çalışmada aktif karbon fiberi üzerine 298, 323 ve 348 K'de benzen ve toluen buharlarının adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Benzen ve toluen buharlarının ticari karbon fiber üzerindeki adsorpsiyon dengesini statik volumetrik teknikle ölçmüşlerdir. Denge ölçümlerinin 298.15, 323.15, ve 348.15 K'de, benzen için 8.7 kPa'da toluen için 3.4 kPa'da gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Sonuçlar Dubinin-Astakhov (DA) denklemiyle korrele edilmiştir. Gironi et al. (2003) aktif karbon üzerine MTBE buharlarının adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında metil tersiyer bütıl eter (MTBE) ve 1-metil bütan buharlarının ticari aktif karbon üzerine adsorpsiyonuna ait bazı deneysel verileri rapor etmişlerdir. 1-metil bütanın, arabaların benzin depolarından yayılan buhar içerisindeki hidrokarbonlara benzer davranış gösterdiğini varsaymışlardır. MTBE + hava ve 1-metil bütan + hava sistemleri için

denge adsorpsiyon verilerini, ilerleme eğrilerinden elde etmiş ve Langmuir izotermi vasıtasıyla korrele etmişlerdir.

Song and Rees (2000) MFI tip zeolit üzerinde benzen, toluen, etil benzen, p-ksilen, sikloheksan ve cis-1,4 dimetil sikloheksanın adsorpsiyon ve difuzyonunu araştırmışlardır. Shim et al. (2006) mezo gözenekli yapıdaki MCM-48 üzerine aseton, benzen, siklo heksan, hekzan, metanol, MEK ve toluenin adsorpsiyonunu 300.15 K'de, gravimetrik bir yöntemle incelemişlerdir. Bu uçucu organik bileşiklerin MCM-48 üzerine adsorpsiyonunun IUPAC sınıflandırmasına göre Tip IV'e benzediğini belirtmişlerdir. Adsorpsiyon verilerini Langmuir-Sips ve DA izoterm modelleriyle açıklayıp model parametrelerini belirlemişlerdir. Agnihotri et al. (2005) tek duvarlı karbon nanotüpleri üzerinde toluen, metil etil keton (MEK), hekzan ve siklo heksanın adsorpsiyonunu  $1 \times 10^{-4}$ -0.95 relatif basınç aralığında incelemişlerdir. Deneysel çalışma 25, 37, 50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Elde edilen izotermelerin hem Tip I hem de Tip II izotermine uyduğunu gözlemlemişlerdir. EA 95 isimli tek duvarlı karbon nanotüpün 35 °C'de tolueni maksimum adsorplama kapasitesini 242 mg/g, hekzanı maksimum adsorplama kapasitesini ise 194 mg/g olarak bulduklarını açıklamışlardır. Aynı şartlarda CVD 80 isimli nanotüpün tolueni maksimum adsorplama kapasitesini 456 mg/g, hekzanı maksimum adsorplama kapasitesini ise 269 mg/g olarak belirlemişlerdir. Tek duvarlı karbon nanotüplerin heterojen yapıda olmasından dolayı deneysel verilerin Freundlich izoterm modeline, Langmuir ve DA izoterm modellerinden daha uygun olduğunu açıklamışlardır.

Carvalho et al. (2006) mantar endüstrisi atıklarından kimyasal aktivasyon yöntemiyle elde edilen aktif karbon üzerine etanol, MEK, 1,1,1 trikloro etan, siklo heksan ve trikloro etilenin adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Adsorpsiyon verilerini DA izoterm modeliyle korele ederek bu izoterm modelinin parametrelerini hesaplamışlardır. Fuertes et al. (2003) aktif karbon fiberleri üzerine 30 °C'de hekzan ve bütanın adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Yüksek konsantrasyonlarda ( $P/P_0 \sim 1$ ) adsorplanmış uçucu organiklerin miktarı adsorbatın doğasından bağımsız ve sadece örneğin gözenek hacmine bağlı olduğunu, düşük konsantrasyonlarda adsorplanan miktarın ise adsorbatın özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Díaz et al. (2004) alümina, 13X ve 5A zeolitleri ve aktif karbon üzerine bazı alkanların, siklik hidrokarbonların, aromatik hidrokarbonların, klorku bileşiklerin adsorpsiyon parametrelerini (adsorpsiyon enerjisi, adsorpsiyon serbest enerjisi) gaz kromatografisinde incelemişlerdir. Çalışmalarında mezo gözenekli alüminanın adsorpsiyon entalpisi mikro gözenekli

maddelerinkinden daha düşük bulunmuştur. Zeolit 13X'in, 5A zeolitinden daha geniş gözeneklere sahip olduğu için daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Shih and Li (2008) iki farklı (CNT1 ve CNT2) çok duvarlı nanotüp üzerine aseton, n-hekzan, benzen ve trikloro etilenin adsorpsiyonunu incelemişlerdir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesini, adsorpsiyon entalpisi ve desorpsiyon enerjisini bu uçucu organik bileşikler arasından asetonda gözlemlemişlerdir. Trikloro etilen, benzen ve n-hekzanın adsorpsiyon ısılarını incelediklerinde bu uçucu organiklerin adsorpsiyonunun fiziksel adsorpsiyon olduğunu belirlemişlerdir. CNT2 nanotüpünün CNT1 nanotüpünden daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi gösterdiğini açıklamışlardır. Bunun nedeni olarak CNT2 nanotüpünün yapısında bulunan amorf karbon tabakalarının bulunmasını işaret etmişlerdir. Hamdi et al. (2004) bir adsorbent karışımı (bentonit, kil, aktif karbon, çimento ve suda çözülebilen bir polimer) üzerine fenol, klorobenzen ve o-ksilenin adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Adsorpsiyon verilerinin Freundlich ve Langmuir izoterm modellerine uygunluğunu araştırmışlardır. Pires et al. (2001) zeolit ve kil üzerinde 1,1,1-trikloro etilen, trikloro etilen, metanol ve propanonun adsorpsiyonunu gravimetrik bir yöntemle incelemişlerdir. Bu uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyon izotermelerinin IUPAC sınıflandırmasının Tip I izotermine benzediğini belirtmişlerdir. Adsorpsiyon verilerini Langmuir ve DA izoterm modelleriyle incelemişlerdir.

Bansode et al. (2003) fındık ve badem kabuğu bazlı aktif karbonlar kullanarak uçucu organik bileşiklerden bromo-dikloro metan, benzen, karbontetra klorür, 1,1,1 trikloro metan, kloroform ve 1,1 dikloro metanın adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında bütün karbonların benzeni diğer uçucu organiklerden daha fazla adsorpladığını gözlemlemişlerdir. Díaz et al. (2007) çok duvarlı nanotüp, karbon nanofiber ve yüksek yüzey alanlı grafit üzerine farklı alkanların, aromatiklerin ve kloro hidrokarbonların adsorpsiyonunu gaz kromatografisi ile araştırmışlardır. Adsorpsiyon kapasitesi ve termodinamik özellikleri (adsorpsiyon entalpisi, yüzey serbest enerjisi) belirlemişlerdir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesinin yüksek yüzey alanlı grafitte sonrasında karbon nanotüpte ve en sonda karbon nano fiberde olduğunu ve en yüksek adsorpsiyon kapasitesinin benzende gözlemlendiğini açıklamışlardır.

Dural and Chen (1997) 1,1,1 trikloro etanın toprak üzerine buhar fazında adsorpsiyon ve desorpsiyonunu gravimetrik olarak 288, 293, 298 K'de incelemişlerdir. Çalışmalarında

adsorpsiyon verileri BET ve GAP izoterm modelleriyle korele edilmiştir. Toprağın spesifik yüzey alanı ile adsorpsiyon kapasitesi arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir. Paulsen et al. (1999) çeşitli ticari aktif karbon üzerine argon, azot ve uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Bu karbonların  $1 \times 10^{-5}$ -0.1 bağıl basıncındaki adsorpsiyon davranışlarını modifiye Freundlich ve DA izoterm modeli ile incelemişlerdir. Modifiye Freundlich izoterminin mezo gözenekli karbonlar için, deneysel verilerle tüm basınç aralığında uyumlu sonuçlar verdiğini, tüm karbonlar için ise  $10^{-2.5}$ -0.1 bağıl basınç aralığında uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Huang et al. (2003) farklı yüzey alanlarına sahip aktif karbon fiberleri üzerine metil etil keton ve benzen buharlarının adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Adsorpsiyonun özelliklerini aktif karbon fiberleri, adsorbat kadar adsorpsiyon şartlarının da etkilediğini belirlemişlerdir.

Bittner et al. (2003) tek duvarlı karbon nanotüp üzerine etanol, izopropanol, sikloheksan, siklohekzen, benzen ve n-heksanın buhar fazında adsorpsiyonunu gravimetrik yöntemle incelemişlerdir. Amorf yapıdaki tek duvarlı karbon nanotüpün hidrokarbon adsorpsiyonu için etkili bir adsorbent olduğunu belirtmişlerdir. Wartelle et al. (2000) ticari aktif karbonlar ve fındık kabuğundan üretilmiş aktif karbon üzerine uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyonunu gaz kromatografisi cihazında incelemişler ve karşılaştırma yapmışlardır. Uçucu organik bileşiklerden aseton, benzen, toluen, etil benzen, propil benzen, butil benzen kullanmışlardır. Fındık kabuğundan elde edilen aktif karbonun hem polar hem de polar olmayan uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyonu için mükemmel bir adsorbent olduğunu açıklamışlardır.

Wu and You (2007) aktif karbon üzerinde uçucu organik bileşiklerden metil etil ketonun (MEK) adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 303 K'de 0.152 g/g AC olduğunu belirlemişlerdir. Chirkova et al. (2004) selüloz üzerine su, metanol ve benzen buharlarının sorpsiyonunu incelemişlerdir. Sorpsiyon verilerini BET izoterm modeli ile karşılaştırmışlardır. Biron and Evans (1998) dinamik yöntemle aktif karbon üzerine organik buharların adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Giaya et al. (2000) hidrofobik moleküler elek üzerine 4 farklı klorlü uçucu organik bileşiğin (kloroform, trikloro etilen, tetrakloro etilen ve karbon tetraklorür) sıvı ve buhar fazında adsorpsiyonunu araştırmışlar ve Freundlich izoterm sabitlerini belirlemişlerdir.

Wu et al. (2003) aktif karbon üzerine izopropil amin, heptan, dikloro metan, 2-kloro-2-metil propan, 2-bütanon, 1-kloro pentan, asetonitril ve benzenin adsorpsiyonunu incelemişlerdir.

Aktif karbonun 5 farklı bağıl basınçta bu uçucu organik bileşiklerini adsorplama kapasitelerini hesaplamışlardır. Tüm bağıl basınçlarda adsorpsiyon kapasitesini en yüksek izopropil amin için elde etmişlerdir. Elde edilen verilerini literatürdeki hekzan, bütan, metanol, etanol, siklohekzan, toluen, kloroform, karbon tetraklorür ve pentan gibi uçucu organik bileşiklerin 2 farklı bağıl basınçta elde edilen adsorpsiyon kapasiteleriyle karşılaştırmışlardır. Paulsen and Cannon (1999) Hindistan cevizi bazlı granüler aktif karbon üzerine metil izobütil ketonun adsorpsiyonunu araştırmışlardır. Adsorpsiyon verilerini Freundlich, Langmuir, BET, Dubinin-Astakhov ve modifiye Freundlich izoterm modelleriyle açıklamışlardır.

### 5.3 AKTİF KARBON ÜZERİNE HİDROJENİN ADSORPSİYONU

Hidrojenin depolanma problemini ortadan kaldırdığı için karbon adsorbentler üzerine hidrojen adsorpsiyonu çalışmaları son derece önem kazanmıştır. Strobel et al. (1999) çevre sıcaklığında karbon malzemeler üzerinde hidrojen adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Hidrojen adsorpsiyonu gaz fazından izotermal gravimetrik analiz ile ölçülmüştür. Çalışmada hidrojen basıncı 125 bar ve sıcaklık 23°C'dir. Hidrojen adsorpsiyonu çevre sıcaklığı ve 125 barda ağırlıkça % 1.5 olarak bulunmuştur.

Zhan, et al. (2002) yapmış oldukları çalışmada aktif karbon üzerindeki adsorplanan H<sub>2</sub> miktarlarını vermişlerdir. Çalışma temiz ulaşım yakıtları kullanımı araştırması için 93-293 K aralığında yapılmış ve 10 g aktif karbon kullanılmıştır. Aktif karbon üzerinde H<sub>2</sub> adsorpsiyon limiti % 23.764 olarak hesaplanmıştır.

Shindo et al. (2003) hazırladıkları aktif karbonun hidrojen adsorpsiyonu ve desorpsiyon özelliklerini araştırmışlardır. Hidrojen moleküllerinin desorpsiyon spektrumu yaklaşık 500-800 °C'de 10 saat sürede termal desorpsiyon kütle spektroskopisinde (TDS) alınmıştır. Bu sıcaklıkta hidrojenlenmiş aktif karbonun desorpsiyon aktivasyon enerjileri sırasıyla 124 ve 237 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Aktif karbon üzerinde hidrojen adsorpsiyonu ile ilgili yapılan çalışmaların bazıları hidrojen taşıtlarda kullanımına yönelik araştırmalar için gerçekleştirilmiştir (Hynek et al 1997, Dillon and Heben 2001). Lamari et al. (2000) çalışmalarında kullandıkları 1000 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon ve Zhou ve Zhou (1998) 2800 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı süper aktif karbon örnekleri

üzerinde hidrojen adsorpsiyonuna ait elde ettikleri sonuçlarda ağırlıkça % 0.5'i geçmemektedir.

Erdoğan ve Kopaç (2007) farklı tanecik boyutlarındaki aktif karbonlar üzerinde H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>'nin sorpsiyon özelliklerini 303-473 K aralığında kromatik teknik kullanarak incelemişlerdir. Hidrojenin adsorpsiyon ısısını üç farklı tanecik boyutundaki aktif karbonlar için – (3.8-4.8) kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Poirier et al. (2001) karbon nano yapıların hidrojen depolama kapasitelerinin 10.5 MPa basınçta ve oda sıcaklığında % 1'den daha az olduğunu açıklamışlardır. Buna karşılık Takagi et al. (2004) yaptıkları çalışmada karbon nanotüp ve karbon nanofiber üzerine hidrojenin ortam sıcaklığında ve 12MPa basıncın altında % 3'ten daha büyük bir değer olacağını açıklamışlardır. Hirscher and Panella (2005) yaptıkları çalışmada 77 K'de 2560 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon üzerine hidrojenin % 4.5 adsorplandığını bildirmişlerdir.

Zhu et al. (2001) özel bir tip karbon fiber üzerinde hidrojenin adsorpsiyonunun maksimum % 4'e ulaştığını açıklamışlardır. Nishiyama et al.(2002) tek duvarlı karbon nanotüp hazırlamışlar ve hidrojen sorpsiyonunu volumetrik olarak 295 ve 77 K'de 110kPa basınç altında ölçmüşlerdir. Maksimum hidrojen konsantrasyonu 295 K'de % 0.932'ye ulaşırken 77 K'de % 2.37'ye ulaşmıştır.

Ansón et al. (2004) yaptıkları çalışmada volumetrik olarak hidrojen adsorpsiyonunu tek duvarlı nanotüp üzerinde incelemişlerdir. Hidrojen adsorpsiyonu atmosferik basınçta 298 K'de % 0.01 iken, 77 K'de % 1'e ulaşmıştır. Panella et al. (2005) farklı karbon yapılar üzerine hidrojen adsorpsiyonunu 77 K ve oda sıcaklığında incelemişlerdir. En yüksek adsorplama kapasitesini 77 K'de % 4.5 olarak 2560 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon için belirlemişlerdir.

Kojima et al. (2006) yaptıkları çalışmada farklı karbon yapılar üzerinde hidrojenin adsorpsiyonunu ve desorpsiyonunu 77 ve 296 K'de incelemişlerdir. 3220 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı süper aktif karbonun 77 K'de hidrojeni % 5 adsorplayıp-desorplarken, 296 K'de bu değer ancak % 1.3 olduğunu belirtmişlerdir.

Figuera-Torres et al. (2007) yaptıkları çalışmada NaOH ve KOH kullanılarak hazırlanan aktif karbonlar üzerinde hidrojenin adsorpsiyonunu 77 K ve atmosferik basınçta incelemişler, en

yüksek adsorplama kapasitesinin % 2.7 ile KOH kullanılarak üretilen aktif karbona ait olduğunu belirtmişlerdir. Kopaç ve Erdoğan (2009) yaptıkları çalışmada çok duvarlı karbon nanotüp-grafit karışımını KOH ve NaOH ile farklı sıcaklıklarda modifiye etmişler ve bu yeni numunelerin hidrojen sorpsiyon kapasitelerini belirlemişlerdir.



## **BÖLÜM 6**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

#### **6.1 DENEYLERDE KULLANILAN CİHAZLAR**

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

##### **6.1.1 Gaz Sorpsiyonu ile Yüzey Alanı ve Gözenek Boyutu Dağılımı Ölçüm Cihazı**

Karbon örneklerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışları, yüzey alanı ölçümleri ve gözenek boyutu çalışmalarının karşılıklı olarak değerlendirmesi amacı ile tüm örneklerde Quantachrome Instruments Autosorp 1 cihazı ve AS1Win V.1.52 yazılımı kullanılarak deneysel işlemler gerçekleştirilmiştir. Aktif karbonların gözenek boyutu dağılımları BJH yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve Ek Açıklamalar A'da verilmiştir.

##### **6.1.2 Piknometre**

Tüm karbon örneklerinin yoğunluk ölçümleri Quantachrome Instruments Ultrapycnometer 1000 katı yoğunluk ölçme sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

##### **6.1.3 Gazlar ve Tüp Fırın**

Deneysel çalışmalarda kullanılan tüm gazlar % 99.9 saflıktadır. Protherm Marka PTF 12/20/250 Model sıcaklık kontrollü tüp fırın aktivasyon deneylerinde kullanılmıştır.

##### **6.1.4 FT-IR Cihazı**

Bu çalışmada karbon örneklerinin IR spektrumları Jasco 300 E model FT-IR cihazında alınmıştır.

### 6.1.5 Element Analiz ve TGA Cihazı

Karbon örneklerinin elementel analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında Analysensysteme GmbH vario MICRO CHNS cihazı ile, TGA analizleri de yine aynı yerde TGA analizleri Perkin Elmer Pyris 1 TGA cihazında yapılmıştır.

## 6.2 DENEYLERDE KULLANILAN KÖMÜRÜN ÖZELLİKLERİ

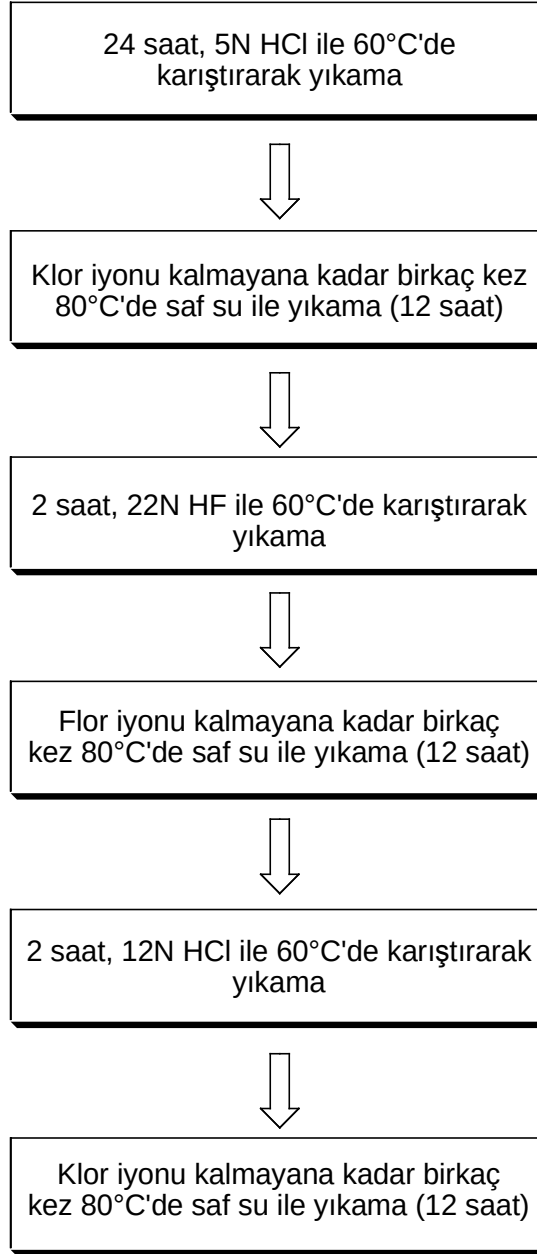
Aktif karbon üretmek amacıyla, kömür numuneleri Türkiye Taşkömürü Kurumu'ndan temin edilmiştir. Bu numuneler Zonguldak'ın doğusundan batısına doğru; TTK Kozlu İşletmesi ve Karadon İşletmelerinden alınmıştır. Kömürlere K1 (Kozlu) ve K2 (Karadon) isimleri verilmiştir. Kömür numunelerinin kül oranları ASTM D 3174 standartına, uçucu madde analizleri de ASTM D 3175 standartına göre yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Zonguldak kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları.

| Kömür Örnekleri | Kül Oranı (%) | Sabit Karbon | Uçucu Madde (%) | Nem (%) |
|-----------------|---------------|--------------|-----------------|---------|
| K1              | 10.26         | 62.06        | 27.68           | 0.991   |
| K2              | 11.59         | 64.07        | 24.34           | 0.686   |

Kömür numunelerinden aktif karbon elde edilmeden önce numuneler demineralizasyon işleminden geçirilmiştir. Bu işlem sonucunda kömür numunelerinin kül oranlarında azalma olmuştur. Demineralizasyon işlemi aşağıdaki basamakları içermektedir.

Demineralizasyon işlemi yapılan kömür numunelerinin kül oranları yine ASTM D 3174 standartına, uçucu madde analizleri de ASTM D 3175 standartına göre yapılmıştır. Buna göre Çizelge 6.2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde K1 kömürünün kül oranının % 10.26'dan % 0.3'e düştüğü, K2 kömürünün kül oranının ise % 11.59 değerinden % 0.4 değerine düştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1 Demineralizasyon işlemi basamakları.

Çizelge 6.2 Demineralizasyon işlemleri yapılmış kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları.

| Kömür Örneği | Kül Oranı (%) | Sabit Karbon | Uçucu Madde (%) |
|--------------|---------------|--------------|-----------------|
| K1           | 0.3           | 75.2         | 24.50           |
| K2           | 0.4           | 76.7         | 22.90           |

Kömür numunelerinin CHNS elementel analizleri Elementar Analysensysteme GmbH vario MICRO CHNS cihazı ile yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her iki kömürün kimyasal yapısının benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.3 Kömür numunelerinin element analiz sonuçları.

| Numune    | %N   | %C    | %H    | %S    | %O (farktan) |
|-----------|------|-------|-------|-------|--------------|
| <b>K1</b> | 1.16 | 85.45 | 4.636 | 0.425 | 8.329        |
| <b>K2</b> | 1.05 | 85.63 | 4.701 | 0.599 | 8.020        |

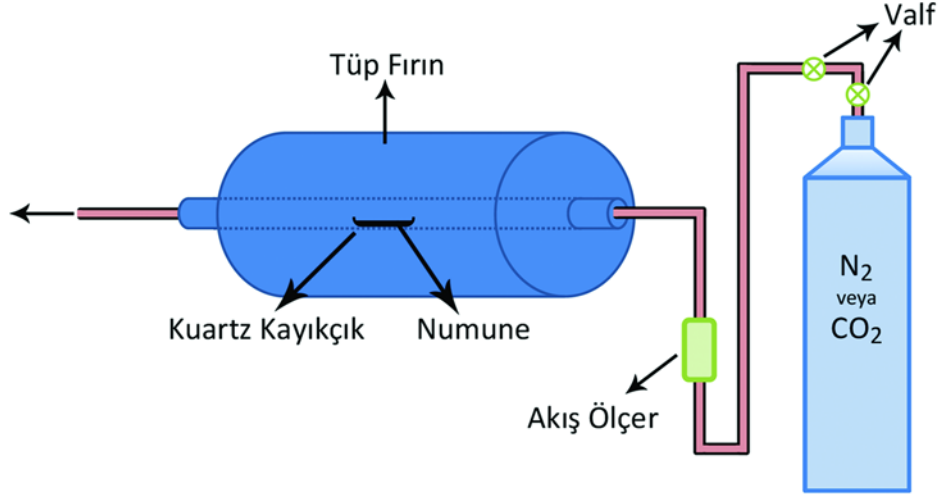
### 6.3 DENEYSEL ŞARTLAR

Zonguldak bitümlü kömürlerinden aktif karbon üretmek amacıyla yapılan bu çalışmada, aktif karbon üretimi fiziksel ve kimyasal yöntemle yapılmıştır. Çalışmada öncelikle optimum aktivasyon süresi, akış hızı ve kimyasal madde miktarları belirlenmiştir.

### 6.4 FİZİKSEL YÖNTEMLE AKTİF KARBON ÜRETİMİ

Kömür numuneleri farklı öğütücüler kullanılarak öğütülmüş ve daha sonra elek analizleri yapılmıştır. Öğütülen numunelerden 106 µm – 300 µm tanecik boyutuna sahip olanlar seçilmiştir. Fiziksel yöntemle aktif karbon hazırlamak için N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> gazları kullanılmıştır. Bu gazlarla aktif karbon numuneleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Kül oranları düşürülen kömür numuneleri etüvde 120°C’de 24 saat kurutulduktan sonra kuartz kayıcıklara koyulup tüp fırına yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 6.2’de verilmiştir. Numune tüp fırında 1 saat, 200 mL/dakika N<sub>2</sub> akışında sırasıyla 400, 500, 600, 700 ve 800°C’de tutularak tamamlanmıştır. Her iki kömür numunesinden (K1 ve K2) de bu şekilde farklı özelliklere sahip aktif karbonlar elde edilmiştir.



Şekil 6.2 Deney düzeneği

## 6.5 KİMYASAL YÖNTEMLE AKTİF KARBON ÜRETİMİ

Kimyasal yöntemle aktif karbon elde etmek için bazlardan KOH ve NaOH, asitlerden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, tuzlardan da ZnCl<sub>2</sub> kullanılmıştır. Bazlarla ve ZnCl<sub>2</sub> tuzuyla kimyasal yöntemle aktif karbonlar elde edilirken öncelikle kömür/kimyasal oranı 1/4 olarak seçilmiş ve kömür ile kimyasal bir havanda güzelce karıştırılmıştır. Havan 12 saat 120°C’de etüvde tutulmuştur. Etüvden alınan numune kuartz kayıkçıklarla tüp fırında 1 saat, 200 mL/dakika N<sub>2</sub> akışında sırasıyla 500, 600, 700 ve 800°C’de tutulmuştur. Fırından alınan numuneler öncelikle 5 N HCl ile üç kez yıkanmıştır. Sonrasında çözeltide klor iyonu kalmayana dek defalarca saf su ile yıkanmıştır. Kömür numuneleri çözeltiden süzülerek ayrılmış ve 24 saat 105°C’de etüvde kurutulmuştur.

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal aktivasyon yapılırken ise öncelikle % 50 ‘lik H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> çözeltisi hazırlanmıştır ve kömür ile bu çözelti bir beherde karıştırılmıştır. Bu karışım 10 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Numune sonrasında 12 saat 120°C’de etüvde tutulmuştur. Etüvden alınan numune kuartz kayıkçıklarla tüp fırında 1 saat, 200 mL/dakika N<sub>2</sub> akışında sırasıyla 500, 600, 700 ve 800°C’de tutulmuştur. Fırından alınan numuneler saf su ve NaHCO<sub>3</sub> kullanılarak, süzüntü nötr pH değerine gelene dek yıkanmıştır. Kömür numuneleri çözeltiden süzülerek ayrılmış ve 24 saat 105°C’de etüvde kurutulmuştur.

## **6.6 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU DENEYLERİ**

Bu çalışmada karbon örnekleri üzerine organik buharlardan izopropil alkol, aseton ve etanol adsorpsiyonu çalışılmıştır. Bu deneyler oda sıcaklığında Quantachrome Autosorp 1 cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazdan elde edilen verilerle  $P/P_0$  bağıl basıncına karşı  $V$  adsorplanan hacim grafikleri çizilmiştir. Veriler kullanılarak 9 farklı izoterm grafikleri çizilerek izoterm parametreleri belirlenmiştir.

## **6.7 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE 77 K'DE HİDROJEN ADSORPSİYONU DENEYLERİ**

Bu çalışmada karbon örnekleri üzerine hidrojen adsorpsiyonu atmosferik basınçta ve 77 K'de Quantachrome Autosorp 1 cihazında gerçekleştirilmiştir.  $P/P_0$  bağıl basıncına karşı  $V$  adsorplanan hacim verileri kullanılarak izoterm grafikleri çizilmiştir.

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, Zonguldak yöresi kömürlerinden fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilen aktif karbon numuneleri üzerine bazı uçucu organik bileşiklerin adsorpsiyonunun incelenmesi amaçlanmıştır. Aktif karbon üretmek amacıyla, kömür numuneleri Türkiye Taşkömürü Kurumu'ndan temin edilmiştir. Bu numuneler Zonguldak'ın doğusundan batısına doğru; TTK Kozlu İşletmesi ve Karadon İşletmelerinden alınmıştır. Kömürlere K1 (Kozlu) ve K2 (Karadon) isimleri verilmiştir.

#### 7.1 ELDE EDİLEN AKTİF KARBON ÖRNEKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde elde edilen aktif karbon örneklerinin N<sub>2</sub> gazı ile 77 K'de adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri, helyum piknometresi ile yoğunluk ölçümleri, elementel analizleri, FT-IR analizleri, TGA analizlerine ait sonuçlar verilmiştir.

##### 7.1.1 N<sub>2</sub> Gazı ile 77 K'de Adsorpsiyon-Desorpsiyon Deneyleri

Bu bölümde fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilen aktif karbon örneklerinin N<sub>2</sub> gazı ile 77 K'de adsorpsiyon-desorpsiyon deneylerine ait izotermeler verilmiştir.

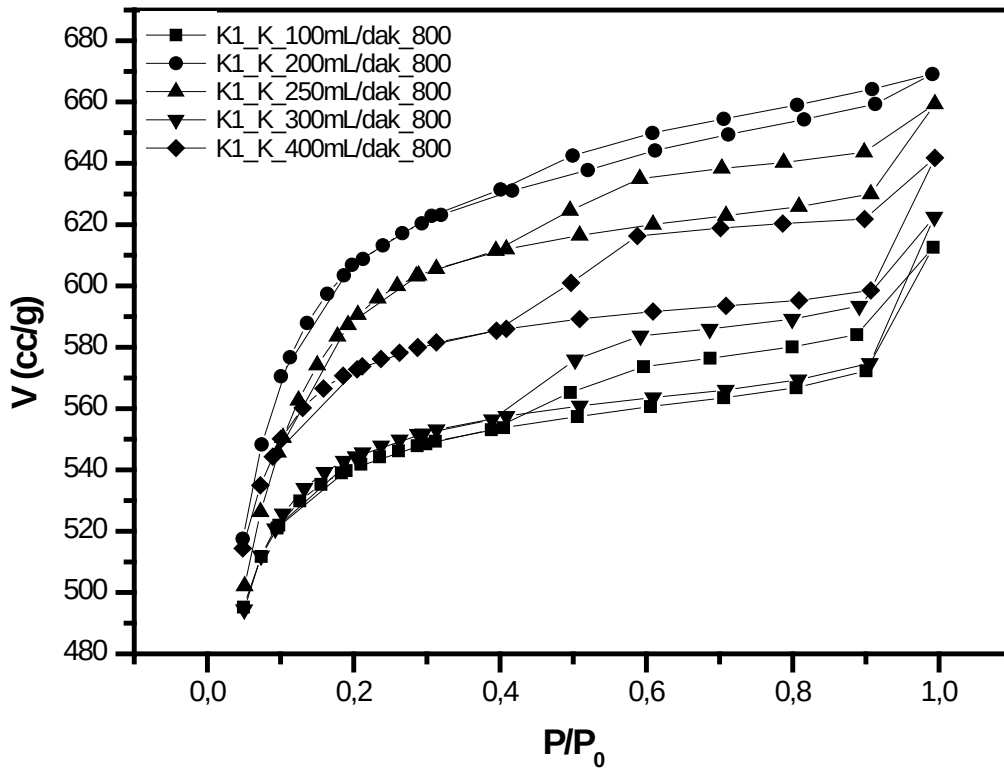
##### 7.1.1.1 Optimum Akış Hızının Belirlenmesi Amacıyla Elde Edilen Aktif Karbonlar

Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla KOH kullanarak kimyasal yöntemle ön denemeler yapılmıştır. Bu deneylerde, numuneler tüp fırında 800 °C'de 100, 150, 200, 250, 300 ve 400 mL/dakika akış hızlarında N<sub>2</sub> gazı geçirilerek hazırlanmıştır. Deneysel düzeneğin hata oranını belirlemek amacıyla bazı deneyler en az 3 kez tekrarlanmış ve düzenden kaynaklanan hata payının %  $\pm 1.5-6$  arasında olduğu belirlenmiştir. Deneysel şartlar ve numune kodları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları.

|                    |                                                                                                                                      |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K1_K_100mL/dak_800 | Kozlu kömürü ile KOH kullanarak 800°C’de, 1 saat 100 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |
| K1_K_150mL/dak_800 | Kozlu kömürü ile KOH kullanarak 800°C’de, 1 saat 150 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |

Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilmiş aktif karbon örneklerinin adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile Quantachrome Instruments’den Autosorb 1 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Optimum akış hızını belirlemek amacıyla elde edilen farklı aktif karbon numunelerinin adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1 Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yöntemleriyle, mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanı t-plot yöntemiyle 77 K’de N<sub>2</sub> ile Quantachrome Autosorp-1 cihazında

yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 7.2 ve 7.3’de verilmiştir. Aktif karbonların BET ve Langmuir yüzey alanları incelendiğinde akış hızı 100mL/dakikadan 200 mL/dak değerine arttığında yüzey alanlarının da arttığı gözlemlenmektedir. BET yüzey alanı 100 mL/dak akış hızında 1678 m<sup>2</sup>/g olarak, 200 mL/dak akış hızında ise 1904 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Akış hızı 250 ve 300 mL/dakikaya çıkarıldığında ise BET yüzey alanları sırasıyla 1872 ve 1689 m<sup>2</sup>/g değerlerine düşmüştür.

Çizelge 7.2 Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

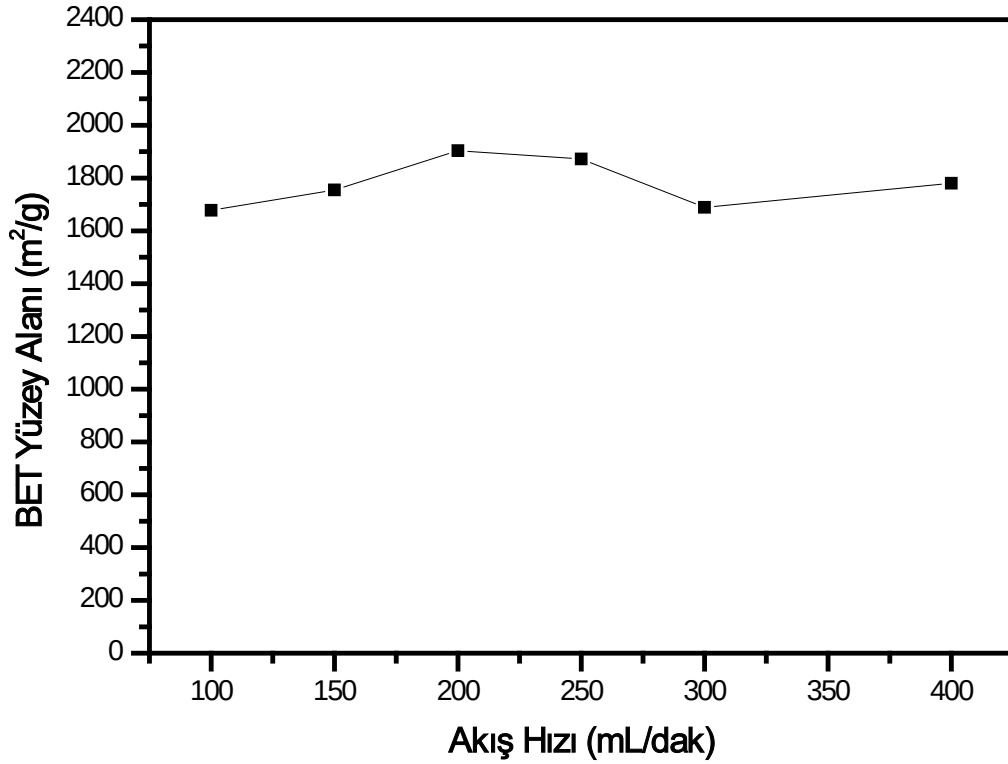
| Örnekler           | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|--------------------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_K_100mL/dak_800 | 1678                                | 0.997          | 2441                                     | 0.999          |
| K1_K_150mL/dak_800 | 1755                                | 0.999          | 2584                                     | 0.998          |
| K1_K_200mL/dak_800 | 1904                                | 0.998          | 2818                                     | 0.999          |
| K1_K_250mL/dak_800 | 1872                                | 0.998          | 2758                                     | 0.987          |
| K1_K_300mL/dak_800 | 1689                                | 0.997          | 2463                                     | 0.999          |
| K1_K_400mL/dak_800 | 1780                                | 0.997          | 2595                                     | 0.999          |

Elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanı t-plot yöntemiyle 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile yapılmıştır. 100 mL/dak akış hızında hazırlanan aktif karbon numunesinin mikro gözenek hacmi 0.82 cc/g, mikro gözenek alanı 1614 m<sup>2</sup>/g iken, 200 mL/dak akış hızında hazırlanan aktif karbon numunesinin mikro gözenek hacmi 0.94 cc/g, mikro gözenek alanı 1843 m<sup>2</sup>/g değerine yükselmiştir. En yüksek BET yüzey alanı, mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı 200 mL/dak akış hızında hazırlanan aktif karbon numunesinde elde edilmiştir.

Şekil 7.2’de akış hızıyla BET yüzey alanının değişim grafiği verilmiştir. Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler sonucunda en yüksek BET yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi K1\_K\_200mL/dak\_800 isimli numunede sırasıyla 1904 m<sup>2</sup>/g ve 0.94 cc/g olarak elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda deneysel çalışmalar için optimum akış hızı 200 mL/dakika olarak belirlenmiştir. 200 mL/dak akış hızından sonraki hızlarda yüzey alanının azalıp sonradan tekrar yükselmesinin nedeninin, tüp fırın içerisinde bu akış hızlarında (300 ve 400 mL/dak) aktifleşmiş kömür örneklerinin bir kısmının numune kabından etrafa saçılmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 7.3 Optimum akış hızının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$  ).

| Örnekler           | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı(m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|--------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_K_100mL/dak_800 | 0.82                       | 1614                                   | 64.69                                    | 0.98           |
| K1_K_150mL/dak_800 | 0.72                       | 1381                                   | 374                                      | 0.94           |
| K1_K_200mL/dak_800 | 0.94                       | 1843                                   | 61.08                                    | 0.91           |
| K1_K_250mL/dak_800 | 0.91                       | 1811                                   | 60.51                                    | 0.95           |
| K1_K_300mL/dak_800 | 0.82                       | 1621                                   | 67.84                                    | 0.97           |
| K1_K_400mL/dak_800 | 0.87                       | 1722                                   | 58.25                                    | 0.96           |



Şekil 7.2 Akış hızının BET yüzey alanına etkisi.

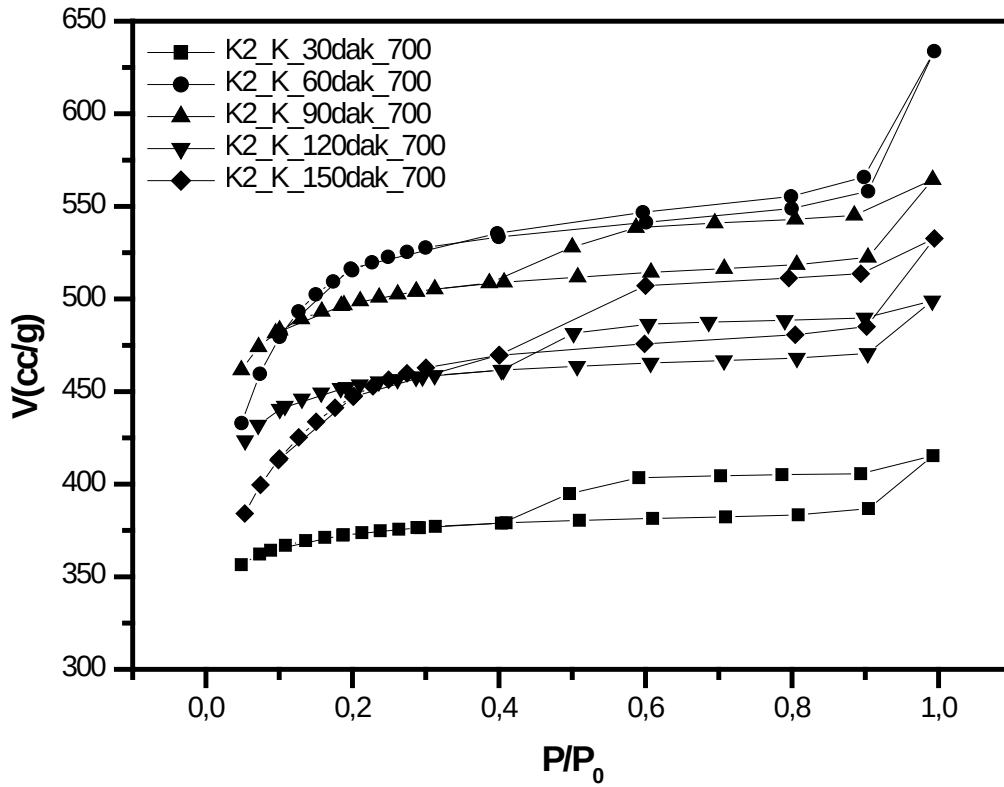
#### 7.1.1.2 Optimum Aktivasyon Süresinin Belirlenmesi Amacıyla Elde Edilen Aktif Karbonlar

Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla KOH kullanarak kimyasal yöntemle ön denemeler yapılmıştır. Bu deneylerde, K2 kömüründen elde edilen numuneler tüp fırında 700°C’de 200mL/dakika akış hızlarında 30, 60, 90, 120, 150 dakika N<sub>2</sub> gazı geçirilerek hazırlanmıştır. Deneysel şartlar ve numune kodları Çizelge 7.4’te belirtilmiştir.

Çizelge 7.4 Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları.

|                |                                                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K2_K_30dak_700 | Karadon kömürü ile KOH kullanarak 700°C’de, 30 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |
| K2_K_60dak_700 | Karadon kömürü ile KOH kullanarak 700°C’de, 30 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |

Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilmiş beş farklı aktif karbon örneğinin adsorpsiyon-desorpsiyon deneyleri 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile yapılmıştır. Bu amaçla elde edilen aktif karbon numunelerinin adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi Şekil 7.3’de verilmiştir.



Şekil 7.3 Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yöntemleriyle, mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanı t-plot yöntemiyle belirlenmiştir ve sonuçlar Çizelge 7.5 ve 7.6’da verilmiştir. Aktif karbonların BET ve Langmuir yüzey alanları incelendiğinde aktivasyon süresi 30 dakikadan 60 dakikaya uzatıldığında yüzey alanlarının da arttığı gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.5'te görüldüğü gibi BET yüzey alanı 30 dakika süresince 1145 m<sup>2</sup>/g olarak, 60 dakika aktivasyon süresinde ise 1659 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Aktivasyon süresi 90 ve 120 dakikaya çıkarıldığında ise BET yüzey alanları sırasıyla 1542 ve 1396 m<sup>2</sup>/g değerlerine düşmüştür.

Çizelge 7.5 Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler        | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_K_30dak_700  | 1145                                | 0.997          | 1659                                    | 0.999          |
| K2_K_60dak_700  | 1659                                | 0.997          | 2408                                    | 0.999          |
| K2_K_90dak_700  | 1542                                | 0.997          | 2238                                    | 0.999          |
| K2_K_120dak_700 | 1396                                | 0.997          | 2031                                    | 0.999          |
| K2_K_150dak_700 | 1448                                | 0.998          | 2113                                    | 0.987          |

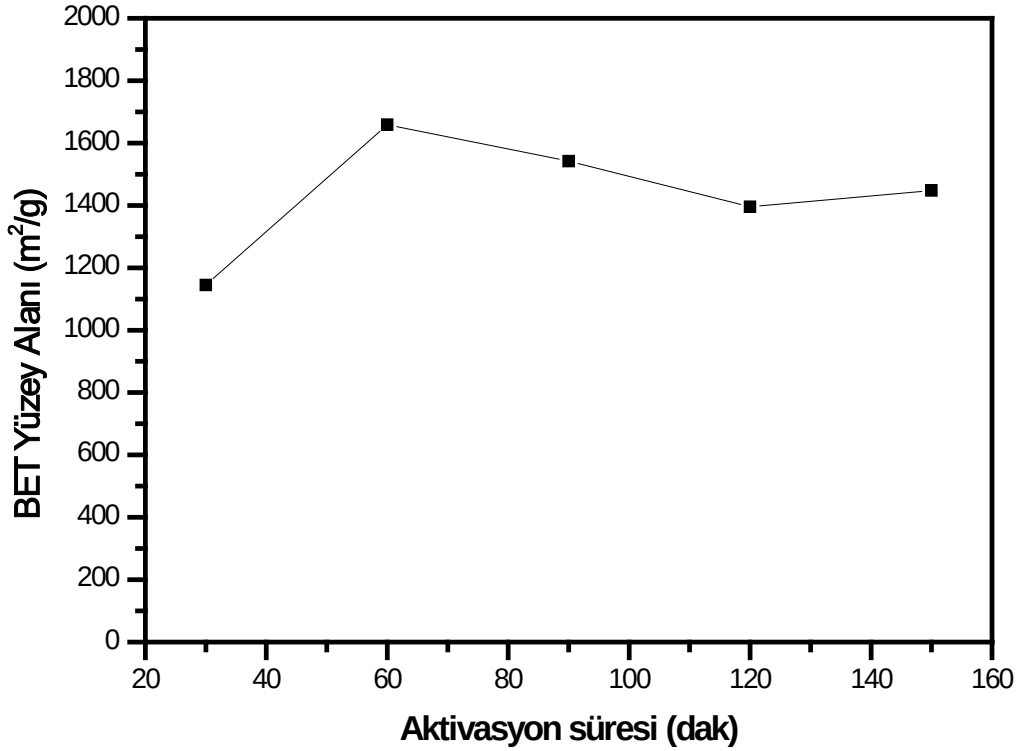
Elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanı t-plot yöntemiyle 77 K'de N<sub>2</sub> gazı ile yapılmıştır. 30 dakika aktivasyon süresinde hazırlanan aktif karbonun mikro gözenek hacmi 0.56 cc/g, mikro gözenek alanı 1109 m<sup>2</sup>/g iken, 60 dakika aktivasyon süresinde hazırlanan aktif karbon numunesinin mikro gözenek hacmi 0.76 cc/g, mikro gözenek alanı 1558 m<sup>2</sup>/g değerine yükselmiştir. En yüksek BET yüzey alanı, mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı 60 dakika aktivasyon süresinde hazırlanan aktif karbon numunesinde elde edilmiştir.

Çizelge 7.6 Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

| Örnekler        | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı(m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_K_30dak_700  | 0.56                       | 1109                                   | 35.92                                    | 0.94           |
| K2_K_60dak_700  | 0.76                       | 1558                                   | 101.8                                    | 0.96           |
| K2_K_90dak_700  | 0.75                       | 1484                                   | 57.75                                    | 0.96           |
| K2_K_120dak_700 | 0.69                       | 1357                                   | 39.87                                    | 0.96           |
| K2_K_150dak_700 | 0.68                       | 1376                                   | 72.34                                    | 0.96           |

Şekil 7.4'te aktivasyon süresi ile BET yüzey alanının nasıl değiştiği görülmektedir. En yüksek BET yüzey alanı ve mikro gözenek hacmi K2\_K\_60dak\_700 isimli numunede sırasıyla 1659 m<sup>2</sup>/g ve 0.761 cc/g olarak elde edilmiştir. Bu ön deneme sonucunda deneysel çalışmalar için

optimum aktivasyon süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. 60 dakikadan sonraki sürelerde BET yüzey alanının azalmasının nedeninin sinterleşme olabileceği düşünülmektedir. Haimour and Emeish (2006) yaptıkları çalışmada aktivasyon süresinin yüzey alanına etkisini incelemişler ve aktivasyon süresini 60 dakika olarak belirlemişlerdir. Guo and Luo (2000) yaptıkları benzer bir çalışmada optimum süreyi 60 dakika olarak belirlemişler ve bu süreden sonraki sürelerde BET yüzey alanının azaldığını açıklamışlardır.



Şekil 7.4 Aktivasyon süresinin BET yüzey alanına etkisi.

#### 7.1.1.3 Fiziksel Yöntemle Elde Edilen Aktif Karbonlar

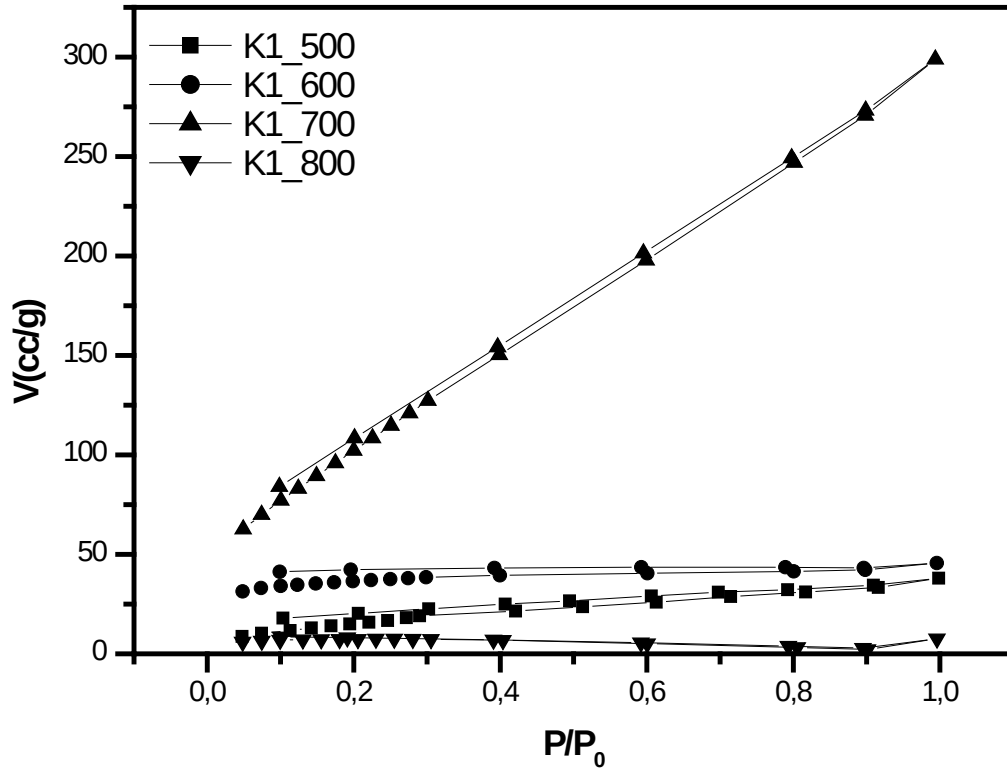
Fiziksel yöntemle aktif karbon hazırlamak için N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> gazları kullanılmıştır. Bu gazlarla aktif karbon numuneleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Çizelge 7.7’de bu aktif karbonları hazırlarken kullanılan numune kodları ve deneysel şartları verilmiştir.

Çizelge 7.7 Fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları.

|            |                                                                                                                            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K2_700     | Karadon kömürü ile 700°C’de, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek fiziksel yolla elde edilen numunedir. |
| K1_CO2_400 | Kozlu kömürü ile 400°C’de, 60 dakika 200 mL/dakika CO <sub>2</sub> gazı geçirilerek fiziksel yolla elde edilen numunedir.  |

## Fiziksel Yöntemle N<sub>2</sub> Kullanarak Elde Edilen Aktif Karbonlar

Farklı sıcaklıklarda fiziksel yolla aktive edilmiş K1 kömüründen elde edilmiş aktif karbon örneklerinin yüzey alanları ve gözenek hacimleri 77 K’de N<sub>2</sub> adsorpsiyonuyla belirlenmiştir. Şekil 7.5’te bu numunelerin N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir.



Şekil 7.5 K1 kömüründen farklı sıcaklıklarda fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Farklı sıcaklıklarda K1 bitümlü kömüründen fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.8’de verilmiştir. Çizelge 7.8’deki sonuçlardan, farklı sıcaklıklarda K1 kömüründen fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin en yüksek yüzey alanlı olanının 700°C’de elde edilen numune olduğu görülmektedir. Bu numunenin BET yüzey alanı 415 m<sup>2</sup>/g, Langmuir yüzey alanı ise 529 m<sup>2</sup>/g’a ulaşmıştır. Sıcaklık 800°C’ye çıktığında ise BET yüzey alanı 24 m<sup>2</sup>/g, Langmuir yüzey alanı ise 34 m<sup>2</sup>/g’a düşmüştür.

Çizelge 7.8 K1 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_500   | 61                                  | 0.999          | 104                                      | 0.988          |
| K1_600   | 119                                 | 0.998          | 173                                      | 0.999          |
| K1_700   | 415                                 | 0.998          | 529                                      | 0.994          |
| K1_800   | 24                                  | 0.996          | 34                                       | 0.999          |

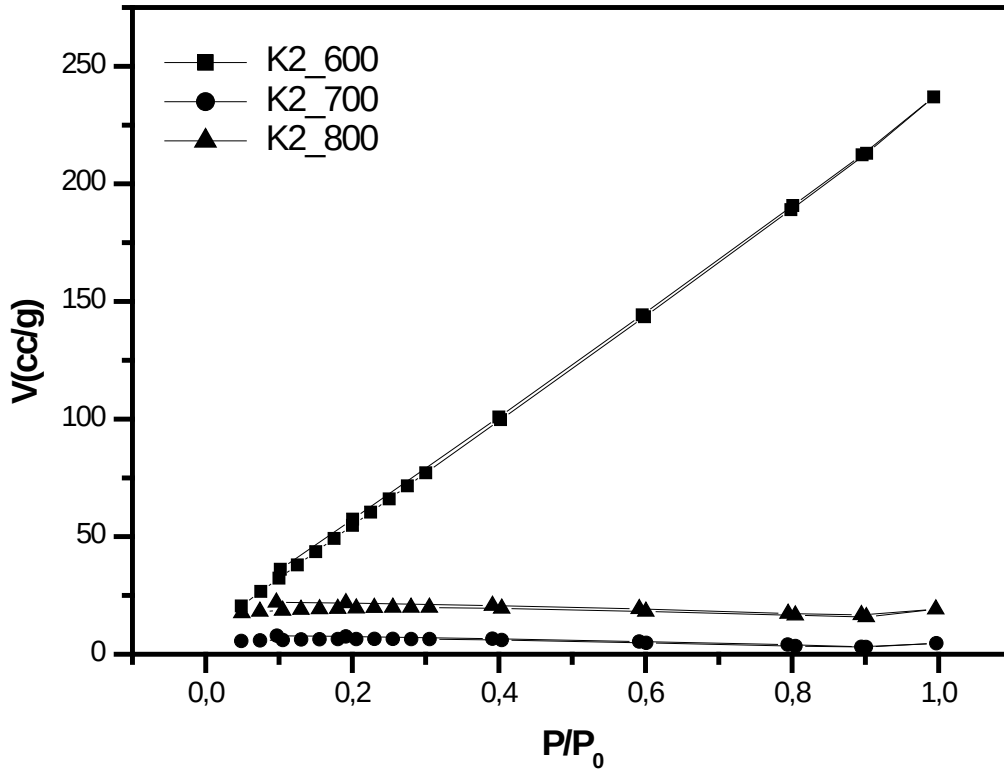
Farklı sıcaklıklarda K1 numunesinden, N<sub>2</sub> gazı kullanarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanı t-plot yöntemiyle 77 K'de N<sub>2</sub> ile yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 7.9'da verilmiştir. Mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı en yüksek olan numune K1\_700 numunesidir. Bu numune % 48 mikro gözenek alanına sahip, % 52 mezo ve makro gözeneklere sahiptir. K1\_700 isimli aktif karbon aynı zamanda 4 farklı sıcaklıkta fiziksel olarak hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek BET ve Langmuir yüzey alanına sahip numunedir.

Çizelge 7.9 K1 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_500   | 1.92E-2                    | 38.86                                   | 22.47                                    | 0.94           |
| K1_600   | 0.06                       | 111.3                                   | 7.98                                     | 0.97           |
| K1_700   | 9.78E-2                    | 199                                     | 216                                      | 0.94           |
| K1_800   | 0.01                       | 25.69                                   | -                                        | 0.35           |

Şekil 7.6'da farklı sıcaklıklarda N<sub>2</sub> gazı ile K2 kömüründen fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbonların 77 K'de N<sub>2</sub> adsorpsiyon izotermi verilmektedir.

Farklı sıcaklıklarda K2 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.10'da verilmiştir. Demineralizasyon işlemi yapılmış K2 numunesinin BET yüzey alanı 29 m<sup>2</sup>/g iken, numune 600°C'de fiziksel olarak aktive edilince BET yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g'a ulaşmıştır. Sıcaklık 700°C'ye çıktığında ise BET yüzey alanı 21 m<sup>2</sup>/g'a, 800°C'ye çıktığında ise 62 m<sup>2</sup>/g'a düşmüştür.



Şekil 7.6 K2 kömüründen farklı sıcaklıklarda fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Çizelge 7.10 K2 ve K2 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| K2       | 29                                  | 0.966          | -                                        | 0.7            |
| K2_500   | 0.6                                 | 0.15           | 0.7                                      | 0.15           |
| K2_600   | 311                                 | 0.991          | 741                                      | 0.942          |
| K2_700   | 21                                  | 0.996          | 29                                       | 0.999          |
| K2_800   | 62                                  | 0.998          | 90                                       | 0.999          |

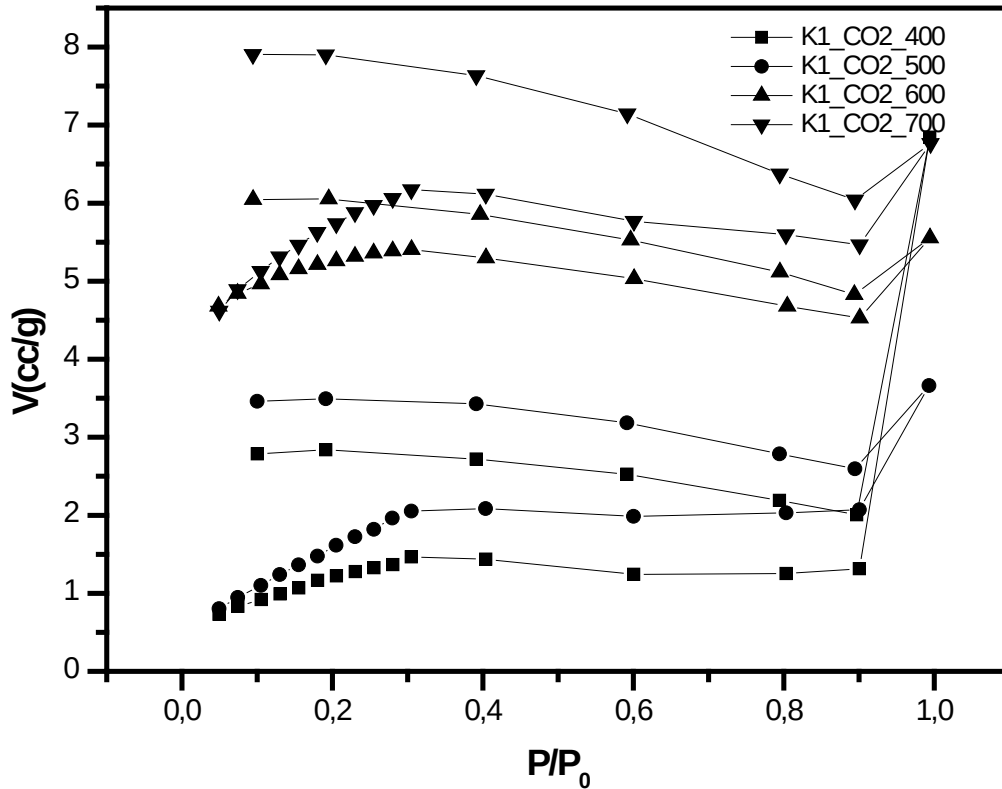
Farklı sıcaklıklarda K2 kömüründen fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.11’de verilmiştir. En yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı K2\_800 numunesi için sırasıyla 0.03 cc/g ve 64.09 m<sup>2</sup>/g olarak hesaplanmıştır. K2\_500 ve K2\_600 isimli aktif karbonlar için t-plot sonuçları elde edilememiştir. Bu numunelerin gözenek yapılarının gelişmemiş olduğu düşünülmüştür.

Çizelge 7.11 K2 ve K2 numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$  ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı(m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2       | -                          | 11.4                                   | 17.93                                   | 0.98           |
| K2_500   | -                          | -                                      | -                                       | -              |
| K2_600   | -                          | -                                      | -                                       | -              |
| K2_700   | 0.01                       | 23.15                                  | -                                       | 0.72           |
| K2_800   | 0.03                       | 64.09                                  | -                                       | 0.50           |

### Fiziksel Yöntemle CO<sub>2</sub> Kullanarak Aktif Karbon Elde Edilmesi

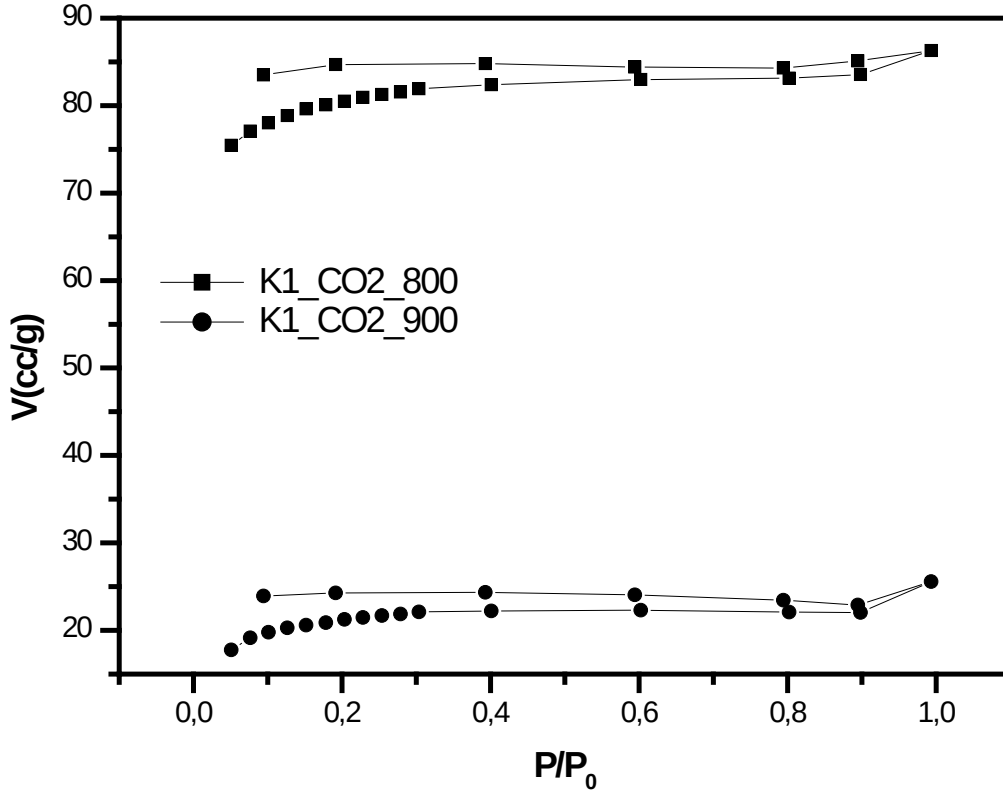
Şekil 7.7’de K1 kömüründen 400, 500, 600 ve 700°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbonların 77 K’deki N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmiştir. Bu izotermilerin sık rastlanan izoterm modellerine pek fazla uymadıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 7.7 K1 kömüründen 400, 500, 600 ve 700°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Şekil 7.8’de 800 ve 900°C’de K1 kömüründen CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbonların 77 K’deki N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmiştir. Bu numunelerin

adsorpsiyon izotermi Tip II izoterm modeline benzerlik göstermektedir. Desorpsiyon eğrisinden mikro gözeneklere adsorbe olan gazın farklı gözeneklerden desorbe olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 7.8 K1 kömüründen 800 ve 900°C'de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K'de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K1 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.12'de verilmiştir. Altı farklı aktif karbon numunesi arasında en yüksek yüzey alanlı numune 800 °C'de elde edilmiştir. K1 kömüründen N<sub>2</sub> ile fiziksel yöntemle 700 °C'de 415 m<sup>2</sup>/g BET yüzey alanlı aktif karbon elde edilirken, CO<sub>2</sub> ile 800 °C'de 251 m<sup>2</sup>/g BET yüzey alanlı aktif karbon elde edilebilmiştir. Fiziksel yöntemle aktif karbon elde ederken, CO<sub>2</sub> gazına göre N<sub>2</sub> gazı ile daha yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

K1 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.13'de verilmiştir. En yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı, en yüksek BET yüzey alanlı numune olan K1\_CO2\_800 numunesinde 0.12 cc/g ve 246 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu aktif karbon % 98 mikro gözenek alanına sahiptir.

Çizelge 7.12 K1 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

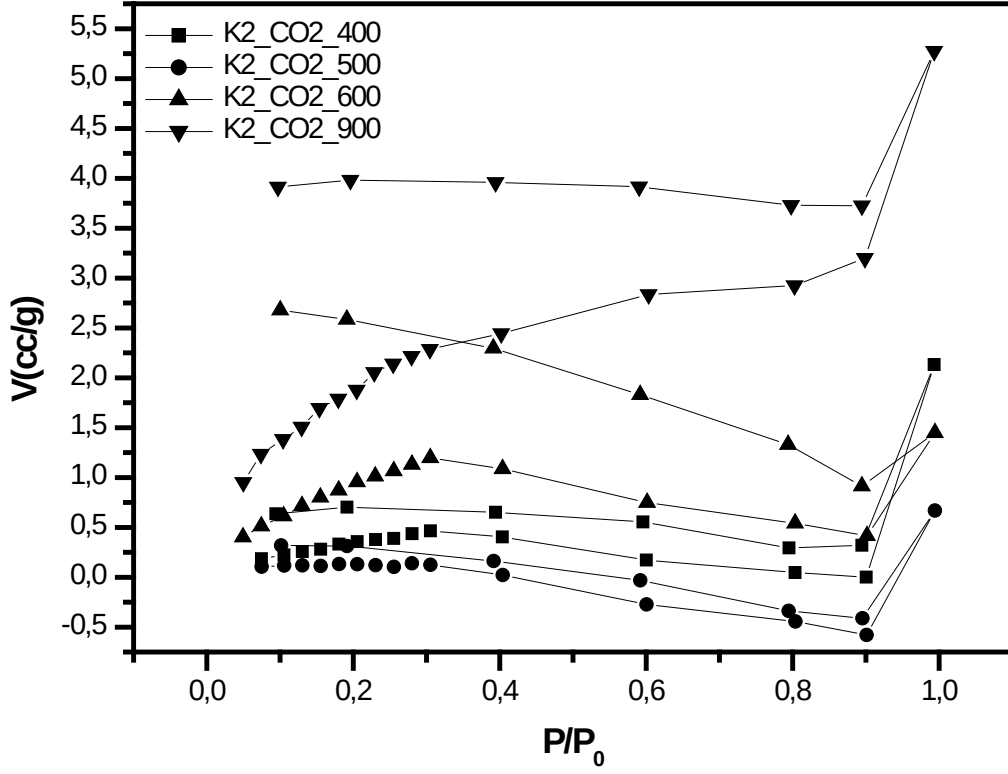
| Örnekler   | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K1_CO2_400 | 5                                   | 0.999          | 8                                       | 0.992          |
| K1_CO2_500 | 7                                   | 0.997          | 13                                      | 0.976          |
| K1_CO2_600 | 17                                  | 0.998          | 24                                      | 0.999          |
| K1_CO2_700 | 19                                  | 0.999          | 29                                      | 0.999          |
| K1_CO2_800 | 251                                 | 0.998          | 362                                     | 0.999          |
| K1_CO2_900 | 178                                 | 0.998          | 254                                     | 0.999          |

Çizelge 7.13 K1 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

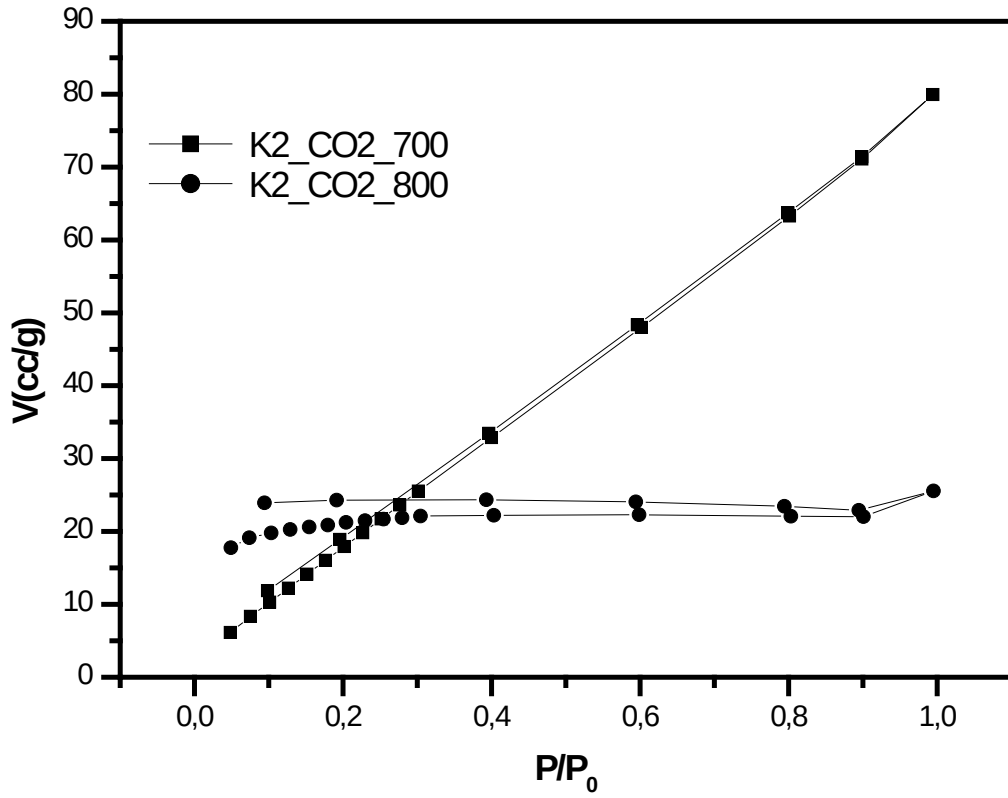
| Örnekler   | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı(m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|------------|----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|
| K1_CO2_400 | 1E-3                       | 1.76                                   | 2.92                                    | 0.60           |
| K1_CO2_500 | 3.34E-3                    | 6.44                                   | 0.68                                    | 0.30           |
| K1_CO2_600 | 8.80E-3                    | 17.45                                  | -                                       | 0.46           |
| K1_CO2_700 | 1.04E-2                    | 19.80                                  | -                                       | 0.22           |
| K1_CO2_800 | 0.12                       | 246                                    | 4.96                                    | 0.95           |
| K1_CO2_900 | 0.09                       | 175                                    | 3.31                                    | 0.69           |

Şekil 7.9’da K2 kömüründen farklı sıcaklıklarda (400, 500, 600 ve 900°C) CO<sub>2</sub> ile fiziksel yöntemle elde edilmiş aktif karbonların N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir.

Şekil 7.10’da K2 kömüründen farklı sıcaklıklarda 700 ve 800°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yöntemle elde edilmiş aktif karbonların N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu aktif karbon numuneleri tarafından adsorplanan gaz hacimleri aynı yöntemle diğer sıcaklıklarda hazırlanan aktif karbon numunelerinden oldukça fazladır. Bunun sonucunda bu iki aktif karbonun yüzey alanlarının diğer sıcaklıklarda hazırlanan aktif karbonlardan oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 7.9 K2 kömüründen 400, 500, 600 ve 900°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.



Şekil 7.10 K2 kömüründen 700 ve 800°C’de CO<sub>2</sub> ile fiziksel yolla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K2 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.14’de verilmiştir. Altı farklı aktif karbon numunesi arasında en yüksek yüzey alanlı numune 700 °C’de 108 m<sup>2</sup>/g olarak elde edilmiştir. K2 kömüründen N<sub>2</sub> ile fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek BET yüzey alanı 600°C’de 311 m<sup>2</sup>/g olarak elde edildiğinden, K2 kömürü için de fiziksel yöntemle N<sub>2</sub> gazı ile daha yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde edilebildiği gözlemlenmiştir. Macia-Agullo et al. (2004) yaptıkları çalışmada CO<sub>2</sub> ile fiziksel olarak ve KOH ve NaOH ile de kimyasal olarak kömürden aktif karbonlar üretmişlerdir. CO<sub>2</sub> ile 644-2487 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbonlar elde etmişlerdir.

Çizelge 7.14 K2 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler   | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_CO2_400 | 2                                   | 0.995          | 4                                       | 0.977          |
| K2_CO2_500 | 0.4                                 | 0.970          | 0.6                                     | 0.987          |
| K2_CO2_600 | 4                                   | 0.999          | 7                                       | 0.988          |
| K2_CO2_700 | 108                                 | 0.992          | 183                                     | 0.969          |
| K2_CO2_800 | 69                                  | 0.998          | 100                                     | 0.999          |
| K2_CO2_900 | 8                                   | 0.998          | 14                                      | 0.993          |

K2 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.15’de verilmiştir. En yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı K2\_CO2\_800 numunesinde 3.405E-2 cc/g ve 66.67 m<sup>2</sup>/g olarak hesaplanmıştır. Bu aktif karbon % 97 mikro gözenek alanına sahiptir. K2\_CO2\_700 isimli aktif karbon ise % 31 mikro gözenek alanına sahiptir ve bu aktif karbonun korelasyon katsayısı (r<sup>2</sup>) diğer aktif karbonlara oranla yüksektir. Bu durumda t-plot yöntemine en uygun aktif karbon bu 6 aktif karbon arasından K2\_CO2\_700 isimli aktif karbondur.

Çizelge 7.15 K2 kömüründen CO<sub>2</sub> kullanılarak fiziksel yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$ ).

| Örnekler   | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı(m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|------------|----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_CO2_400 | 1.97E-4                    | 0.96                                   | 0.74                                    | 0.44           |
| K2_CO2_500 | 1.67E-4                    | 0.60                                   | -                                       | 0.18           |
| K2_CO2_600 | 2.68E-3                    | 5.17                                   | -                                       | 0.34           |
| K2_CO2_700 | 5.24E-3                    | 33.46                                  | 74.55                                   | 0.94           |
| K2_CO2_800 | 3.41E-2                    | 66.67                                  | 1.78                                    | 0.41           |
| K2_CO2_900 | 3.31E-3                    | 5.94                                   | 2.05                                    | 0.61           |

#### 7.1.1.4 Kimyasal Yöntemle Elde Edilen Aktif Karbonlar

Zonguldak bitümlü kömüründen KOH, NaOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanarak farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle aktif karbonlar elde edilmiştir. Öncelikle optimum kimyasal madde miktarı belirlenmiş ve kullanılan tüm kimyasal maddeler belirlenen bu oranda kullanılarak aktif karbonlar elde edilmiştir.

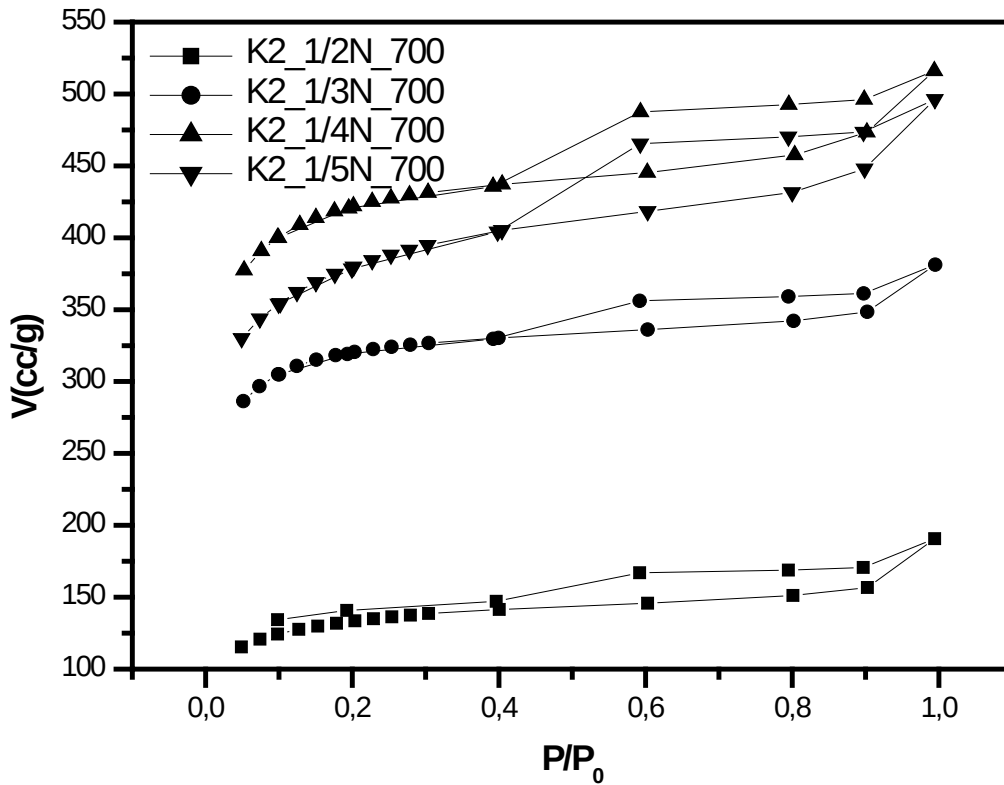
#### Optimum Kimyasal Madde Miktarının Belirlenmesi Amacıyla Elde Edilen Aktif Karbonlar

Kimyasal yöntemle aktif karbon elde etmeden önce optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla bazı ön denemeler yapılmıştır. Bu amaçla kömür/kimyasal aktivasyon ajanı oranları değiştirilerek yeni aktif karbon numuneleri elde edilmiştir. Bu çalışma için NaOH kimyasalı seçilmiş ve 1/2, 1/3, 1/4 ve 1/5 oranında yapılan deneysel aktivasyon işlemleri tamamlanmış ve elde edilen numunelerin yüzey alanları ve gözenek yapıları belirlenmiştir. Çizelge 7.16'da optimum kimyasal madde miktarını belirlemek amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları verilmiştir.

Şekil 7.11'de optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla K2 kömüründen kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu 4 aktif karbonun izotermi Tip IV izotermine benzemektedir. Bu izoterm tipinde yapıda mezo gözeneklerin varlığından söz edilir.

Çizelge 7.16 Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları.

|             |                                                                                                                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K2_1/2N_700 | Karadon kömürü ile kömür/NaOH oranı 1/2 olarak 700°C’de, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |
| K2_1/3N_700 | Karadon kömürü ile kömür/NaOH oranı 1/3 olarak 700°C’de, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir. |



Şekil 7.11 Optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilmiş aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yüzey alanları ve korelasyon katsayıları Çizelge 7.17’de verilmiştir. Aktif karbonların BET ve Langmuir yüzey alanları incelendiğinde kimyasal miktarı 1/2’den 1/4’e çıkarıldığında yüzey alanlarının da arttığı gözlemlenmektedir. Çizelge 7.17’de görüldüğü gibi BET yüzey alanı 1/2 için 429 m<sup>2</sup>/g olarak, 1/4 kimyasal miktarında ise 1335 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Kimyasal miktarı 1/5’e çıkarıldığında ise BET yüzey alanı 1224 m<sup>2</sup>/g değerine düşmüştür.

Çizelge 7.17 Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler    | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|-------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_1/2N_700 | 429                                 | 0.998          | 626                                     | 0.999          |
| K2_1/3N_700 | 1011                                | 0.998          | 1465                                    | 0.999          |
| K2_1/4N_700 | 1335                                | 0.998          | 1937                                    | 0.999          |
| K2_1/5N_700 | 1224                                | 0.998          | 1782                                    | 0.999          |

Çizelge 7.18’de elde edilen aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları verilmiştir. En yüksek mikro gözenek hacmi 0.62 cc/g, mikro gözenek alanı 1245 m<sup>2</sup>/g ile K2\_1/4N\_700 isimli aktif karbon numunesinde görülmüştür. Bu aktif karbon % 93 mikro gözenek alanına sahiptir. Bu sonuçlara göre optimum kimyasal miktarı 1/4 olarak belirlenmiştir. Guo and Luo (2000) yaptıkları çalışmada farklı konsantrasyonlarda ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ve KOH çözeltileriyle aktif karbonlar hazırlamışlardır. Optimum konsantrasyonları ZnCl<sub>2</sub> için % 30, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> için % 40, KOH için % 10 olarak belirlemişlerdir. Aynı çalışmada aktivasyon sıcaklığıyla elde edilen aktif karbonların yüzey alanları karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanını 800°C’de elde etmişlerdir. Ubago-Perez et al. (2006) yaptıkları çalışmada zeytin çekirdeğinden KOH ile aktif karbonlar elde etmişlerdir. KOH/Karbon oranının 4/1 ve 5/1 olduğunda en yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde ettiklerini açıklamışlardır.

Çizelge 7.18 Optimum kimyasal miktarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

| Örnekler    | Micropore Volume (cc/g) | Micropore Area(m <sup>2</sup> /g) | External Surface Area(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_1/2N_700 | 0.19                    | 377.8                             | 51.61                                    | 0.98           |
| K2_1/3N_700 | 0.48                    | 955.6                             | 55.35                                    | 0.99           |
| K2_1/4N_700 | 0.62                    | 1245                              | 90.01                                    | 0.99           |
| K2_1/5N_700 | 0.55                    | 1113                              | 111                                      | 0.99           |

Kimyasal yöntemle aktif karbon elde etmek için bazlardan KOH ve NaOH, asitlerden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, tuzlardan da ZnCl<sub>2</sub> kullanılmıştır. Bu aktif karbonlar optimum şartlar göz önünde bulundurularak elde edilmişlerdir. Karbon/kimyasal oranı 1/4, aktivasyon süresi 60 dakika ve N<sub>2</sub> akış hızı 200 mL/dak alınarak aktif karbonlar hazırlanmışlardır. Çizelge 7.19’da farklı

aktivasyon kimyasalı ile kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları verilmiştir.

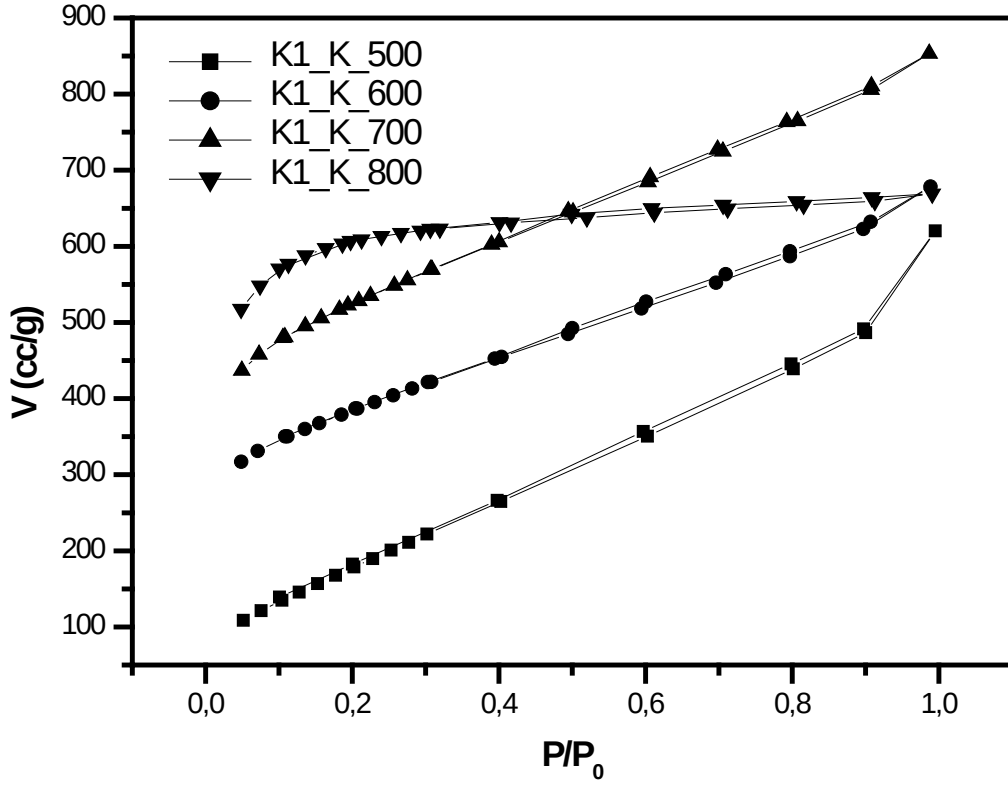
Çizelge 7.19 Kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon numunelerinin kodları ve deneysel şartları.

|          |                                                                                                                                                                       |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K2_K_700 | Karadon kömürü ile 700°C’de, KOH kullanılarak, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir.                          |
| K1_N_500 | Kozlu kömürü ile 500°C’de, NaOH kullanılarak, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek fiziksel yolla elde edilen numunedir.                           |
| K2_Z_600 | Karadon kömürü ile 600°C’de, ZnCl <sub>2</sub> kullanılarak, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek kimyasal yolla elde edilen numunedir.            |
| K1_P_800 | Kozlu kömürü ile 800°C’de, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> kullanılarak, 60 dakika 200 mL/dakika N <sub>2</sub> gazı geçirilerek fiziksel yolla elde edilen numunedir. |

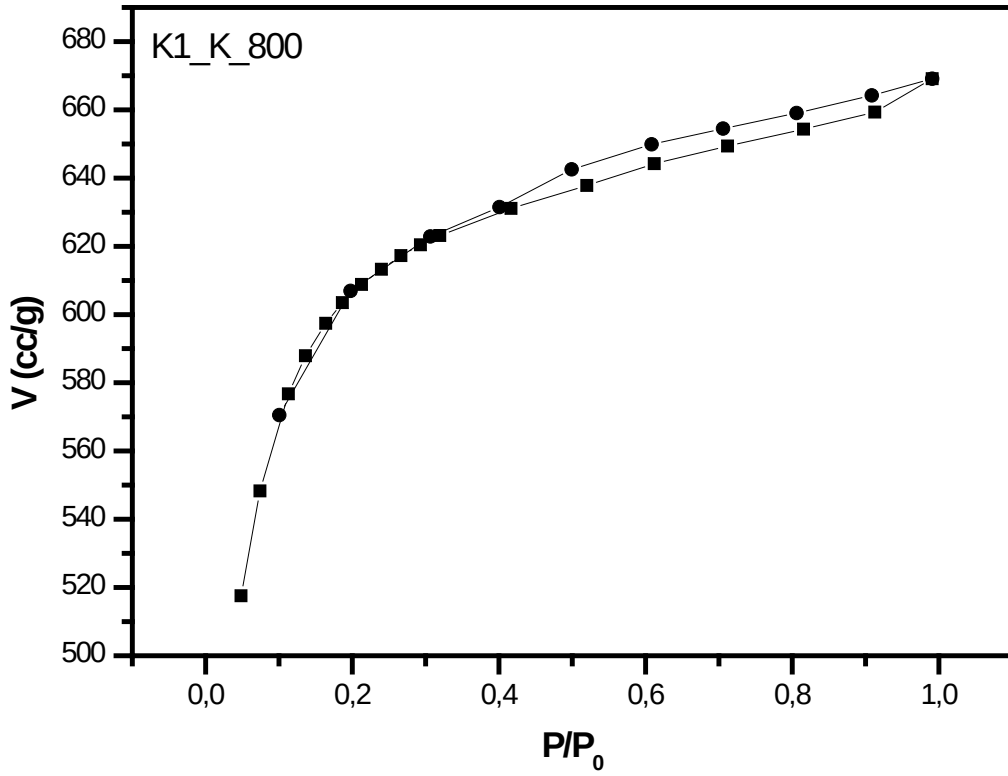
### Kimyasal Yöntemle KOH Kullanarak Elde Edilen Aktif Karbonlar

Şekil 7.12’de KOH kullanılarak K1 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Şekil 7.13’te 800°C’de hazırlanan aktif karbonun izoterm grafiği verilmiştir. Bu 4 farklı aktif karbonun izotermi incelendiğinde; 500, 600 ve 700°C’de hazırlanan aktif karbonlarda adsorplanan azot gazının aynı yoldan desorbe olduğu gözlemlenmektedir. 800°C’de hazırlanan K1\_K\_800 isimli aktif karbondaki ise adsorpsiyon histerezisinin varlığı dikkat çekmektedir.

KOH kullanılarak K1 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.20’de verilmiştir. Elde edilen 5 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 800°C’de elde edilmiştir. K1 kömüründen KOH ile aktif karbon elde ederken yüzey alanları sıcaklık arttıkça artış göstermiştir. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 1904 m<sup>2</sup>/g ve 2818 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Aynı kömür örneği (K1) fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 415 m<sup>2</sup>/g olarak K1\_700 numunesinde gözlemlenmiştir. 800°C’de KOH ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonun (K1\_K\_800) BET yüzey alanı, N<sub>2</sub> ile fiziksel yöntemle hazırlanan aktif karbonun (K1\_700) 5 katıdır.



Şekil 7.12 K1 kömüründen KOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.



Şekil 7.13 K1\_K\_800 numunesinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Çizelge 7.20 K1 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_K_500 | 728                                 | 0.998          | 1141                                     | 0.987          |
| K1_K_600 | 1297                                | 0.999          | 1928                                     | 0.998          |
| K1_K_700 | 1755                                | 0.999          | 2584                                     | 0.998          |
| K1_K_800 | 1904                                | 0.998          | 2818                                     | 0.999          |

KOH kullanılarak K1 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.21’de verilmiştir. En yüksek yüzey alanlı olarak elde edilen K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.94 cc/g ve 1843 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Aynı numune elde edilen diğer 4 aktif karbon numunelerinden en düşük external yüzey alanına (61.08 m<sup>2</sup>/g) sahip numunedir. Bu yöntemle 800°C’de elde edilen K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesi yüksek oranla mikro gözenekli yapıdadır ve % 97 mikro gözenek alanına sahiptir. Oysa 500°C’de elde edilen K1\_K\_500 isimli aktif karbon numunesi daha az mikro gözenekli yapıda elde edilmiştir. Çünkü bu numunenin mikro gözenek alanı 271 m<sup>2</sup>/g iken external yüzey alanı 456 m<sup>2</sup>/g’dir bu durumda mikro gözenek alanı oranı yalnızca % 37’dir. Aynı kömür numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_700 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.098 cc/g’dir. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.94 cc/g değerine çıkmaktadır. Böylelikle mikro gözenek hacmi yaklaşık 10 kat kadar artmıştır. Jibril et al. (2007) yaptıkları çalışmada KOH ile bitümlü kömürlerden aktif karbon elde etmişlerdir. Aktivasyon sıcaklığı 600°C iken 661 m<sup>2</sup>/g, 800°C iken 1906 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbonlar elde etmişlerdir.

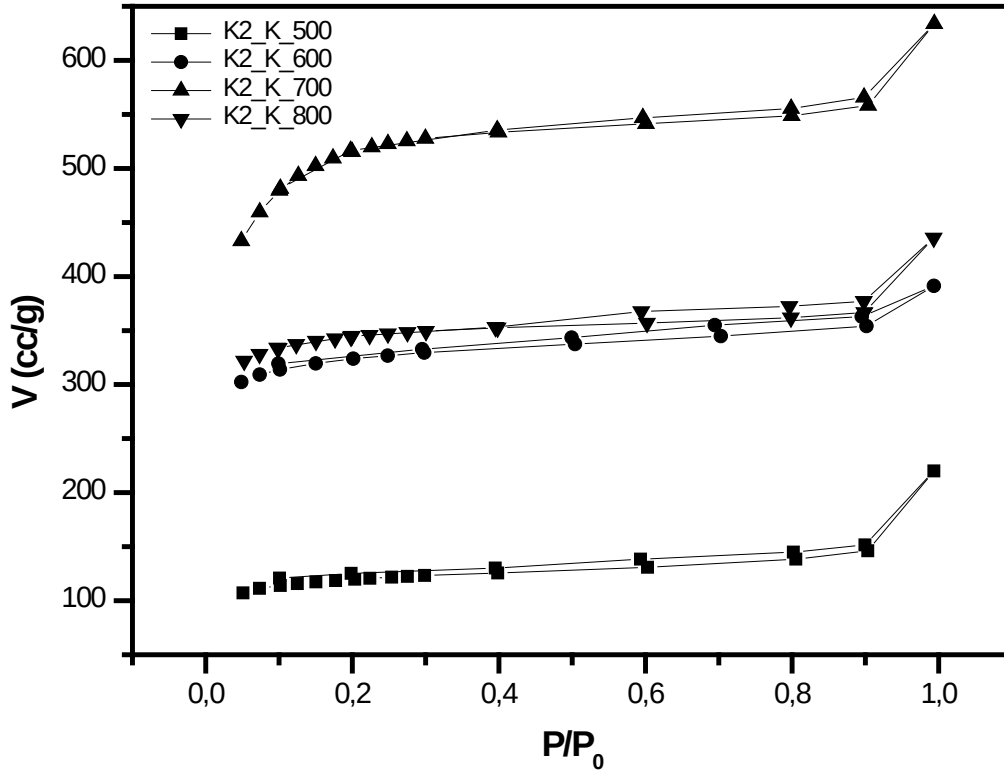
Şekil 7.14’te KOH kullanılarak K2 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu izotermi K1 kömüründen aynı şartlarda elde edilen aktif karbonların izotermiyle karşılaştırıldığında, K1 kömüründen sadece 800°C’de elde edilen aktif karbondaki gözlemlenen adsorpsiyon histerezisinin K2 kömüründen elde

edilen 4 aktif karbonda da var olduğu belirlenmiştir. Bu durumda yapıda mikro gözeneklerin yanında mezo ve makro gözeneklerinde var olduğu söylenebilir.

Çizelge 7.21 K1 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$ ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_K_500 | 0.13                       | 271                                     | 456                                      | 0.98           |
| K1_K_600 | 0.51                       | 971                                     | 327                                      | 0.95           |
| K1_K_700 | 0.72                       | 1381                                    | 374                                      | 0.94           |
| K1_K_800 | 0.94                       | 1843                                    | 61.08                                    | 0.91           |

KOH kullanılarak K2 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.22’de verilmiştir. Elde edilen 5 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 700°C’de elde edilmiştir. K2 kömüründen KOH ile aktif karbon elde ederken yüzey alanları sıcaklık arttıkça 700°C’ye kadar artış göstermiş, fakat sıcaklık 800°C’ye çıktığında yüzey alanı yine düşmüştür. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K2\_K\_700 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 1659 m<sup>2</sup>/g ve 2408 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Aynı kömür örneği fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_600 numunesinde gözlemlenmiştir. Böylelikle aynı kömür örneğinden KOH ile kimyasal yöntemle, fiziksel yöntemle oranla yaklaşık 5 kat yüksek yüzey alanlı numuneler elde edilebilmiştir. Aynı kimyasal aktivasyon işlemi K1 kömürüne de yapılmış ve en yüksek yüzey alanı 800°C’de 1904 m<sup>2</sup>/g olarak elde edilmiştir. Yani KOH ile kimyasal yolla aktif karbon elde edilirken K1 kömüründen, K2 kömürüne oranla daha yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde edilebilmiştir.



Şekil 7.14 K2 kömüründen KOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Çizelge 7.22 K2 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_K_500 | 382                                 | 0.998          | 551                                     | 0.999          |
| K2_K_600 | 1051                                | 0.998          | 1452                                    | 0.999          |
| K2_K_700 | 1659                                | 0.997          | 2408                                    | 0.999          |
| K2_K_800 | 1080                                | 0.997          | 1548                                    | 0.999          |

KOH kullanılarak K2 kömüründen farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.23’te verilmiştir. En yüksek yüzey alanına sahip K2\_K\_700 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına da sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.76 cc/g ve 1558 m<sup>2</sup>/g olarak hesaplanmıştır. K2\_K\_700 isimli aktif karbon % 94 mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değer K1 kömüründen aynı şartlarda elde edilen aktif karbonun mikro gözenek alanı oranından daha düşüktür, yani K2 kömüründen elde edilen aktif karbondaki K1 kömüründen elde edilen aktif karbondan daha fazla mezo ve

makro gözenekler mevcuttur. Aynı kömür numunesinden (K2) fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K2\_800 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.03 cc/g'dır. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K2\_K\_700 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.76 cc/g değerine çıkmaktadır. Böylelikle mikro gözenek hacmi yaklaşık 24 kat kadar artmıştır. Aynı yöntemle, K1 kömürü kullanılarak elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacmi 0.97 cc/g olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.23 K2 kömüründen KOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ ).

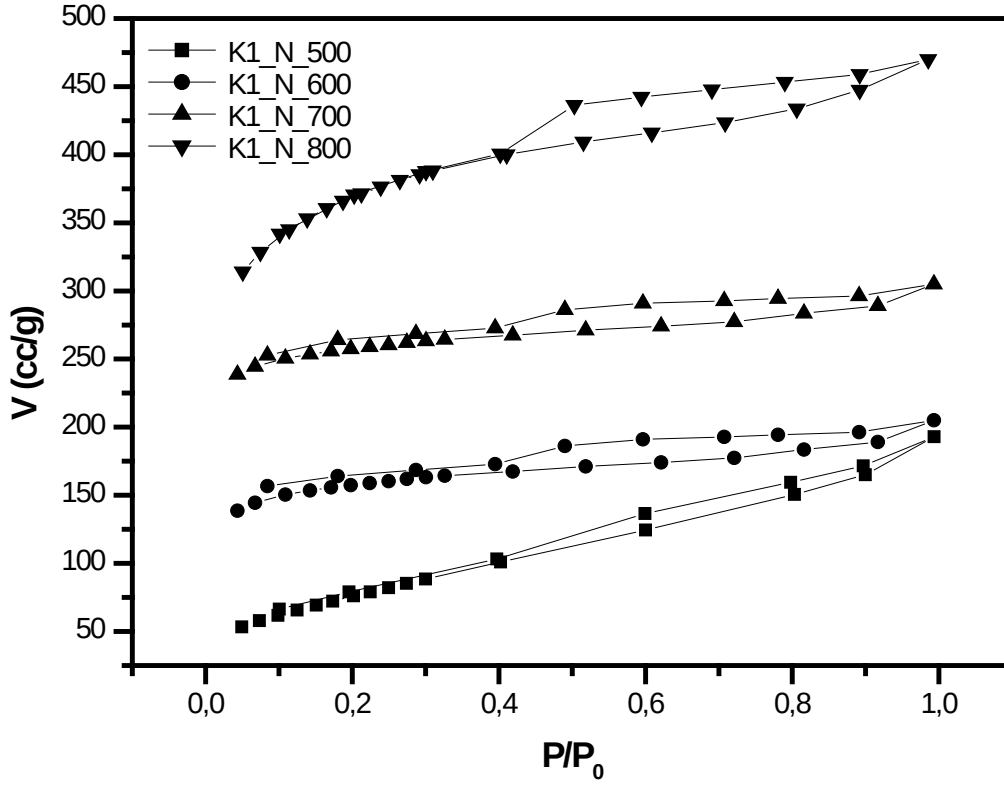
| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_K_500 | 0.14                       | 293.4                                   | 88.07                                    | 0.93           |
| K2_K_600 | 0.48                       | 987.5                                   | 63.35                                    | 0.98           |
| K2_K_700 | 0.76                       | 1558                                    | 101.8                                    | 0.96           |
| K2_K_800 | 0.50                       | 1001                                    | 79.61                                    | 0.93           |

### Kimyasal Yöntemle NaOH Kullanarak Elde Edilen Aktif Karbonlar

Şekil 7.15'te K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle, farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu izotermi aynı kömürden KOH kullanarak hazırlanan aktif karbonların izotermiyle karşılaştırıldığında bu 4 aktif karbonun izotermiğinde adsorpsiyon histerezisinin varlığı dikkat çekmektedir.

K1 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.24'de verilmiştir. Elde edilen 4 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 800°C'de elde edilmiştir. K1 kömüründen NaOH ile aktif karbon elde ederken yüzey alanları sıcaklık arttıkça artış göstermiştir. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K1\_N\_800 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 1188 m<sup>2</sup>/g ve 1770 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Aynı kömür örneği (K2) fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_600 numunesinde, KOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1904 m<sup>2</sup>/g olarak K1\_K\_800 isimli aktif karbon örneğinde

gözlemlenmiştir. Böylelikle aynı kömür örneğinden KOH ile kimyasal yöntemle, fiziksel yöntemle oranla yaklaşık 5 katı yüksek yüzey alanlı, NaOH ile kimyasal yöntemle elde edilen numuneden de yaklaşık 1.6 katı yüksek yüzey alanlı numuneler elde edilmiştir.



Şekil 7.15 K1 kömüründen NaOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Çizelge 7.24 K1 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K1_N_500 | 281                                 | 0.999          | 434                                     | 0.994          |
| K1_N_600 | 495                                 | 0.997          | 733                                     | 0.999          |
| K1_N_700 | 1059                                | 0.998          | 1559                                    | 0.999          |
| K1_N_800 | 1188                                | 0.998          | 1770                                    | 0.999          |

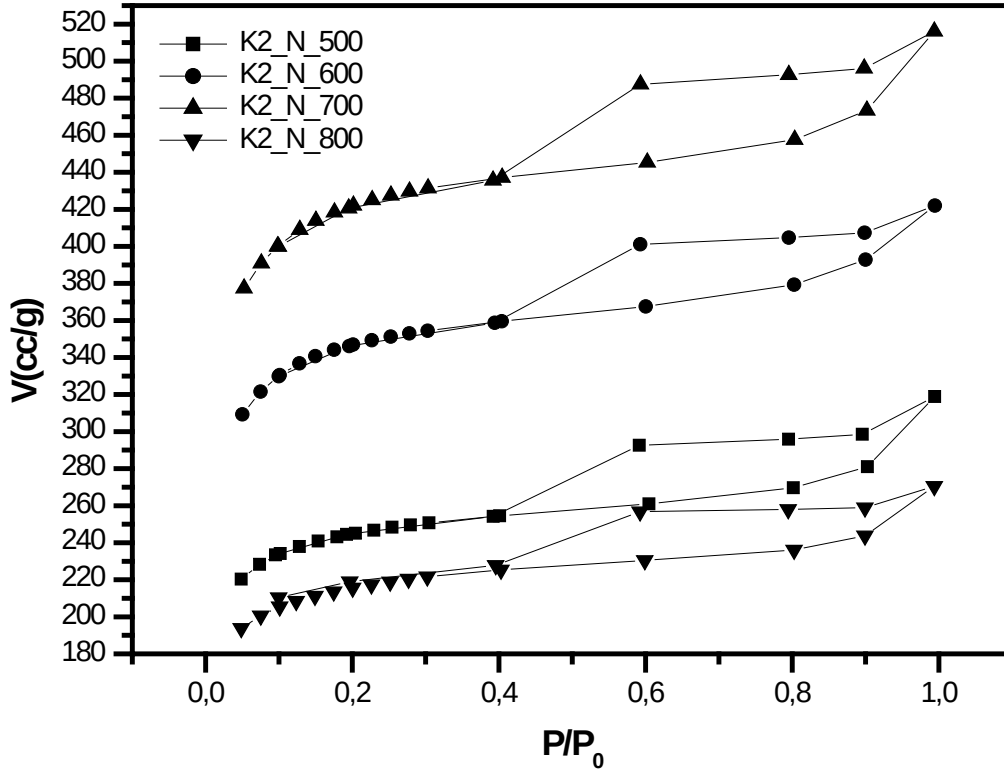
K1 kömüründen NaOH ile kimyasal yöntemle farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı

ve external yüzey alanları Çizelge 7.25’de verilmiştir. En yüksek yüzey alanına sahip K1\_N\_800 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına da sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.55 cc/g ve 1082 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. K1 kömüründen NaOH ile elde edilen bu 4 aktif karbonun % mikro gözenek alanları karşılaştırıldığında; 500, 600, 700 ve 800°C’de elde edilen aktif karbonların sırasıyla % 56, 91, 74 ve 91 oranlarında mikro gözenek alanlarına sahip oldukları gözlemlenmektedir. Bu değerler aynı kömürden KOH ile hazırlanan aktif karbonların mikro gözenek alanı yüzdelerinden daha düşüktür. Aynı kömür numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_700 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.098 cc/g’dır. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.94 cc/g değerine çıkmaktadır. Bu değer NaOH kullanarak yapılan kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon numunesinin mikro gözenek hacminin yaklaşık 2 katıdır.

Çizelge 7.25 K1 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$ ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_N_500 | 7.82E-2                    | 156                                     | 125                                      | 0.97           |
| K1_N_600 | 0.23                       | 484                                     | 47.08                                    | 0.98           |
| K1_N_700 | 0.40                       | 783.3                                   | 275.7                                    | 0.96           |
| K1_N_800 | 0.55                       | 1082                                    | 106                                      | 0.96           |

Şekil 7.16’da K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle, farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. K2 kömüründen NaOH ile 4 farklı sıcaklıkta hazırlanan bu aktif karbonların izotermelerinde adsorpsiyon histerezi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.16 K2 kömüründen NaOH ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ile korelasyon katsayıları Çizelge 7.26’da verilmiştir. Elde edilen 5 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 700°C’de elde edilmiştir. K2 kömüründen NaOH ile aktif karbon elde ederken, yüzey alanları sıcaklık arttıkça 700°C’ye kadar artış göstermiş, fakat sıcaklık 800°C’ye çıktığında yüzey alanı yine düşmüştür. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K2\_N\_700 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 1335 m<sup>2</sup>/g ve 1937 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.26’da verilen korelasyon katsayılarından bu yöntemle hazırlanan aktif karbonların hem BET hem de Langmuir izoterm modeline uyumlu oldukları gözlemlenmektedir. Aynı kömür örneği (K2) fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_600 numunesinde gözlemlenmiştir. Aynı kömür kimyasal yöntemle KOH ile aktive edildiğinde ise K2\_K\_700 numunesinin BET yüzey alanı 1659 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. Aynı kimyasal aktivasyon işlemi (NaOH ile) K1 kömürüne de yapılmış ve en yüksek yüzey alanı 800°C’de 1188 m<sup>2</sup>/g olarak elde edilmiştir. Yani NaOH ile kimyasal yolla aktif karbon elde edilirken K2 kömüründen, K1 kömürüne oranla daha yüksek yüzey alanlı aktif karbon elde edilebilmiştir.

Çizelge 7.26 K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K2_N_500 | 774                                 | 0.998          | 1120                                    | 0.999          |
| K2_N_600 | 1098                                | 0.998          | 1589                                    | 0.999          |
| K2_N_700 | 1335                                | 0.998          | 1937                                    | 0.999          |
| K2_N_800 | 686                                 | 0.998          | 991                                     | 0.999          |

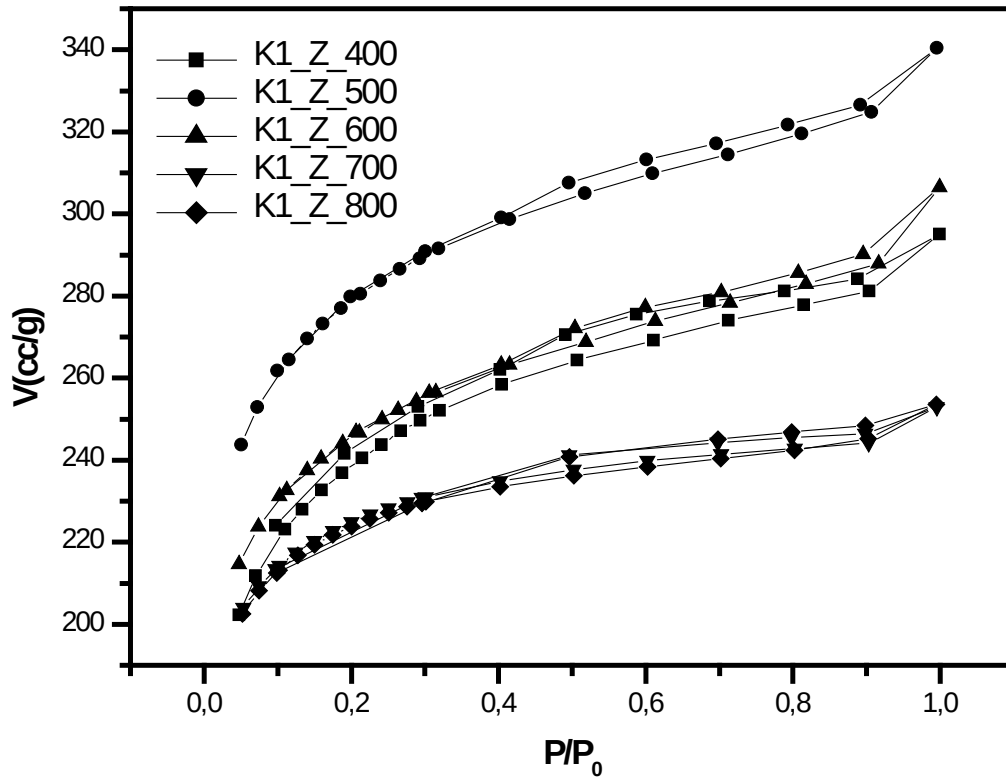
K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.27’de verilmiştir. En yüksek yüzey alanlı olarak elde edilen K2\_N\_700 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.62 cc/g ve 1245 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Bu yöntemle hazırlanan aktif karbonların hepsi yüksek oranda mikro gözenek alanına sahiptir. K2\_N\_500 isimli aktif karbon % 91, diğerleri ise % 93 mikro gözenek alanına sahiptirler. K1 kömüründen aynı şartlarda elde edilen aktif karbonlar K2 kömüründen elde edilenlere göre daha düşük mikro gözenek alanına sahiptirler. Aynı kömür numunesinden (K2) fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K2\_800 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.03 cc/g’dır. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K2\_K\_700 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.76 cc/g değerine çıkmaktadır. Aynı yöntemle (NaOH ile) K1 kömürü kullanılarak aktif karbon elde edilen numunenin en yüksek mikro gözenek hacmi 0.550 cc/g olarak bulunmuştur. NaOH kullanarak kimyasal aktivasyon işlemi yapıldığında K2 numunesinden elde edilen aktif karbon numunesi (K2\_N\_700), K1 numunesinden elde edilenden (K1\_N\_800) daha yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Macia-Agullo et al. (2004) NaOH kullanarak kimyasal yöntemle aktif karbon elde etmişlerdir. NaOH/Karbon oranını 4/1 olarak yaptıkları deneyde BET yüzey alanını 2000 m<sup>2</sup>/g olarak bulmuşlardır. Lillo-Rodenas et al. (2007) yaptıkları çalışmada KOH ile NaOH’e oranla daha yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde etmişlerdir. K1 ve K2 kömüründen KOH ve NaOH kullanarak elde edilen aktif karbonların yüzey alanları karşılaştırıldığında, KOH ile daha yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.27 K2 kömüründen NaOH kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları (  $P/P_0 > 0.2$  ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_N_500 | 0.351                      | 704.3                                   | 69.78                                    | 0.99           |
| K2_N_600 | 0.511                      | 1024                                    | 73.86                                    | 0.99           |
| K2_N_700 | 0.621                      | 1245                                    | 90.01                                    | 0.99           |
| K2_N_800 | 0.316                      | 634                                     | 51.51                                    | 0.99           |

### Kimyasal Yöntemle ZnCl<sub>2</sub> Kullanarak Elde Edilen Aktif Karbonlar

Şekil 7.17’de K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanılarak kimyasal yöntemle farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu 5 farklı aktif karbonun izotermelerinde adsorpsiyon histerezi görülmektedir.



Şekil 7.17 K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K1 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları ile korelasyon katsayıları Çizelge 7.28’de verilmiştir. Elde edilen 5 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 500°C’de elde edilmiştir. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K1\_Z\_500 isimli aktif karbon için sırasıyla 885 m<sup>2</sup>/g ve 1303 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Korelasyon katsayılarından bu yöntemle hazırlanan 5 aktif karbonun da BET ve Langmuir izoterm modeline uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Aynı kömür örneği fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 415 m<sup>2</sup>/g olarak K1\_700 numunesinde, KOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1904 m<sup>2</sup>/g olarak K1\_K\_800 isimli aktif karbon örneğinde, NaOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1188 m<sup>2</sup>/g olarak K1\_N\_800 isimli aktif karbon örneğinde gözlemlenmiştir. Böylelikle aynı kömür örneğinden KOH, NaOH ve  $ZnCl_2$  aktivasyon kimyasalları ile hazırlanan aktif karbonlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbonun KOH ile kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.28 K1 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı(m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
| K1_Z_400 | 767                                 | 0.998          | 1142                                    | 0.999          |
| K1_Z_500 | 885                                 | 0.998          | 1303                                    | 0.999          |
| K1_Z_600 | 783                                 | 0.998          | 1153                                    | 0.999          |
| K1_Z_700 | 714                                 | 0.998          | 1034                                    | 0.999          |
| K1_Z_800 | 711                                 | 0.998          | 1029                                    | 0.999          |

K1 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.29’da verilmiştir. En yüksek yüzey alanlı olarak elde edilen K1\_Z\_500 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.42 cc/g ve 826.6 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Bu kimyasal aktivasyon ajanı ile hazırlanan aktif karbonlar da KOH ve NaOH ile hazırlanan aktif karbonlar gibi yüksek oranda mikro gözenekli yapıdadırlar. K1\_Z\_500 isimli aktif karbon % 93 mikro gözenek alanına sahiptir. Aynı kömür numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif

karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_700 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.098 cc/g'dır. Aynı kömür numunesi (K1) KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_K\_800 isimli aktif karbon numunesidir ve bu değer 0.94 cc/g, NaOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacimli olan aktif karbon K1\_N\_800 ve mikro gözenek hacmi 0.55 cc/g değerindedir. Bunun sonucunda alkali hidroksitlerle elde edilen aktif karbonlar  $ZnCl_2$  ile elde edilen aktif karbon örneğinden daha yüksek mikro gözenek hacmine ve yüzey alanına sahiptirler.

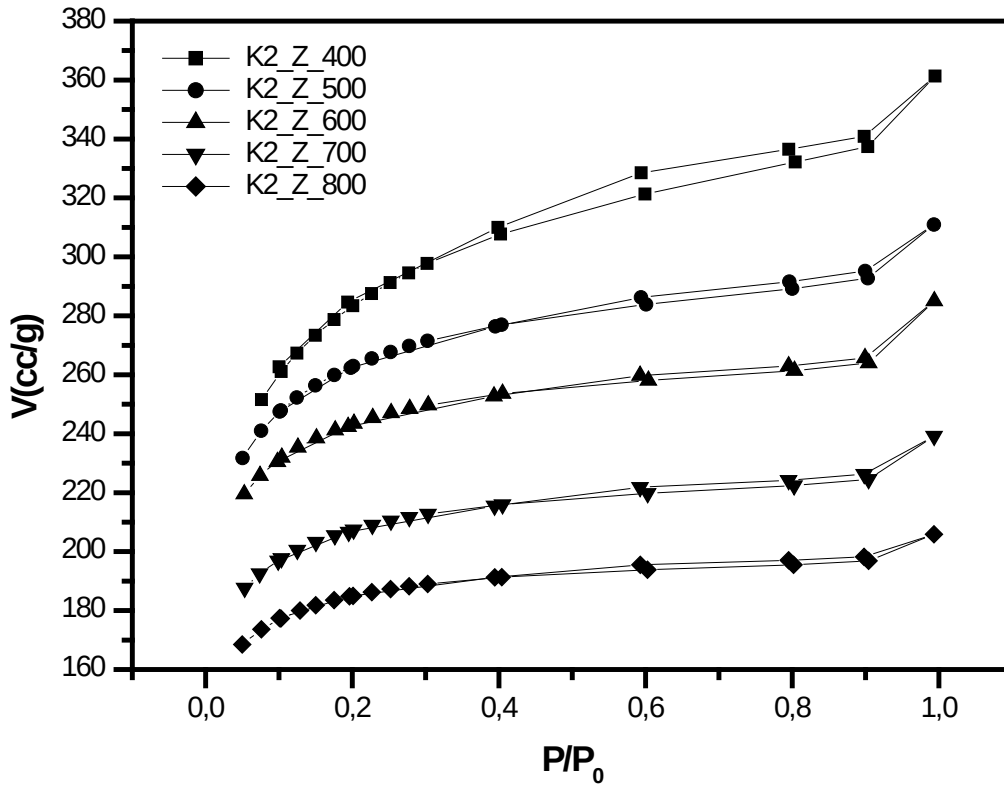
Çizelge 7.29 K1 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_Z_400 | 0.37                       | 716                                     | 51.29                                    | 0.92           |
| K1_Z_500 | 0.42                       | 826.6                                   | 58.82                                    | 0.94           |
| K1_Z_600 | 0.37                       | 727.1                                   | 55.8                                     | 0.95           |
| K1_Z_700 | 0.35                       | 687.7                                   | 25.98                                    | 0.92           |
| K1_Z_800 | 0.34                       | 682.6                                   | 28.45                                    | 0.94           |

Şekil 7.18'de K2 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak kimyasal yöntemle, farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de  $N_2$  ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. Aynı kimyasal aktivasyon ajanı ile K1 kömüründen elde edilen aktif karbonlarda gözlemlenen adsorpsiyon histerezisinin bu aktif karbonlar da gözlemlendikleri belirlenmiştir.

K2 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yüzey alanları ile korelasyon katsayıları Çizelge 7.30'da verilmiştir. Elde edilen 5 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 400°C'de elde edilmiştir ve sıcaklık arttıkça yüzey alanı azalmıştır. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K2\_Z\_400 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 926 m<sup>2</sup>/g ve 1360 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Sıcaklık 800°C'ye çıktığında bu değerler sırasıyla 584 m<sup>2</sup>/g ve 843 m<sup>2</sup>/g değerlerine düşmüştür. Çizelge 7.30'daki korelasyon katsayıları incelendiğinde elde edilen bu 5 aktif karbonun BET ve Langmuir izoterm modellerine uygun oldukları gözlemlenmiştir. Aynı kömür örneği

fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_600 numunesinde, KOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1659 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_K\_700 isimli aktif karbon örneğinde, NaOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1335 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_N\_700 isimli aktif karbon örneğinde gözlemlenmiştir. Böylelikle aynı kömür örneğinden elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon KOH ile kimyasal yöntemle elde edilmiştir. Hu et al. (2003) yaptıkları çalışmada hindistan cevizi kabuğundan ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal olarak yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde etmişlerdir. Aktivasyon kimyasalı olarak KOH kullandıklarında daha yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde etmişlerdir. Bu çalışmada da K1 ve K2 kömüründen aktif karbon hazırlarken KOH kullandığımızda ZnCl<sub>2</sub>'e oranla daha yüksek yüzey alanlı aktif karbonlar elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 7.18 K2 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K2 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.31'de verilmiştir. En yüksek yüzey alanlı olarak elde edilen K2\_Z\_400 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek

alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.42 cc/g ve 850.5 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.31’den bu kimyasal aktivasyon ajanı ile hazırlanan aktif karbonların da yüksek oranda mikro gözenekli yapıda oldukları görülmektedir. K2\_Z\_400 isimli aktif karbonun % 92 mikro gözenek alanına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde, en yüksek mikro gözenek hacimli K2\_K\_700 isimli aktif karbon numunesi olup, en yüksek 0.76 cc/g değerine sahiptir. NaOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde ise en yüksek mikro gözenek hacimli olan aktif karbon K2\_N\_700’dür ve bu değer 0.62 cc/g değerindedir. ZnCl<sub>2</sub> ile K1 kömüründen elde edilen aktif karbon örneğinde en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı K1\_Z\_500 isimli numunede sırasıyla 0.42 cc/g ve 826.6 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Bu durumda her iki kömürden de ZnCl<sub>2</sub> ile elde edilen aktif karbonların mikro gözenek hacimlerinin benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 7.30 K2 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (400, 500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

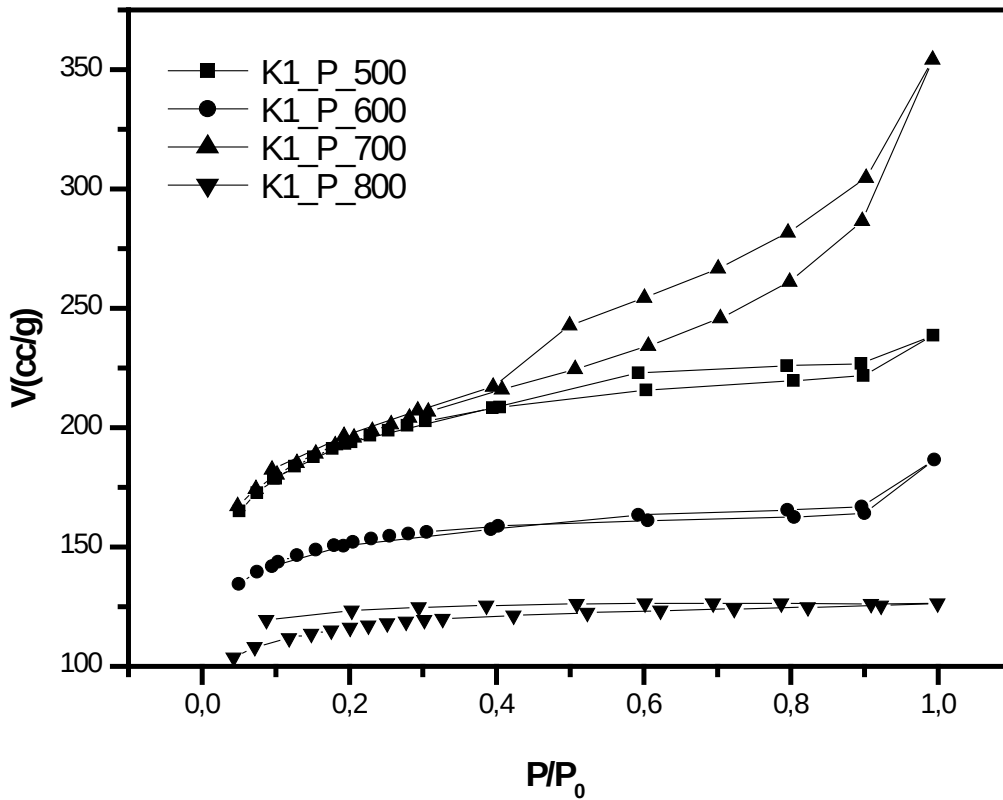
| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> | Langmuir Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|-------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_Z_400 | 926                                 | 0.998          | 1360                                     | 0.999          |
| K2_Z_500 | 841                                 | 0.998          | 1223                                     | 0.999          |
| K2_Z_600 | 771                                 | 0.998          | 1119                                     | 0.999          |
| K2_Z_700 | 657                                 | 0.998          | 953                                      | 0.999          |
| K2_Z_800 | 584                                 | 0.998          | 843                                      | 0.999          |

Çizelge 7.31 K2 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_Z_400 | 0.42                       | 850.5                                   | 75.18                                    | 0.95           |
| K2_Z_500 | 0.40                       | 795.6                                   | 45.28                                    | 0.97           |
| K2_Z_600 | 0.37                       | 733.4                                   | 37.34                                    | 0.97           |
| K2_Z_700 | 0.31                       | 627.7                                   | 28.89                                    | 0.97           |
| K2_Z_800 | 0.28                       | 564.8                                   | 18.88                                    | 0.97           |

## Kimyasal Yöntemle H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Kullanarak Elde Edilen Aktif Karbonlar

Şekil 7.19’da K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak kimyasal yöntemle farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. 500, 600 ve 700°C’de hazırlanan aktif karbonların izotermelerinde adsorpsiyon histerezisinin varlığı gözlemlenmektedir, 800°C’de hazırlanan aktif karbonun izotermine ise adsorplanan gazın tamamen farklı bir yoldan desorbe olduğu görülmektedir.



Şekil 7.19 K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de N<sub>2</sub> gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yöntemleriyle belirlenmiştir. Bu numunelerin BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.32’de verilmiştir. Elde edilen 4 farklı aktif karbon numunesi arasında en yüksek yüzey alanlı numune 700°C’de elde edilmiştir. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K1\_P\_700 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 636 m<sup>2</sup>/g ve 933 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. 500°C’de aktivasyon ile elde edilen aktif karbon numunesinin yüzey alanı değerleri bu değerlere çok yakın olup sırasıyla 630 m<sup>2</sup>/g ve 923 m<sup>2</sup>/g değerlerindedir. Kalderis et al. (2008) H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanarak aktif

karbonlar elde etmişler ve en yüksek yüzey alanlı aktif karbonu ( $173 \text{ m}^2/\text{g}$ )  $700^\circ\text{C}$ 'de % 75 aktivasyon kimyasalı kullanarak elde ettiklerini açıklamışlardır.

Aynı kömür örneği fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı  $415 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak K1\_700 numunesinde, KOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı  $1904 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak K1\_K\_800 isimli aktif karbon örneğinde, NaOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı  $1188 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak K1\_N\_800 isimli aktif karbon örneğinde,  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı  $885 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak K1\_Z\_500 isimli aktif karbon örneklerinde gözlemlenmiştir. Böylelikle aynı kömür örneğinden elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon KOH ile kimyasal yöntemle elde edilmiştir.

Çizelge 7.32 K1 kömüründen  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında ( $500$ ,  $600$ ,  $700$  ve  $800^\circ\text{C}$ ) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | $r^2$ | Langmuir Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | $r^2$ |
|----------|-------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|-------|
| K1_P_500 | 630                                       | 0.998 | 923                                            | 0.999 |
| K1_P_600 | 483                                       | 0.998 | 703                                            | 0.999 |
| K1_P_700 | 636                                       | 0.999 | 933                                            | 0.999 |
| K1_P_800 | 361                                       | 0.999 | 535                                            | 0.999 |

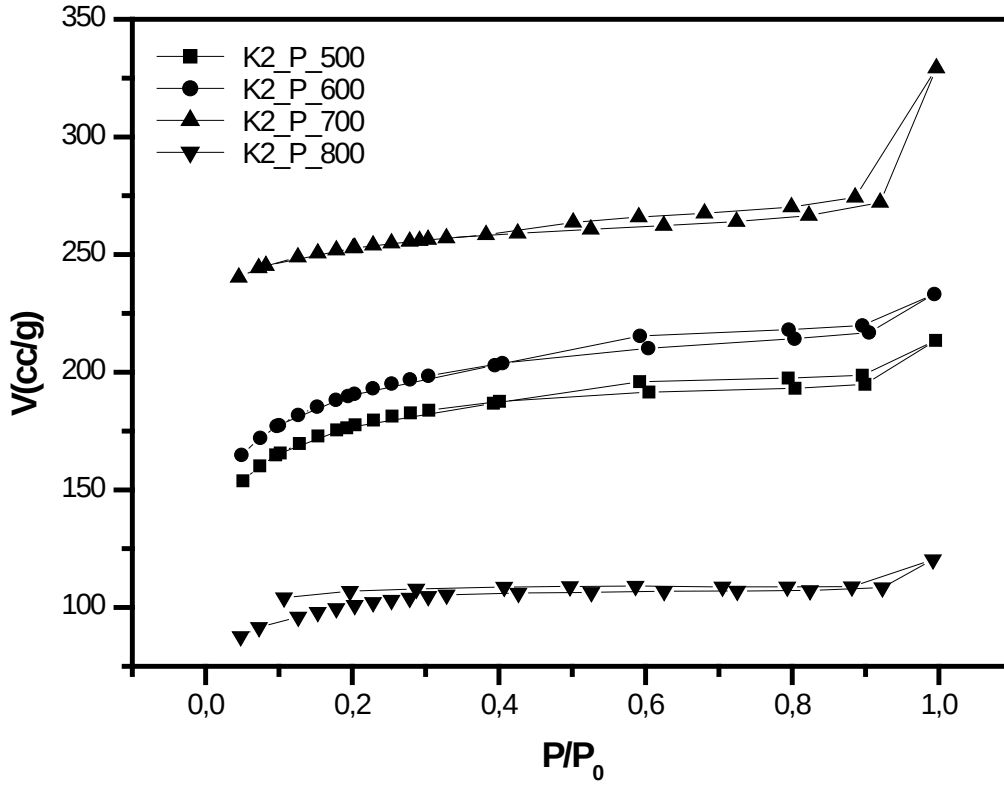
K1 kömüründen  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında ( $500$ ,  $600$ ,  $700$  ve  $800^\circ\text{C}$ ) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.33'de verilmiştir. K1\_P\_500 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla  $0.29 \text{ cc/g}$  ve  $588.2 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak belirlenmiştir.  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ile hazırlanan aktif karbonların diğer aktivasyon kimyasalları ile hazırlanan aktif karbonlardan daha düşük % mikro gözenek alanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. K1\_P\_700 isimli aktif karbon % 75 mikro gözenek alanına sahiptir. Aynı kömür numunesinden fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek mikro gözenek hacimli olanı K1\_700 isimli aktif karbon numunesi olup bu değer  $0.098 \text{ cc/g}$ 'dır. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacmi  $0.94 \text{ cc/g}$ , NaOH ile  $0.55 \text{ cc/g}$ ,  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak aktive edildiğinde ise  $0.42 \text{ cc/g}$  olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.33 K1 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( $P/P_0 > 0.2$ ).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | R <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K1_P_500 | 0.29                       | 588.2                                   | 41.73                                    | 0.96           |
| K1_P_600 | 0.23                       | 453.7                                   | 29.62                                    | 0.96           |
| K1_P_700 | 0.24                       | 476                                     | 161                                      | 0.99           |
| K1_P_800 | 0.18                       | 352                                     | 9.30                                     | 0.94           |

Şekil 7.20’de K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak kimyasal yöntemle, farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K’de  $N_2$  ile yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi verilmektedir. K1 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak elde edilen aktif karbonlarda görülen adsorpsiyon histerezisi bu aktif karbonlarda da gözlemlenmektedir. Burada da 800°C’de hazırlanan aktif karbonun desorpsiyon eğrisi diğer 3 sıcaklıkta hazırlanan aktif karbonların desorpsiyon eğrisinden farklıdır. K2\_Z\_800 isimli aktif karbonun izoterminde adsorplanan gaz farklı bir yol çizerek desorbe olmuştur.

K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal yöntemle farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin yüzey alanları BET ve Langmuir yüzey alanları Çizelge 7.34’de verilmiştir. Elde edilen 4 farklı aktif karbon numuneleri arasında en yüksek yüzey alanlı numune 700°C’de elde edilmiştir. En yüksek BET ve Langmuir yüzey alanları K2\_P\_700 isimli aktif karbon numunesi için sırasıyla 767 m<sup>2</sup>/g ve 1129 m<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiştir. Sıcaklık 800°C’ye çıktığında bu değerler sırasıyla 405 m<sup>2</sup>/g ve 606 m<sup>2</sup>/g değerlerine düşmüştür. Aynı kömür örneği fiziksel yolla aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 311 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_600 numunesinde, KOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1659 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_K\_700 isimli aktif karbon örneğinde, NaOH ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 1335 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_N\_700 isimli aktif karbon örneğinde,  $ZnCl_2$  ile kimyasal yöntemle aktive edildiğinde maksimum yüzey alanı 926 m<sup>2</sup>/g olarak K2\_Z\_400 isimli aktif karbon örneklerinde gözlemlenmiştir. Böylelikle K2 kömüründen elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon KOH ile kimyasal yöntemle elde edilmiştir.



Şekil 7.20 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile farklı sıcaklıklarda kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbon numunelerinin 77 K'de  $N_2$  gazı ile adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği.

Çizelge 7.34 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin BET ve Langmuir yüzey alanları.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | $r^2$ | Langmuir Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | $r^2$ |
|----------|-----------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| K2_P_500 | 570                         | 0.998 | 834                              | 0.999 |
| K2_P_600 | 616                         | 0.998 | 898                              | 0.999 |
| K2_P_700 | 767                         | 0.998 | 1129                             | 0.999 |
| K2_P_800 | 405                         | 0.998 | 606                              | 0.999 |

K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) hazırlanan aktif karbon numunelerinin mikro gözenek hacmi, mikro gözenek alanı ve external yüzey alanları Çizelge 7.35'de verilmiştir. En yüksek yüzey alanlı olarak elde edilen K2\_P\_700 isimli aktif karbon numunesi en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanına sahiptir. Bu değerler sırasıyla 0.36 cc/g ve 705  $m^2/g$  olarak belirlenmiştir. K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile hazırlanan aktif karbonlar K1 kömüründen aynı kimyasal aktivasyon ajanı ile hazırlanan aktif karbonlardan daha yüksek mikro gözenekli yapıdadırlar. K1\_P\_700

isimli aktif karbon % 75 mikro gözenek alanına sahipken, K2\_P\_700 isimli aktif karbon % 92 mikro gözenek alanına sahiptir. Aynı kömür numunesi KOH ile kimyasal olarak aktive edildiğinde en yüksek mikro gözenek hacmi 0.76 cc/g, NaOH ile 0.62 cc/g olarak belirlenmiştir. ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal olarak aktive edildiğinde ise en yüksek mikro gözenek hacimli olan aktif karbon K2\_Z\_400'dür ve bu değer 0.423 cc/g'dır. H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak K1 kömüründen elde edilen aktif karbon örneğinde en yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı sırasıyla 0.292 cc/g ve 588.2 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. K2 kömürü H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak aktive edildiğinde, K1 kömüründen daha yüksek mikro gözenek hacmi ve mikro gözenek alanı elde edilmiştir.

Çizelge 7.35 K2 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak farklı aktivasyon sıcaklıklarında (500, 600, 700 ve 800°C) kimyasal yolla elde edilen aktif karbon numunelerinin t-plot analiz sonuçları ( P/P<sub>0</sub> > 0.2).

| Örnekler | Mikro Gözenek Hacmi (cc/g) | Mikro Gözenek Alanı (m <sup>2</sup> /g) | External Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | r <sup>2</sup> |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| K2_P_500 | 0.27                       | 539.2                                   | 31.13                                    | 0.96           |
| K2_P_600 | 0.29                       | 576.3                                   | 39.46                                    | 0.94           |
| K2_P_700 | 0.36                       | 705                                     | 62                                       | 0.95           |
| K2_P_800 | 0.19                       | 378                                     | 26                                       | 0.98           |

### 7.1.2 Helyum Piknometresi İle Yoğunluk Ölçümleri

Karbon örneklerinin yoğunlukları helyum piknometresi kullanılarak belirlenmiştir. Çizelge 7.36'da karbon numunelerinin yoğunlukları verilmiştir. K1 ve K2 kömürünün yoğunluklarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir ve bu değerler sırasıyla 1.400 ve 1.375'dir. Çizelge incelendiğinde hemen hemen tüm karbonların yoğunluklarının genellikle 1-2 g/cc aralığında oldukları gözlemlenmektedir. K1\_K\_700 ve K1\_Z\_700 isimli aktif karbonların diğer karbonlara göre daha yüksek yoğunluklu oldukları belirlenmiştir.

Çizelge 7.36 Karbon numunelerinin yoğunlukları.

| K1 Karbonları | Yoğunluk (g/cc) | K2 Karbonları | Yoğunluk (g/cc) |
|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| K1            | 1.400           | K2            | 1.375           |
| K1_500        | 1.422           | K2_500        | 1.325           |
| K1_800        | 1.766           | K2_600        | 1.133           |
| K1_K_500      | 1.966           | K2_700        | 1.424           |
| K1_K_600      | 1.600           | K2_K_500      | 1.628           |
| K1_K_700      | 2.885           | K2_K_600      | 1.496           |
| K1_K_800      | 1.516           | K2_K_800      | 1.978           |
| K1_N_500      | 1.163           | K2_N_500      | 1.503           |
| K1_N_600      | 1.368           | K2_N_700      | 1.244           |
| K1_N_700      | 1.025           | K2_N_800      | 1.556           |
| K1_Z_400      | 1.160           | K2_Z_400      | 1.162           |
| K1_Z_500      | 1.075           | K2_Z_500      | 1.183           |
| K1_Z_700      | 2.444           | K2_Z_600      | 1.677           |
| K1_Z_800      | 1.315           | K2_Z_700      | 1.541           |
| K1_P_600      | 0.889           | K2_Z_800      | 1.567           |
| K1_CO2_800    | 1.780           | K2_P_600      | 1.483           |

### 7.1.3 Elde Edilen Aktif Karbonların Element Analizleri

Elde edilen aktif karbon numunelerinin CHNS elementel analizleri Elementar Analysensysteme GmbH vario MICRO CHNS cihazı ile yapılmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 7.37’de verilmiştir. Çizelgeden, elde edilen aktif karbonların oksijen içeriklerinin kömür numunelerine oranla arttıkları gözlemlenmiştir. Oksijen içerikleri fark alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.37 incelendiğinde K1 kömürü % 8.33, K2 kömürü ise % 8.02 oranında oksijen içerirken, bu kömürlerden fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilen aktif karbonların oksijen içeriklerinin arttıkları belirlenmiştir. Her iki kömürden hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek oksijen içeriklerinin KOH ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlarda olduğu gözlemlenmiştir. K1\_K\_700, K1\_K\_800, K2\_K\_700 ve K2\_K\_800 isimli aktif karbonların oksijen içerikleri sırasıyla % 43.37, 29.37, 46.45 ve 33.42 olarak belirlenmiştir. Bu aktif karbonlar, fiziksel yöntemle ve diğer aktivasyon kimyasallarıyla hazırlanan aktif karbonlardan daha yüksek yüzey alanına sahip aktif karbonlardır.

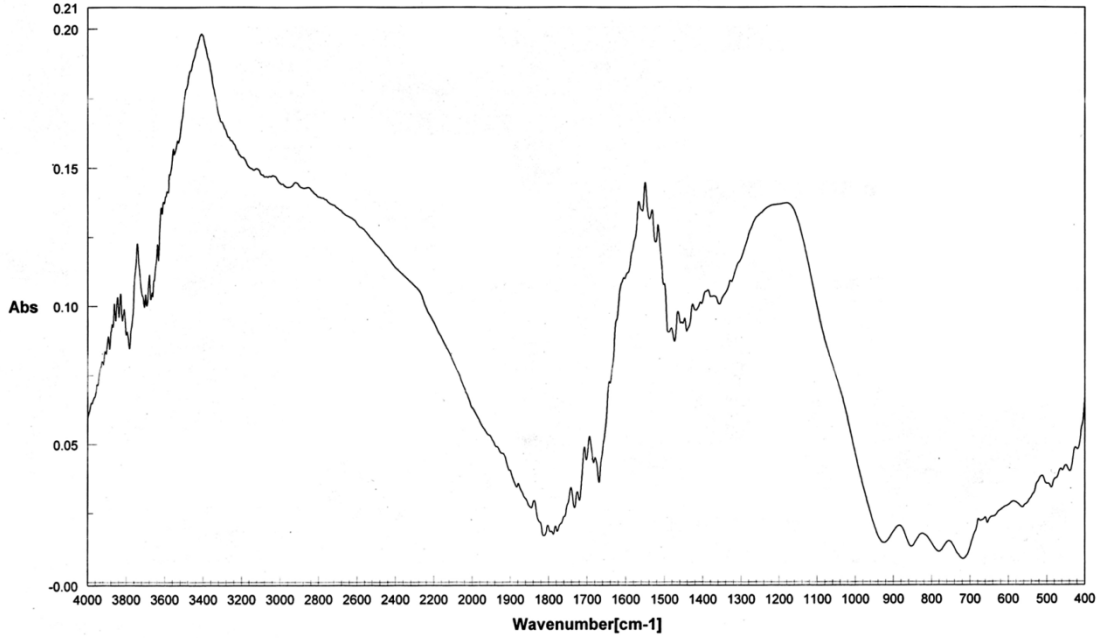
Çizelge 7.37 Karbon numunelerinin element analiz sonuçları.

| Numune   | %N   | %C    | %H   | %S   | %O    |
|----------|------|-------|------|------|-------|
| K1       | 1.16 | 85.45 | 4.64 | 0.43 | 8.32  |
| K1_600   | 1.04 | 84.64 | 2.79 | 0.37 | 11.16 |
| K1_700   | 1.16 | 87.34 | 1.87 | 0.40 | 9.23  |
| K1_K_700 | 0.25 | 52.78 | 3.47 | 0.13 | 43.37 |
| K1_K_800 | 0.41 | 67.27 | 2.71 | 0.25 | 29.37 |
| K1_N_700 | 0.34 | 72.76 | 1.79 | 0.27 | 24.84 |
| K1_N_800 | 0.53 | 77.72 | 1.86 | 0.19 | 19.70 |
| K1_Z_500 | 0.96 | 78.10 | 2.49 | 0.37 | 18.08 |
| K1_Z_600 | 0.90 | 82.23 | 2.34 | 0.45 | 14.08 |
| K1_P_500 | 0.85 | 79.18 | 2.78 | 0.32 | 16.87 |
| K2       | 1.05 | 85.63 | 4.70 | 0.60 | 8.02  |
| K2_600   | 0.97 | 87.33 | 2.61 | 0.51 | 8.58  |
| K2_700   | 1.08 | 87.87 | 1.76 | 0.52 | 8.77  |
| K2_K_700 | 0.45 | 49.97 | 3.03 | 0.10 | 46.45 |
| K2_K_800 | 0.28 | 64.36 | 1.76 | 0.18 | 33.42 |
| K2_N_600 | 0.34 | 67.37 | 2.66 | 0.13 | 29.50 |
| K2_N_700 | 0.33 | 77.45 | 1.40 | 0.13 | 20.69 |
| K2_Z_400 | 1.01 | 74.05 | 3.29 | 0.27 | 21.38 |
| K2_Z_500 | 0.86 | 74.87 | 2.83 | 0.39 | 21.05 |
| K2_P_500 | 0.70 | 69.12 | 2.94 | 0.19 | 27.05 |

#### 7.1.4 Elde Edilen Aktif Karbonların FTIR Analizleri

Kozlu kömürünün ve bu kömürden KOH ile elde edilen aktif karbon numunelerinin FTIR analizleri Jasco FTIR cihazı ile KBr tablet hazırlanarak elde edilmiştir. Bu yöntem ile kabaca kömürün yapısındaki fonksiyonel grupların değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 7.21’de K1 kömürüne ait FTIR spektrumu verilmiştir. Spektrumda 3410, 1741, 1694, 1550, 1517, 1465, 1387, 1181 ve 884  $\text{cm}^{-1}$ ’de piklerin varlığı dikkat çekmektedir. Buradaki piklerin; 3410  $\text{cm}^{-1}$ ’de OH gerilme piki, 1741  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=O gerilme piki (aldehit, keton ve ester), 1694  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=O gerilme piki, 1550  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=C aromatik, 1517  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=C aromatik, 1465  $\text{cm}^{-1}$ ’de  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  (asimetrik titreşim) ya da C=C aromatik iskelet gerilimi, 1387  $\text{cm}^{-1}$ ’de  $\text{CH}_3$  simetrik eğilme titreşimi, 1181  $\text{cm}^{-1}$ ’de C-O-C gerilme ya da C=C gerilme ya da O- $\text{CH}_3$

metoksil, 884  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-H aromatik halka dışı C-H eğilme titreşimi oldukları düşünülmektedir.

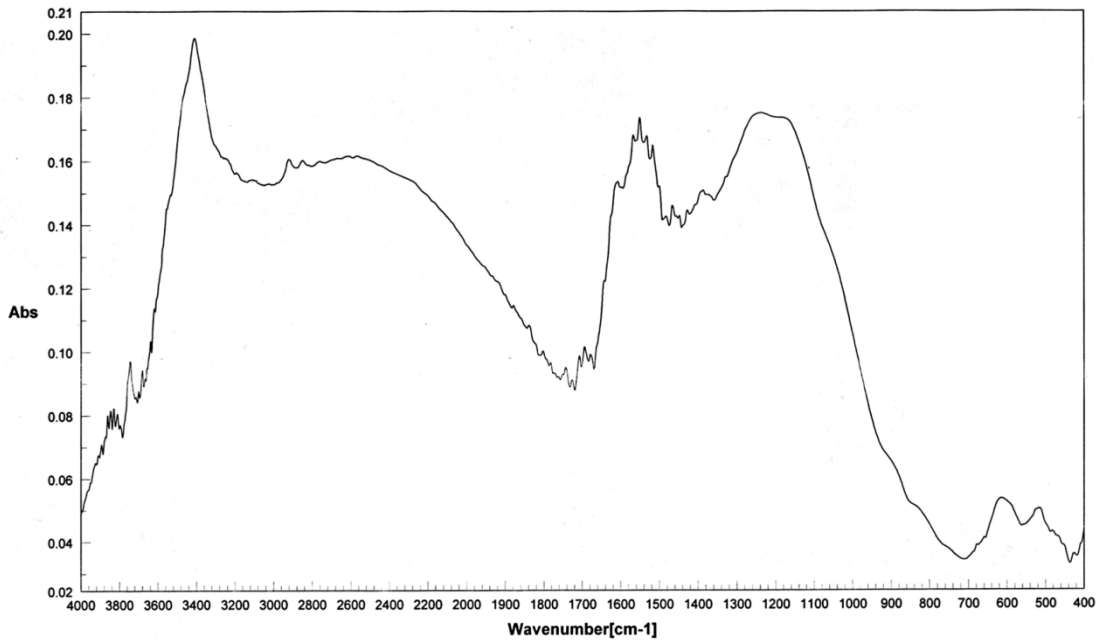


Şekil 7.21 Kozlu kömürünün (K1) FTIR spektrumu.

Şekil 7.22'de Kozlu kömüründen KOH ile kimyasal olarak 600°C'de elde edilen K1\_K\_600 isimli aktif karbona ait FTIR spektrumu görülmektedir. Spektrumda 3410, 1694, 1551, 1466, 1238 ve 614  $\text{cm}^{-1}$ 'de piklerin varlığı gözlemlenmektedir. Buradaki piklerin; 3410  $\text{cm}^{-1}$ 'de OH gerilme piki, 1694  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=O gerilme piki, 1551  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C aromatik, 1466  $\text{cm}^{-1}$ 'de  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  (asimetrik titreşim) ya da C=C aromatik iskelet gerilimi, 1238  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-O gerilme piki, 614  $\text{cm}^{-1}$ 'de O-H hidroksil gruplarında gerilme pikleri oldukları düşünülmektedir. Spektrum incelendiğinde; 3410  $\text{cm}^{-1}$ 'deki OH gerilme titreşimini ifade eden pikin şiddetini azaldığı, 1694  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=O gerilme pikinin ve 1550  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=C aromatik pikin şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir. 1741  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=O gerilme pikinin, 1387  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki  $\text{CH}_3$  eğilme titreşiminin, 1517  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=C aromatik pikin ve 884  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C-H eğilme pikinin kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni kömürün 600°C'de muamele edilmesi ve KOH gibi güçlü bir bazın karbon yapısını bozması olabilir.

Şekil 7.23'de Kozlu kömüründen KOH ile kimyasal olarak 700°C'de elde edilen K1\_K\_700 isimli aktif karbona ait FTIR spektrumu görülmektedir. Spektrumda 3411, 1707, 1694, 1612,

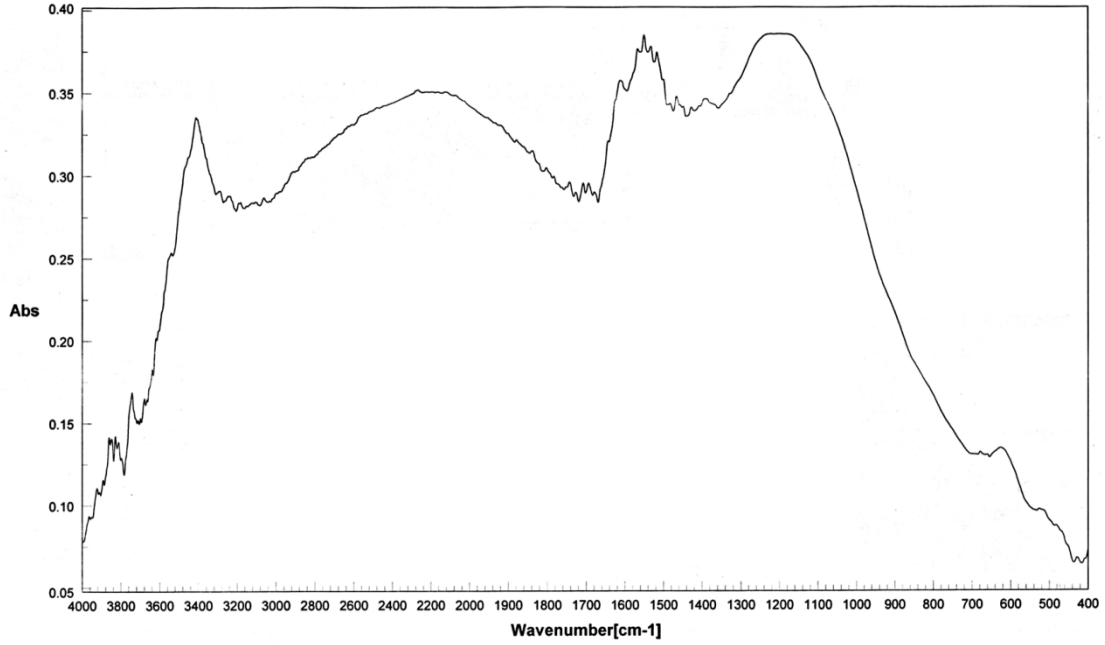
1550, 1517, 1465, 1388 ve 1196  $\text{cm}^{-1}$ 'de piklerin varlığı gözlemlenmektedir. Buradaki piklerin; 3411  $\text{cm}^{-1}$ 'de OH gerilme piki, 1707  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=O gerilme piki (aldehit, keton ve ester), 1694  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=O gerilme piki, 1612  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C iskelet gerilim piki, 1550  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C aromatik, 1517  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C aromatik, 1465  $\text{cm}^{-1}$ 'de  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  (asimetrik titreşim) ya da C=C aromatik iskelet gerilimi, 1388  $\text{cm}^{-1}$ 'de  $\text{CH}_3$  simetrik eğilme titreşimi, 1196  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-O-C gerilme ya da C=C gerilme ya da O- $\text{CH}_3$  metoksil piklerinden kaynaklandıkları düşünülmektedir. Spektrum incelendiğinde; Kozlu kömürü ve K1\_K\_600 isimli aktif karbonların spektrumlarına göre 3410  $\text{cm}^{-1}$ 'deki OH gerilme titreşimini ifade eden pikin şiddetinin azaldığı, 1694  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=O gerilme pikinin ve 1550  $\text{cm}^{-1}$ 'de ki C=C aromatik pikin şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kömür numunesinde gözlenen 884  $\text{cm}^{-1}$ 'deki C-H eğilme piki ve K1\_K\_600 isimli aktif karbondaki gözlenen 614  $\text{cm}^{-1}$ 'deki O-H gerilme piklerinin kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni bu aktif karbonun 700°C gibi yüksek bir sıcaklıkta elde edilmiş olması olabilir.



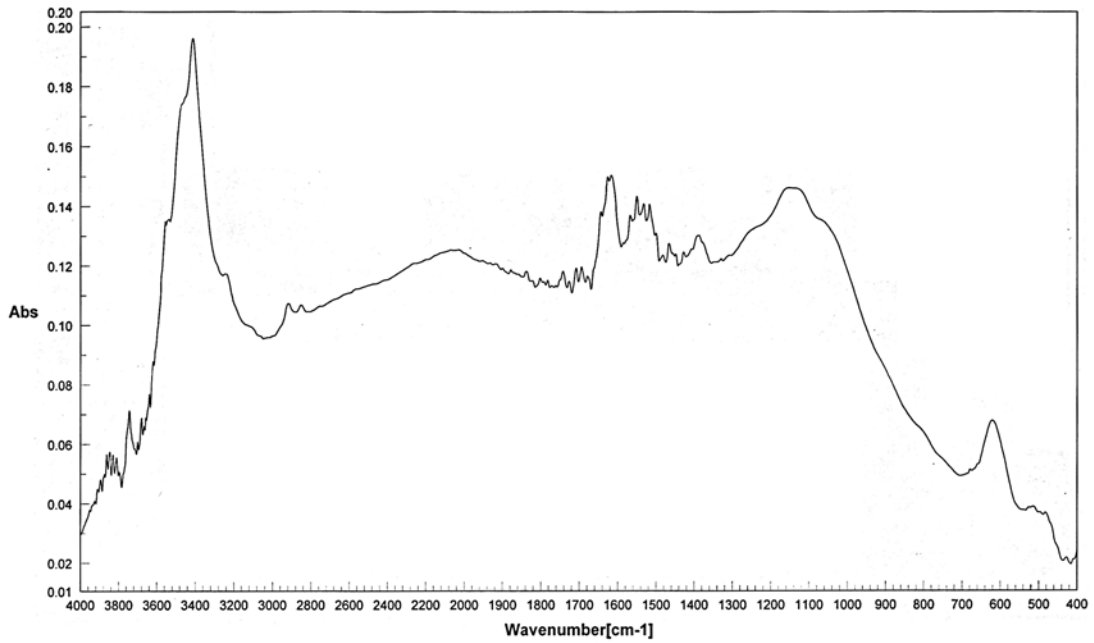
Şekil 7.22 K1\_K\_600 numunesinin FTIR spektrumu.

Şekil 7.24'de Kozlu kömüründen KOH ile kimyasal olarak 800°C'de elde edilen K1\_K\_800 isimli aktif karbona ait FTIR spektrumu görülmektedir. Spektrumda 3413, 1617, 1550 ve 1150  $\text{cm}^{-1}$ 'de piklerin varlığı gözlemlenmektedir. Buradaki piklerin; 3413  $\text{cm}^{-1}$ 'de OH gerilme piki, 1617  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C iskelet gerilim piki, 1550  $\text{cm}^{-1}$ 'de C=C aromatik,

1150  $\text{cm}^{-1}$ 'de C-O-C gerilme ya da C=C gerilme ya da O-CH<sub>3</sub> metoksil pikleri oldukları düşünülmektedir. Spektrum, Kozlu kömürünün spektrumu ile karşılaştırıldığında yapının oldukça değişmiş olduğu ve pik şiddetlerinin zayıfladığı gözlemlenmektedir.



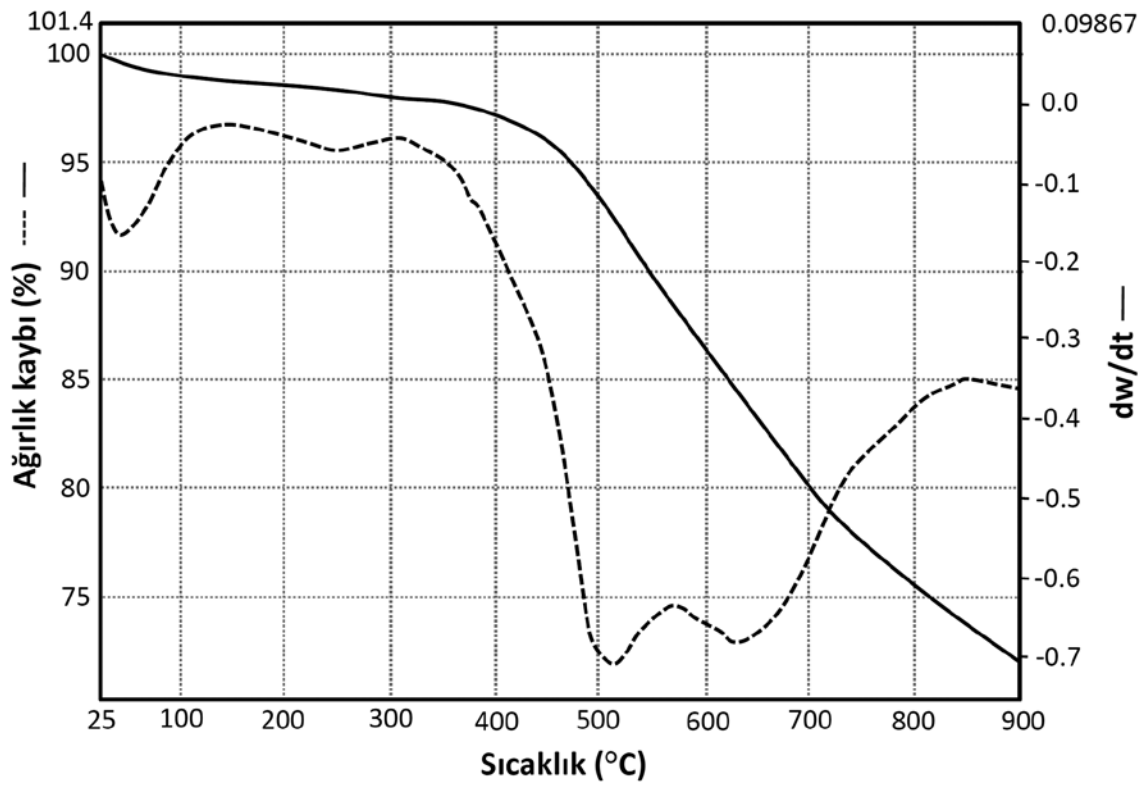
Şekil 7.23 K1\_K\_700 numunesinin FTIR spektrumu.



Şekil 7.24 K1\_K\_800 numunesinin FTIR spektrumu.

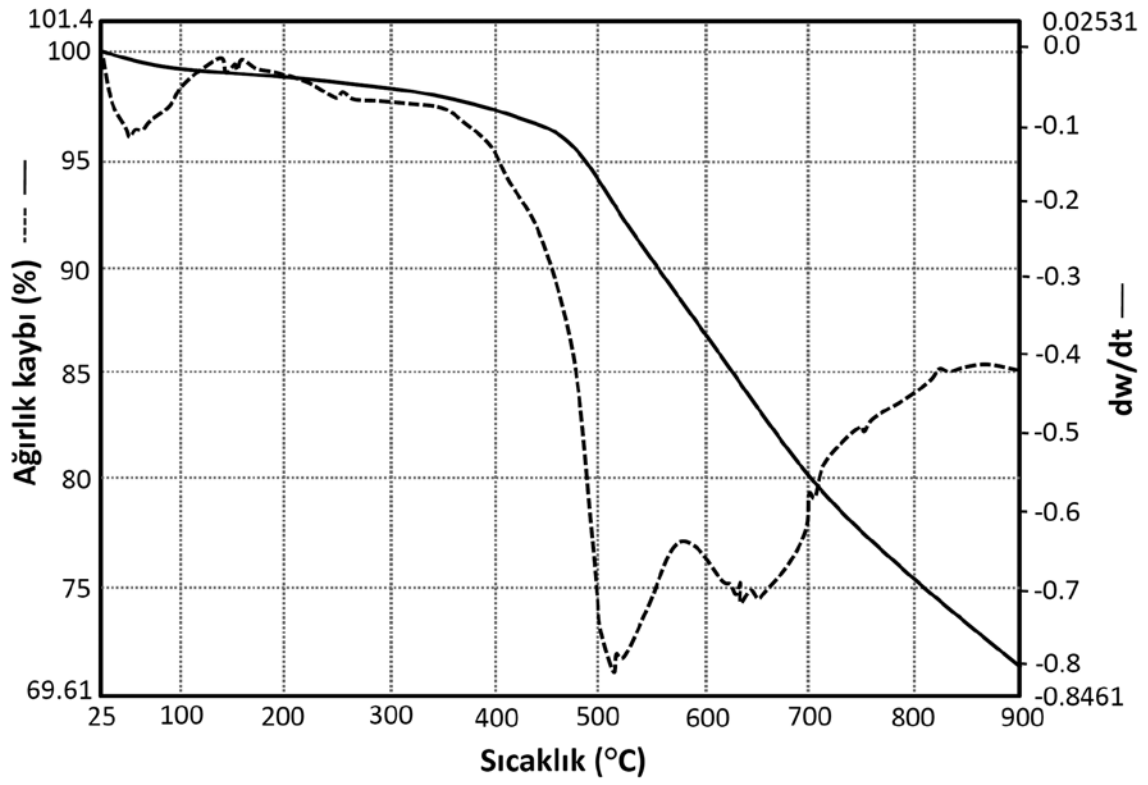
### 7.1.5 Elde Edilen Aktif Karbonların TGA Analizleri

Şekil 7.25 ve 7.26’da kül oranları düşürülmüş sırasıyla K1 (Kozlu) ve K2 (Karadon) kömürlerine ait TGA eğrileri verilmiştir. Numuneler tipik bir kömüre ait davranış göstermiş ve yaklaşık 100°C’ye kadar bünyelerinde bulunan suyu yitirmişlerdir. Her iki kömür numunesinde de 400°C’ye kadar ağırlık kaybında bir değişme olmamış, 400°C’den sonra kömür numunelerinin bünyesindeki uçucuların kaybına bağlı olarak ağırlık kaybında artış gözlemlenmiştir. K1 ve K2 numunelerinin 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 27.5 olarak belirlenmiştir.

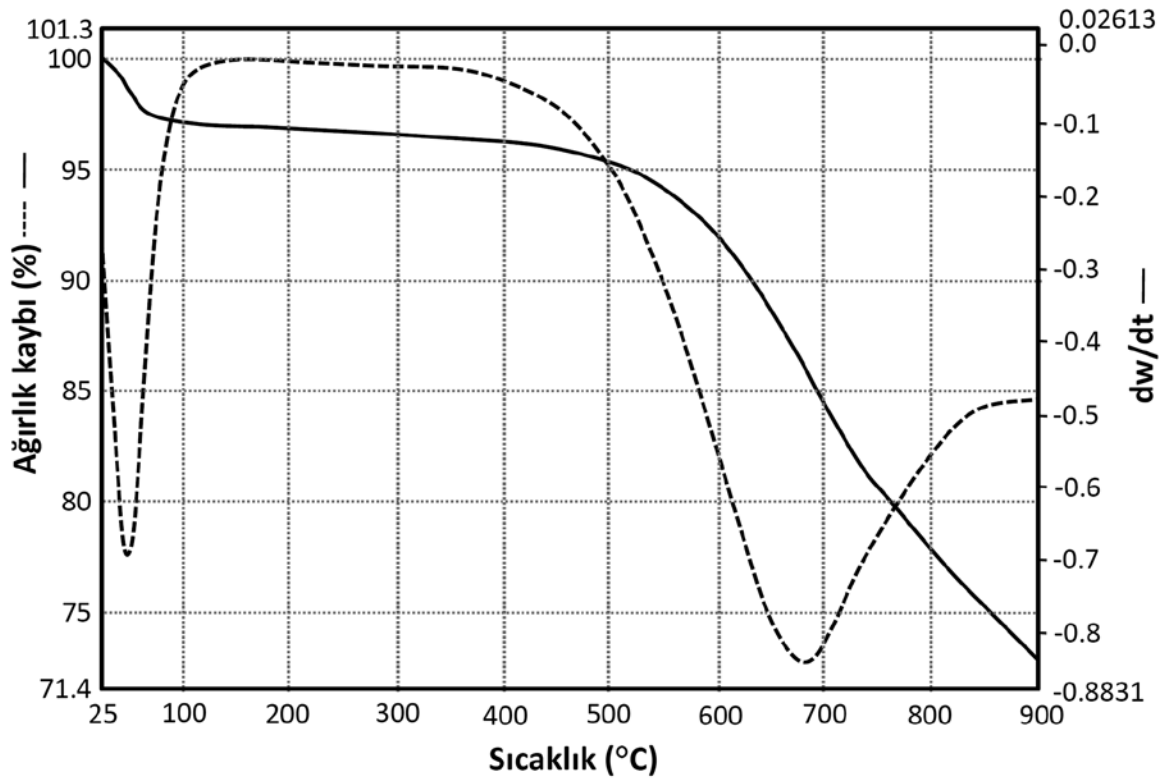


Şekil 7.25 K1 numunesine ait TGA eğrileri.

Şekil 7.27’de K1 kömüründen N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 600°C’de üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı verilmiştir. Bu numune de 100°C’ye kadar bünyesinde bulunan suyu yitirmiştir. Numune N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 600°C’de işlem görürken uçucuların bir kısmını yitirdiğinden dolayı kalan uçucuların 500°C’den sonra yapıdan ayrıldıkları gözlemlenmektedir. Ağırlık kaybı hızı yaklaşık olarak K1 kömüründeki gibi gerçekleşmiş ve 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 27 olarak belirlenmiştir.

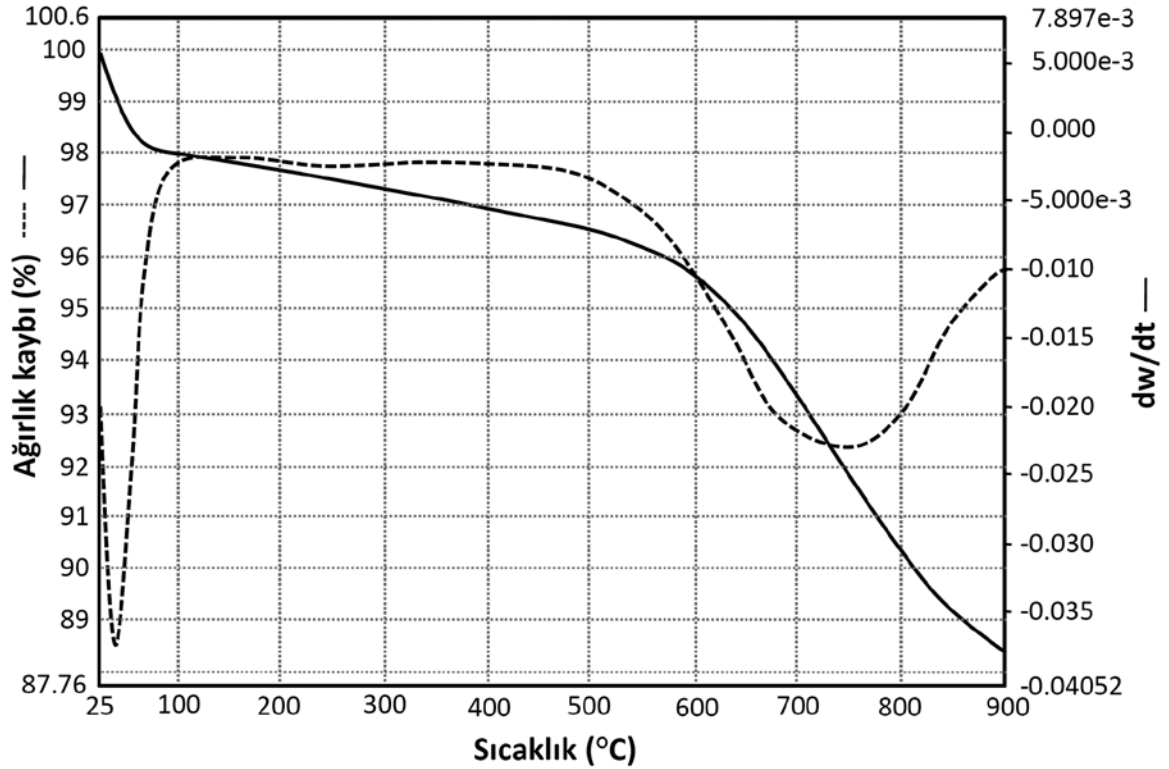


Şekil 7.26 K2 numunesine ait TGA eğrileri.



Şekil 7.27 K1\_600 numunesine ait TGA eğrileri.

Şekil 7.28’de K2 kömüründen N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 600°C’de üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı verilmiştir. Bu numunede kömür numuneleri ve K1 kömüründen aynı şartlarda elde edilmiş numune gibi 100°C’ye kadar bünyesinde bulunan suyu yitirmiştir. Ağırlık kaybı önceki üç numuneden daha az gerçekleşmiş ve 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 12 olarak belirlenmiştir. Bu da numunenin sıcaklığa karşı diğer üç numuneden daha dayanıklı olduğunu göstermiştir.

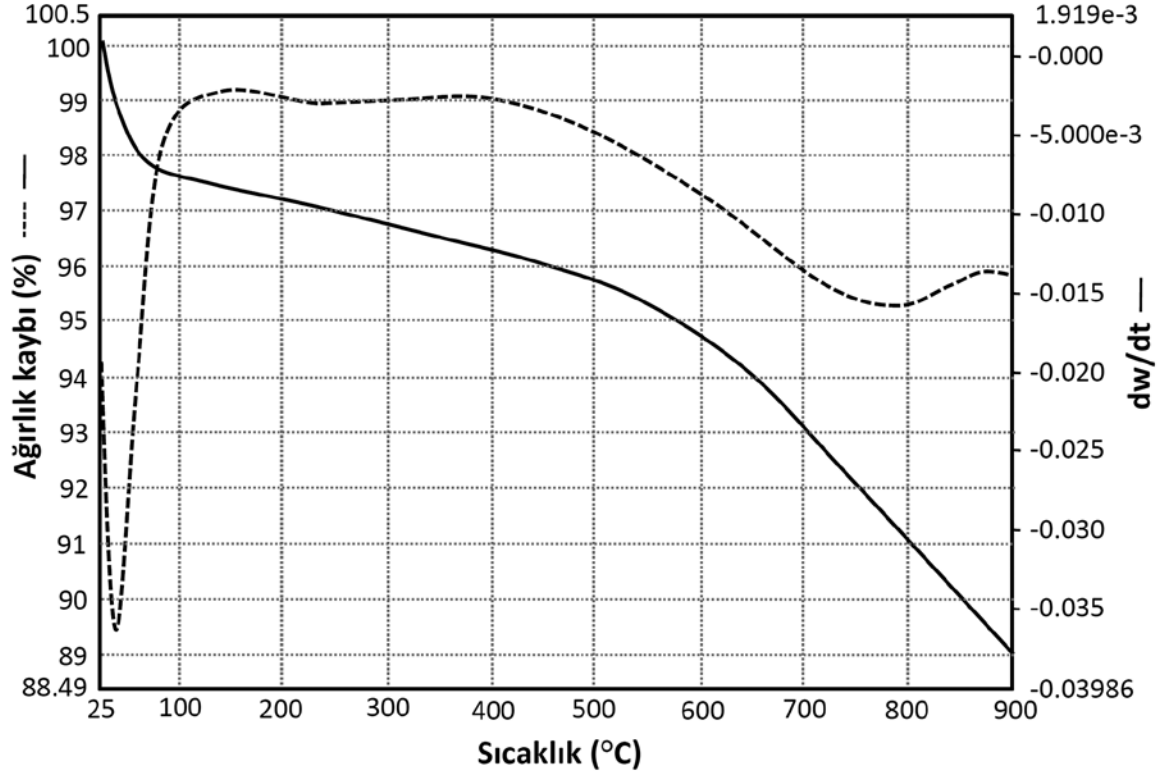


Şekil 7.28 K2\_600 numunesine ait TGA eğrileri.

Şekil 7.29’da K1 kömüründen N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 700°C’de üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı verilmiştir. Bu numune de 100°C’ye kadar bünyesinde bulunan suyu yitirmiştir. Numune N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 700°C’de işlem görürken uçucuların bir kısmını yitirdiğinden dolayı ağırlık kaybı hızı K1 kömüründen daha yavaş gerçekleşmiş ve 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 11 olarak belirlenmiştir.

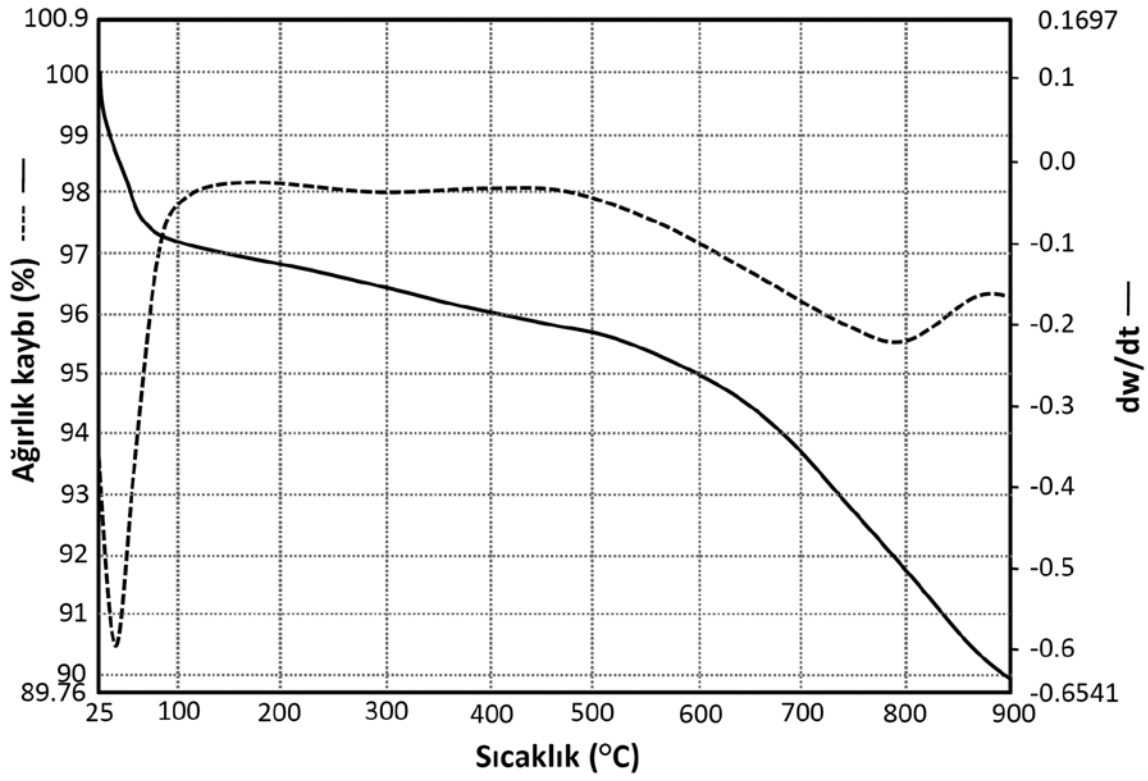
Şekil 7.30’da K2 kömüründen N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 700°C’de üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar bünyesinde bulunan suyu yitirmiştir. Ağırlık kaybı hızı K2 kömüründen daha yavaş, aynı şartlarda K1 kömüründen elde

edilen aktif karbonla benzer gerçekleşmiştir. Numune N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak 700°C’de işlem görürken uçucuların bir kısmını yitirdiğinden dolayı 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 10 olarak belirlenmiştir.

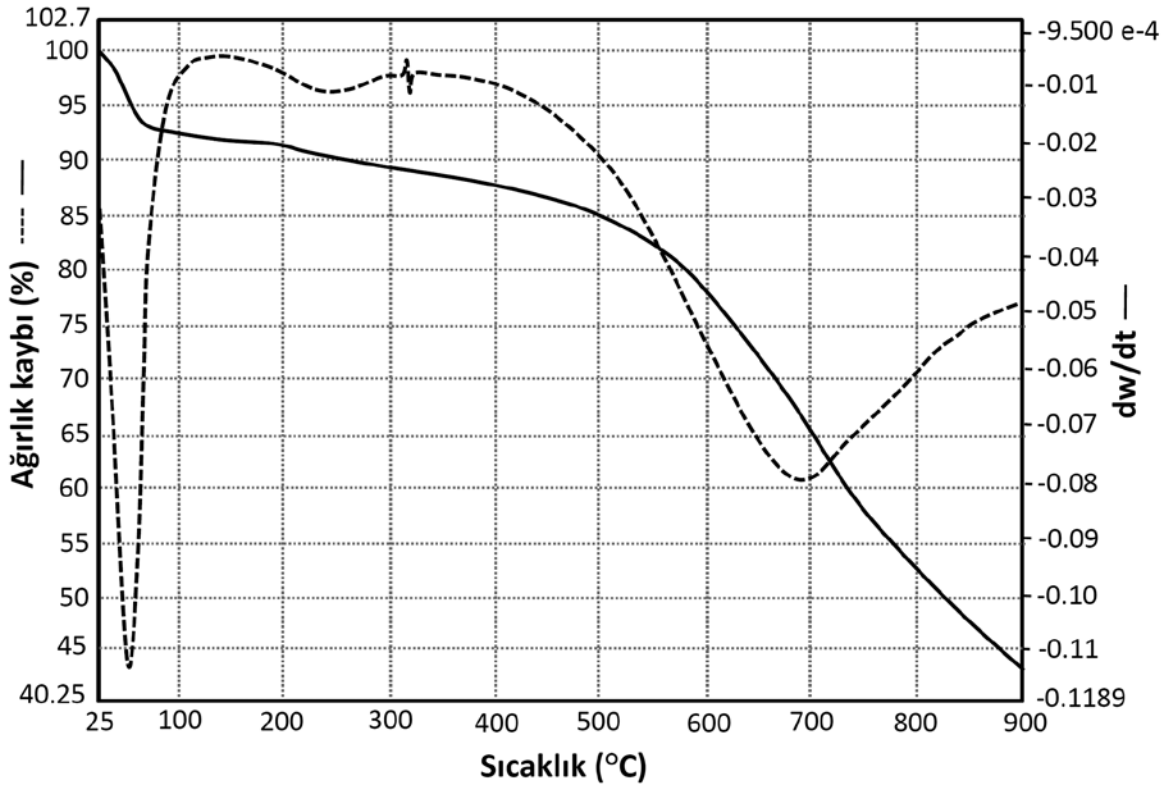


Şekil 7.29 K1\_700 numunesine ait TGA eğrileri.

K1 kömüründen KOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.31’de verilmiştir. Bu numunede 150°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 7.5 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 150-500°C arasındaki sıcaklıklarda ise toplam ağırlık kaybı % 7.5 olmuş ve daha yavaş meydana gelmiştir. 500°C’den sonra ağırlık kaybının hızlı bir biçimde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. 150°C’ye kadar olan ağırlık kaybının, numunenin bünyesindeki sudan ve KOH’un dehidrasyonundan kaynaklanan sudan meydana geldiği bilinmektedir. K1 kömüründe 400°C’ye kadar görülmeyen ağırlık kaybının, KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunesinde görülmesinin nedeni yine KOH’un dehidrasyonu ve hidrojen kaybıdır. Bunun nedeni kömürün yapısına bağlı –H’li grupların –OK gruplarıyla yer değiştirmesidir (Hsu and Teng 2000). 500°C’nin üstündeki sıcaklıklarda hızla gerçekleşen ağırlık kaybının çeşitli uçuculardan kaynaklandığı söylenebilir. K1 kömüründen KOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 57 olarak belirlenmiştir.

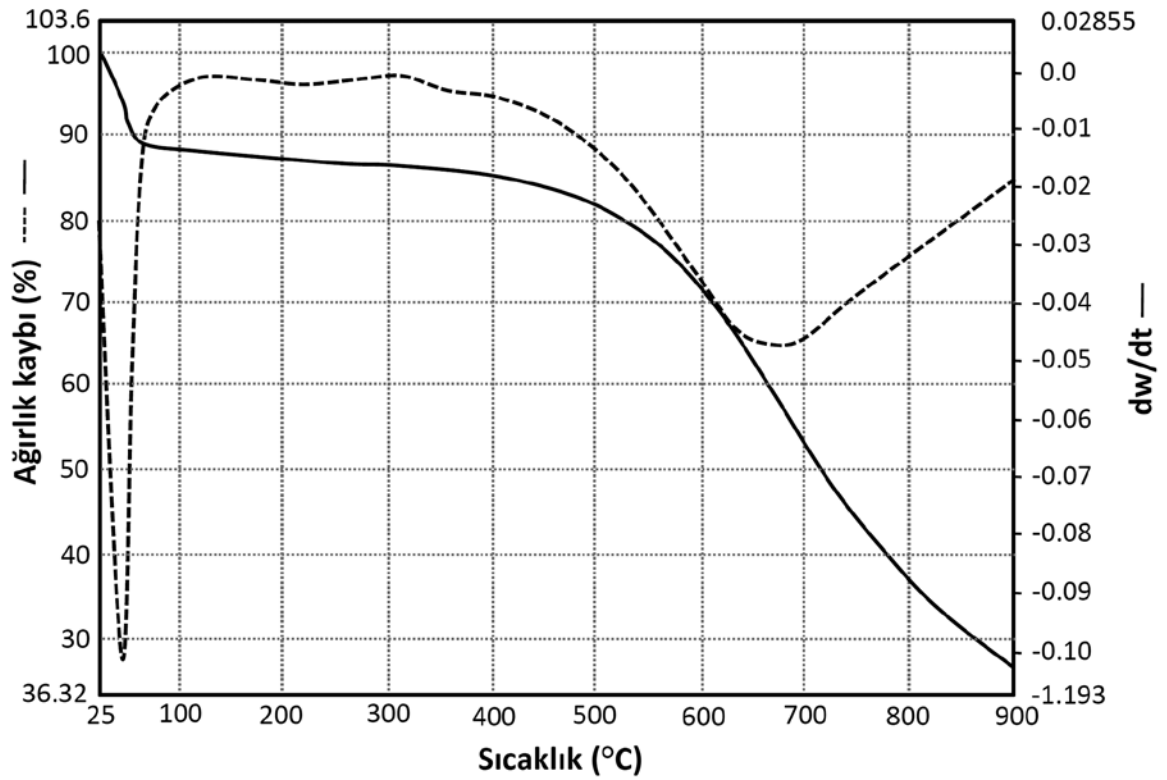


Şekil 7.30 K2\_700 numunesine ait TGA eğrileri.



Şekil 7.31 K1\_K\_700 numunesine ait TGA eğrileri.

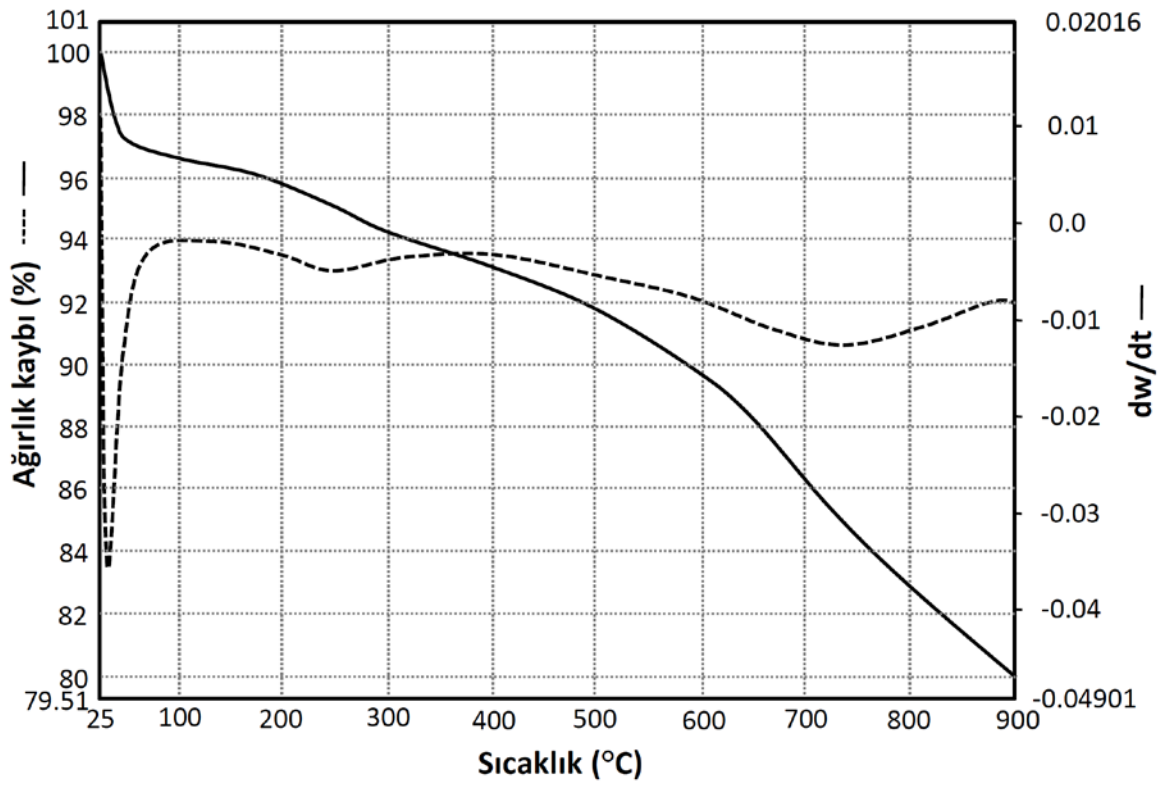
K2 kömüründen KOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.32’de verilmiştir. Bu numunede 150°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 12.5 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu değer aynı şartlarda K1 kömüründen üretilen aktif karbon numunesinden 1.7 kat daha fazladır. 150-500°C arasındaki sıcaklıklarda ise toplam ağırlık kaybı % 5 olmuş ve daha yavaş meydana gelmiştir. Sıcaklık 500°C’yi geçtikten sonra ağırlık kaybının hızlı bir biçimde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Bu numunenin TGA diyagramı aynı şartlarda K1 kömüründen üretilen aktif karbonun TGA diyagramına benzemektedir. Burada da 500°C’nin üstündeki sıcaklıklarda hızla gerçekleşen ağırlık kaybının çeşitli uçuculardan kaynaklandığı söylenebilir. K2 kömüründen KOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 72 olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı şartlarda K1 kömüründen üretilen aktif karbonun ağırlık kaybının 1.3 katıdır.



Şekil 7.32 K2\_K\_700 numunesine ait TGA eğrileri.

K1 kömüründen KOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.33’de verilmiştir. Bu numunede 150°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 3.8 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu değer her iki kömürden de

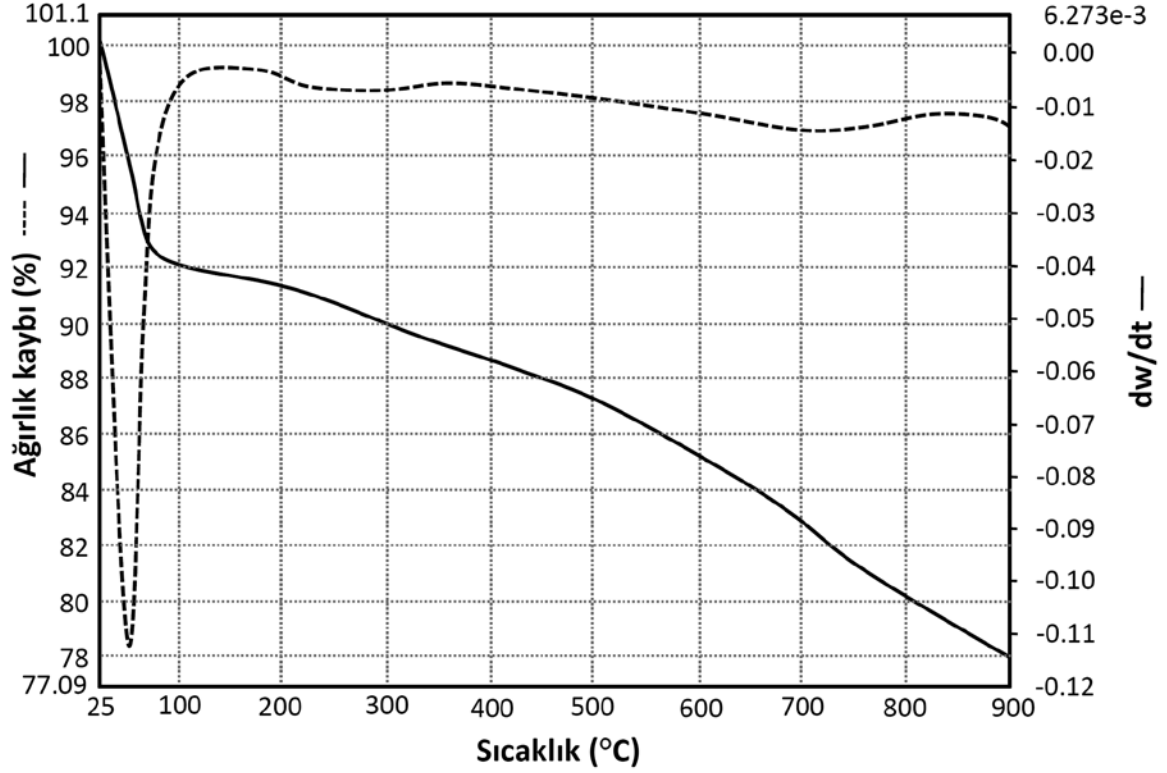
700°C’de üretilen aktif karbon numunelerinininkinden azdır. 150°C’den sonra ağırlık kaybı yavaş bir şekilde 900°C’ye kadar gerçekleşmiştir. K1 kömüründe 400°C’ye kadar görülmeyen ağırlık kaybının, KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunesinde görülmesinin nedeni yine KOH’un dehidrasyonu ve hidrojen kaybıdır. Bunun nedeni kömürün yapısına bağlı –H’li grupların –OK gruplarıyla yer değiştirmesidir (Hsu and Teng 2000). K1 kömüründen KOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 20 olarak belirlenmiştir. Bu değer K1 kömüründen 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun toplam ağırlık kaybının yaklaşık 1/3’ü kadardır.



Şekil 7.33 K1\_K\_800 numunesine ait TGA eğrileri.

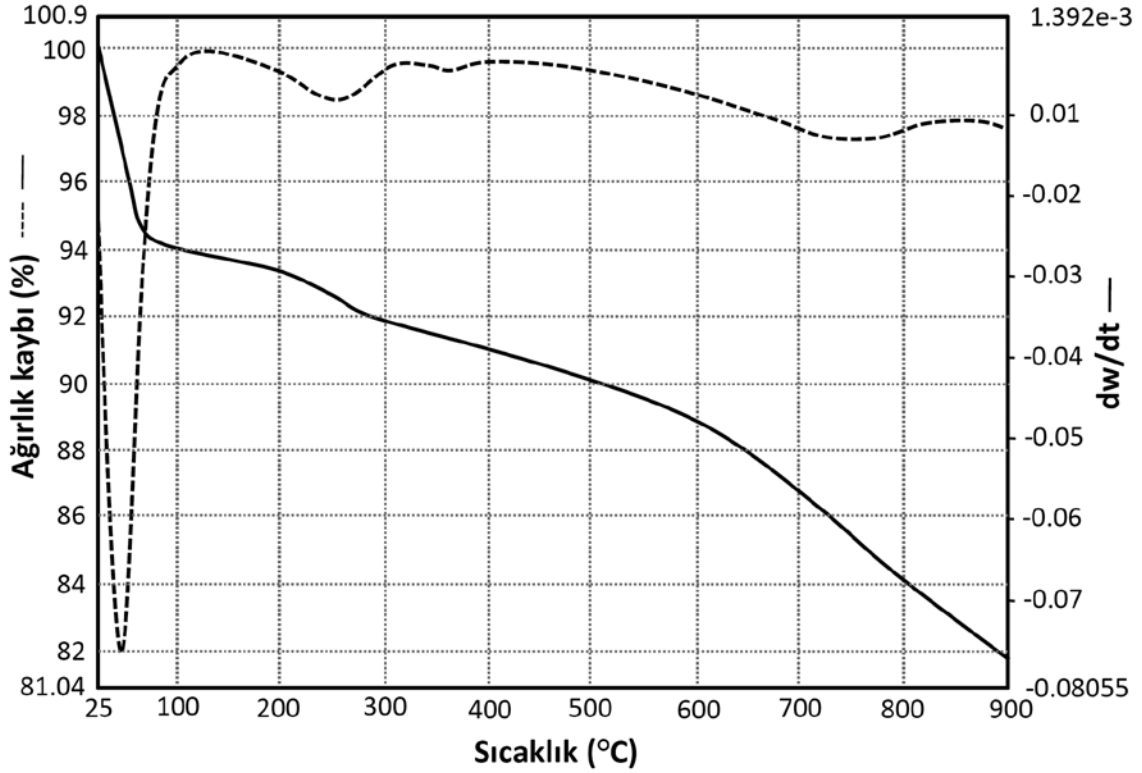
K2 kömüründen KOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.34’de verilmiştir. Bu numunede 150°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 8.4 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu değer K1 kömüründen 800°C’de üretilen aktif karbon numunesinininkinden 2.2 kat fazladır. 150°C’den sonra ağırlık kaybı yavaş bir şekilde 900°C’ye kadar gerçekleşmiştir. Bu numunenin TGA diyagramı aynı şartlarda K1 kömüründen üretilen aktif karbon numunesinin TGA diyagramına benzerlik göstermektedir. K2 kömüründen KOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki

toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 22 olarak belirlenmiştir. Bu değer K2 kömüründen 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbon için % 72 iken, aynı şartlarda K1 kömüründen üretilen aktif karbon için % 20’dir.



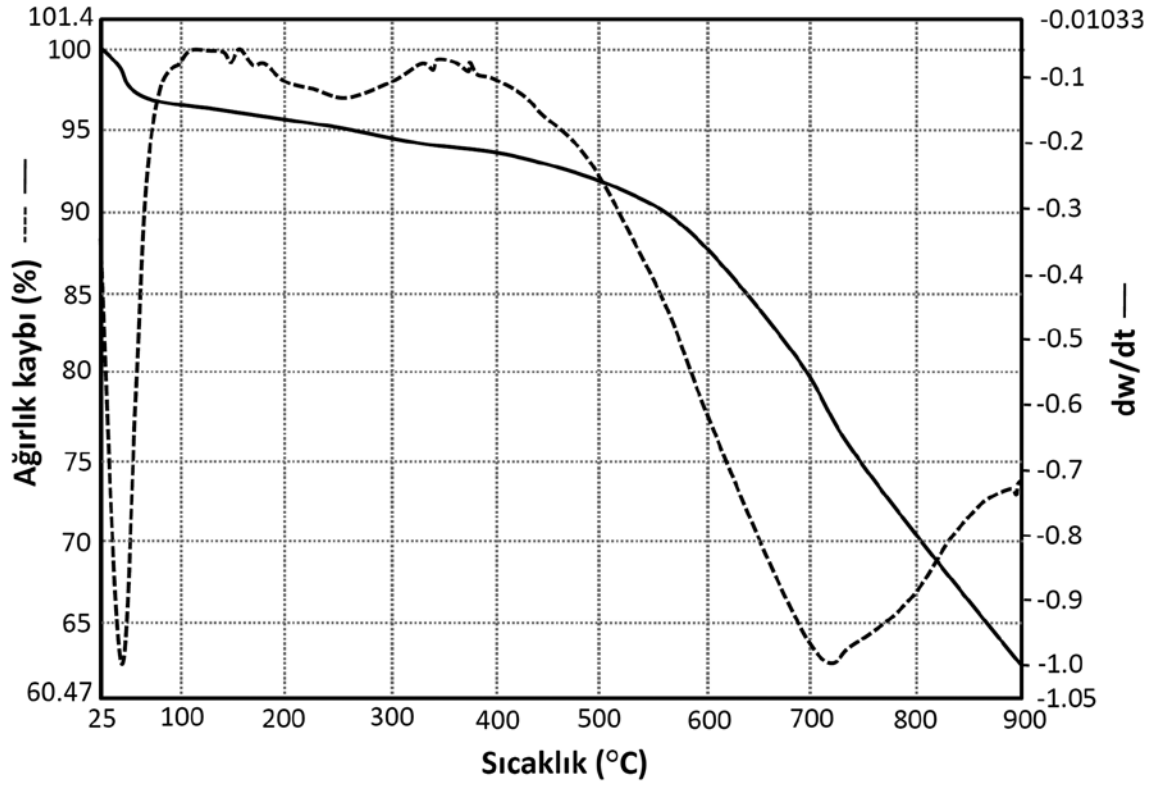
Şekil 7.34 K2\_K\_800 numunesine ait TGA eğrileri.

K1 kömüründen NaOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.35’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 6 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 100°C’den sonraki ağırlık kaybının yavaş bir şekilde 900°C’ye kadar olduğu görülmektedir. K1 kömüründe 400-600°C aralığında gözlenen hızlı ağırlık kaybı K1\_N\_700 numunesinde gözlemlenmemiştir. Bunun nedeni katrana bağlı ürünlerin numunenin bünyesine bağlanması olabilir. Bu durum KOH ile hazırlanan aktif karbon numunelerinde de gözlemlenmiştir. K1 (Kozlu) kömüründen NaOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 18 olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı sıcaklıkta KOH ile hazırlanan aktif karbon örneklerinden oldukça küçüktür. Yani 700°C’de NaOH ile kimyasal olarak hazırlanan aktif karbonun KOH ile hazırlananlara göre daha yüksek düzeyde kömürün uçucu ürünlerini bastırıldığı veya kömürü bünyesine daha iyi bağladığı söylenebilir.



Şekil 7.35 K1\_N\_700 numunesine ait TGA eğrileri.

K2 kömüründen NaOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.36’da verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 3.4 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu değer aynı şartlarda K1 kömüründen hazırlanan aktif karbona oranla düşüktür. 100-600°C sıcaklık aralığında ağırlık kaybının yavaş olduğu, 600-800°C sıcaklık aralığında ise hızlı olduğu gözlemlenmiştir. K2 kömüründe 400-600°C aralığında gözlenen hızlı ağırlık kaybı K2\_N\_700 numunesinde gözlemlenmemiştir. Bunun nedeni de katrana bağlı ürünlerin numunenin bünyesine bağlanması olabilir. K2 kömüründen NaOH ile 700°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 37 olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı sıcaklıkta NaOH ile K1 kömüründen hazırlanan aktif karbon örneğinin ağırlık kaybının 2 katından fazladır. Yani 700°C’de NaOH ile K1 kömüründen kimyasal olarak hazırlanan aktif karbonun bu numuneye göre kömürü bünyesine daha iyi bağladığı söylenebilir.

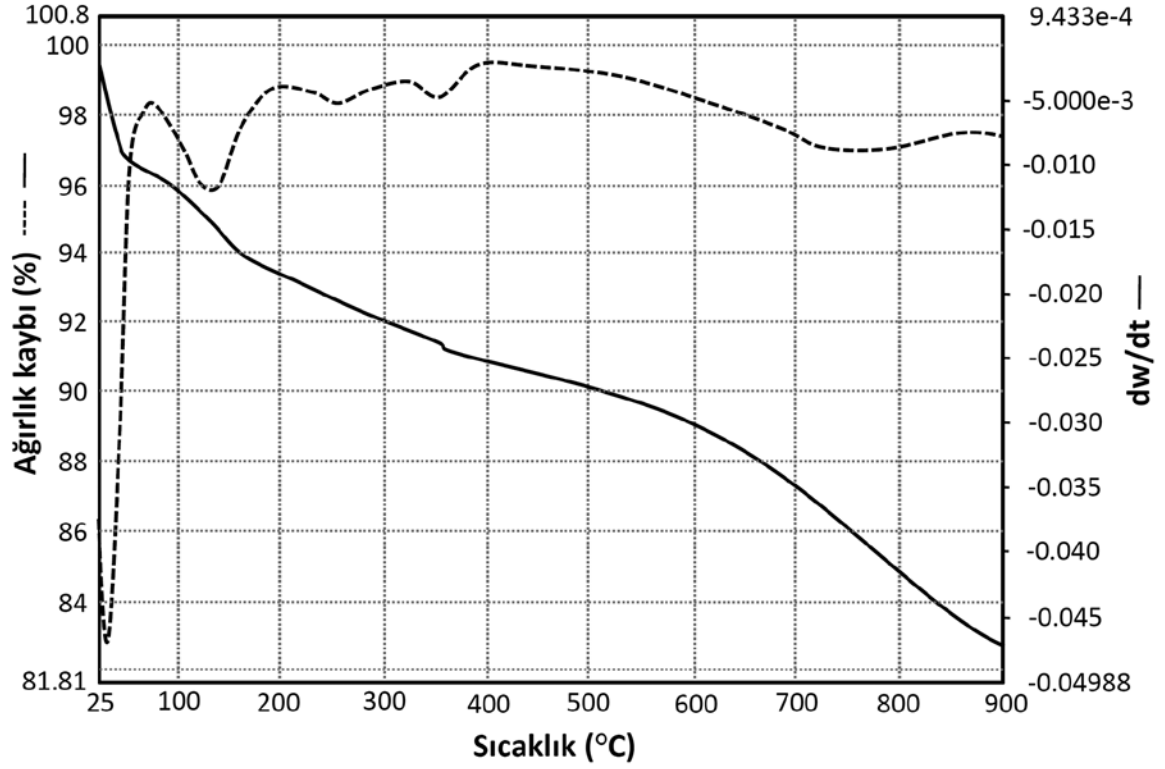


Şekil 7.36 K2\_N\_700 numunesine ait TGA eğrileri.

K1 kömüründen NaOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.37’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 4 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 100-300°C sıcaklık aralığında 2 tane dw/dt piki gözlemlenmiştir. NaOH nem çekici olduğundan bu sıcaklık aralığında bu piklerin nemin uzaklaşma pikleri oldukları söylenebilir. 300-400°C sıcaklık aralığında yapıda bulunan uçucuların uzaklaştıkları söylenebilir (Hsu and Teng 2000). 600-800°C sıcaklık aralığında ise yapıdan karbon oksitlerin uzaklaşmış olabilecekleri söylenebilir. K1 kömüründen NaOH ile 800°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 15 olarak belirlenmiştir.

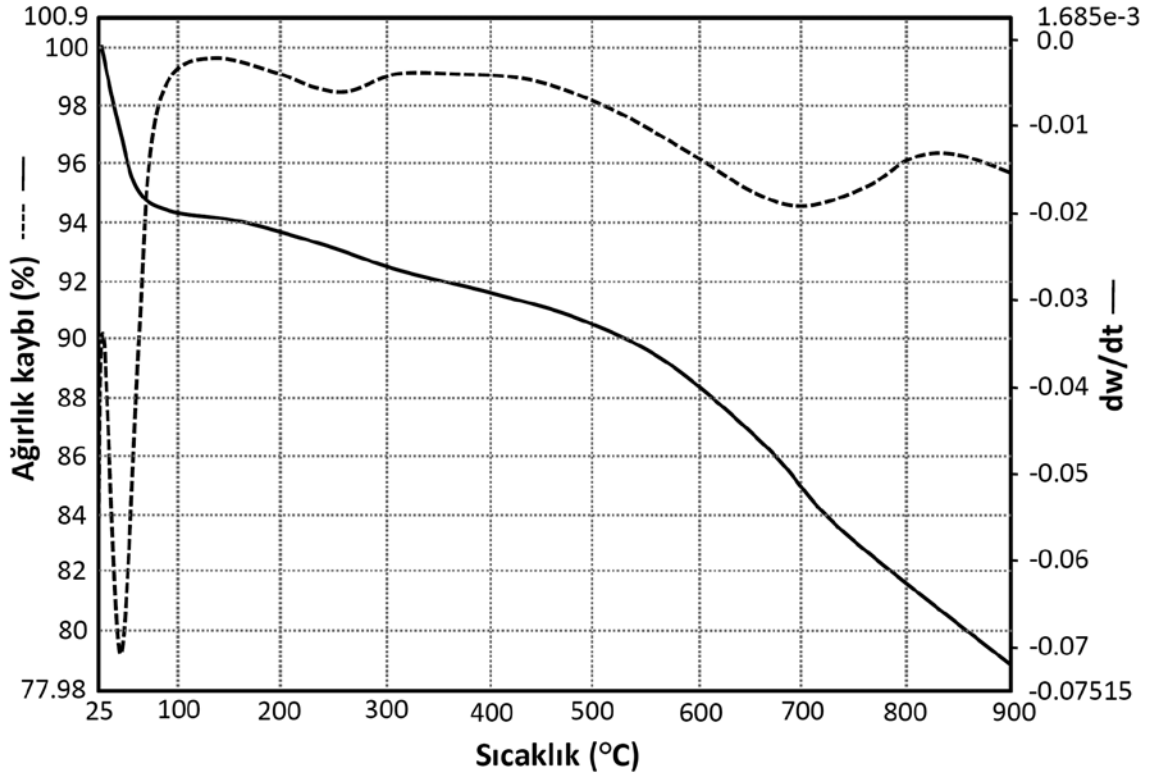
K2 kömüründen NaOH ile 600°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.38’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 5.5 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 200-300°C sıcaklık aralığında 1 tane dw/dt piki gözlemlenmiştir. NaOH nem çekici olduğundan bu sıcaklık aralığında bu pikin nemin uzaklaşma piki veya uçucuların uzaklaşma piki oldukları söylenebilir. 600-800°C sıcaklık aralığında ise yapıdan karbon oksitlerin uzaklaşmış

olabilecekleri söylenebilir (Hsu and Teng 2000). K2 kömüründen NaOH ile 600°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 19 olarak belirlenmiştir.

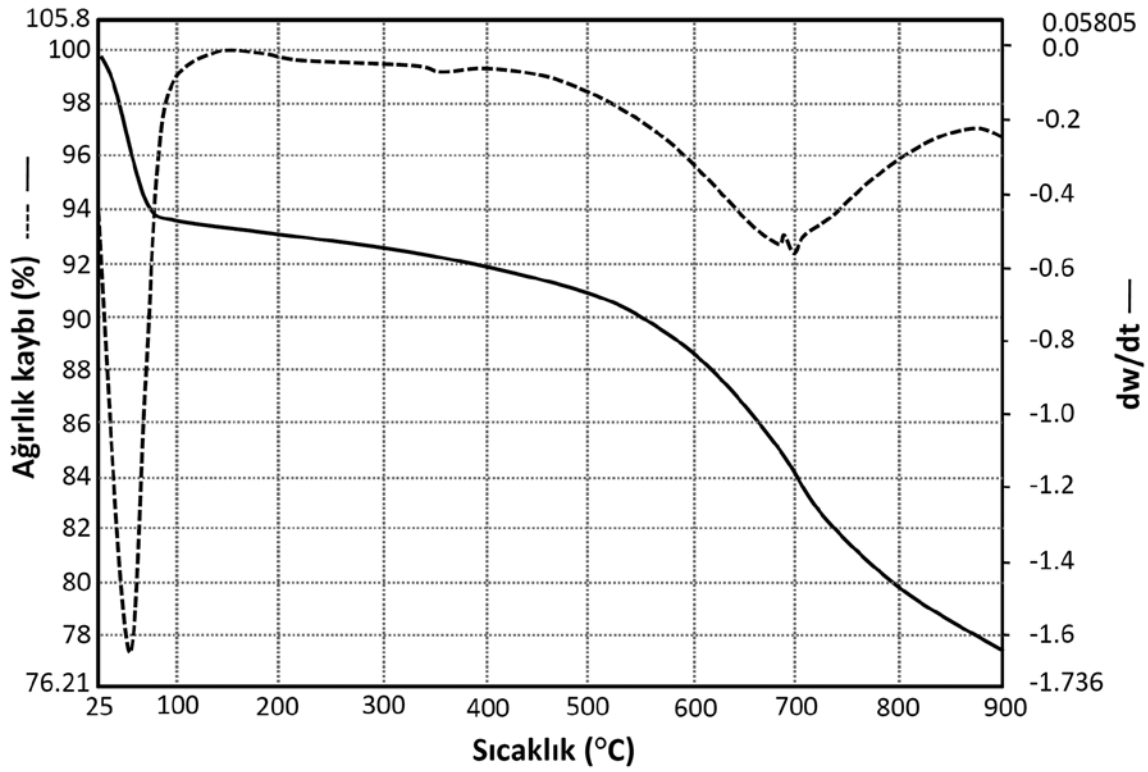


Şekil 7.37 K1\_N\_800 numunesine ait TGA eğrileri.

K1 kömüründen  $ZnCl_2$  ile 500°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.39’da verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 6.5 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 500°C’ye kadar çok fazla ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir. 600-800°C sıcaklık aralığında hızlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da uçuculardan veya sıvı fazdaki çinko klorürün buharlaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. (Hsu and Teng 2000). K1 kömüründen  $ZnCl_2$  ile 500°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 23 olarak belirlenmiştir.

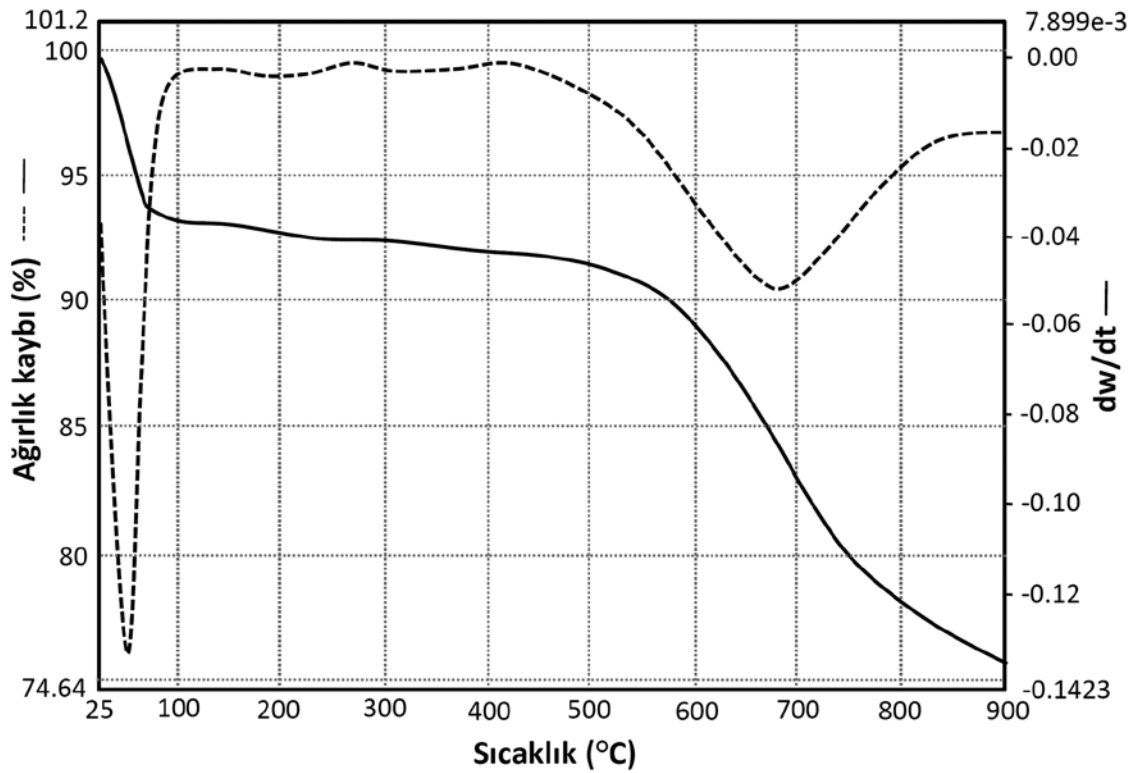


Şekil 7.38 K2\_N\_600 numunesine ait TGA eğrileri.



Şekil 7.39 K1\_Z\_500 numunesine ait TGA eğrileri.

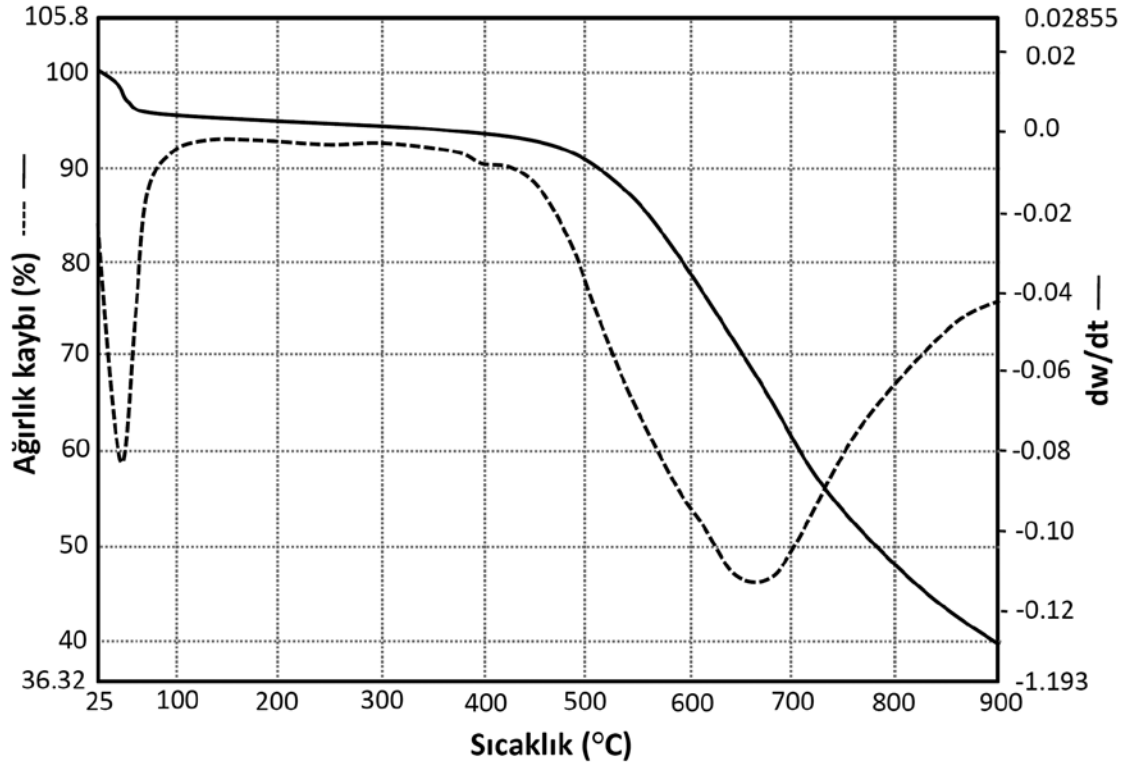
K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile  $500^\circ\text{C}$ 'de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.40'da verilmiştir. Bu numunede  $100^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 7 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir.  $500^\circ\text{C}$ 'ye kadar çok fazla ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir.  $600-800^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığında hızlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da uçuculardan veya sıvı fazdaki çinko klorürün buharlaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. (Hsu and Teng 2000). K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile  $500^\circ\text{C}$ 'de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun  $900^\circ\text{C}$ 'deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 24 olarak belirlenmiştir. Bu diyagram ve toplam ağırlık kaybı değeri K1 kömüründen aynı şartlarda hazırlanan aktif karbonla çok benzerlik göstermektedir.



Şekil 7.40 K2\_Z\_500 numunesine ait TGA eğrileri.

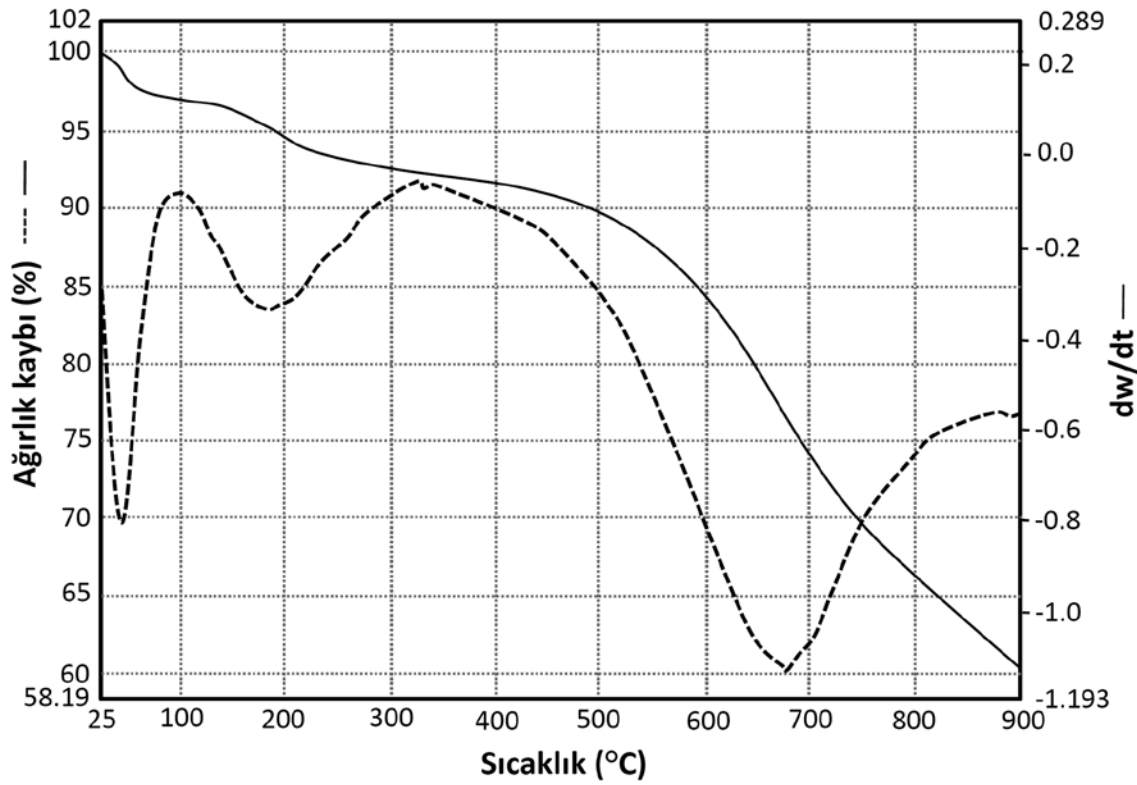
K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile  $600^\circ\text{C}$ 'de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.41'de verilmiştir. Bu numunede  $100^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 4 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir.  $400^\circ\text{C}$ 'ye kadar çok fazla ağırlık kaybı gözlemlenmemiştir.  $400-800^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığında hızlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da uçuculardan veya sıvı fazdaki çinko klorürün buharlaşmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. (Hsu and Teng 2000). K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile  $600^\circ\text{C}$ 'de kimyasal olarak

üretimiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 60 olarak belirlenmiştir. Bu değeri aynı kimyasal ile 500°C’de hazırlanan aktif karbonun ağırlık kaybının yaklaşık 3 katıdır. K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile 500°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun bu aktif karbona göre yapısının birbirine daha sıkı bağı olduğı söylenebilir.



Şekil 7.41 K1\_Z\_600 numunesine ait TGA eğrileri.

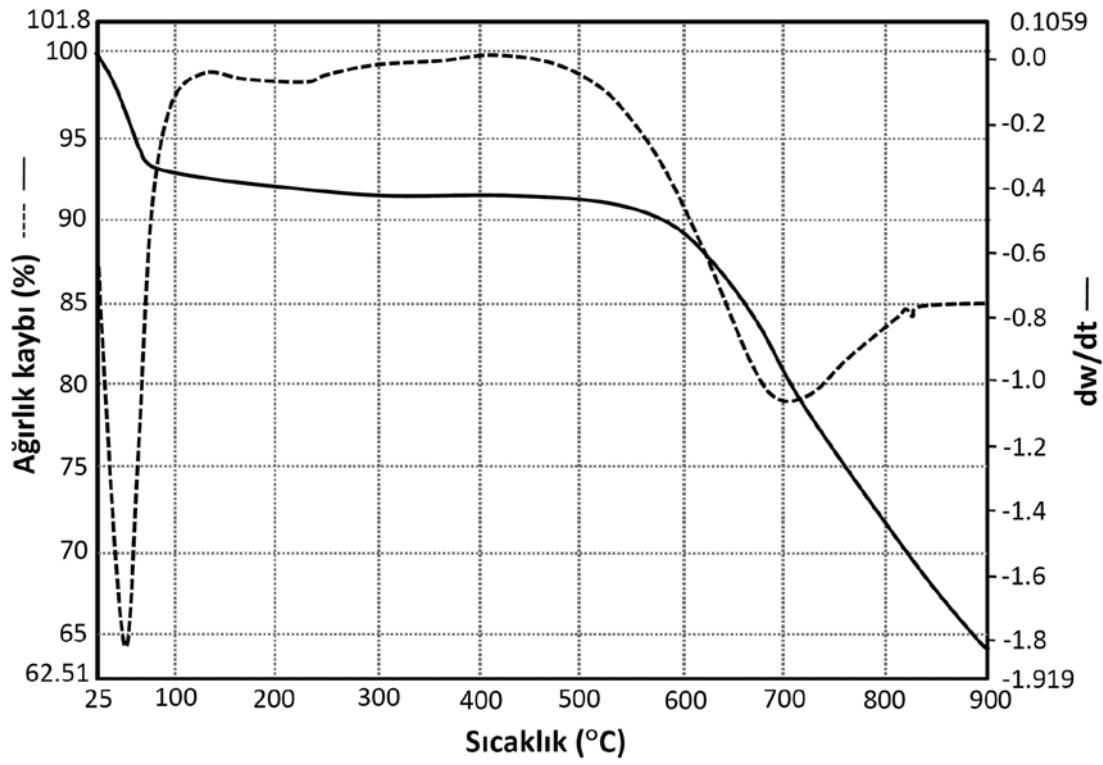
K2 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile 400°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun TGA diyagramı Şekil 7.42’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 3 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 100-300°C sıcaklık aralığında bir dw/dt piki gözlemlenmiştir. Bu pik ZnCl<sub>2</sub> nem çekici bir kimyasal olduğı için bu nemin uzaklaşmasından kaynaklanabilir. 400-800°C sıcaklık aralığında hızlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da uçuculardan veya sıvı fazdaki çinko klorürün buharlaşmasından kaynaklanabileceğı düşünülmüştür. (Hsu and Teng 2000). K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile 400°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 40 olarak belirlenmiştir. Bu değeri aynı kimyasal ile K2 (Karadon) kömüründen 500°C’de hazırlanan aktif karbonun ağırlık kaybından daha fazla, K1 kömüründen (Kozlu) 600°C’de hazırlanan aktif karbonun ağırlık kaybından daha azdır.



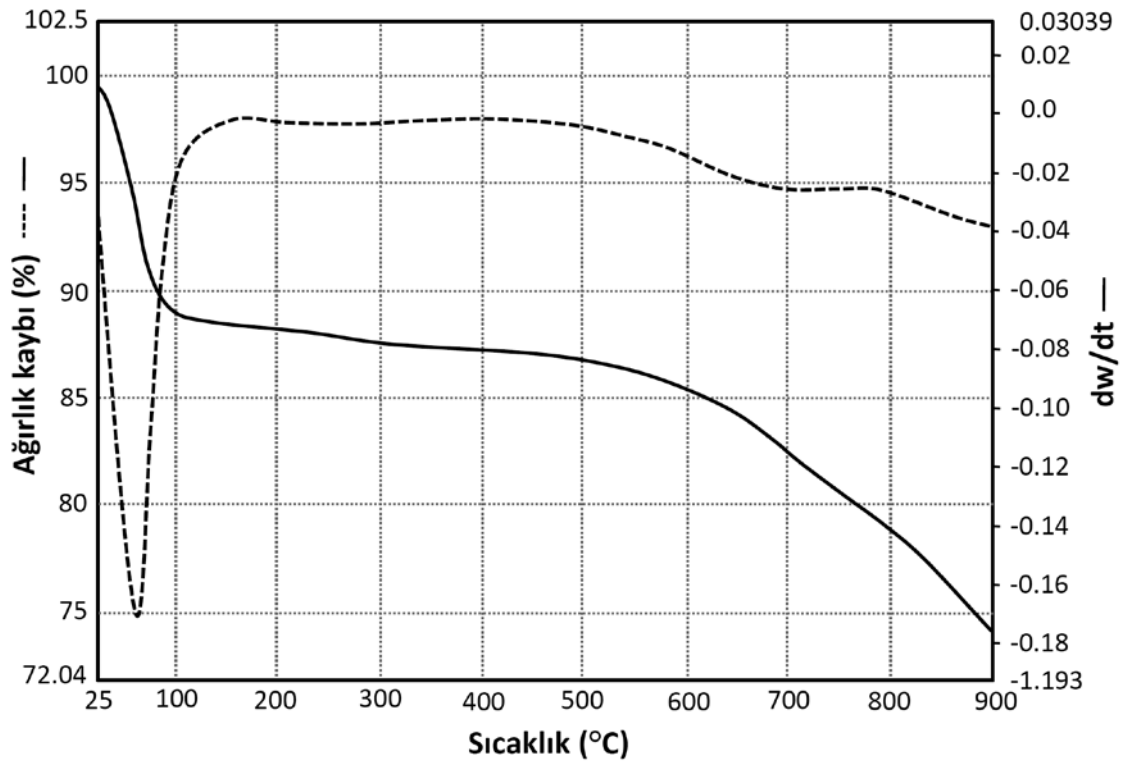
Şekil 7.42 K2\_Z\_400 numunesine ait TGA eğrileri.

K1\_P\_500 numunesine ait TGA diyagramı Şekil 7.43’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 7 olarak hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. 600-800°C sıcaklık aralığında hızlı bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da bünyeye emilmiş  $H_3PO_4$ ’lerin su kaybederek kondenzasyonu sırasında oluşan polifosforik asitlerin buharlaşmasıyla veya bozunmasıyla meydana gelmiş olabileceği düşünülmüştür. Bu asitler  $H_3PO_4$ ,  $H_4P_2O_7$ ,  $H_5P_3O_{10}$  türleri ve daha küçük oranda diğerlerini ( $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$ ) içermektedir (Teng et al. 1998, Hsu and Teng 2000). K1 kömüründen  $H_3PO_4$  ile 500°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 35.5 olarak belirlenmiştir.

K2\_P\_500 numunesine ait TGA diyagramı Şekil 7.44’de verilmiştir. Bu numunede 100°C’ye kadar olan sıcaklık aralığında ağırlık kaybı yaklaşık % 11 olarak gerçekleşmiştir. 600-800°C aralığında % 7’lik bir ağırlık kaybı gözlemlenmiş ve bunun da bünyeye emilmiş  $H_3PO_4$ ’lerin su kaybederek kondenzasyonu sırasında oluşan polifosforik asitlerin buharlaşmasıyla veya bozunmasıyla meydana gelmiş olabileceği düşünülmüştür. K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile 500°C’de kimyasal olarak üretilmiş aktif karbonun 900°C’deki toplam ağırlık kaybı yaklaşık % 26 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.43 K1\_P\_500 numunesine ait TGA eğrileri.



Şekil 7.44 K2\_P\_500 numunesine ait TGA eğrileri.

## **7.2 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ORGANİK BUHAR ADSORPSİYONU**

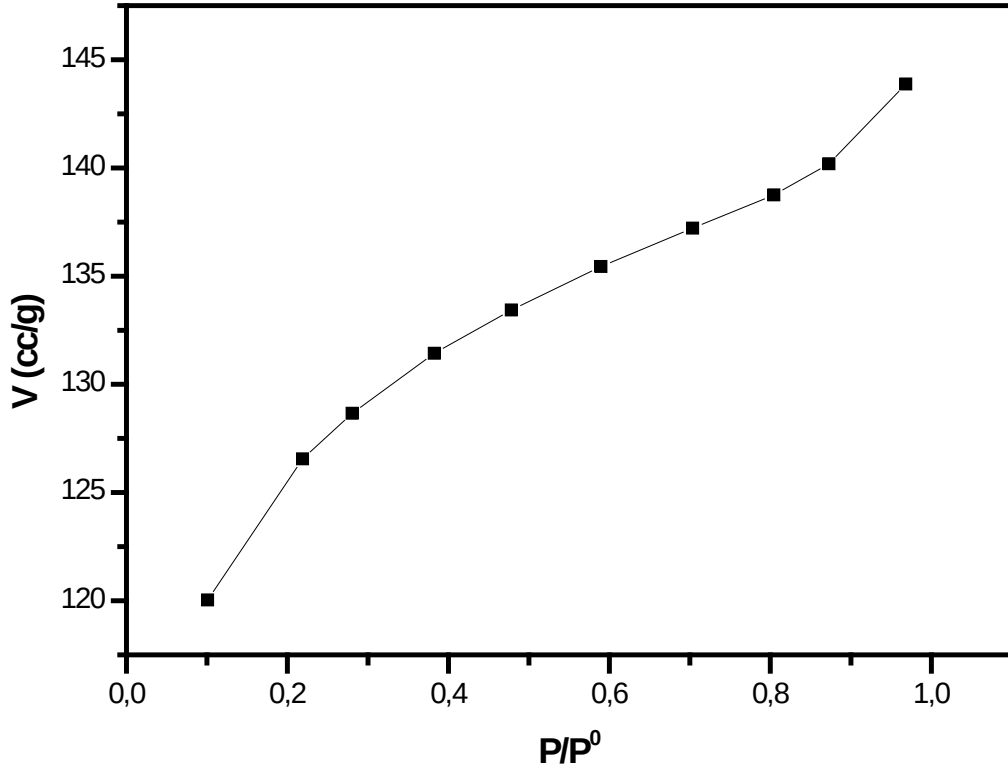
Zonguldak bitümlü kömürlerinden fiziksel ve kimyasal yöntemlerle elde edilen aktif karbon numuneleri üzerine oda sıcaklığında organik buharlardan izopropil alkol, aseton ve etanolün adsorpsiyonları incelenmiştir. Seçilen organik buharların ticari aktif karbon üzerine adsorpsiyonları da incelenmiş ve çeşitli izoterm modelleri kullanılarak elde edilen aktif karbonlarla karşılaştırmaları yapılmıştır.

## **7.3 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA İZOPROPİL ALKOL ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ.**

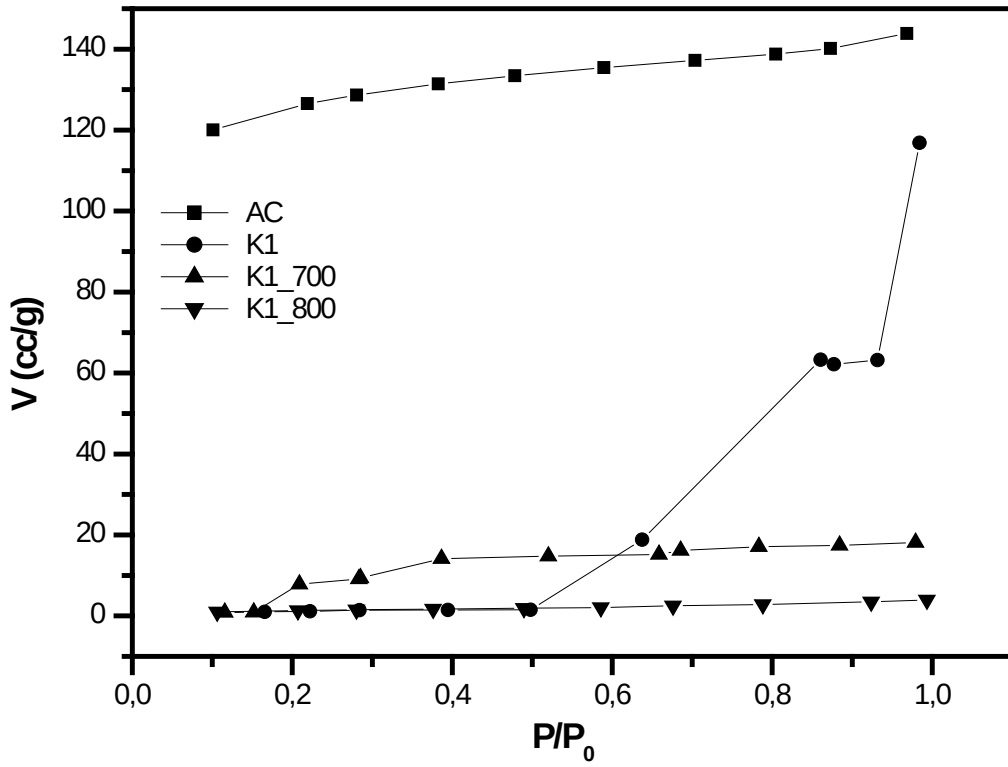
İzopropil alkol adsorpsiyonu çalışmaları oda sıcaklığında Autosorp 1 cihazı kullanılarak buhar fazında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde kül oranları düşürülmüş kömürlerin ve ticari bir aktif karbonun da organik buharları adsorplama kapasiteleri belirlenmiş ve elde edilen aktif karbon numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.45’de ticari aktif karbon üzerine izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi verilmiştir. Şekil’den bu izotermin Tip II izoterm tipine uygun olduğu olduğu gözlemlenmektedir. Bu izotermde hem tek tabakalı adsorpsiyonun hem de çok tabakalı adsorpsiyonun gerçekleştiği düşünülmektedir.

### **7.3.1 K1 ve K2 Kömüründen N<sub>2</sub> Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri**

Şekil 7.46’da K1 kömürü, K1 kömüründen azot kullanarak fiziksel olarak elde edilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi verilmiştir. K1 kömürünün izopropil alkolü adsorplama izotermi Tip III izoterm tipine benzemektedir. Bu izoterm tipi gözeneksiz ve makro gözenekli katılarda görülen bir izoterm tipidir. K1\_700 isimli aktif karbona ait izoterm basamaklı izoterm tipine benzemektedir. Bu tip izotermi genellikle mikro gözeneklerin yanında farklı boyutlarda mezo gözenek grupları içeren katılarda gözlemlenmektedir.



Şekil 7.45 Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.



Şekil 7.46 K1 kömürü, K1 kömüründen azot kullanarak fiziksel olarak elde edilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

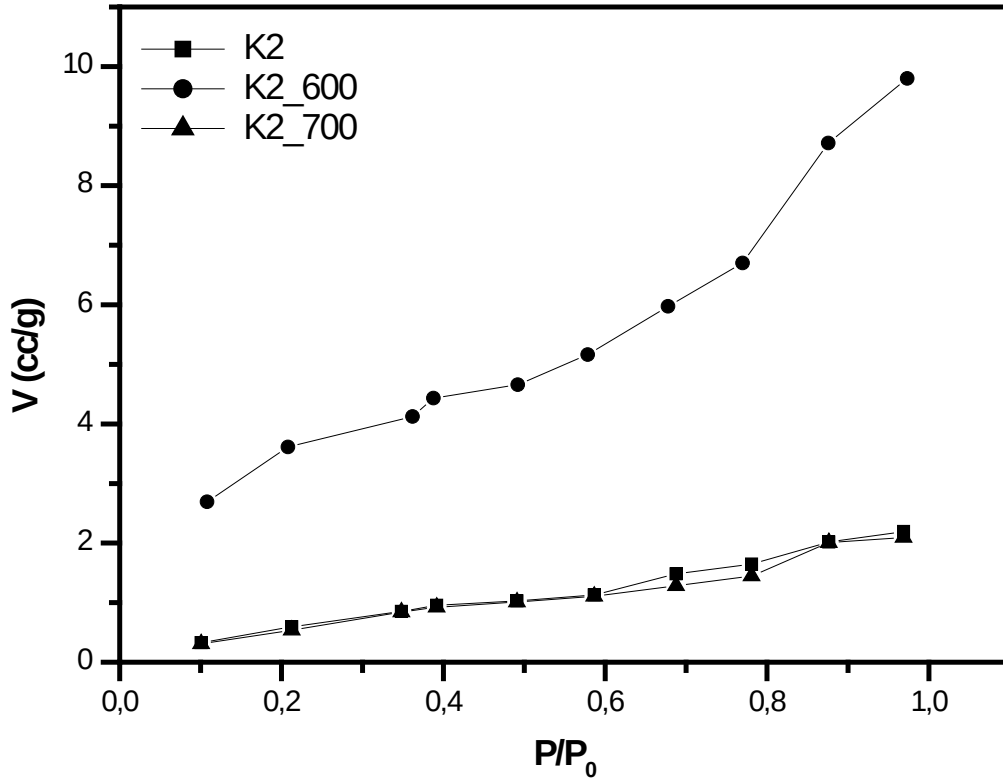
Çizelge 7.38’de ticari aktif karbonun (AC), K1 kömürünün ve K1 kömüründen azot kullanarak fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin ticari aktif karbonda olduğu gözlemlenmiştir. K1 kömürü fiziksel yolla elde edilen aktif karbonlara kıyasla daha yüksek adsorplama kapasitesine sahiptir. Çizelgeden K1\_700 isimli aktif karbonun izopropil alkolü adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uygun olmadığı  $\% W_m$  parametrelerinin hesaplanamamasından anlaşılmıştır. K1 kömürü düşük yüzey alanlı olmasına rağmen izopropil alkolü  $\% 23.84$  adsorplamıştır.

Çizelge 7.38 Ticari aktif karbon, K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ ’da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve  $\% W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2                   | 26.4                        |
| K1       | 2                                   | 23.84 | 0.34                   | 0.87                        |
| K1_700   | 415                                 | 4.64  | -                      | -                           |
| K1_800   | 24                                  | 1.05  | 0.31                   | 0.87                        |

Şekil 7.47’de K2 kömürü ve K2 kömüründen azot kullanarak fiziksel yöntemle 600 ve 700°C’de üretilen aktif karbonların izopropil alkolü adsorplama izotermi verilmiştir. Üç karbon yapının izotermi benzerlik göstermektedir. Bu üç izotermin Tip II izoterm modeline benzediği gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.39’da ticari aktif karbonun (AC), K2 kömürünün ve K2 kömüründen azot kullanarak fiziksel yöntemle 600 ve 700°C’de üretilen aktif karbonların izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin ticari aktif karbonda olduğu gözlemlenmiştir. 600°C’de üretilen aktif karbon K2 kömüründen daha yüksek adsorplama kapasitesine sahiptir. K1 kömürü izopropil alkolü  $\% 23.84$  adsorplarken, K2 kömürü  $\% 0.584$  adsorplamıştır.



Şekil 7.47 K2 kömürü ve K2 kömüründen azot kullanarak fiziksel olarak elde edilen aktif karbonların üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izoterminin.

Çizelge 7.39 Ticari aktif karbon, K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W  | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28   | 19.2                   | 26.4                        |
| K2       | 29                                  | 0.58 | 0.19                   | 0.64                        |
| K2_600   | 311                                 | 2.56 | 0.72                   | 1.40                        |
| K2_700   | 21                                  | 0.56 | 0.20                   | 0.76                        |

N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel yolla K1 ve K2 kömüründen elde edilen aktif karbon numuneleri ve ticari aktif karbon (AC\_K) üzerine organik buharların adsorpsiyonu BET, Langmuir, Freundlich, DR, DA, Harkins-Jura, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleriyle karşılaştırılmış ve izoterm parametreleri belirlenmiştir. Çizelge 7.40'da bu izoterm modelleri verilmiştir.

Çizelge 7.40 Kullanılan adsorpsiyon modelleri.

| Adsorpsiyon Modelleri                                                                                             |                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>BET</p> $\frac{1}{W((P_0/P) - 1)} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right)$          | <p>Langmuir Model</p> $\frac{P/P_0}{W} = \frac{1}{C W_m} + \frac{P/P_0}{W_m}$            |
| <p>DR Model</p> $\log V = \log V_0 - 2.303 \left(\frac{RT}{\beta E_0}\right)^2 \log \left(\frac{P_0}{P}\right)^2$ | <p>DA Model</p> $W = W_0 \exp \left[ - \left( \frac{-RT \ln P/P_0}{E} \right)^n \right]$ |
| <p>Freundlich Model</p> $\log V = \log k + 1/n \log P$                                                            | <p>Harkins-Jura</p> $\ln \left( \frac{P}{P_0} \right) = A - \frac{B}{W^2}$               |
| <p>Henderson</p> $\ln[-\ln(1 - P/P_0)] = \ln k + n \ln W$                                                         | <p>Smith</p> $W = V_b - V \ln \left( 1 - P/P_0 \right)$                                  |
| <p>Halsey</p> $\ln W = [(1/n) \ln C] - (1/n) \ln[\ln(P_0/P)]$                                                     |                                                                                          |

Çizelge 7.41’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel yolla K1 ve K2 kömüründen elde edilen aktif karbon numuneleri ve ticari aktif karbon (AC\_K) üzerine izopropil alkolün adsorpsiyonu BET, Langmuir, Freundlich ve Harkins-Jura model parametreleri verilmiştir. Çizelge 7.40 incelendiğinde, ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyonunun BET, Langmuir ve Harkins-Jura izoterm modellerine uygun olduğu korelasyon katsayılarından anlaşılmıştır. Çizelgedeki 7 karbon yapının BET ve Langmuir izoterm parametreleri incelendiğinde W<sub>m</sub> tek tabaka kapasitesinin en yüksek değerini ticari aktif karbon için aldığı gözlemlenmektedir. K1\_700 isimli aktif karbonun BET ve Langmuir izoterm modellerine ait korelasyon katsayıları yüksek olsa da parametrelerdeki negatif değerler uyumun sağlanmadığını göstermektedir.

Çizelge 7.41’den K2 kömürü ve K2\_700 isimli aktif karbonun Harkins-Jura izoterm modeline uygun olmadıkları sırasıyla r<sup>2</sup>=0.921 ve 0.864 olmasına rağmen izoterm parametrelerinin negatif olmasından anlaşılmaktadır. K1 ve K2 kömürü karşılaştırıldığında ise, K2 kömürünün K1 kömürüne göre BET, Langmuir ve Freundlich izoterm modellerine uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.41 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |        |        |        |         |         |         |
|-----------------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
|                                         | AC    | K1     | K1_700 | K1_800 | K2      | K2_600  | K2_700  |
| <b>BET</b>                              |       |        |        |        |         |         |         |
| <b>C</b>                                | 39.17 | 9.312  | -2.089 | 28.76  | 6.397   | 229.5   | 5.266   |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.194 | 3.4E-3 | -      | 3.2E-3 | 1.94E-3 | 7.23E-3 | 1.98E-3 |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997 | 0.994  | 0.820  | 0.999  | 0.998   | 0.995   | 0.997   |
| <b>Langmuir</b>                         |       |        |        |        |         |         |         |
| <b>C</b>                                | 32.16 | 2.58   | -3.20  | 8.64   | 1.57    | 9.765   | 1.163   |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.324 | 8.8E-3 | -      | 5.6E-3 | 6.4E-3  | 0.014   | 7.66E-3 |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999 | 0.963  | 0.850  | 0.996  | 0.999   | 0.999   | 0.922   |
| <b>Freundlich</b>                       |       |        |        |        |         |         |         |
| <b>K</b>                                | 0.373 | 0.171  | 0.077  | 0.009  | 5.44E-3 | 0.021   | 5.15E-3 |
| <b>n</b>                                | 5.35  | 0.347  | 0.751  | 1.723  | 1.230   | 1.850   | 1.230   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.918 | 0.830  | 0.757  | 0.929  | 0.980   | 0.887   | 0.976   |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |        |        |        |         |         |         |
| <b>A</b>                                | 0.359 | 6.0E-3 | 3.9E-4 | 9.7E-6 | 1.97E-6 | 7.07E-5 | 1.67E-6 |
| <b>B</b>                                | 2.466 | 0.050  | 0.066  | 0.068  | -0.020  | 0.105   | -0.027  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.981 | 0.914  | 0.854  | 0.993  | 0.921   | 0.984   | 0.864   |

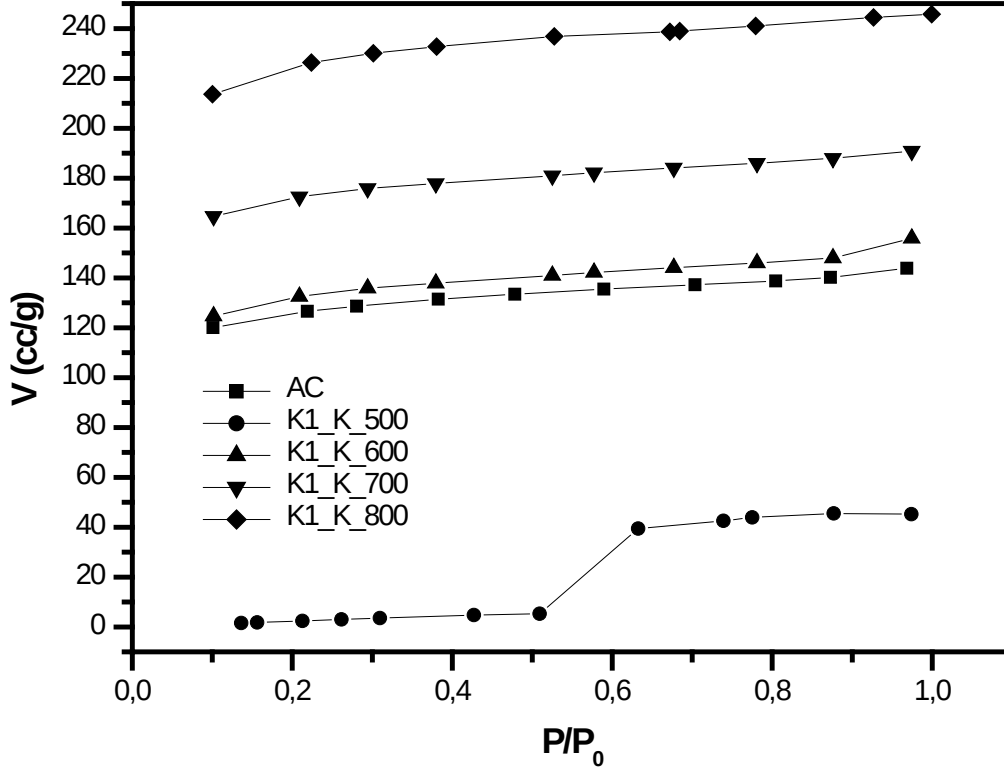
Çizelge 7.42’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel yolla K1 ve K2 kömüründen elde edilen aktif karbon numuneleri ve ticari aktif karbon (AC) üzerine izopropil alkolün adsorpsiyonu DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith model parametreleri verilmiştir. Çizelge 7.42 incelendiğinde, 7 karbon yapının da izopropil alkol adsorpsiyonunda DR izoterm modeline diğer izoterm modellerinden daha uygun oldukları gözlemlenmektedir. DR ve DA izoterm modellerinde mikro gözenek hacmini ifade eden V<sub>0</sub> ve W<sub>0</sub>, adsorpsiyon ısısını ifade eden E<sub>0</sub> ve E parametrelerinin en yüksek değerlerini ticari aktif karbon için aldıkları gözlemlenmektedir. Yine çizelgeden 5 izoterm modeline en az uyumlu olan karbon yapının K1\_700 isimli aktif karbon olduğu anlaşılmaktadır. Henderson izoterm modeli parametreleri K ve n sırasıyla 5.23E+5 ve 2.58 ile en yüksek değerlerini K1\_800 için almışlardır. Bu izoterm modelinde K ve n parametreleri ne kadar büyük olursa, adsorbentinde mikro gözenekli yapısının o kadar kararlı olacağı belirtilmiştir (Polatoğlu 2006).

Çizelge 7.42 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |       |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                         | AC      | K1    | K1_700  | K1_800  | K2      | K2_600  | K2_700  |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.861238)</b> |         |       |         |         |         |         |         |
| $V_0$ (cc/g)                            | 0.403   | 0.006 | 0.223   | 0.006   | 3.3E-3  | 0.017   | 2.89E-3 |
| $E_0$ (kJ/mol)                          | 13.5    | 7.27  | 2.82    | 9.03    | 6.24    | 8.24    | 6.48    |
| $r^2$                                   | 0.996   | 0.999 | 0.880   | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999   |
| <b>DA</b>                               |         |       |         |         |         |         |         |
| $W_0$ (cc/g)                            | 0.48    | 0.01  | 8.05    | 0.01    | 0.01    | 0.02    | 0.01    |
| $n$                                     | 1       | 1     | 1       | 1       | 1.1     | 1       | 1       |
| $E$ (kJ/mol)                            | 35.7    | 4.86  | 0.64    | 6.50    | 3.49    | 5.44    | 3.32    |
| <b>Henderson</b>                        |         |       |         |         |         |         |         |
| $K$                                     | 1.59E+9 | 5.40  | 6487    | 5.23E+5 | 5.9E+4  | 24755   | 5.82E+4 |
| $n$                                     | 20.98   | 0.466 | 2.70    | 2.58    | 1.94    | 2.44    | 1.92    |
| $r^2$                                   | 0.996   | 0.911 | 0.828   | 0.986   | 0.979   | 0.965   | 0.970   |
| <b>Halsey</b>                           |         |       |         |         |         |         |         |
| $C$                                     | 6.4E-15 | 0.015 | 3.22E-9 | 2.8E-12 | 9.46E-9 | 4.36E-8 | 8.4E-9  |
| $n$                                     | 31.26   | 0.830 | 5.615   | 4.97    | 3.07    | 3.81    | 3.06    |
| $r^2$                                   | 0.91    | 0.836 | 0.595   | 0.837   | 0.858   | 0.984   | 0.854   |
| <b>Smith</b>                            |         |       |         |         |         |         |         |
| $V_b$                                   | 0.346   | 0.029 | 0.029   | 0.042   | 0.002   | 0.010   | 0.002   |
| $V$                                     | 0.013   | 0.084 | 0.007   | 0.002   | 0.001   | 0.005   | 0.001   |
| $r^2$                                   | 0.856   | 0.969 | 0.573   | 0.867   | 0.891   | 0.937   | 0.891   |

### 7.3.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.48’de K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. K1\_K\_500 isimli aktif karbona ait izotermde bağıl basıncın 0.5 olduğu noktaya kadar adsorpsiyon doğrusal ilerlerken, bağıl basınç 0.65 değerine geldiğinde adsorpsiyonun hızla yükseldiği gözlemlenmektedir. K1\_K\_600, K1\_K\_700 ve K1\_K\_800 isimli aktif karbonlara ait izotermi birbiri benzediği görülmektedir. Bu izotermi Tip II izoterm modeline benzemektedirler.



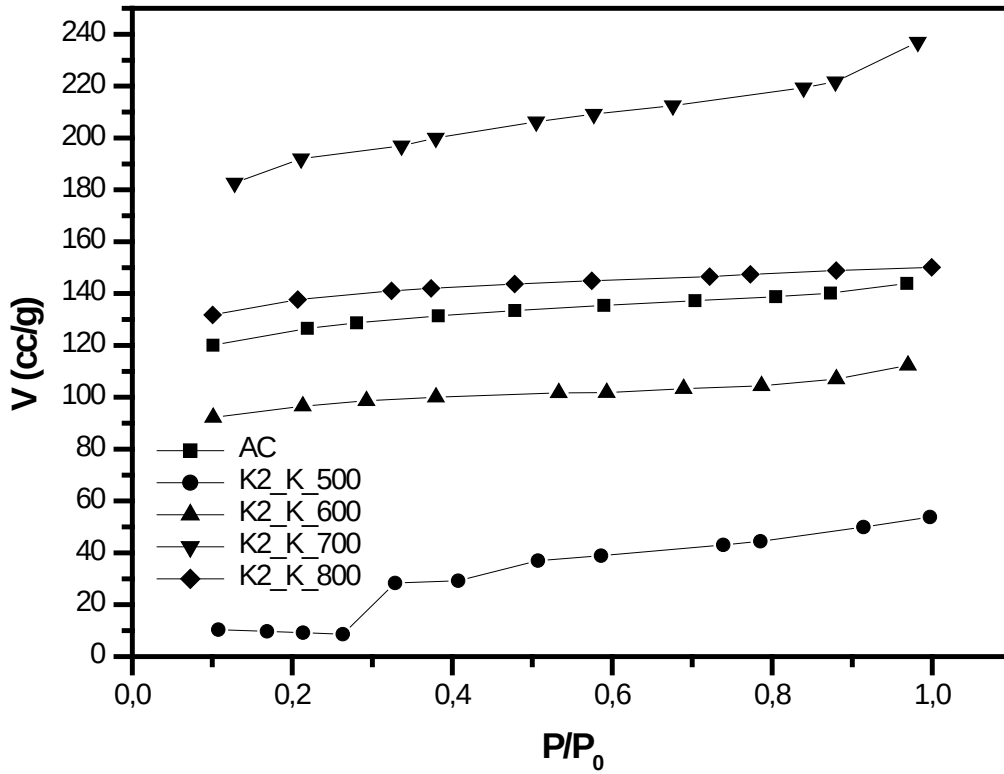
Şekil 7.48 K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermleri.

Çizelge 7.43’de K1 kömürü, K1 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_K\_800) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbon izopropil alkolü K1 kömüründen 1.7, ticari aktif karbondan ise 1.4 kat daha fazla adsorplamıştır. Çizelge 7.43’den K1\_K\_500 isimli aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyonunda Langmuir adsorpsiyon modelinden hesaplanan %  $W_m$  parametresinin bulunamamasından bu izoterm modeline uygun olmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 7.49’da K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle 500, 600, 700 ve 800°C’de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerden, K2\_K\_500 isimli aktif karbon hariç diğer 3 aktif karbonun izotermilerinin Tip II izotermine benzediği gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.43 K1 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K1       | 2                           | 23.84 | 0.34          | 0.87               |
| K1_K_500 | 728                         | 10.81 | 1.19          | -                  |
| K1_K_600 | 1297                        | 29.45 | 24.01         | 32.84              |
| K1_K_700 | 1755                        | 33.83 | 24.01         | 32.84              |
| K1_K_800 | 1904                        | 39.69 | 29.18         | 39.06              |



Şekil 7.49 K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izoterminin grafiği.

Çizelge 7.44'de K2 kömürü, K2 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K2\_K\_700) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbon izopropil alkolü K2 kömüründen 66,5, ticari aktif karbondan ise 1,35 kat daha fazla adsorplamıştır. Bu aktif karbon K1 kömüründen elde edilen en yüksek yüzey alanlı aktif karbonla

karşılaştırıldığında K1 kömüründen elde edilen aktif karbonun izopropil alkolü bu aktif karbondan % 1.02 kat daha fazla adsorpladığı gözlemlenmiştir. K2\_K\_500 isimli aktif karbon izopropil alkolü bağıl basınç 0.9 iken % 12.62 adsorplamıştır. Fakat aynı aktif karbonun BET ve Langmuir izotermi % tek tabaka kapasitesi parametreleri düşük çıkmıştır. K1\_K\_600, K1\_K\_700 ve K1\_K\_800 isimli aktif karbonlarda bu durum gözlenmemiştir.

Çizelge 7.44 K2 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K2       | 29                                  | 0.58  | 0.19          | 0.64               |
| K2_K_500 | 382                                 | 12.62 | 1.47          | 2.06               |
| K2_K_600 | 1051                                | 23.13 | 16.18         | 21.32              |
| K2_K_700 | 1659                                | 38.83 | 24.59         | 35.65              |
| K2_K_800 | 1080                                | 28.68 | 19.49         | 28.11              |

Çizelge 7.45'de K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge 7.45 incelendiğinde, K1\_K\_500 isimli aktif karbonun  $r^2$  değeri 0.895 olmasına rağmen Harkins-Jura uygun olmadığı, K2\_K\_500 isimli aktif karbonun ise  $r^2$  değeri 0.998 olmasına rağmen Langmuir izoterm modeline uygun olmadığı görülmektedir. BET ve Langmuir izotermelerinden hesaplanan  $W_m$  tek tabaka kapasitelerinin K1\_K\_800 isimli aktif karbonda sırasıyla 0.434 g/g ve 0.718 g/g ile en yüksek değerde oldukları gözlemlenmiştir. Aynı aktif karbonun Freundlich izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin ise 0.766 olduğu ve bu değer diğer aktif karbonların tek tabaka kapasitelerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Freundlich ve Harkins-Jura izoterm modellerine K1\_K\_700 ve K2\_K\_800 isimli aktif karbonların diğer aktif karbonlardan daha uygun oldukları gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.45 K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_K_500 | K1_K_600 | K1_K_700 | K1_K_800 | K2_K_500 | K2_K_600 | K2_K_700 | K2_K_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 2.814    | 41.58    | 37.71    | 38.25    | 18.13    | 66.42    | 24.29    | 30.83    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.012    | 0.246    | 0.316    | 0.434    | 0.0149   | 0.193    | 0.326    | 0.242    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.993    | 0.998    | 0.998    | 0.996    | 0.994    | 1        | 0.997    | 0.997    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 8.03E-3  | 66.73    | 89.08    | 37.27    | -33.05   | 104.2    | 60.1     | 90.2     |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 3.81     | 0.382    | 0.489    | 0.718    | 0.021    | 0.271    | 0.554    | 0.391    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.05     | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.998    | 1        | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.137    | 0.403    | 0.507    | 0.766    | 0.153    | 0.288    | 0.604    | 0.401    |
| <b>n</b>                                | 0.509    | 11.83    | 16.35    | 7.89     | 1.064    | 13.94    | 9.07     | 18.23    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.884    | 0.945    | 0.990    | 0.978    | 0.845    | 0.884    | 0.920    | 0.980    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 2.93E-5  | 0.354    | 0.824    | 1.645    | 3.75E-3  | 0.208    | 0.563    | 0.616    |
| <b>B</b>                                | -0.111   | 2.168    | 3.200    | 3.820    | 0.155    | 2.485    | 1.523    | 3.840    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.895    | 0.930    | 0.985    | 0.992    | 0.947    | 0.867    | 0.932    | 0.997    |

Çizelge 7.46’da K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge 7.46 incelendiğinde, DR izoterm modelinde 8 aktif karbonun da r<sup>2</sup> değerlerinin 0.999 olduğu görülmektedir. V<sub>0</sub>, K1\_K\_500 ve K2\_K\_500 isimli aktif karbonlarda çok düşükken K1\_K\_800 isimli aktif karbon için 0.897 cc/g, K2\_K\_700 isimli aktif karbon için 0.701 cc/g’dir. DA izoterm modelinden hesaplanan W<sub>0</sub> ise, K1\_K\_500 ve K2\_K\_500 için sırasıyla 0.01 ve 0.02 cc/g iken, K1\_K\_800 ve K2\_K\_700 için sırasıyla 0.86 ve 0.77 cc/g olarak belirlenmiştir. Henderson izoterm modeline en uyumlu aktif karbonların K1\_K\_700, K2\_K\_700 ve K2\_K\_800 olduğu, Halsey ve Smith izoterm modellerine ise; K1\_K\_600, K2\_K\_600 ve K2\_K\_700 olduğu anlaşılmıştır.

Çizelge 7.46 K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

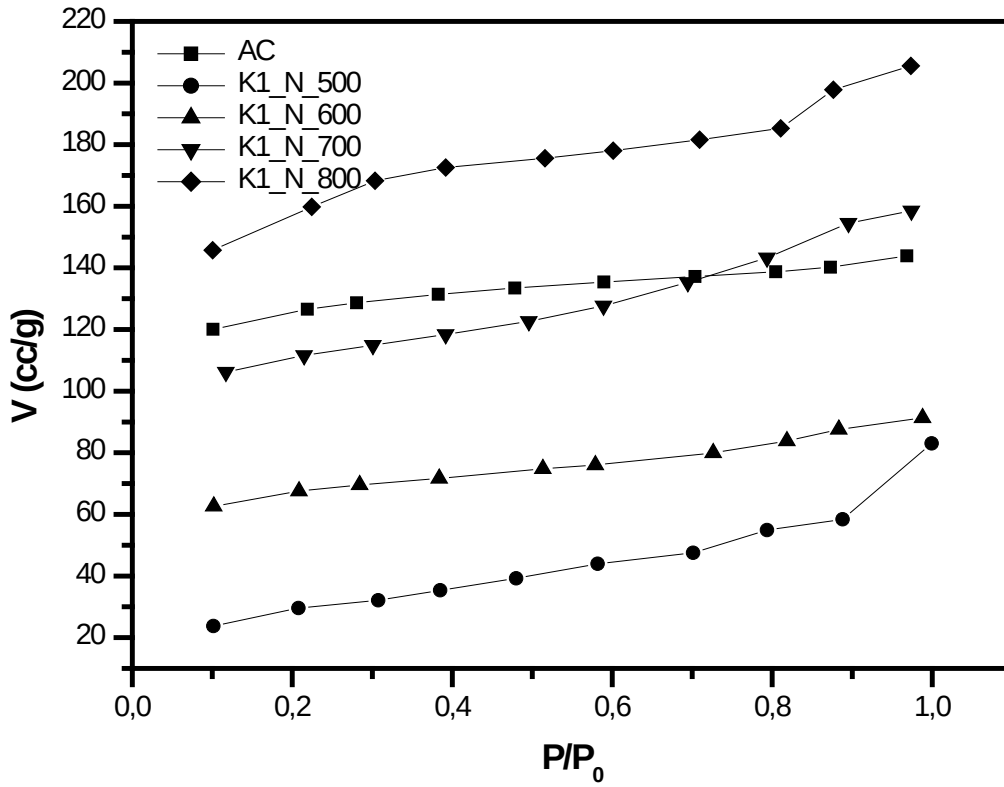
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_K_500 | K1_K_600 | K1_K_700 | K1_K_800 | K2_K_500 | K2_K_600 | K2_K_700 | K2_K_800 |
| <b>DR (<math>\beta:0.861238</math>)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 5.6E-3   | 0.478    | 0.614    | 0.897    | 0.028    | 0.3431   | 0.701    | 0.489    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 7.27     | 19.10    | 21.85    | 14.2     | 13.3     | 22.2     | 17       | 22.5     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.989    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.01     | 0.52     | 0.64     | 0.86     | 0.02     | 0.36     | 0.77     | 0.52     |
| <b>n</b>                                | 3.30     | 1        | 1.1      | 1        | 1        | 1.0      | 1        | 1        |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 5.24     | 28.74    | 34.00    | 34.07    | 14.02    | 38.99    | 24.43    | 39.83    |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 6.704    | 2.8E+7   | 2.14E+8  | 8.8E+5   | 3744     | 3.15E+10 | 2207     | 6.36E+11 |
| <b>n</b>                                | 0.614    | 17.92    | 26.86    | 30.35    | 3.60     | 18.83    | 13.53    | 28.83    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.842    | 0.985    | 0.993    | 0.985    | 0.902    | 0.952    | 0.990    | 0.991    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 8.01E-3  | 1.78E-12 | 2.19E-14 | 4.32E-9  | 1.59E-11 | 1.07E-16 | 1.35E-6  | 3.35E-15 |
| <b>n</b>                                | 1.167    | 27.10    | 42.45    | 40.45    | 10.44    | 27.79    | 21.73    | 34.34    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.664    | 0.95     | 0.863    | 0.882    | 0.657    | 0.984    | 0.950    | 0.920    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.0145   | 0.362    | 0.472    | 0.613    | 0.090    | 0.261    | 0.525    | 0.372    |
| <b>V</b>                                | 0.0413   | 0.016    | 0.013    | 0.019    | 0.011    | 0.012    | 0.030    | 0.014    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.607    | 0.917    | 0.80     | 0.818    | 0.680    | 0.967    | 0.923    | 0.866    |

### 7.3.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.50’de K1 kömüründen NaOH ile kimyasal yöntemle 500, 600, 700 ve 800°C’de hazırlanan aktif karbonların izopropil alkol adsorpsiyon izotermi verilmektedir. Bu 4 aktif karbonun izotermi Tip II izotermine benzemektedir.

Çizelge 7.47’de K1 kömürü, K1 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_N\_800) en

yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbon izopropil alkolü K1 kömüründen 0.67, ticari aktif karbondan ise 0.81 kat daha fazla adsorplamıştır. Bu aktif karbon K1 kömüründen KOH ile elde edilen en yüksek yüzey alanlı aktif karbonla karşılaştırıldığında NaOH ile hazırlanan aktif karbonun daha düşük adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 7.47’den 500°C’de NaOH ile elde edilen aktif karbonun KOH ile elde edilen aktif karbondan daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. K1\_K\_500 izopropil alkolü % 10.81 adsorplarken, K1\_N\_500 % 18.22 adsorplamıştır.

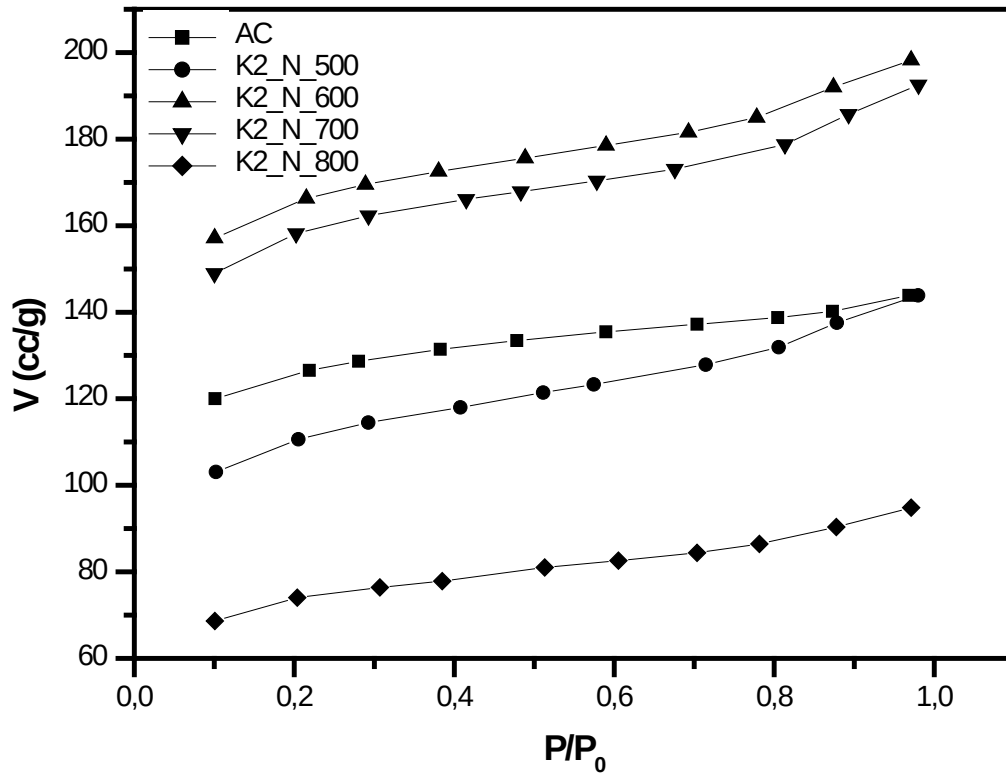


Şekil 7.50 K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermleri.

Şekil 7.51’de K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle 500, 600, 700 ve 800°C’de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermleri verilmiştir. Bu 4 aktif karbonun izopropil alkol izotermleri Tip II izotermine benzemektedir.

Çizelge 7.47 K1 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K1       | 2                                   | 23.84 | 0.34          | 0.87               |
| K1_N_500 | 281                                 | 18.22 | 5.73          | 9.42               |
| K1_N_600 | 495                                 | 19.68 | 11.43         | 16.60              |
| K1_N_700 | 1059                                | 29.84 | 16.94         | 24.53              |
| K1_N_800 | 1188                                | 35.55 | 23.39         | 32.72              |



Şekil 7.51 K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.48'de K2 kömürü, K2 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbonların 600 ve 700°C'de elde

edildiği ve bu iki numunenin en yüksek adsorplama kapasitelerine sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.48'den K2 kömüründen 500°C'de NaOH ile elde edilen aktif karbonun KOH ile elde edilen aktif karbondan daha yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. K2\_K\_600 izopropil alkolü % 12.62 adsorplarken, K2\_N\_500 % 27.85 adsorplamıştır. K2 kömüründen NaOH ile 500, 600 ve 700°C'de elde edilen aktif karbonlar, K1 kömüründen elde edilen aktif karbonlardan daha yüksek adsorplama kapasitelerine sahipken; 800°C'de K1 kömüründen elde edilen aktif karbon K2 kömüründen elde edilenden daha yüksek adsorplama kapasitesine sahiptir.

Çizelge 7.48 K2 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K2       | 29                                  | 0.58  | 0.19          | 0.64               |
| K2_N_500 | 774                                 | 27.85 | 17.29         | 24.59              |
| K2_N_600 | 1098                                | 34.72 | 23.61         | 32.16              |
| K2_N_700 | 1335                                | 34.02 | 22.72         | 31.32              |
| K2_N_800 | 685.5                               | 20.28 | 11.97         | 17.83              |

Çizelge 7.49'da K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde 8 aktif karbonun da izopropil alkol adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu oldukları ( $r^2=0.998-0.999$ ) gözlemlenmektedir. BET ve Langmuir izoterm modellerinden hesaplanan  $W_m$  tek tabaka kapasitelerinin en düşük K1\_N\_500 isimli aktif karbonda olduğu, en yüksek değerinin K1\_N\_800 ve K2\_N\_600 isimli aktif karbonlarda olduğu belirlenmiştir. Aynı aktif karbonların Freundlich izoterm modelinden hesaplanan K tek tabaka kapasitesinin sırasıyla 0.525 ve 0.512 ile en yüksek değerlerini aldıkları belirlenmiştir.

Çizelge 7.49 K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_N_500 | K1_N_600 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 | K2_N_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 425.2    | 51.44    | 34.97    | 59.17    | 46.39    | 42.48    | 41.54    | 40.28    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.061    | 0.129    | 0.204    | 0.305    | 0.209    | 0.309    | 0.294    | 0.136    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997    | 0.999    | 0.998    | 0.999    | 0.998    | 0.998    | 0.998    | 0.998    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 15.53    | 52.36    | 58.42    | 38.15    | 52.51    | 78       | 68.35    | 55.07    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.104    | 0.199    | 0.325    | 0.486    | 0.326    | 0.474    | 0.456    | 0.217    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.165    | 0.231    | 0.398    | 0.525    | 0.366    | 0.512    | 0.493    | 0.242    |
| <b>n</b>                                | 0.477    | 6.38     | 5.36     | 7.47     | 7.389    | 10.83    | 10.06    | 7.8      |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.876    | 0.912    | 0.865    | 0.927    | 0.925    | 0.920    | 0.903    | 0.925    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 5.13E-3  | 0.05     | 0.113    | 0.347    | 0.154    | 0.477    | 0.477    | 0.073    |
| <b>B</b>                                | 0.15     | 0.90     | 0.67     | 1.237    | 1.118    | 1.788    | 1.788    | 1.212    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.994    | 0.954    | 0.943    | 0.915    | 0.952    | 0.927    | 0.927    | 0.945    |

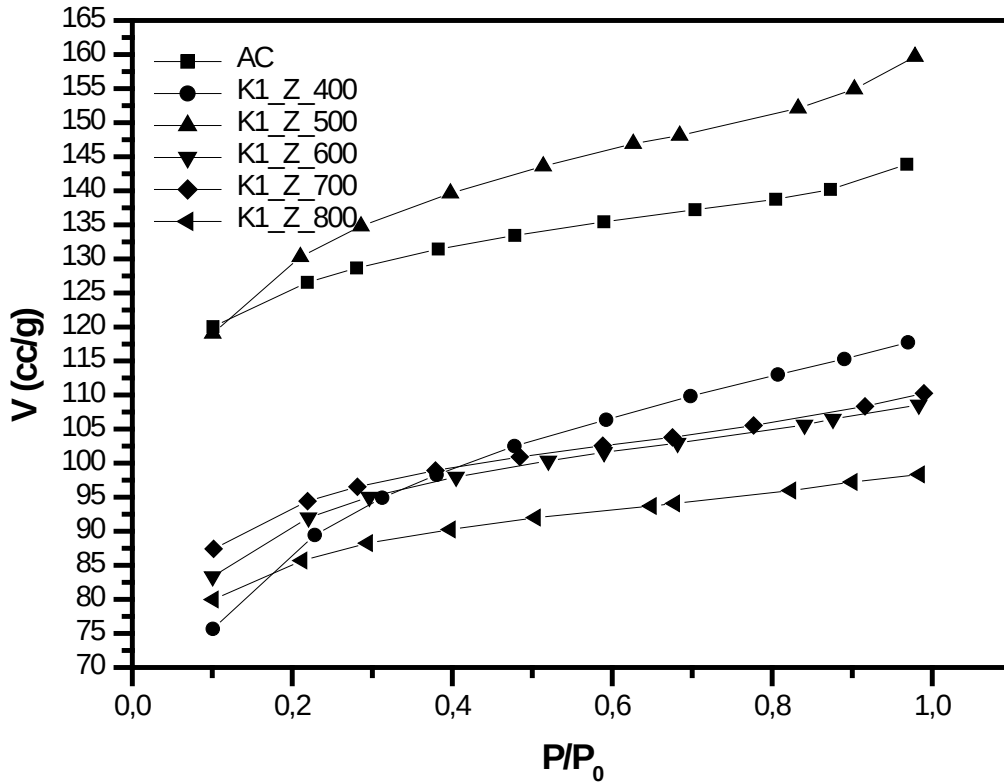
Çizelge 7.50’de K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modelinde V<sub>0</sub>, K1\_N\_800 için 0.584 cc/g, K2\_N\_600 için 0.595 cc/g iken, K1\_N\_500 için 0.123 cc/g’dır. E<sub>0</sub>, K1\_N\_500 için 10.1 kJ/mol iken diğer aktif karbonlar için 16-20 kJ/mol arasında değişmektedir. DA izotermine ise W<sub>0</sub>, K1\_N\_800 için 0.65 cc/g, K2\_N\_600 için 0.63 cc/g iken K1\_N\_500 için 0.16 cc/g’dır. E ise, K1\_N\_500 için 7.97 kJ/mol iken diğer aktif karbonlar için 21-30 kJ/mol arasında değişmektedir. Henderson izoterm modeli K parametresi K2\_N\_800 için 1.05E+7, n parametresi ise K2\_N\_700 için 14.18 olarak belirlenmiştir. Bu değerler bu izoterm modelinde gözlemlenen en yüksek değerlerdir. Henderson izoterm modelinde en yüksek korelasyon katsayısına sahip aktif karbonlar K2\_N\_500 ve K2\_N\_800 iken, Halsey ve Smith izotermelerinde ise K1\_N\_500’dür.

Çizelge 7.50 K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_N_500 | K1_N_600 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 | K2_N_800 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.861238)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.123    | 0.247    | 0.402    | 0.584    | 0.404    | 0.595    | 0.571    | 0.271    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 10.1     | 17.2     | 19.1     | 16.3     | 17.5     | 20.3     | 19.1     | 17.1     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.16     | 0.27     | 0.43     | 0.65     | 0.440    | 0.63     | 0.62     | 0.29     |
| <b>n</b>                                | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1.1      | 1        | 1.1      |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 7.97     | 23.21    | 30.00    | 21.22    | 24.03    | 29.87    | 28.55    | 21.5     |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 622.2    | 1.1E+6   | 1098     | 2434.5   | 78312    | 0.486    | 51451    | 1.05E+7  |
| <b>n</b>                                | 3.06     | 8.92     | 6.79     | 10.83    | 10.40    | 0.066    | 14.18    | 10.83    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.989    | 0.983    | 0.972    | 0.960    | 0.991    | 0.984    | 0.981    | 0.990    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 1.9E-4   | 1.05E-11 | 5.88E-6  | 1.83E-6  | 6.13E-9  | 3.75E-8  | 1.23E-8  | 1.44E-11 |
| <b>n</b>                                | 3.62     | 15.43    | 10.58    | 16.81    | 16.40    | 22.17    | 22.29    | 15.97    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.962    | 0.875    | 0.920    | 0.933    | 0.922    | 0.956    | 0.952    | 0.952    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.076    | 0.189    | 0.304    | 0.441    | 0.306    | 0.452    | 0.432    | 0.203    |
| <b>V</b>                                | 0.041    | 0.015    | 0.039    | 0.034    | 0.024    | 0.026    | 0.024    | 0.017    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.957    | 0.840    | 0.893    | 0.911    | 0.888    | 0.924    | 0.922    | 0.923    |

### 7.3.4 K1 ve K2 Kömüründen ZnCl<sub>2</sub> Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.52’de K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal yöntemle 400, 500, 600, 700 ve 800°C’de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermi verilmektedir.



Şekil 7.52 K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.51’de K1 kömürü, K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbonun  $500^\circ\text{C}$ ’de elde edildiği ve bu numunenin en yüksek adsorplama kapasitelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile elde edilen aktif karbonların izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri % 20.87 ile % 29.99 arasında değişmektedir. K1 kömürünün izopropil alkolü K1\_Z\_600, K1\_Z\_700 ve K1\_Z\_800 isimli aktif karbonlardan daha fazla adsorpladığı dikkat çekmektedir.

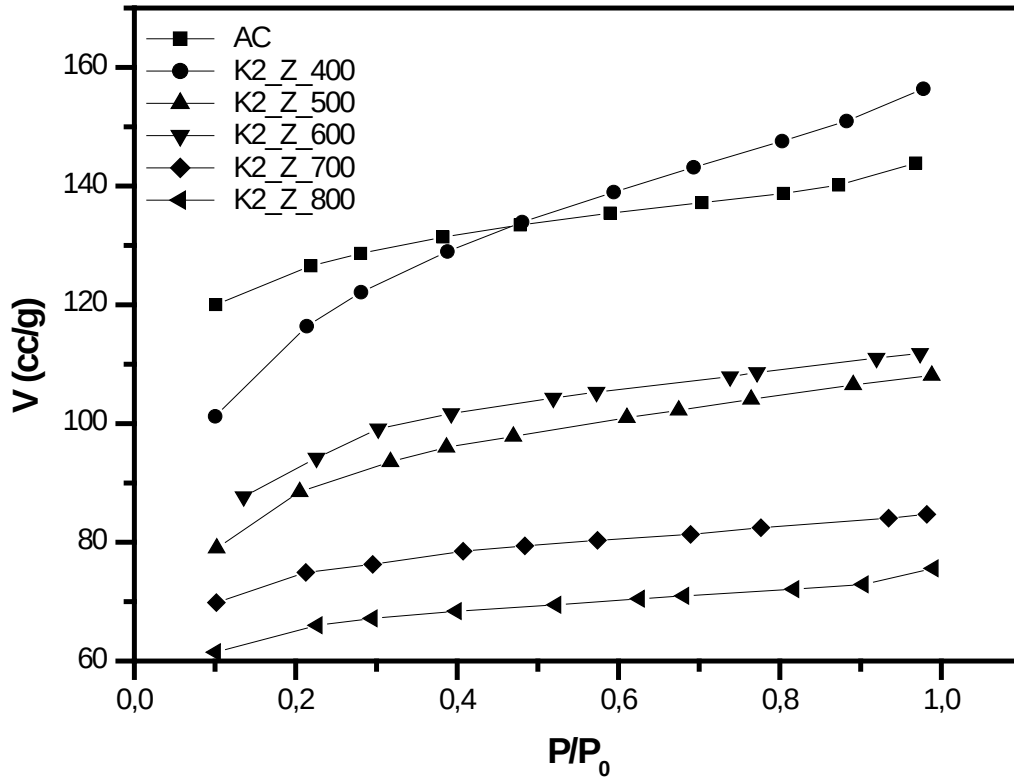
Şekil 7.53’te K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle 400, 500, 600, 700 ve  $800^\circ\text{C}$ ’de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermi vermiştir. Bu 5 aktif karbonun izotermi benzerlik göstermektedir.

Çizelge 7.52’de K2 kömürü, K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbonun  $400^\circ\text{C}$ ’de elde edildiği ve

bu numunenin % 29.56 ile en yüksek adsorplama kapasitelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile elde edilen aktif karbonların izopropil alkolü adsorplama kapasitelerinin % 16.86-29.56 arasında değiştiği ve bu aktif karbonların adsorplama kapasitelerinin K1 kömüründen hazırlanan aktif karbonlardan daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 7.51 K1 Kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                       | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K1       | 2                                         | 23.84 | 0.34          | 0.87               |
| K1_Z_400 | 767                                       | 24.00 | 14.84         | 22.42              |
| K1_Z_500 | 885                                       | 29.99 | 20.02         | 28.01              |
| K1_Z_600 | 783                                       | 22.55 | 14.84         | 21.51              |
| K1_Z_700 | 714                                       | 22.83 | 15.21         | 21.57              |
| K1_Z_800 | 711                                       | 20.87 | 13.82         | 20.00              |



Şekil 7.53 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.52 K2 Kömüründen  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28    | 19.2          | 26.4               |
| K2       | 29                          | 0.58  | 0.19          | 0.64               |
| K2_Z_400 | 926                         | 29.56 | 18.96         | 26.96              |
| K2_Z_500 | 841                         | 22.46 | 14.24         | 21.57              |
| K2_Z_600 | 771                         | 23.05 | 15.11         | 22.90              |
| K2_Z_700 | 657                         | 18.49 | 12.13         | 17.70              |
| K2_Z_800 | 584                         | 16.86 | 10.87         | 15.90              |

Çizelge 7.53'de K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, BET izoterminden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin K1\_Z\_800 için 0.16 g/g, K2\_Z\_800 için 0.122 g/g, K2\_Z\_700 için 0.138 g/g ve diğer aktif karbonlar için ise 0.17-0.25 g/g aralığında değiştiği belirlenmiştir. Langmuir izoterm modelinden hesaplanan tek tabak kapasitesinin K2\_Z\_700 için 0.215 g/g, K2\_Z\_800 için 0.189 g/g iken, diğer aktif karbonlar için 0.25-0.389 g/g aralığında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek tek tabaka kapasitesine sahip aktif karbon aynı zamanda en yüksek adsorplama kapasitesine sahip K1\_Z\_500 isimli aktif karbondur. Aynı aktif karbon Freundlich izoterm modelinden hesaplanan K tek tabaka kapasitesi (0.42) de en yüksek olan aktif karbondur. Freundlich izoterm modeline en uyumlu aktif karbonun K1\_Z\_400,  $r^2$  değeri en düşük aktif karbonun ise K2\_Z\_800 olduğu belirlenmiştir. Harkins-Jura izoterm modeline en uyumlu aktif karbonun K2\_Z\_400,  $r^2$  değeri en düşük aktif karbonun ise K2\_Z\_800 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.54'de K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelgeden DR izotermi  $V_0$  parametresinin  $ZnCl_2$  ile elde edilen 10 aktif karbon için 0.237-0.481 cc/g aralığında değiştiği belirlenmiştir. K1\_Z\_500 en yüksek değere, K2\_Z\_800 en düşük değere sahip aktif karbonlardır.  $E_0$  ise, 12.2-18.6 kJ/mol aralığında değişmektedir. K1\_Z\_400 en düşük değere, K2\_Z\_800 en yüksek değere sahip aktif karbonlardır.

Çizelge 7.53 K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                         | K1Z400 | K1Z500 | K1Z600 | K1Z700 | K1Z800 | K2Z400 | K2Z500 | K2Z600 | K2Z700 | K2Z800 |
| <b>BET</b>                              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>C</b>                                | 121.2  | 58.55  | 56.1   | 53.04  | 45.17  | 150.4  | 51.45  | 45.30  | 41.54  | 44.52  |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.174  | 0.25   | 0.174  | 0.179  | 0.16   | 0.234  | 0.166  | 0.178  | 0.138  | 0.122  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.998  | 0.999  | 0.998  | 0.999  | 0.998  | 0.999  | 0.998  | 0.999  | 0.998  | 0.998  |
| <b>Langmuir</b>                         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>C</b>                                | 22.89  | 44.46  | 43.04  | 56.45  | 57.73  | 27.24  | 32.17  | 27.13  | 66.78  | 66.87  |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.289  | 0.389  | 0.274  | 0.275  | 0.250  | 0.369  | 0.275  | 0.297  | 0.215  | 0.189  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.990  | 0.999  | 0.999  |
| <b>Freundlich</b>                       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>K</b>                                | 0.317  | 0.42   | 0.29   | 0.292  | 0.263  | 0.414  | 0.290  | 0.301  | 0.226  | 0.198  |
| <b>n</b>                                | 5.23   | 8.31   | 9.05   | 10.43  | 11.45  | 5.42   | 7.51   | 8.47   | 12.29  | 12.60  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.998  | 0.990  | 0.996  | 0.990  | 0.996  | 0.996  | 0.996  | 0.990  | 0.996  | 0.968  |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>A</b>                                | 0.088  | 0.262  | 0.147  | 0.167  | 0.153  | 0.150  | 0.119  | 0.150  | 0.124  | 0.096  |
| <b>B</b>                                | 0.859  | 1.469  | 1.74   | 1.95   | 2.21   | 0.850  | 1.414  | 1.66   | 2.43   | 2.454  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.996  | 0.990  | 0.997  | 0.988  | 0.996  | 0.998  | 0.997  | 0.982  | 0.995  | 0.951  |

DA izotermi  $W_0$  parametresi K2\_Z\_800 için 0.26 cc/g ile en düşük değerde, K1\_Z\_500 ile K2\_Z\_400 için ise 0.53 cc/g ile en yüksek değerini almıştır. E parametresi ise 11.9-27.83 kJ/mol aralığında değişmektedir. K2\_Z\_800 isimli aktif karbonun Henderson izoterm modeli K parametresi  $6.97E+15$  ve n parametresi ise 21.89 olarak belirlenmiştir. Henderson ve Halsey izoterm modellerinde en düşük  $r^2$  değerine sahip aktif karbon K2\_Z\_600, en yüksek  $r^2$  değerine sahip aktif karbon ise K2\_Z\_800'dür. Smith izoterm modelinde de en düşük  $r^2$  değerine sahip aktif karbon K2\_Z\_600 iken, en yüksek  $r^2$  değerine sahip aktif karbon K2\_Z\_400'dür.

Çizelge 7.54 K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine isopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

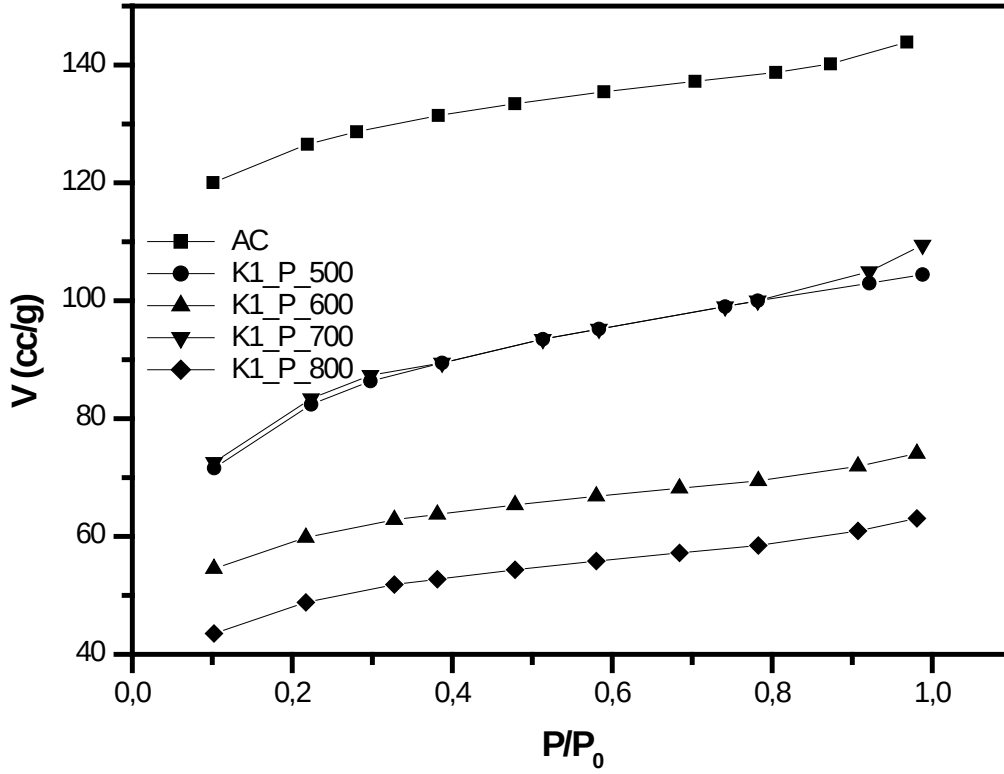
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
|-----------------------------------------|---------|----------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|
|                                         | K1Z400  | K1Z500   | K1Z600  | K1Z700   | K1Z800   | K2Z400  | K2Z500  | K2Z600  | K2Z700   | K2Z800   |
| <b>DR (<math>\beta:0.861238</math>)</b> |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
| $V_0(\text{cc/g})$                      | 0.344   | 0.481    | 0.339   | 0.343    | 0.310    | 0.446   | 0.336   | 0.352   | 0.272    | 0.237    |
| $E_0(\text{kJ/mol})$                    | 12.2    | 15.9     | 15.6    | 17.4     | 18.2     | 12.9    | 13.8    | 14.1    | 18.0     | 18.6     |
| $r^2$                                   | 0.999   | 0.999    | 0.999   | 0.999    | 0.999    | 0.999   | 0.999   | 0.999   | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
| $W_0(\text{cc/g})$                      | 0.41    | 0.53     | 0.38    | 0.38     | 0.34     | 0.53    | 0.38    | 0.40    | 0.30     | 0.26     |
| $n$                                     | 1       | 1.1      | 1       | 1        | 1        | 1       | 1.1     | 1       | 1        | 1        |
| $E(\text{kJ/mol})$                      | 11.9    | 18.99    | 19.39   | 24.32    | 26.09    | 13.21   | 14.71   | 17.42   | 25.69    | 27.83    |
| <b>Henderson</b>                        |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
| $K$                                     | 85133   | 4.08E+5  | 1.45E+9 | 1.6E+10  | 9.27E+11 | 3512    | 7.69E+6 | 2.51E+8 | 4.08E+14 | 6.97E+15 |
| $n$                                     | 9.03    | 13.79    | 16.21   | 18.24    | 19.85    | 8.32    | 12.13   | 15.27   | 21.92    | 21.89    |
| $r^2$                                   | 0.968   | 0.992    | 0.970   | 0.985    | 0.972    | 0.991   | 0.985   | 0.940   | 0.975    | 0.998    |
| <b>Halsey</b>                           |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
| $C$                                     | 2.56E-9 | 2.65E-10 | 1.1E-17 | 2.63E-20 | 1.2E-22  | 2.16E-5 | 1.31E-9 | 4.5E-16 | 4.25E-27 | 1.39E-29 |
| $n$                                     | 14.84   | 22.30    | 29.12   | 34.03    | 35.52    | 9.96    | 14.91   | 27.01   | 38.75    | 39.15    |
| $r^2$                                   | 0.813   | 0.860    | 0.784   | 0.815    | 0.786    | 0.916   | 0.888   | 0.764   | 0.814    | 0.891    |
| <b>Smith</b>                            |         |          |         |          |          |         |         |         |          |          |
| $V_b$                                   | 0.256   | 0.364    | 0.258   | 0.263    | 0.239    | 0.319   | 0.244   | 0.266   | 0.207    | 0.181    |
| $V$                                     | 0.022   | 0.020    | 0.010   | 0.009    | 0.008    | 0.046   | 0.022   | 0.012   | 0.006    | 0.005    |
| $r^2$                                   | 0.766   | 0.816    | 0.723   | 0.760    | 0.721    | 0.880   | 0.834   | 0.708   | 0.756    | 0.846    |

### 7.3.5 K1 ve K2 Kömüründen $H_3PO_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların İzopropil Alkol Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.54'te K1 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle 500, 600, 700 ve  $800^\circ\text{C}$ 'de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermeleri verilmiştir.

Çizelge 7.55'de K1 kömürü, K1 Kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında; ticari aktif karbondan sonra, en yüksek yüzey alanlı aktif

karbonun 700°C’de elde edildiği ve bu numunenin % 22.70 ile en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

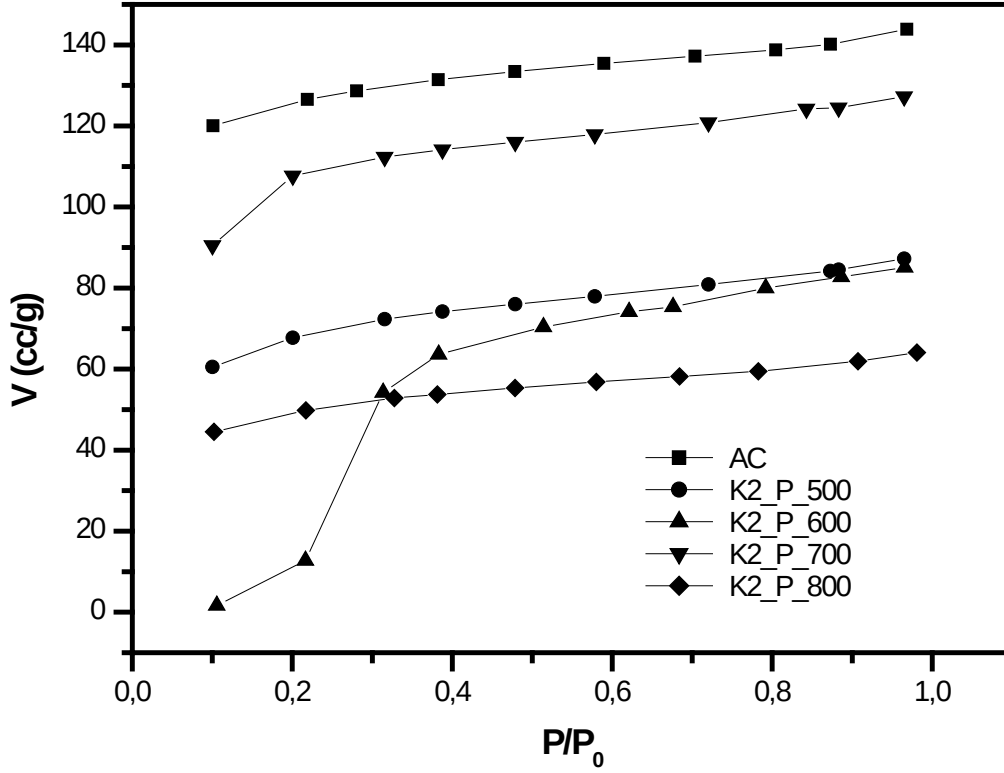


Şekil 7.54 K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.55 K1 Kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ ’da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % W<sub>m</sub> değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2                   | 26.4                        |
| K1       | 2                                   | 23.84 | 0.34                   | 0.87                        |
| K1_P_500 | 630                                 | 21.89 | 13.87                  | 20.57                       |
| K1_P_600 | 483                                 | 16.58 | 9.85                   | 15.33                       |
| K1_P_700 | 636                                 | 22.70 | 14.02                  | 20.76                       |
| K1_P_800 | 361                                 | 14.48 | 8.34                   | 13.20                       |

Şekil 7.55'te K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle 500, 600, 700 ve 800°C'de hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun izopropil alkol adsorpsiyon izotermi verilmiştir.



Şekil 7.55 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında izopropil alkolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.56'da K2 kömürü, K2 Kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında; ticari aktif karbondan sonra, en yüksek yüzey alanlı aktif karbonun 700°C'de elde edildiği ve bu numunenin % 25.45 ile en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer K1 kömüründen aynı şartlarda hazırlanan aktif karbondan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. K2\_P\_600 izopropil alkolü % 18.97 adsorplamasına rağmen, BET ve Langmuir izoterm modellerine ait % tek tabaka kapasiteleri hesaplanamamıştır.

Çizelge 7.57'de K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K2\_P\_600 isimli aktif karbonun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyum sağlamadığı, diğer aktif karbonların ise uyumlu

oldukları belirlenmiştir. En yüksek BET ve Langmuir izotermi tek tabaka kapasitelerinin en yüksek olduğu aktif karbon K2\_P\_700'dür. Freundlich izoterm modeli n parametresi BET ve Langmuir izoterm modellerine uyum sağlamayan K2\_P\_600 için 0.611 iken, diğer aktif karbonlar için 6.05-7.56 aralığında değişmektedir. K2\_P\_600 isimli aktif karbon için BET ve Langmuir izoterm modelinden tek tabaka kapasitesi hesaplanamamış, fakat Freundlich izoterm modelinden tek tabaka kapasitesi 0.403 olarak hesaplanmıştır. Bu değer Freundlich izoterm modelinden hesaplanan en yüksek tek tabaka kapasitesidir. Harkins-Jura izoterm modeli B parametresi K2\_P\_600 için 0.32 iken, diğer aktif karbonlar için 1.03-1.823 aralığında değişmektedir.

Çizelge 7.56 K2 Kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da izopropil alkolü adsorplama kapasiteleri ve % W<sub>m</sub> değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28    | 19.2                   | 26.4                        |
| K2       | 29                                  | 0.58  | 0.19                   | 0.64                        |
| K2_P_500 | 570                                 | 18.97 | 11.45                  | 17.56                       |
| K2_P_600 | 616                                 | 18.57 | -                      | -                           |
| K2_P_700 | 767                                 | 25.45 | 16.87                  | 25.32                       |
| K2_P_800 | 405                                 | 14.67 | 8.48                   | 13.42                       |

Çizelge 7.58'de K1 ve K2 kömürlerinden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli parametresi V<sub>0</sub>, K1\_P\_700 için 0.317 cc/g, K2\_P\_700 için 0.434 cc/g'dır. Bu değerler K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile elde edilen aktif karbonlar arasında belirlenen en yüksek değerlerdir. DA izoterm modeli parametresi W<sub>0</sub> ise, K1\_P\_700 için 0.36 cc/g, K2\_P\_700 için 0.55 cc/g'dır. Henderson izoterm modelinden hesaplanan K parametresi; K2\_P\_700 için 1.04E+8, K2\_P\_800 için 1.14E+9 olarak, n parametresi ise; K2\_P\_700 için 16.17, K2\_P\_800 için 11.13 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Henderson izoterm modeli için en yüksek değerlerdir. Henderson izoterm modelinde korelasyon katsayısı en yüksek aktif karbon K1\_P\_700 iken, Halsey ve Smith izoterm modelleri için ise K2\_P\_500'dür.

Çizelge 7.57 K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

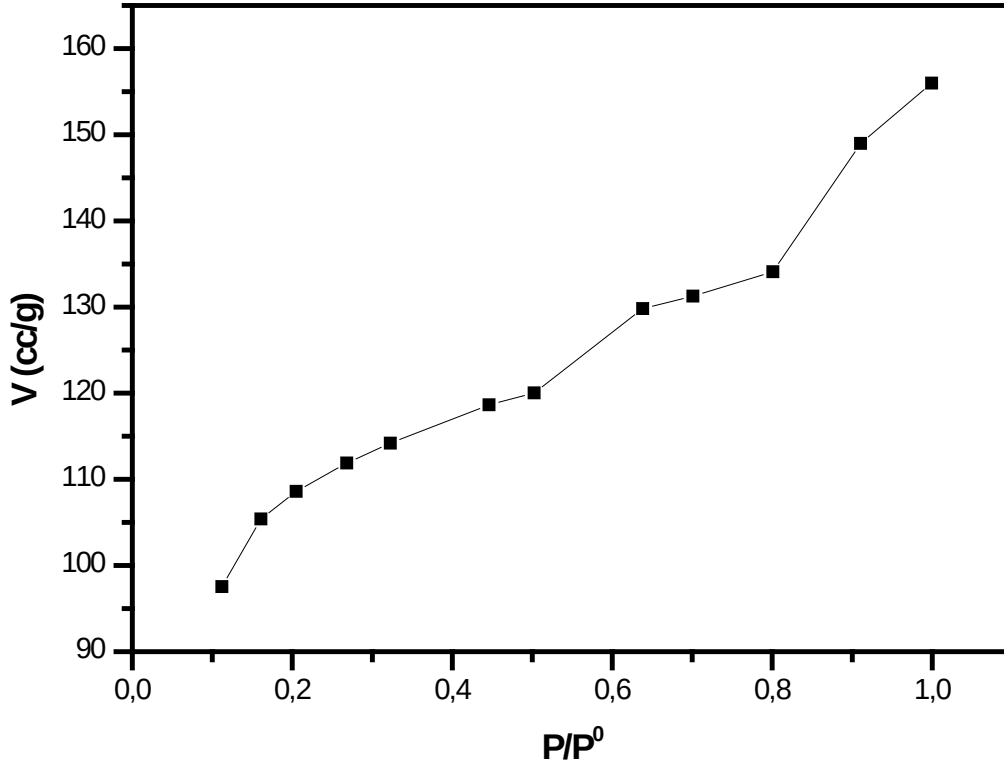
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_P_500 | K1_P_600 | K1_P_700 | K1_P_800 | K2_P_500 | K2_P_600 | K2_P_700 | K2_P_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 97.5     | 41.41    | 94.38    | 50.04    | 57.3     | -2.11    | 67.02    | 48.9     |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.161    | 0.109    | 0.163    | 0.091    | 0.129    | -        | 0.203    | 0.093    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.998    | 0.998    | 0.999    | 0.998    | 0.998    | 0.960    | 0.995    | 0.998    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 27.45    | 39.39    | 27.88    | 30.95    | 30.44    | -3.19    | 26.34    | 31.77    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.259    | 0.181    | 0.262    | 0.152    | 0.213    | -        | 0.339    | 0.155    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.950    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.280    | 0.194    | 0.284    | 0.165    | 0.231    | 0.403    | 0.343    | 0.167    |
| <b>n</b>                                | 6.163    | 7.89     | 6.05     | 6.52     | 6.54     | 0.611    | 7.56     | 6.64     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.998    | 0.984    | 0.998    | 0.986    | 0.992    | 0.820    | 0.951    | 0.986    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.086    | 0.052    | 0.084    | 0.030    | 0.06     | 0.020    | 0.21     | 0.032    |
| <b>B</b>                                | 1.08     | 1.36     | 1.03     | 1.08     | 1.11     | 0.320    | 1.823    | 1.107    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.998    | 0.986    | 0.982    | 0.990    | 0.994    | 0.907    | 0.990    | 0.990    |

Çizelge 7.58 K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine izopropil alkolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_P_500 | K1_P_600 | K1_P_700 | K1_P_800 | K2_P_500 | K2_P_600 | K2_P_700 | K2_P_800 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.861238)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b><math>V_0</math>(cc/g)</b>           | 0.313    | 0.220    | 0.317    | 0.183    | 0.257    | 0.256    | 0.434    | 0.187    |
| <b><math>E_0</math>(kJ/mol)</b>         | 13.0     | 15.8     | 13.1     | 14.15    | 13.9     | 3.25     | 11.2     | 14.3     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b><math>W_0</math>(cc/g)</b>           | 0.37     | 0.25     | 0.36     | 0.21     | 0.29     | 3.45     | 0.55     | 0.21     |
| <b>n</b>                                | 1        | 1        | 1.1      | 1.1      | 1.1      | 1        | 1        | 1        |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 13.53    | 19.8     | 13.53    | 15.57    | 14.77    | 0.85     | 9.73     | 16.33    |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 4.4E+6   | 5.6E+9   | 1.65E+6  | 9.6E+8   | 1.9E+7   | 2212     | 1.04E+8  | 1.14E+9  |
| <b>n</b>                                | 11.18    | 13.10    | 10.55    | 10.93    | 10.78    | 4.67     | 16.17    | 11.13    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.953    | 0.994    | 0.996    | 0.993    | 0.994    | 0.889    | 0.994    | 0.993    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 3.1E-14  | 1.56E-17 | 3.02E-12 | 2.86E-16 | 5.19E-12 | 9.65E-8  | 4.54E-13 | 2.01E-16 |
| <b>n</b>                                | 21.87    | 21.92    | 18.66    | 18.34    | 15.99    | 9.19     | 23.91    | 18.67    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.742    | 0.874    | 0.870    | 0.871    | 0.897    | 0.717    | 0.894    | 0.870    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b><math>V_b</math></b>                 | 0.237    | 0.168    | 0.236    | 0.138    | 0.191    | 0.165    | 0.298    | 0.141    |
| <b>V</b>                                | 0.013    | 0.009    | 0.015    | 0.009    | 0.015    | 0.023    | 0.015    | 0.009    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.688    | 0.834    | 0.836    | 0.834    | 0.861    | 0.707    | 0.847    | 0.834    |

#### 7.4 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA ASETON ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ.

Aseton adsorpsiyonu çalışmaları oda sıcaklığında buhar fazında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kömür numuneleri ve bu kömür numunelerinden elde edilen aktif karbonların asetonu adsorplama kapasiteleri ticari bir aktif karbonla da karşılaştırılmak istenmiştir, bu nedenle aynı şartlarda adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.56'da ticari aktif karbona ait asetonun adsorpsiyon izotermi verilmiştir.

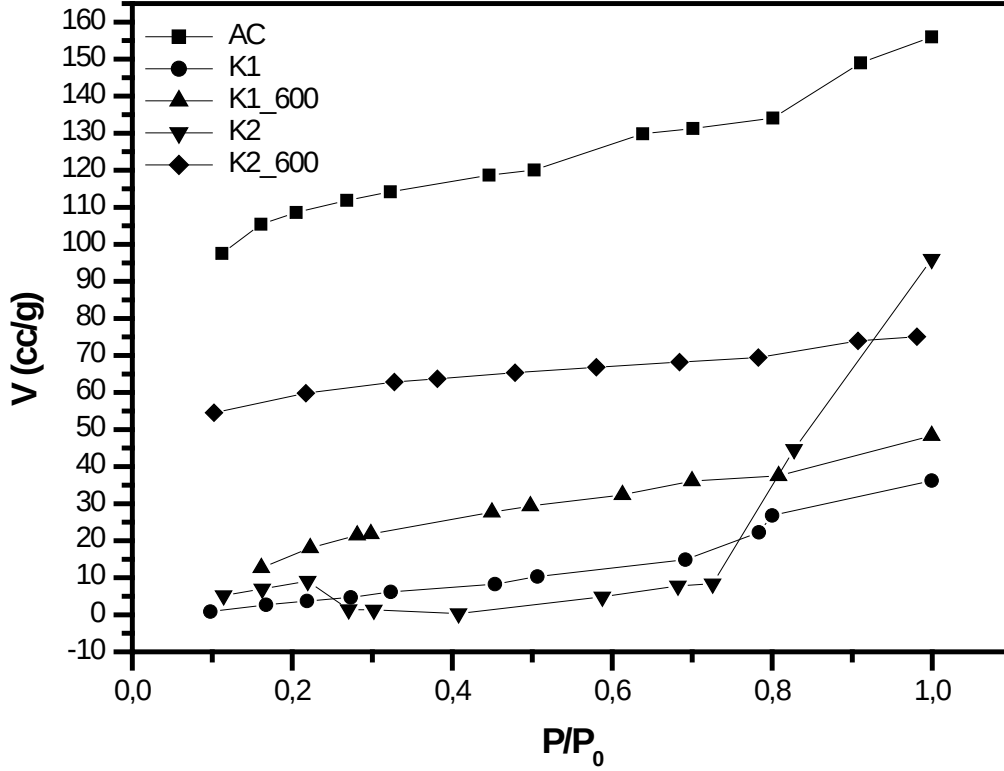


Şekil 7.56 Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

#### 7.4.1 K1 ve K2 Kömüründen N<sub>2</sub> Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Çalışmanın bu bölümünde kül oranları düşürülmüş kömürlerin asetonu adsorplama kapasiteleri belirlenmiş ve elde edilen aktif karbon numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.57’de K1, K2 kömürünün ve bu kömürlerden azot kullanarak 600°C’de fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine asetonun adsorpsiyon izotermi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 7.59’da ticari aktif karbonun (AC\_K), K1, K2 kömürünün ve bu kömürlerden azot kullanarak 600°C’de fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin ticari aktif karbonda olduğu gözlemlenmiştir. K1 kömürünün asetonu % 8.59 adsorpladığı, K2 kömürünün ise % 19.93 adsorpladığı belirlenmiştir.



Şekil 7.57 K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden azot kullanarak 600°C’de fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.59 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ ’da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K1       | 2                                   | 8.59  | -             | -                  |
| K1_600   | 119                                 | 11.14 | 6.02          | 28.37              |
| K2       | 29                                  | 19.93 | 0.09          | 0.11               |
| K2_600   | 311                                 | 18.48 | 8.77          | 17.90              |

Çizelge 7.60’da ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden 600°C’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K1 kömürünün aseton adsorpsiyonunun sadece Freundlich izoterm modeliyle uyumlu olduğu, diğer 3 izoterm modeline uyumlu olmadığı belirlenmiştir. BET ve Langmuir izoterm modelleri tek tabaka kapasitelerinin en yüksek ticari aktif karbonda olduğu belirlenmiştir. K1 kömürü için BET ve

Langmuir izoterm modellerinden belirlenemeyen tek tabaka kapasitesi Freundlich izoterm modelinden 0.083 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.60 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden 600°C’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |         |        |         |        |
|-----------------------------------------|-------|---------|--------|---------|--------|
|                                         | AC    | K1      | K1_600 | K2      | K2_600 |
| <b>BET</b>                              |       |         |        |         |        |
| <b>C</b>                                | 39.17 | -0.45   | 4.16   | 6.45    | 34.52  |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.194 | -       | 0.064  | 8.54E-4 | 0.101  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997 | 0.703   | 0.954  | 0.881   | 0.998  |
| <b>Langmuir</b>                         |       |         |        |         |        |
| <b>C</b>                                | 32.16 | -2      | 0.58   | -7.67   | 56.86  |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.324 | -       | 0.396  | 1.07E-3 | 0.122  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999 | 0.830   | 0.716  | 0.877   | 0.999  |
| <b>Freundlich</b>                       |       |         |        |         |        |
| <b>K</b>                                | 0.373 | 0.083   | 0.120  | 0.038   | 0.132  |
| <b>n</b>                                | 5.35  | 0.668   | 1.527  | 1.03    | 4.32   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.918 | 0.982   | 0.982  | 0.193   | 0.968  |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |         |        |         |        |
| <b>A</b>                                | 0.113 | 6.89E-5 | 1.8E-3 | 0.417   | 0.065  |
| <b>B</b>                                | 0.787 | -0.101  | 0.06   | 0.199   | 2.34   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.967 | 0.850   | 0.943  | 0.031   | 0.952  |

Çizelge 7.61’de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden 600°C’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K1 kömürünün Smith izoterm modeline, K2 kömürünün ise DA ve Smith izoterm modellerine uyum sağlamadıkları belirlenmiştir. DR izoterm modeli parametresi V<sub>0</sub>, ticari aktif karbon için 0.403 cc/g iken, K1 kömürü için 0.039 cc/g, K2 kömürü için 0.050 cc/g ve K2\_600 için 0.327 cc/g olarak belirlenmiştir. E<sub>0</sub> ise, ticari aktif karbon için 13.5 kJ/mol iken, K1 kömürü için 4.23 kJ/mol, K2 kömürü için 6.15 kJ/mol ve K2\_600 için ise 12.3 kJ/mol olarak belirlenmiştir. DA izoterm modeli parametresi n ticari aktif karbon ve K1 kömürü için 3.5, K1\_600 ve K2\_600 için 1 olarak belirlenmiştir. Henderson izoterm modeli parametreleri en yüksek ticari aktif karbondaki

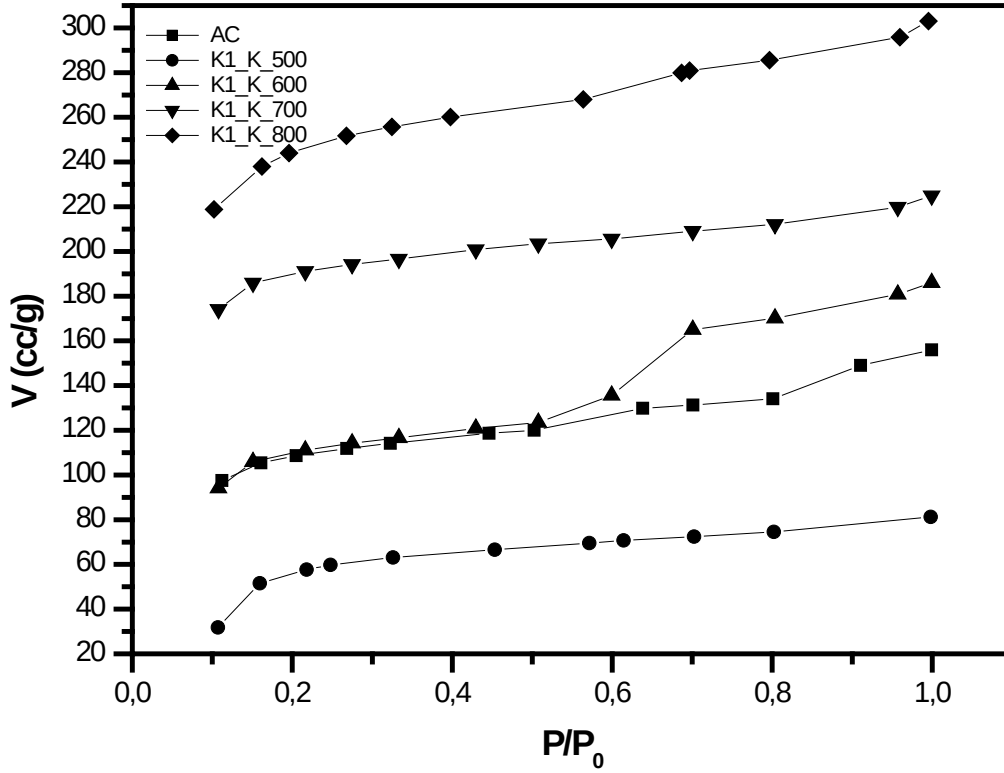
gözlemlenmiştir. Henderson ve Halsey izoterm modellerinde en düşük korelasyon katsayısı K2 kömüründe, Smith izoterm modelinde ise ticari aktif karbonda gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.61 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden 600°C’de N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |         |         |       |          |
|-----------------------------------------|----------|---------|---------|-------|----------|
|                                         | AC       | K1      | K1_600  | K2    | K2_600   |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.826033)</b> |          |         |         |       |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.403    | 0.039   | 0.125   | 0.050 | 0.327    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 13.5     | 4.23    | 5.132   | 6.15  | 12.3     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.996    | 0.998   | 0.999   | 0.998 | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |         |         |       |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.38     | 0.02    | 0.310   | -     | 0.28     |
| <b>n</b>                                | 3.50     | 3.50    | 1       | -     | 1        |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 9.00     | 4.71    | 2.22    | -     | 8.37     |
| <b>Henderson</b>                        |          |         |         |       |          |
| <b>K</b>                                | 10360    | 72.02   | 457.5   | 0.388 | 9875     |
| <b>n</b>                                | 8.374    | 1.251   | 2.49    | 0.452 | 6.456    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.976    | 0.908   | 0.980   | 0.570 | 0.965    |
| <b>Halsey</b>                           |          |         |         |       |          |
| <b>C</b>                                | 4.09E-12 | 2.42E-7 | 5.51E-4 | 8.11  | 3.12E-10 |
| <b>n</b>                                | 22.37    | 3.96    | 2.69    | 1.89  | 12.34    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.737    | 0.585   | 0.912   | 0.530 | 0.982    |
| <b>Smith</b>                            |          |         |         |       |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.294    | -0.001  | 0.046   | -1.50 | 0.198    |
| <b>V</b>                                | 0.018    | 0.040   | 0.036   | 13.43 | 0.011    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.668    | 0.969   | 0.907   | 0.911 | 0.854    |

#### 7.4.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.58’de K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermeleri verilmiştir. K1\_K\_500 ve K1\_K\_700’ün aseton adsorpsiyon izotermeleri Tip I izotermine benzemektedir.



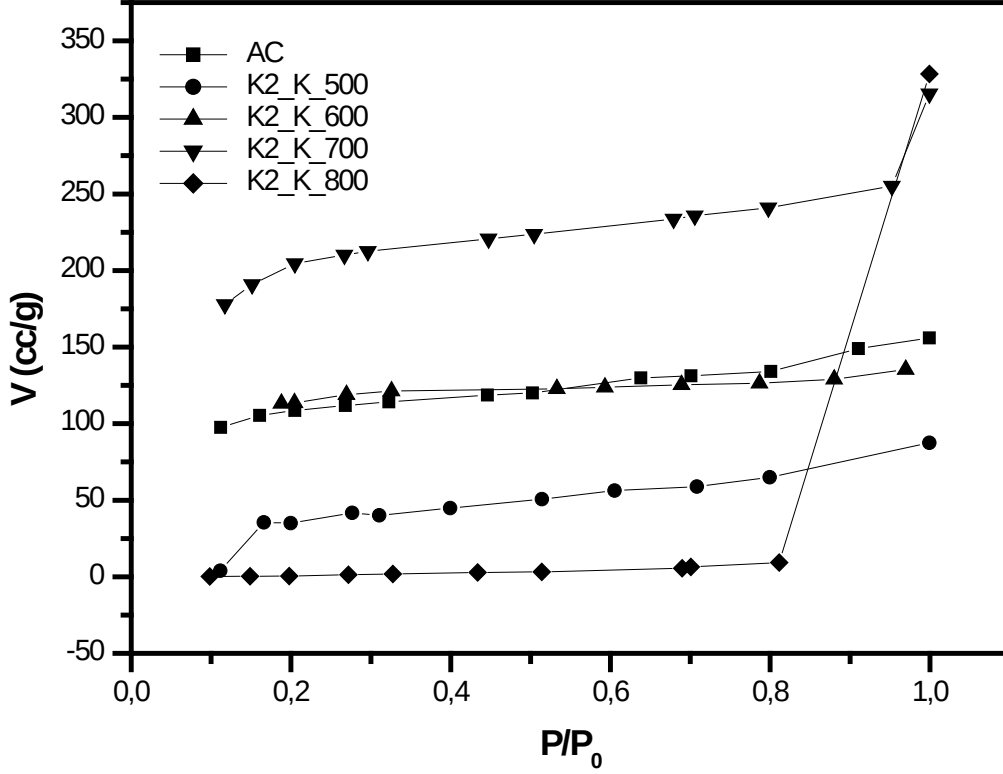
Şekil 7.58 K1 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.62’de K1 kömürü, K1 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_K\_800) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbon asetonu K1 kömüründen 5.1, ticari aktif karbondan ise 0.66 kat daha fazla adsorplamıştır.

Çizelge 7.62 K1 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ ’da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28.80 | 16.25                  | 24.47                       |
| K1       | 2                                   | 8.59  | -                      | -                           |
| K1_K_500 | 728                                 | 17.40 | 11.66                  | 22.48                       |
| K1_K_600 | 1297                                | 32.53 | 16.53                  | 25.21                       |
| K1_K_700 | 1755                                | 36.84 | 24.64                  | 35.07                       |
| K1_K_800 | 1904                                | 44.00 | 30.28                  | 41.79                       |

Şekil 7.59’da K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, K2\_K\_700 ve K2\_K\_800 isimli aktif karbonların aseton izotermi Tip II izotermine benzedikleri gözlemlenmiştir.



Şekil 7.59 K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.63’de K2 kömürü, K2 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunelerinin en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbonlar K2\_K\_700 ve K2\_K\_800 isimli aktif karbonlardır ve sırasıyla % 45 ve 45.99 asetonu adsorplamışlardır. K2\_K\_800 isimli aktif karbon asetonu K2 kömüründen 2.31 kat, ticari aktif karbondan ise 1.6 kat daha fazla adsorplamıştır. K2\_K\_500 isimli aktif karbon asetonu % 18.48 adsorpladığı halde BET ve Langmuir izoterm modellerine uyum sağlamadığı belirlenmiştir.

Çizelge 7.63 K2 Kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K2       | 29                                  | 19.93 | 0.09          | 0.11               |
| K2_K_500 | 382                                 | 18.48 | -             | -                  |
| K2_K_600 | 1051                                | 25.97 | 16.25         | 25.98              |
| K2_K_700 | 1659                                | 45.00 | 27.59         | 38.65              |
| K2_K_800 | 1080                                | 45.99 | 28.60         | 40.43              |

Çizelge 7.64'de K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K2\_K\_500 üzerine aseton adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyum sağlamadığı, diğer aktif karbonların bu iki izoterm modellerine uygun oldukları belirlenmiştir. K1\_K\_800 isimli aktif karbonun BET ve Langmuir tek tabaka kapasiteleri sırasıyla 0.434 g/g ve 0.718 g/g olarak, Freundlich izoterm modeli tek tabaka kapasitesi ise 0.766 olarak belirlenmiştir. Bu değerler tabloda gözlemlenen en yüksek değerlerdir. K2\_K\_500 isimli aktif karbonun Freundlich izoterm modeli korelasyon katsayısı diğer aktif karbonlardan oldukça küçüktür. Yani bu aktif karbon Langmuir izoterm modeline en az uyumlu aktif karbondur. K2\_K\_500 için BET ve Langmuir izoterm modellerinden belirlenemeyen tek tabaka kapasitesi Freundlich izoterm modelinden 0.253 olarak belirlenmiştir. Freundlich Harkins-Jura izoterm modeline en uyumlu aktif karbonların K1\_K\_500 ve K2\_K\_800 oldukları belirlenmiştir.

Çizelge 7.65'de K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR ve DA izoterm modelleri  $V_0$  ve  $W_0$  parametreleri en yüksek değerlerini sırasıyla 0.897 cc/g ve 0.86 cc/g ile K1\_K\_800 isimli aktif karbonda almışlardır. DR izoterm modeline en az uyumlu aktif karbonların K1\_K\_500 ve K2\_K\_500 olduğu belirlenmiştir. Bu aktif karbonlar, diğer aktif karbonlarla karşılaştırıldığında daha düşük yüzey alanına sahip aktif karbonlardır. Henderson izoterm modelinden hesaplanan K parametresi; K1\_K\_700 için 268203, K2\_K\_600 için 4.8E+8 olarak, n parametresi ise; K1\_K\_700 için 19.96, K2\_K\_600 için 17.73 olarak hesaplanmıştır.

Bu değerler Henderson izoterm modeli için çizelgede gözlemlenen en yüksek değerlerdir. Henderson izoterm modeline en az uyumlu aktif karbonun K1\_K\_600 olduğu, Halsey ve Smith izoterm modellerine ise K1\_K\_700 isimli aktif karbonun olduğu belirlenmiştir. Diğer aktif karbonlara göre daha düşük yüzey alanına sahip K1\_K\_500 ve K2\_K\_500 isimli aktif karbonlar, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modellerine diğer aktif karbonlardan daha uyumlu göründükleri için bu izoterm modellerinin adsorplama kapasitesi ve yüzey alanı daha düşük olan aktif karbonlar için daha uygun oldukları belirlenmiştir.

Çizelge 7.64 K1 ve K2 kmrllerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_K_500 | K1_K_600 | K1_K_700 | K1_K_800 | K2_K_500 | K2_K_600 | K2_K_700 | K2_K_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 16.77    | 46.55    | 31.06    | 38.25    | -1.53    | 22.33    | 68.21    | 69.24    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.132    | 0.198    | 0.327    | 0.434    | -        | 0.194    | 0.381    | 0.384    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.952    | 0.996    | 0.996    | 0.996    | 0.543    | 0.999    | 0.997    | 0.998    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 4.43     | 26.27    | 50.3     | 37.27    | -2.815   | 26.33    | 24.06    | 23.67    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.29     | 0.337    | 0.540    | 0.718    | -        | 0.351    | 0.63     | 0.61     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.926    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.613    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.219    | 0.445    | 0.568    | 0.766    | 0.253    | 0.340    | 0.634    | 0.625    |
| <b>n</b>                                | 3.09     | 3.40     | 10.34    | 7.89     | 1.08     | 11.74    | 5.513    | 5.643    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.832    | 0.890    | 0.964    | 0.978    | 0.655    | 0.907    | 0.814    | 0.980    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.032    | 0.079    | 0.637    | 0.844    | 7.4E-3   | 0.264    | 0.566    | 0.601    |
| <b>B</b>                                | 0.741    | 0.363    | 1.967    | 1.428    | 0.146    | 2.28     | 1.347    | 1.432    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.993    | 0.908    | 0.961    | 0.979    | 0.980    | 0.890    | 0.978    | 0.997    |

Çizelge 7.65 K1 ve K2 kömürlerinden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

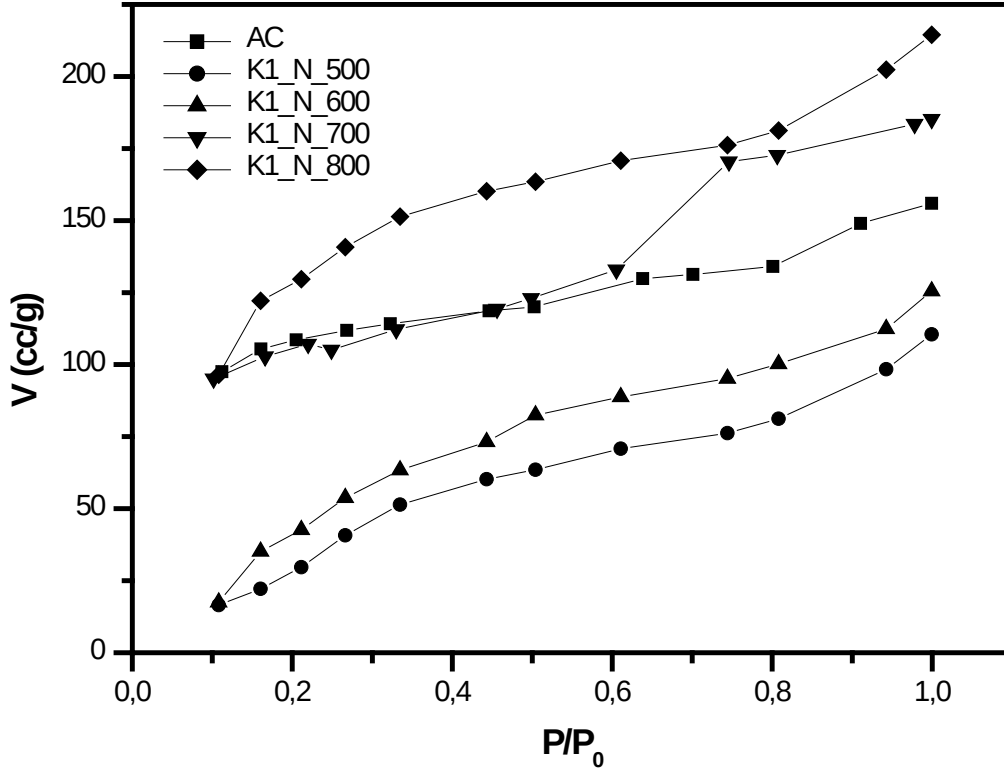
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_K_500 | K1_K_600 | K1_K_700 | K1_K_800 | K2_K_500 | K2_K_600 | K2_K_700 | K2_K_800 |
| <b>DR (<math>\beta:0.826033</math>)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.337    | 0.427    | 0.685    | 0.897    | 2.368    | 0.381    | 0.794    | 0.797    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 6.17     | 11.7     | 15.6     | 14.2     | 2.87     | 29.8     | 11.4     | 12.1     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.975    | 0.980    | 0.999    | 0.999    | 0.960    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.24     | 0.39     | 0.65     | 0.86     | 0.49     | 0.39     | 0.77     | 0.79     |
| <b>n</b>                                | 3.50     | 3.50     | 3.50     | 2.80     | 3.50     | 1        | 2.30     | 2.35     |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 5.74     | 8.27     | 9.75     | 10.3     | 3.72     | 76.4     | 9.09     | 9.78     |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 2.66E+5  | 56.05    | 268203   | 125.8    | 493.7    | 4.8E+8   | 60.81    | 61.23    |
| <b>n</b>                                | 7.37     | 4.12     | 19.96    | 14.07    | 3.22     | 17.73    | 8.318    | 8.987    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.990    | 0.910    | 0.987    | 0.982    | 0.985    | 0.937    | 0.932    | 0.942    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 1.02E-6  | 6.44E-4  | 2.47E-15 | 1.58E-5  | 7.17E-4  | 2.46E-14 | 1.74E-5  | 1.67E-5  |
| <b>n</b>                                | 7.63     | 6.37     | 51.28    | 28.25    | 3.31     | 26.80    | 19.14    | 18.74    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.935    | 0.85     | 0.768    | 0.799    | 0.960    | 0.905    | 0.972    | 0.985    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.149    | 0.287    | 0.515    | 0.666    | 0.087    | 0.304    | 0.548    | 0.543    |
| <b>V</b>                                | 0.031    | 0.069    | 0.011    | 0.027    | 0.054    | 0.014    | 0.037    | 0.041    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.900    | 0.815    | 0.729    | 0.751    | 0.955    | 0.878    | 0.969    | 0.966    |

#### 7.4.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.60’da K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların aseton adsorpsiyon izotermeleri verilmiştir.

Çizelge 7.66’da K1 kömürü, K1 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_N\_800) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu aktif karbon asetonu K1

kömüründen 4.2, ticari aktif karbondan ise 1.2 kat daha fazla adsorplamıştır. Çizelgeden K1 kömürünün BET ve Langmuir izotermine, K1\_N\_600 ve K1\_N\_700'ün ise Langmuir izoterm modeline uygun olmadıkları belirlenmiştir.

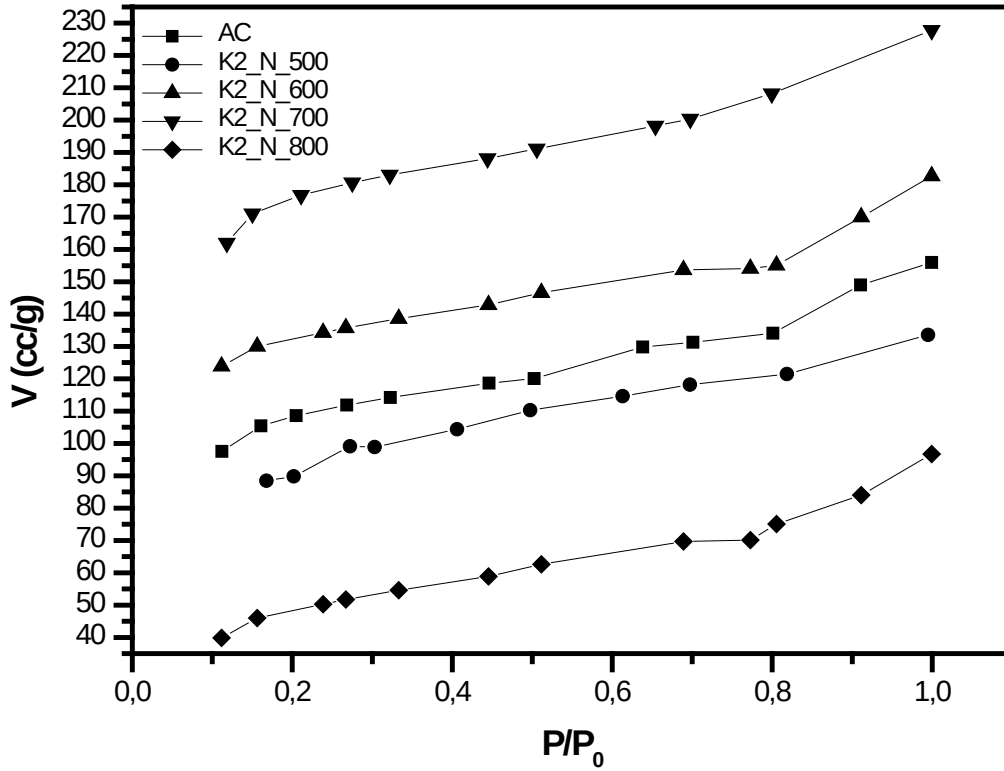


Şekil 7.60 K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.66 K1 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K1       | 2                           | 8.59  | -             | -                  |
| K1_N_500 | 281                         | 22.27 | 13.94         | -                  |
| K1_N_600 | 495                         | 24.55 | 18.23         | -                  |
| K1_N_700 | 1059                        | 32.44 | 16.53         | 23.84              |
| K1_N_800 | 1188                        | 35.74 | 21.57         | 34.43              |

Şekil 7.61'de K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermi verilmiştir.



Şekil 7.61 K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.67’de K2 kömürü, K2 kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K2\_N\_700) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu aktif karbon asetonu K2 kömüründen 1.9, ticari aktif karbondan ise 1.3 kat daha fazla adsorplamıştır. Her iki kömür için de KOH ile kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların, asetonu NaOH ile elde edilen aktif karbonlardan daha fazla adsorpladıkları belirlenmiştir.

Çizelge 7.68’de K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K1\_N\_500’ün hem Langmuir hem de Harkins-Jura izoterm modellerine, K1\_N\_600’ün ise Langmuir izoterm modeline uyumlu olmadıkları belirlenmiştir. K1\_N\_500 isimli aktif karbon BET ve Freundlich izoterm modellerine  $r^2$  değerleri sırasıyla 0.915 ve 0.980 ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. BET ve Langmuir izoterm modellerinden hesaplanan tek tabaka kapasiteleri en yüksek değerlerini

K1\_N\_800 ve K2\_N\_700 isimli aktif karbonlarda almışlardır. Bu aktif karbonlar; Harkins-Jura izoterm modeli A parametresinin sırasıyla 0.138 ve 0.393 ile, Freundlich izoterm modeli K parametresinin sırasıyla 0.527 ve 0.555 ile en yüksek olduğu aktif karbonlardır. Bu iki aktif karbon aynı zamanda en yüksek adsorplama kapasitelerine sahip aktif karbonlardır. K1\_N\_600 isimli aktif karbon için tek tabaka kapasitesi 0.223 g/g olarak belirlenmesine rağmen  $r^2$  değeri 0.61 olduğu için bu izoterm modeline uyumlu olmadığı düşünülmüştür.

Çizelge 7.67 K2 Kömüründen NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC_K     | 745                                 | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K2       | 29                                  | 19.93 | 0.09          | 0.11               |
| K2_N_500 | 774                                 | 25.73 | 14.82         | 23.78              |
| K2_N_600 | 1098                                | 32.15 | 18.70         | 27.54              |
| K2_N_700 | 1335                                | 37.14 | 23.55         | 33.78              |
| K2_N_800 | 685.5                               | 20.05 | 8.76          | 14.60              |

Çizelge 7.69'da K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.579 cc/g ve 0.642 cc/g ile sırasıyla K1\_N\_800 ve K2\_N\_700 isimli aktif karbonlarda almışlardır. DA izoterm modeli  $W_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.49 cc/g ve 0.45 cc/g ile sırasıyla K1\_N\_800 ve K2\_N\_600 isimli aktif karbonlarda almışlardır. K2\_N\_700 DA izoterm modeline uyumlu görünmemektedir. Henderson izoterm modeli K ve n parametreleri en yüksek değerlerini K2\_N\_600 ve K2\_N\_700 isimli aktif karbonların asetonu adsorpsiyonunda almışlardır. K parametresi K2\_N\_600 için 14771 iken K2\_N\_700 için 6130.7 olarak belirlenmiştir. n parametresi ise, K2\_N\_600 için 10.248 iken K2\_N\_700 için 13 olarak belirlenmiştir. Bu izoterm modelinde K ve n parametreleri ne kadar büyük olursa, adsorbentinde mikro gözenekli yapısının o kadar kararlı olacağı belirtilmiştir (Polatoğlu 2006). Çizelgede K1 kömüründen elde edilen aktif karbonların Henderson izotermi parametrelerinin K2 kömüründen elde edilen aktif karbonlara göre düşük oldukları gözlemlenmektedir. Halsey ve Smith izoterm modeline en az uyumlu aktif karbonun K1\_N\_700 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.68 K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_N_500 | K1_N_600 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 | K2_N_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 2.368    | 2.191    | 39.76    | 59.74    | 53.98    | 31.39    | 33.36    | 334      |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.162    | 0.223    | 0.189    | 0.275    | 0.174    | 0.23     | 0.308    | 0.096    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.915    | 0.610    | 0.997    | 0.996    | 0.998    | 0.997    | 0.997    | 0.997    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | -0.2     | -0.4     | 34.17    | 8.71     | 15.80    | 47.93    | 41.58    | 13.94    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -        | -        | 0.313    | 0.525    | 0.312    | 0.38     | 0.51     | 0.171    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.362    | 0.330    | 0.999    | 0.998    | 0.997    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.277    | 0.333    | 0.445    | 0.527    | 0.334    | 0.43     | 0.555    | 0.214    |
| <b>n</b>                                | 1.24     | 1.325    | 3.23     | 3.304    | 4.57     | 6.89     | 7.65     | 2.893    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.980    | 0.952    | 0.869    | 0.966    | 0.983    | 0.865    | 0.922    | 0.937    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 5.55E-3  | 0.011    | 0.067    | 0.138    | 0.076    | 0.192    | 0.393    | 0.016    |
| <b>B</b>                                | -7.03E-3 | 0.043    | 0.291    | 0.485    | 0.641    | 1.005    | 1.25     | 0.304    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.782    | 0.862    | 0.950    | 0.968    | 0.980    | 0.905    | 0.933    | 0.984    |

Çizelge 7.69 K1 ve K2 kömürlerinden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

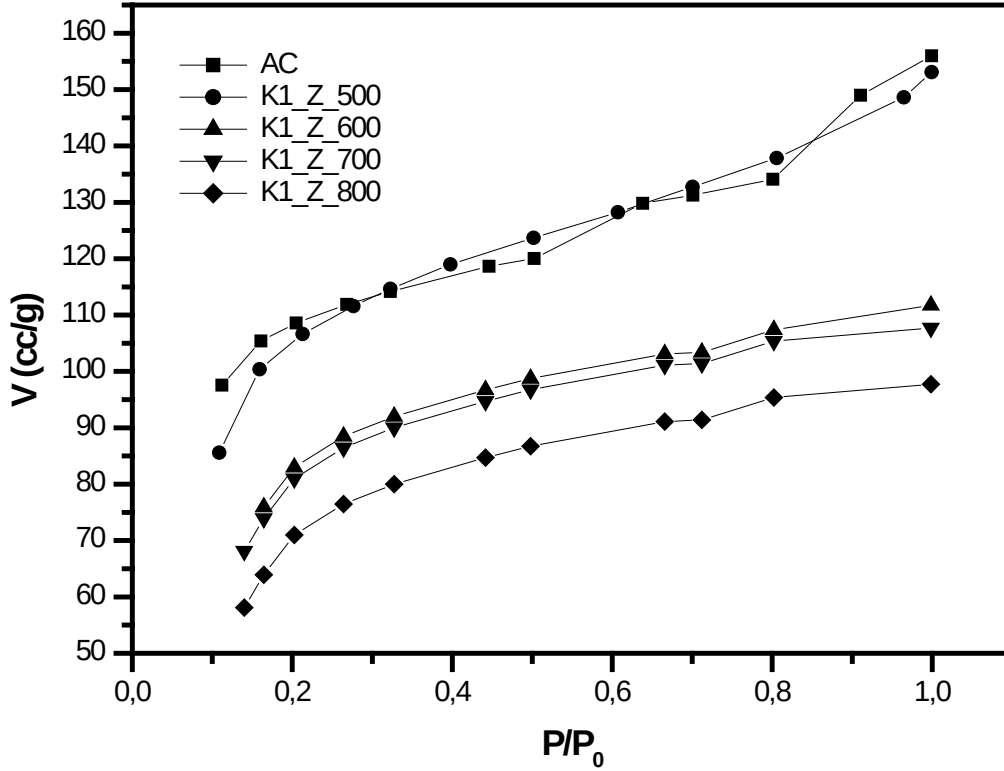
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_N_500 | K1_N_600 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 | K2_N_800 |
| <b>DR (<math>\beta:0.826033</math>)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.163    | 0.353    | 0.385    | 0.579    | 0.312    | 0.468    | 0.642    | 0.198    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 6.20     | 4.91     | 14.7     | 8.52     | 19.3     | 17.3     | 14.7     | 10.19    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.988    | 0.987    | 0.999    | 0.984    | 0.999    | 0.993    | 0.999    | 0.990    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.37     | 0.21     | 0.42     | 0.49     | 0.33     | 0.45     | -        | 0.18     |
| <b>n</b>                                | 1        | 3.50     | 1.30     | 3.50     | 1        | 3.50     | -        | 3.50     |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 2.81     | 5.06     | 14.5     | 6.93     | 30.6     | 10.2     | -        | 7.54     |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 38.88    | 43.58    | 97.40    | 258.5    | 3292     | 14771    | 6130.7   | 2180     |
| <b>n</b>                                | 2.12     | 2.50     | 4.482    | 6.719    | 6.69     | 10.248   | 13.00    | 4.39     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.960    | 0.931    | 0.885    | 0.96     | 0.974    | 0.978    | 0.991    | 0.990    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 1.3E-3   | 1.12E-3  | 2.52E-7  | 6.81E-8  | 6.25E-5  | 8.61E-12 | 2.28E-11 | 2.97E-5  |
| <b>n</b>                                | 3.21     | 3.766    | 13.36    | 18.14    | 7.25     | 25.67    | 34.05    | 5.39     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.774    | 0.770    | 0.626    | 0.703    | 0.903    | 0.824    | 0.804    | 0.972    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.105    | 0.142    | 0.315    | 0.395    | 0.239    | 0.365    | 0.481    | 0.013    |
| <b>V</b>                                | 0.06     | 0.063    | 0.029    | 0.026    | 0.052    | 0.017    | 0.016    | 0.040    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.843    | 0.800    | 0.596    | 0.702    | 0.868    | 0.804    | 0.781    | 0.966    |

#### 7.4.4 K1 ve K2 Kömüründen ZnCl<sub>2</sub> Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.62’de K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların aseton adsorpsiyon izotermi verilmektedir.

Çizelge 7.70’de K1 kömürü, K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmektedir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_Z\_500) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. ZnCl<sub>2</sub> ile hazırlanan bu aktif

karbonlar arasında 400°C’de hazırlanan aktif karbonun BET yüzey alanı 767 m<sup>2</sup>/g olmasına rağmen asetonu ancak % 1.43 adsorpladığı belirlenmiştir. Diğer sıcaklıklarda hazırlanan aktif karbonların (500, 600, 700 ve 800°C) adsorplama kapasiteleri % 20.87-28.42 arasında değişmektedir.

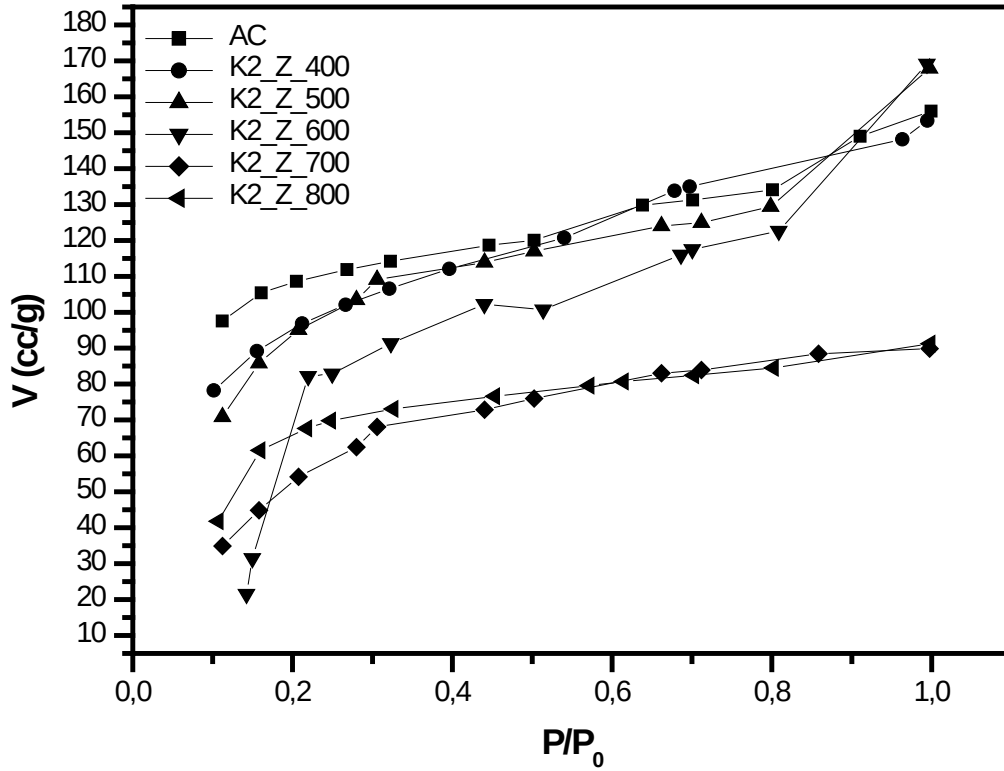


Şekil 7.62 K1 kömüründen ZnCl<sub>2</sub> kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.70 K1 Kömüründen ZnCl<sub>2</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 28.80 | 16.25                  | 24.47                       |
| K1       | 2                                   | 8.59  | -                      | -                           |
| K1_Z_400 | 767                                 | 1.43  | 0.366                  | 1.71                        |
| K1_Z_500 | 885                                 | 28.42 | 16.88                  | 26.20                       |
| K1_Z_600 | 783                                 | 22.46 | 13.64                  | 23.14                       |
| K1_Z_700 | 714                                 | 21.83 | 13.87                  | 23.37                       |
| K1_Z_800 | 711                                 | 20.87 | 13.82                  | 20.00                       |

Şekil 7.63’de K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermi verilmiştir.



Şekil 7.63 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.71’de K2 kömürü, K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesi (K2\_Z\_400) asetonu % 28.45 adsorplarken, daha düşük yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K2\_Z\_600) % 30.49 ile en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  ile 800°C’de elde edilen aktif karbon hariç diğer aktif karbonların asetonu adsorplama kapasitelerinin K1 kömüründen elde edilenlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.72’de K1 ve K2 kömürlerinden  $\text{ZnCl}_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K1\_Z\_400 ve K2\_Z\_800 isimli aktif karbonların aseton adsorpsiyonunun Harkins-Jura, K2\_Z\_600’ün ise BET, Langmuir ve Harkins-Jura izoterm modellerine uyumlu olmadıkları belirlenmiştir. BET ve Langmuir izoterm modellerinden hesaplanan tek tabaka kapasiteleri en yüksek olan aktif karbonların

K1\_Z\_500 ve K2\_Z\_500 olduğu görülmektedir. Bu aktif karbonlar aynı zamanda yüksek adsorplama kapasitesine sahip aktif karbonlardır. Freundlich izoterm modeli K sabiti, K1\_Z\_500 için 0.383, K2\_Z\_400 için 0.386 ve K2\_Z\_500 için 0.385 olarak belirlenmiştir. Bu izoterm parametresi tek tabaka değerine karşılık gelmektedir ve adsorbentin adsorpsiyon kapasitesi hakkında bilgi vermektedir (Polatoğlu 2006).

Çizelge 7.71 K2 Kömüründen  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K2       | 29                          | 19.93 | 0.09          | 0.11               |
| K2_Z_400 | 926                         | 28.45 | 16.04         | 24.87              |
| K2_Z_500 | 841                         | 30.33 | 17.35         | 28.39              |
| K2_Z_600 | 771                         | 30.49 | -             | -                  |
| K2_Z_700 | 657                         | 18.90 | 13.12         | 27.06              |
| K2_Z_800 | 584                         | 19.13 | 12.51         | 22.18              |

Çizelge 7.73'de K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.436 cc/g ve 0.43 cc/g ile sırasıyla K1\_Z\_500 ve K2\_Z\_500 isimli aktif karbonlarda almışlardır. DA izoterm modeli  $W_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.54 cc/g ve 0.67 cc/g ile sırasıyla K1\_Z\_600 ve K2\_Z\_600 isimli aktif karbonlarda almışlardır. Buradan  $ZnCl_2$  ile 500°C'de elde edilen aktif karbonların DR izoterm modelinde, 600°C'de elde edilen aktif karbonların ise DA modelinde daha yüksek mikro gözenek hacmi değerine sahip oldukları belirlenmiştir. Henderson izoterm modeli K parametresi en yüksek değerlerini K1\_Z\_600 ve K2\_Z\_800 isimli aktif karbonların asetonu adsorpsiyonunda almışlardır. K parametresi K1\_Z\_600 için 37867 iken K2\_Z\_800 için 589423 olarak belirlenmiştir. n parametresi ise, K1\_Z\_500 için 8.828 iken K2\_Z\_800 için 8.50 olarak belirlenmiştir. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, aseton adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K1\_Z\_500 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir. Bu aktif karbon aseton adsorpsiyon kapasitesi en yüksek olan aktif karbonlardan biridir.

Çizelge 7.72 K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

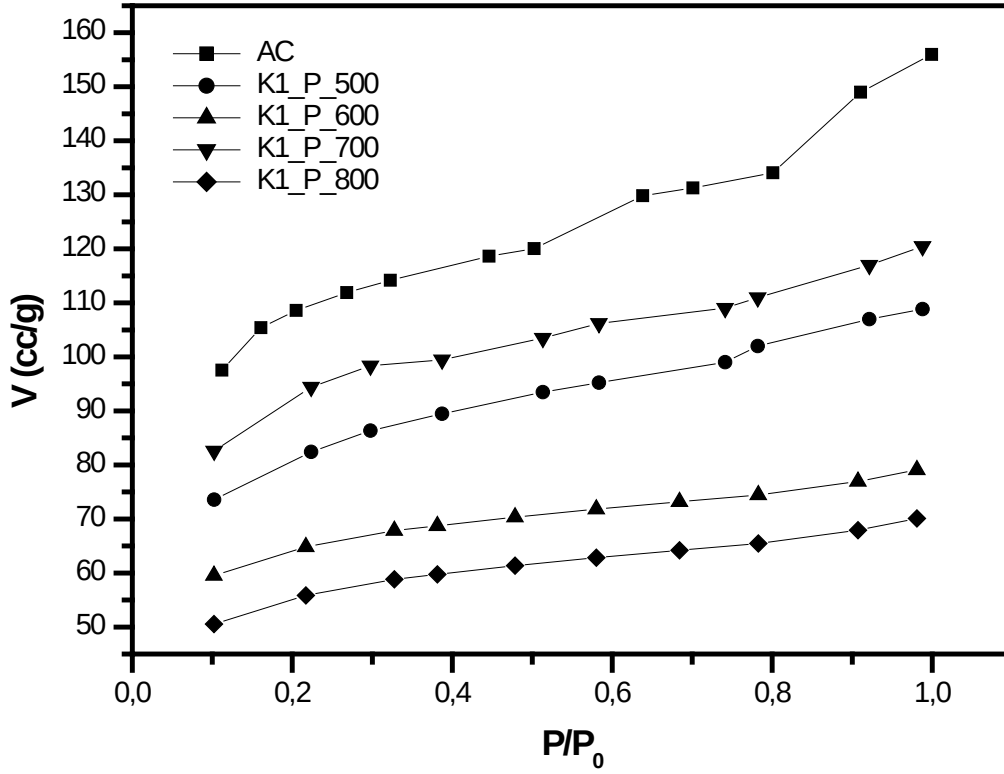
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                         | K1Z400  | K1Z500 | K1Z600 | K1Z700 | K1Z800 | K2Z400 | K2Z500 | K2Z600 | K2Z700 | K2Z800 |
| <b>BET</b>                              |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>C</b>                                | 4.268   | 145.2  | 68.65  | 2444   | 94.48  | 738.1  | 35.12  | -0.48  | 9.454  | 31.73  |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.004   | 0.203  | 0.158  | 0.161  | 0.146  | 0.191  | 0.210  | -      | 0.151  | 0.143  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.776   | 0.996  | 0.997  | 0.995  | 0.994  | 0.998  | 0.997  | 0.511  | 0.996  | 0.973  |
| <b>Langmuir</b>                         |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>C</b>                                | 0.799   | 16.19  | 11.90  | 10.26  | 8.357  | 15.1   | 7.846  | -2.02  | 2.88   | 6.74   |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | 0.017   | 0.355  | 0.301  | 0.305  | 0.286  | 0.331  | 0.397  | -      | 0.371  | 0.285  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.372   | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.998  | 0.999  | 0.998  | 0.688  | 0.993  | 0.972  |
| <b>Freundlich</b>                       |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>K</b>                                | 0.014   | 0.383  | 0.291  | 0.288  | 0.262  | 0.386  | 0.385  | 0.369  | 0.254  | 0.243  |
| <b>n</b>                                | 0.932   | 4.384  | 5.12   | 4.625  | 4.09   | 3.522  | 3.237  | 2.52   | 2.44   | 3.67   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.967   | 0.976  | 0.978  | 0.960  | 0.954  | 0.992  | 0.926  | 0.880  | 0.942  | 0.850  |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| <b>A</b>                                | 3.39E-6 | 0.105  | 0.074  | 0.073  | 0.052  | 0.071  | 0.075  | 0.042  | 0.023  | 0.049  |
| <b>B</b>                                | -0.118  | 0.708  | 0.85   | 0.887  | 0.755  | 0.444  | 0.505  | -0.280 | 0.349  | -0.898 |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.819   | 0.992  | 0.978  | 0.975  | 0.970  | 0.996  | 0.933  | 0.974  | 0.900  | 0.993  |

Çizelge 7.73 K1 ve K2 kömürlerinden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
|-----------------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
|                                         | K1Z400 | K1Z500  | K1Z600 | K1Z700 | K1Z800 | K2Z400 | K2Z500 | K2Z600 | K2Z700 | K2Z800  |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.861238)</b> |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
| $V_0(\text{cc/g})$                      | 0.005  | 0.436   | 0.374  | 0.371  | 0.343  | 0.380  | 0.43   | 1.855  | 0.282  | 0.354   |
| $E_0(\text{kJ/mol})$                    | 6.78   | 9.93    | 8.35   | 8.15   | 7.58   | 10.8   | 8.25   | 3.23   | 6.78   | 6.86    |
| $r^2$                                   | 0.744  | 0.992   | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.999  | 0.998  | 0.987  | 0.999  | 0.977   |
| <b>DA</b>                               |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
| $W_0(\text{cc/g})$                      | 0      | 0.38    | 0.54   | 0.34   | 0.31   | 0.40   | 0.36   | 0.67   | 0.40   | 0.27    |
| $n$                                     | 3.50   | 3.50    | 1      | 2.50   | 2.60   | 1.70   | 3.30   | 3.50   | 1.30   | 3.50    |
| $E(\text{kJ/mol})$                      | 5.96   | 7.56    | 5.73   | 6.74   | 6.36   | 9.03   | 6.82   | 3.81   | 4.47   | 6.10    |
| <b>Henderson</b>                        |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
| $K$                                     | 204.7  | 17142   | 37867  | 35267  | 23327  | 1131.5 | 1026.2 | 178.85 | 808    | 589423  |
| $n$                                     | 1.11   | 8.828   | 7.93   | 7.76   | 6.92   | 6.224  | 6.082  | 4.211  | 4.28   | 8.50    |
| $r^2$                                   | 0.984  | 0.973   | 0.976  | 0.976  | 0.975  | 0.979  | 0.980  | 0.990  | 0.935  | 0.990   |
| <b>Halsey</b>                           |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
| $C$                                     | 1.8E-3 | 1.3E-12 | 5.6E-6 | 6.0E-6 | 9.2E-6 | 8.1E-8 | 8.5E-8 | 1.4E-5 | 1.0E-4 | 4.57E-7 |
| $n$                                     | 1.14   | 23.35   | 8.43   | 8.25   | 7.36   | 13.18  | 12.99  | 7.968  | 5.24   | 8.781   |
| $r^2$                                   | 0.950  | 0.725   | 0.912  | 0.912  | 0.910  | 0.764  | 0.886  | 0.898  | 0.830  | 0.937   |
| <b>Smith</b>                            |        |         |        |        |        |        |        |        |        |         |
| $V_b$                                   | 7.5E-4 | 0.306   | 0.219  | 0.214  | 0.188  | 0.280  | 0.274  | 0.228  | 0.153  | 0.175   |
| $V$                                     | 0.007  | 0.015   | 0.04   | 0.040  | 0.040  | 0.027  | 0.029  | 0.044  | 0.046  | 0.031   |
| $r^2$                                   | 0.974  | 0.702   | 0.880  | 0.880  | 0.721  | 0.746  | 0.900  | 0.920  | 0.806  | 0.900   |

#### 7.4.5 K1 ve K2 Kömüründen $H_3PO_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Aseton Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.64’de K1 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermeleri verilmiştir.



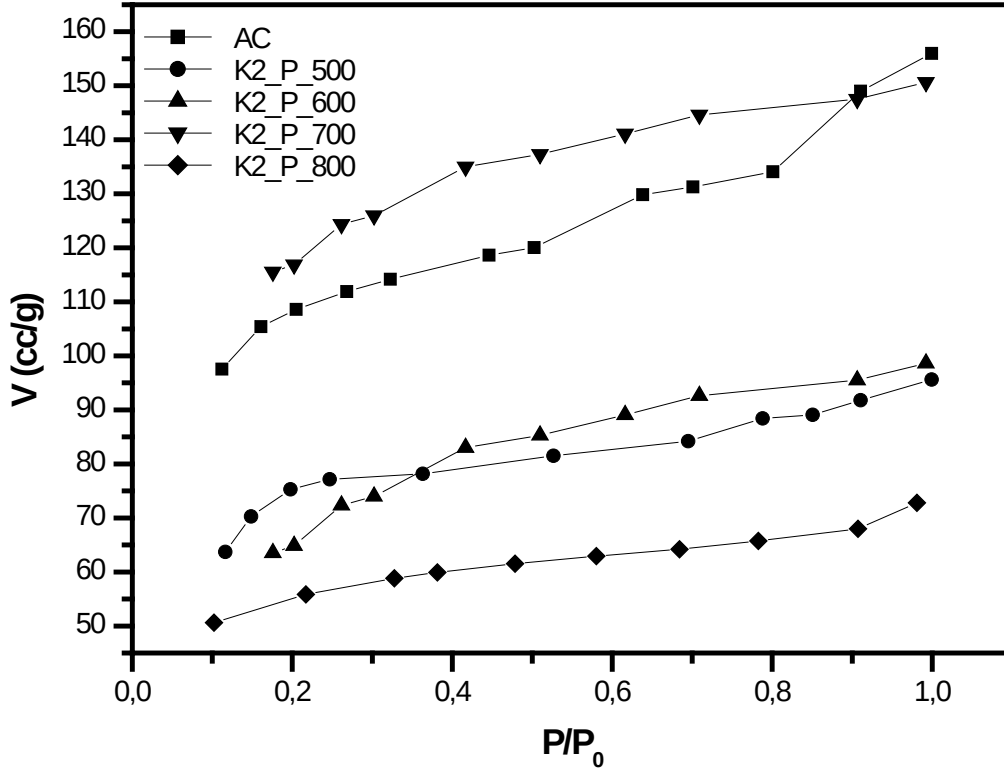
Şekil 7.64 K1 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.74’de K1 kömürü, K1 kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K1\_P\_700) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.74 K1 kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ ’da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K1       | 2                           | 8.59  | -             | -                  |
| K1_P_500 | 630                         | 22.01 | 13.94         | 19.22              |
| K1_P_600 | 483                         | 17.02 | 11.28         | 15.43              |
| K1_P_700 | 636                         | 23.80 | 16.53         | 23.74              |
| K1_P_800 | 361                         | 15.38 | 9.89          | 13.76              |

Şekil 7.65'te K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun aseton adsorpsiyon izotermi verilmiştir.



Şekil 7.65 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında asetonun adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.75'de K2 kömürü, K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin ve ticari aktif karbonun asetonu adsorplama kapasiteleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon numunesinin (K2\_P\_700) en yüksek adsorplama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.76'da K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, tüm aktif karbonların aseton adsorpsiyonlarının bu 4 izoterm modeline uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. BET ve Langmuir izoterm modellerinden hesaplanan tek tabaka kapasiteleri en yüksek olan aktif karbonların K1\_P\_700 ve K2\_P\_700 olduğu görülmektedir. Bu aktif karbonlar aynı zamanda yüksek adsorplama kapasitesine sahip aktif karbonlardır. Freundlich izoterm modeli K sabiti, K1\_P\_700 için 0.303, K2\_P\_700 için 0.393 olarak belirlenmiştir. Bu izoterm parametresi tek

tabaka değerine karşılık gelmektedir ve BET, Langmuir ve Freundlich izotermi tek tabaka kapasitelerinin aynı aktif karbonlarda en yüksek değerlerini aldıkları belirlenmiştir. Harkins-Jura izoterm modeli A parametresi de aynı aktif karbonlarda en yüksek değerini sırasıyla 0.107 ve 0.169 olarak almıştır.

Çizelge 7.75 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da asetonu adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 28.80 | 16.25         | 24.47              |
| K2       | 29                          | 19.93 | 0.09          | 0.11               |
| K2_P_500 | 570                         | 19.87 | 11.11         | 18.37              |
| K2_P_600 | 616                         | 20.37 | 11.89         | 20.51              |
| K2_P_700 | 767                         | 28.09 | 17.70         | 27.54              |
| K2_P_800 | 405                         | 15.88 | 9.91          | 13.72              |

Çizelge 7.76 K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_P_500 | K1_P_600 | K1_P_700 | K1_P_800 | K2_P_500 | K2_P_600 | K2_P_700 | K2_P_800 |
| <b>BET</b>                              |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 173.1    | 107      | 478.5    | 146      | 29.02    | 643      | 34.55    | 138.9    |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | 0.162    | 0.127    | 0.189    | 0.110    | 0.125    | 0.135    | 0.215    | 0.110    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.998    | 0.991    | 0.998    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Langmuir</b>                         |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 39.75    | 53.62    | 32.57    | 44.82    | 28.10    | 9.79     | 20.51    | 45.87    |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | 0.238    | 0.183    | 0.278    | 0.160    | 0.225    | 0.258    | 0.380    | 0.159    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.997    | 0.999    | 0.999    |
| <b>Freundlich</b>                       |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.275    | 0.201    | 0.302    | 0.177    | 0.239    | 0.260    | 0.393    | 0.179    |
| <b>n</b>                                | 5.95     | 8.513    | 6.60     | 7.39     | 6.65     | 3.92     | 6.484    | 7.05     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.981    | 0.983    | 0.971    | 0.984    | 0.940    | 0.985    | 0.990    | 0.955    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.071    | 0.060    | 0.107    | 0.040    | 0.082    | 0.038    | 0.169    | 0.038    |
| <b>B</b>                                | 0.914    | 1.48     | 1.16     | 1.256    | 1.494    | 0.515    | 1.07     | 1.152    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.992    | 0.985    | 0.966    | 0.987    | 0.944    | 0.940    | 0.967    | 0.961    |

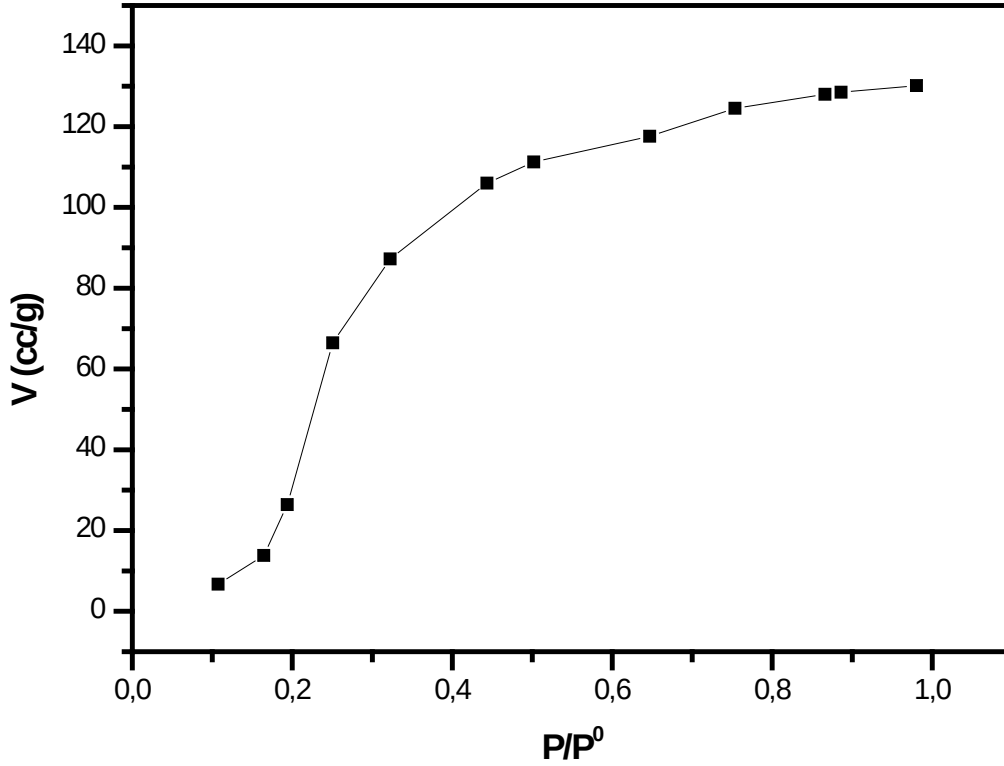
Çizelge 7.77’de K1 ve K2 kömürlerinden  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.342 cc/g ve 0.408 cc/g ile sırasıyla K1\_P\_700 ve K2\_P\_700 isimli aktif karbonlarda almışlardır. DA izoterm modeli  $W_0$  parametresi en yüksek değerlerini 0.40 cc/g ve 0.44 cc/g ile sırasıyla K1\_P\_700 ve K2\_P\_700 isimli aktif karbonlarda almışlardır. Bu aktif karbonlar aynı zamanda en yüksek adsorplama kapasitesine sahip aktif karbonlardır. Henderson izoterm modeli K parametresi en yüksek değerlerini K1\_P\_600 ve K1\_P\_800 isimli aktif karbonların asetonu adsorpsiyonunda almışlardır. K parametresi K1\_P\_600 için  $1.77E+10$  iken K1\_P\_800 için  $4.67E+7$  olarak belirlenmiştir. Bu aktif karbonların n parametreleri ise sırasıyla 14.09 ve 12.32 olarak belirlenmiştir. Henderson izoterm modeli için,  $H_3PO_4$  ile K1 kömüründen elde edilen aktif karbonlar K2 kömüründen elde edilen aktif karbonlardan daha uyumlu olarak belirlenmişlerdir. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, aseton adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K2\_P\_600 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.77 K1 ve K2 kömürlerinden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonlar üzerine asetonun DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | K1_P_500 | K1_P_600 | K1_P_700 | K1_P_800 | K2_P_500 | K2_P_600 | K2_P_700 | K2_P_800 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.826033)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.294    | 0.228    | 0.342    | 0.198    | 0.308    | 0.238    | 0.408    | 0.198    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 15.07    | 17.12    | 13.9     | 15.83    | 10.24    | 14.06    | 18.91    | 15.99    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.999    | 0.995    | 0.999    | 0.999    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.34     | 0.25     | 0.40     | 0.22     | 0.27     | 0.27     | 0.44     | 0.22     |
| <b>n</b>                                | 1        | 1        | 1        | 1.1      | 3.50     | 1        | 1        | 1        |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 16.8     | 21.53    | 14.2     | 17.7     | 7.66     | 16.6     | 29.98    | 18.79    |
| <b>Henderson</b>                        |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 2.4E+5   | 1.77E+10 | 1.38E+6  | 4.67E+9  | 8.25E+7  | 3726     | 1.2E+4   | 4.68E+8  |
| <b>n</b>                                | 8.95     | 14.09    | 11.02    | 12.32    | 12.01    | 5.58     | 9.30     | 11.08    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.996    | 0.995    | 0.991    | 0.994    | 0.973    | 0.920    | 0.930    | 0.992    |
| <b>Halsey</b>                           |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 5.2E-12  | 2.344    | 5.95E-9  | 2.0E-17  | 1.3E-10  | 3.51E-6  | 8.39E-7  | 2.61E-15 |
| <b>n</b>                                | 17.83    | 23.55    | 13.98    | 20.62    | 14.31    | 7.78     | 12.77    | 18.00    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.820    | 0.875    | 0.956    | 0.873    | 0.985    | 0.76     | 0.772    | 0.930    |
| <b>Smith</b>                            |          |          |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.218    | 0.175    | 0.247    | 0.152    | 0.195    | 0.185    | 0.320    | 0.151    |
| <b>V</b>                                | 0.026    | 0.009    | 0.024    | 0.009    | 0.019    | 0.033    | 0.033    | 0.011    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.904    | 0.834    | 0.928    | 0.834    | 0.971    | 0.699    | 0.700    | 0.906    |

## 7.5 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE ODA SICAKLIĞINDA ETANOL ADSORPSİYONU İZOTERMLERİ, KAPASİTELERİ VE PARAMETRELERİ.

Etanol adsorpsiyonu çalışmaları oda sıcaklığında buhar fazında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kömür numuneleri ve bu kömür numunelerinden elde edilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri ticari bir aktif karbonla da karşılaştırılmak istenmiştir bu nedenle aynı şartlarda adsorpsiyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.66'da ticari aktif karbona ait etanolün adsorpsiyon izotermi verilmiştir.



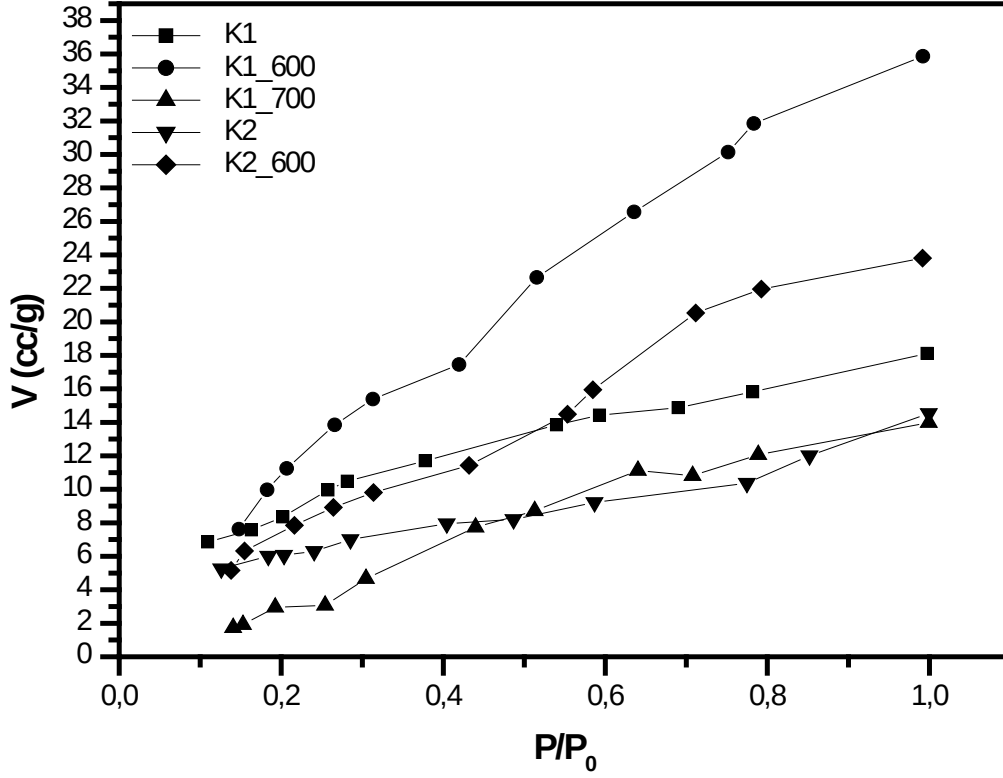
Şekil 7.66 Ticari aktif karbon (AC) üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

#### 7.5.1 K1 ve K2 Kömüründen N<sub>2</sub> Kullanılarak Fiziksel Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Çalışmanın bu bölümünde kül oranları düşürülmüş kömürlerin etanolü adsorplama kapasiteleri belirlenmiş ve elde edilen aktif karbon numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 7.67'de K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden azot kullanarak fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların üzerine etanolün adsorpsiyon izotermi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 7.78'de ticari aktif karbonun (AC), K1 ve K2 kömürünün ve bu kömürlerden azot kullanarak fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin ticari aktif karbondaki olduğu belirlenmiştir. Ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine, K1\_700'ün ise Langmuir izoterm modeline uyumlu olmadıkları gözlemlenmiştir.



Şekil 7.67 K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden azot kullanarak fiziksel yöntemle üretilen aktif karbonların üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.78 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve % W<sub>m</sub> değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % W <sub>m</sub> (BET) | % W <sub>m</sub> (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------------|
| AC       | 745                                 | 21.12 | -                      | -                           |
| K1       | 2                                   | 3.59  | 1.77                   | 3.29                        |
| K1_600   | 119                                 | 6.87  | 3.38                   | 20.70                       |
| K1_700   | 415                                 | 2.80  | 1.53                   | -                           |
| K2       | 29                                  | 2.90  | 1.09                   | 1.87                        |
| K2_600   | 311                                 | 4.67  | 1.83                   | 5.41                        |

Çizelge 7.79'da ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, ticari aktif karbon ve K1\_700 isimli aktif karbonun aseton adsorpsiyonunun Langmuir, K1\_600, K1\_700 ve K2\_600'ün ise Harkins-Jura ve ticari aktif karbonun da BET izoterm modeline uyumlu olmadıkları belirlenmiştir. BET izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin en

yüksek olduğu aktif karbonun K1\_600, Langmuir izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin en yüksek olduğu karbonun K1 kömürü ve Freundlich izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin en yüksek olduğu aktif karbonun yine K1\_600 olduğu görülmektedir. Çizelgeden K1 ve K2 kömürünün etanol adsorpsiyonunun bu dört izoterm modeline de uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.79 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                         | AC    | K1      | K1_600  | K1_700  | K2      | K2_600  |
| <b>BET</b>                              |       |         |         |         |         |         |
| <b>C</b>                                | -     | 16.89   | 3.924   | 1.559   | 58.70   | 6.996   |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.018   | 0.035   | 0.016   | 0.011   | 0.019   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997 | 0.992   | 0.948   | 0.308   | 0.998   | 0.976   |
| <b>Langmuir</b>                         |       |         |         |         |         |         |
| <b>C</b>                                | -2.86 | 5.68    | 0.453   | -0.67   | 10.10   | 1.772   |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.034   | 0.261   | -       | 0.019   | 0.057   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.930 | 0.964   | 0.627   | 0.457   | 0.990   | 0.928   |
| <b>Freundlich</b>                       |       |         |         |         |         |         |
| <b>K</b>                                | 0.403 | 0.037   | 0.077   | 0.034   | 0.026   | 0.273   |
| <b>n</b>                                | 0.804 | 2.214   | 1.262   | 0.900   | 2.22    | 1.31    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.837 | 0.992   | 0.992   | 0.979   | 0.95    | 0.985   |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |         |         |         |         |         |
| <b>A</b>                                | 0.018 | 2.89E-4 | 4.26E-4 | 2.57E-5 | 1.35E-4 | 1.89E-4 |
| <b>B</b>                                | 0.161 | 0.138   | -0.017  | -0.105  | 0.155   | -0.011  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.785 | 0.918   | 0.920   | 0.817   | 0.982   | 0.959   |

Çizelge 7.80'de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli V<sub>0</sub> parametresi en yüksek değerini 0.266 cc/g ile ticari aktif karbonda almıştır. Ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyonu, DR izotermi dışındaki diğer izoterm modellerine uyumlu görünmemektedir. K2 kömürünün etanol adsorpsiyonu DA izoterm modeline uyumlu değildir. Henderson izoterm modeli K parametresi en yüksek değerlerini K1 ve K2 kömürlerinin etanolü adsorpsiyonunda almışlardır. K parametresi K1 için 39130.6 iken K2

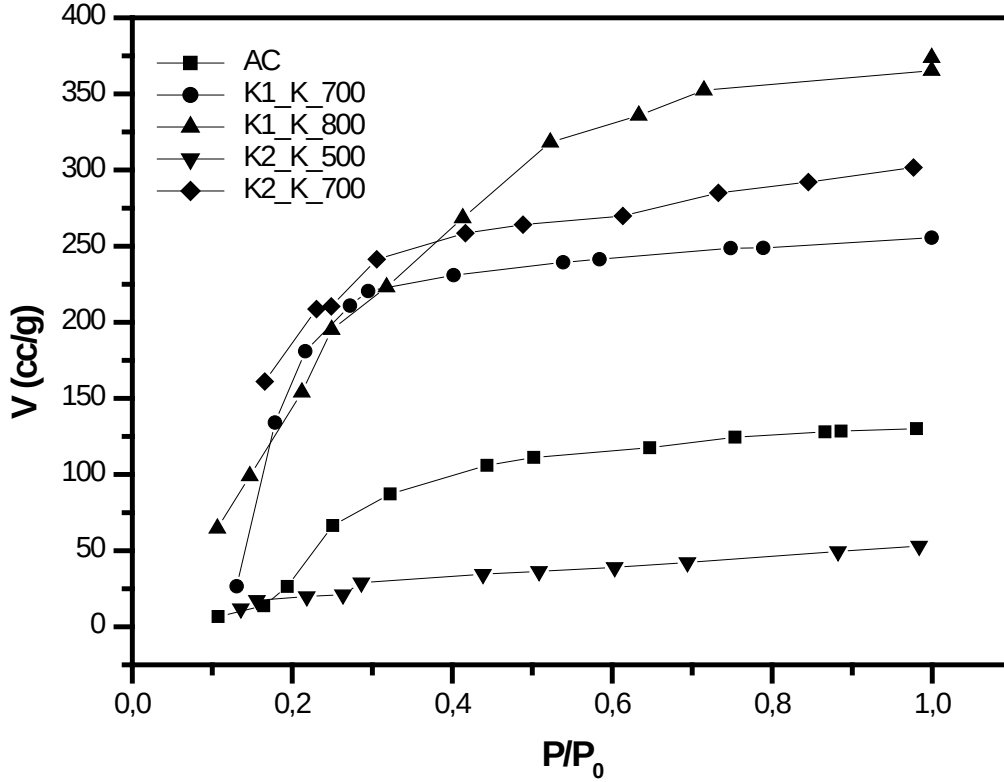
için 4328923 olarak belirlenmiştir. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, etanol adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun ticari aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.80 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden N<sub>2</sub> gazı ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |         |         |         |         |        |
|-----------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
|                                         | AC      | K1      | K1_600  | K1_700  | K2      | K2_600 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.656052)</b> |         |         |         |         |         |        |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.266   | 0.026   | 0.067   | 0.028   | 0.020   | 0.037  |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 4.99    | 13.2    | 6.43    | 5.34    | 12.8    | 7.43   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.969   | 0.977   | 0.922   | 0.996   | 0.993   | 0.974  |
| <b>DA</b>                               |         |         |         |         |         |        |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 2.21    | 0.04    | 0.04    | 0.13    | -       | 0.03   |
| <b>n</b>                                | 1       | 1       | 3.50    | 1       | -       | 3.50   |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 1.11    | 7.88    | 4.98    | 1.40    | -       | 5.39   |
| <b>Henderson</b>                        |         |         |         |         |         |        |
| <b>K</b>                                | 10.35   | 39130.6 | 210.1   | 104     | 328923  | 341.5  |
| <b>n</b>                                | 1.512   | 3.014   | 1.82    | 1.20    | 3.23    | 1.74   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.624   | 0.966   | 0.992   | 0.944   | 0.988   | 0.988  |
| <b>Halsey</b>                           |         |         |         |         |         |        |
| <b>C</b>                                | 2.79E-4 | 7.15E-6 | 1.71E-3 | 2.79E-3 | 3.54E-7 | 6.763  |
| <b>n</b>                                | 4.404   | 3.126   | 1.87    | 1.29    | 3.54    | 1.76   |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.400   | 0.900   | 0.959   | 0.868   | 0.965   | 0.981  |
| <b>Smith</b>                            |         |         |         |         |         |        |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.16    | 0.018   | 0.019   | 0.005   | 0.012   | 0.011  |
| <b>V</b>                                | 0.04    | 0.011   | 0.032   | 0.015   | 0.007   | 0.023  |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.452   | 0.890   | 0.972   | 0.894   | 0.966   | 0.984  |

#### 7.5.2 K1 ve K2 Kömüründen KOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermeleri, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.68’de K1 ve K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyon izotermeleri verilmiştir. Bu 2 izotermin Tip I izoterm modeline benzediği belirlenmiştir.



Şekil 7.68 K1 ve K2 kömüründen KOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.81’de ticari aktif karbonun (AC), K1 ve K2 kömürünün ve bu kömürlerden KOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin en yüksek yüzey alanına sahip K1\_K\_800 isimli aktif karbonda olduğu gözlemlenmiştir. Çizelgeden K1\_K\_700 isimli aktif karbonun yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olmasına rağmen BET ve Langmuir izoterm modellerine, K1\_K\_800’ün ise Langmuir izoterm modeline uyumlu olmadıkları belirlenmiştir.

Çizelge 7.82’de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, ticari aktif karbon, K1\_K\_700 ve K1\_K\_800 isimli aktif karbonların aseton adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu olmadıkları belirlenmiştir. BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu olmayan K1\_K\_700 ve K1\_K\_800 isimli aktif karbonların, Freundlich izoterm modeline uyumlu oldukları ve bu izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka

kapasitesi değerlerinin en yüksek değerler oldukları belirlenmiştir. Aynı aktif karbonların Harkins-Jura izoterm modeline de diğer karbonlardan daha az uyumlu oldukları belirlenmiştir

Çizelge 7.81 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 21.12 | -             | -                  |
| K1       | 2                                   | 3.59  | 1.77          | 3.29               |
| K1_K_700 | 1755                                | 34.45 | -             | -                  |
| K1_K_800 | 1904                                | 43.46 | 44.17         | -                  |
| K2       | 29                                  | 2.90  | 1.09          | 1.87               |
| K2_K_500 | 382                                 | 9.84  | 6.05          | 30.46              |
| K2_K_700 | 1659                                | 38.29 | 30.12         | 54.15              |

Çizelge 7.82 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |         |          |          |         |          |          |
|-----------------------------------------|-------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
|                                         | AC    | K1      | K1_K_700 | K1_K_800 | K2      | K2_K_500 | K2_K_700 |
| <b>BET</b>                              |       |         |          |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | -     | 16.89   | -1.801   | 1.602    | 58.70   | 3.615    | 9.48     |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | -     | 0.018   | -        | 0.791    | 0.011   | 0.064    | 0.431    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.997 | 0.992   | 0.682    | 0.519    | 0.998   | 0.666    | 0.990    |
| <b>Langmuir</b>                         |       |         |          |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | -2.86 | 5.68    | -2.999   | -0.68    | 10.10   | 0.481    | 2.378    |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | -     | 0.034   | -        | -        | 0.019   | 0.438    | 1.181    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.930 | 0.964   | 0.725    | 0.704    | 0.990   | 0.225    | 0.980    |
| <b>Freundlich</b>                       |       |         |          |          |         |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.403 | 0.037   | 0.730    | 0.922    | 0.026   | 0.115    | 0.653    |
| <b>n</b>                                | 0.804 | 2.214   | 1.391    | 1.352    | 2.22    | 1.471    | 3.27     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.837 | 0.992   | 0.525    | 0.922    | 0.95    | 0.957    | 0.900    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |         |          |          |         |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.018 | 2.89E-4 | 0.21     | 0.10     | 1.35E-4 | 1.38E-3  | 0.231    |
| <b>B</b>                                | 0.161 | 0.138   | 0.627    | 0.068    | 0.155   | 0.025    | 0.535    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.785 | 0.918   | 0.771    | 0.790    | 0.982   | 0.822    | 0.903    |

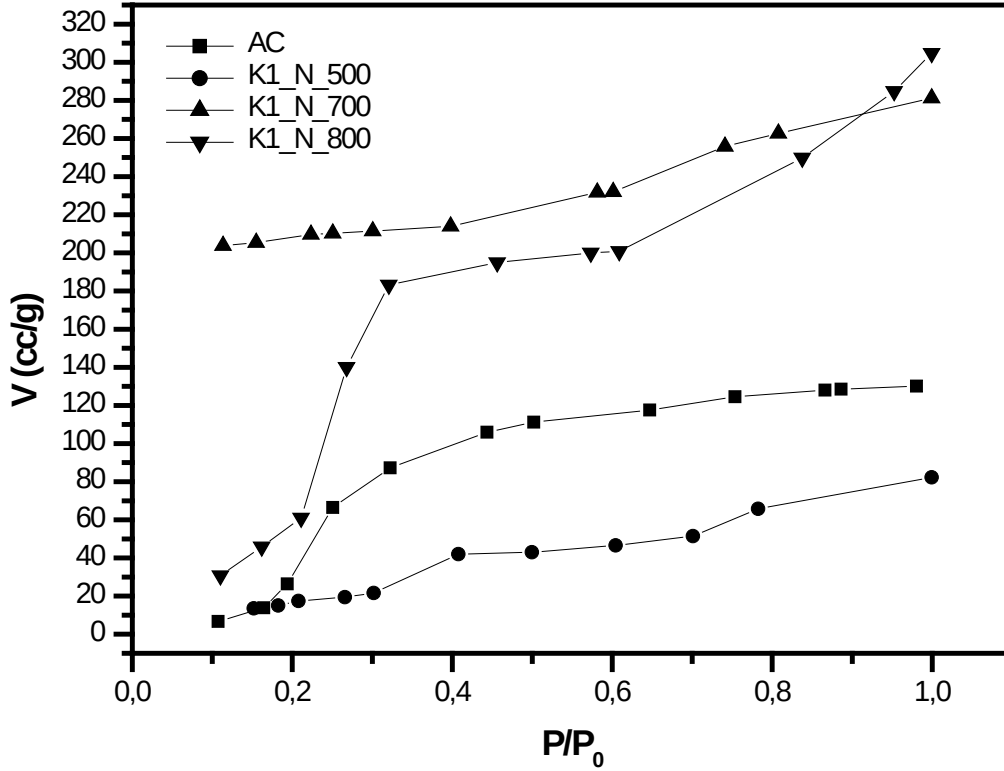
Çizelge 7.83’de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi K1\_K\_800 için 0.885 cc/g, K2\_K\_700 için 0.912 cc/g olarak belirlenmiştir. DA izoterm modeli n parametresi K1\_K\_700 ve K2\_K\_500 için 3.5, K1\_K\_800 için 1.5 ve K2\_K\_700 için 1 olarak belirlenmiştir Henderson izoterm modeli K parametresi en yüksek değerlerinin K1 ve K2 kömürleri hariç K2\_K\_500 isimli aktif karbonda olduğu belirlenmiştir. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, etanol adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K1\_K\_800 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.83 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |         |          |          |         |          |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
|                                         | AC      | K1      | K1_K_700 | K1_K_800 | K2      | K2_K_500 | K2_K_700 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.656052)</b> |         |         |          |          |         |          |          |
| <b><math>V_0</math>(cc/g)</b>           | 0.266   | 0.026   | 7.38     | 0.885    | 0.020   | 0.103    | 0.912    |
| <b><math>E_0</math>(kJ/mol)</b>         | 4.99    | 13.2    | 3.53     | 6.45     | 12.8    | 7.07     | 7.58     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.969   | 0.977   | 0.979    | 0.999    | 0.993   | 0.900    | 0.999    |
| <b>DA</b>                               |         |         |          |          |         |          |          |
| <b><math>W_0</math>(cc/g)</b>           | 2.21    | 0.04    | 1.71     | 1.30     | -       | 0.07     | 1.72     |
| <b>n</b>                                | 1       | 1       | 3.50     | 1.5      | -       | 3.50     | 1        |
| <b><math>E</math>(kJ/mol)</b>           | 1.11    | 7.88    | 3.57     | 3.39     | -       | 5.23     | 3.10     |
| <b>Henderson</b>                        |         |         |          |          |         |          |          |
| <b>K</b>                                | 10.35   | 39130.6 | 48.03    | 6.468    | 328923  | 665      | 41.20    |
| <b>n</b>                                | 1.512   | 3.014   | 5.71     | 3.36     | 3.23    | 2.55     | 6.263    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.624   | 0.966   | 0.796    | 0.686    | 0.988   | 0.882    | 0.867    |
| <b>Halsey</b>                           |         |         |          |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | 2.79E-4 | 7.15E-6 | 1.81E-3  | 2.04E-5  | 3.54E-7 | 5.06E-7  | 1.9E-4   |
| <b>n</b>                                | 4.404   | 3.126   | 7.78     | 15.86    | 3.54    | 5.153    | 12.23    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.400   | 0.900   | 0.691    | 0.413    | 0.965   | 0.669    | 0.655    |
| <b>Smith</b>                            |         |         |          |          |         |          |          |
| <b><math>V_b</math></b>                 | 0.16    | 0.018   | 0.410    | 0.513    | 0.012   | 0.056    | 0.480    |
| <b>V</b>                                | 0.04    | 0.011   | 0.078    | 0.036    | 0.007   | 0.016    | 0.048    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.452   | 0.890   | 0.662    | 0.435    | 0.966   | 0.711    | 0.613    |

### 7.5.3 K1 ve K2 Kömüründen NaOH Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

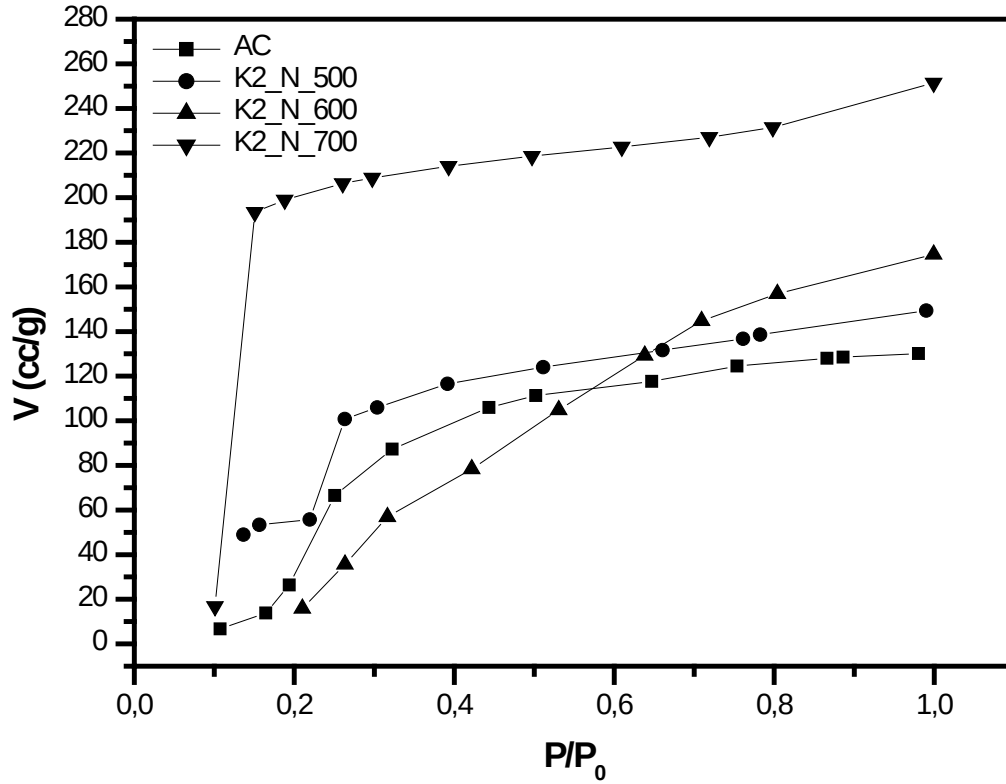
Şekil 7.69’da K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyon izotermi verilmektedir.



Şekil 7.69 K1 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Şekil 7.70’de K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyon izotermi verilmektedir.

Çizelge 7.84’de ticari aktif karbonun (AC), K1 ve K2 kömürünün ve bu kömürlerden NaOH kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri verilmektedir. En yüksek adsorplama kapasitesinin en yüksek yüzey alanlarına sahip aktif karbonlarda olduğu gözlemlenmiştir. Çizelgeden K1\_N\_800, K2\_N\_600 ve K2\_N\_700 isimli aktif karbonların BET ve Langmuir izoterm modellerine, K2\_N\_500’ün ise Langmuir izoterm modeline uyumlu olmadıkları belirlenmiştir.



Şekil 7.70 K2 kömüründen NaOH kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.84 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /g) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-------------------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                                 | 21.12 | -             | -                  |
| K1       | 2                                   | 3.59  | 1.77          | 3.29               |
| K1_N_500 | 281                                 | 14.48 | 3.78          | 9.75               |
| K1_N_700 | 1059                                | 36.64 | 22.34         | 30.84              |
| K1_N_800 | 1188                                | 38.53 | -             | -                  |
| K2       | 29                                  | 2.90  | 1.09          | 1.87               |
| K2_N_500 | 774                                 | 23.50 | 22.12         | -                  |
| K2_N_600 | 1098                                | 26.42 | -             | -                  |
| K2_N_700 | 1335                                | 34.09 | -             | -                  |

Çizelge 7.85’de ticari aktif karbon, K1 ve K2 kömürlerinden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, BET izoterm modeline uyumlu aktif karbonların K1\_N\_500, K1\_N\_700 ve K2\_N\_500 olduğu, Langmuir izoterm modeline K1\_N\_500 ve K1\_N\_700 olduğu belirlenmiştir. Harkins-Jura izoterm modeline K1\_N\_700 ve K2\_N\_600’ün uyumlu olmadığı belirlenmiştir. Freundlich izoterm modeline K2\_N\_700’ün  $r^2$  değeri diğer aktif karbonlardan düşük olsada, diğer tüm aktif karbonların uyumlu olduğu belirlenmiştir. Freundlich izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin en yüksek 0.711 ile K1\_N\_800’de olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.85 Ticari aktif karbon, K1 ve K2 kömürlerinden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | AC_K  | K1_N_500 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 |
| <b>BET</b>                              |       |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | -     | 4.718    | 28.91    | -0.59    | 2.45     | -1.46    | -1.82    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.177    | 0.286    | -        | 0.284    | -        | -        |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997 | 0.990    | 0.998    | 0.806    | 0.415    | 0.952    | 0.544    |
| <b>Langmuir</b>                         |       |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | -2.86 | 0.896    | 127.5    | -2.011   | -0.098   | -2.6     | -3.07    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.794    | 0.446    | -        | -        | -        | -        |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.930 | 0.920    | 0.998    | 0.905    | 0.041    | 0.958    | 0.600    |
| <b>Freundlich</b>                       |       |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.403 | 0.245    | 0.536    | 0.711    | 0.349    | 0.470    | 0.670    |
| <b>n</b>                                | 0.804 | 2.27     | 7.081    | 1.009    | 1.745    | 0.695    | 1.477    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.837 | 0.900    | 0.821    | 0.895    | 0.870    | 0.925    | 0.420    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |          |          |          |          |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.018 | 0.020    | 0.268    | 0.076    | 0.047    | 0.004    | 0.373    |
| <b>B</b>                                | 0.161 | 0.314    | -0.873   | 0.195    | 0.469    | -0.093   | 1.51     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.785 | 0.759    | 0.914    | 0.860    | 0.976    | 0.702    | 0.955    |

Çizelge 7.86’da ticari aktif karbon, K1 ve K2 kömürlerinden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi K1\_N\_700 için 0.558 cc/g, K1\_N\_800 için 0.306 cc/g olarak belirlenmiştir.

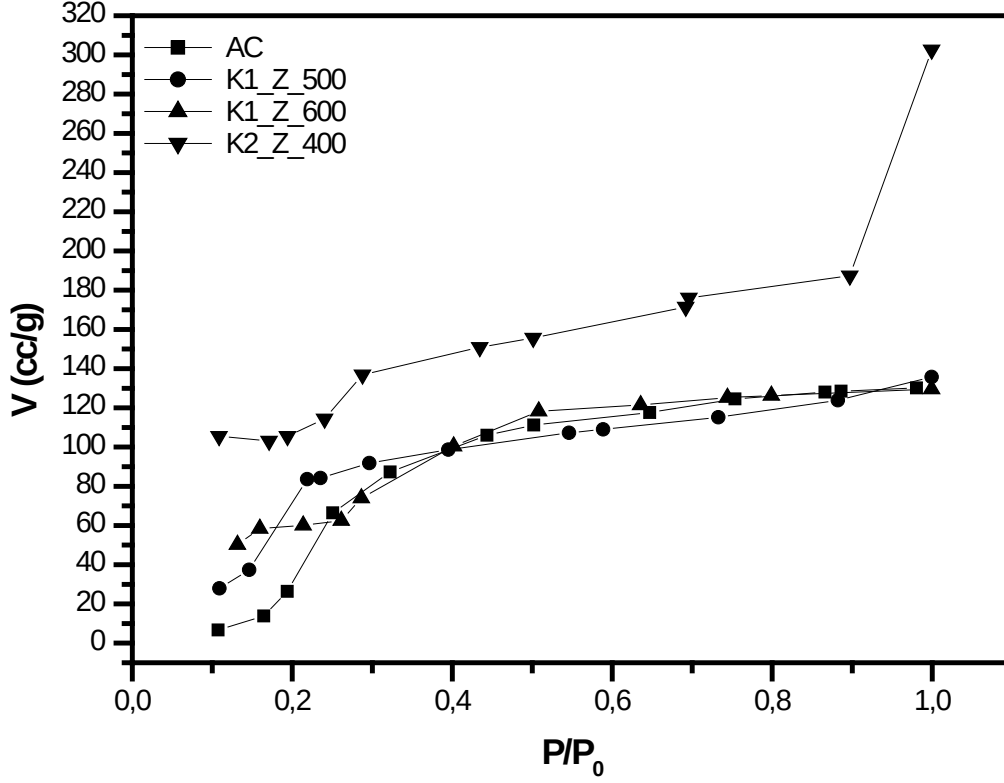
K2\_N\_700 için bu değer 14.52 cc/g olarak hesaplanmıştır fakat bu değer anlamsız olduğu için bu aktif karbonun etanol adsorpsiyonunun DA izoterm modeline uyumlu olmadığı düşünülmüştür. Benzer durum DA izoterm modeli için de gözlemlendiğinden bu aktif karbonun DA izoterm modeline de uyumlu olmadığı düşünülmüştür. Aynı aktif karbonun Henderson izoterm modeli parametreleri yüksek olduğu için bu izoterm modeline uyumlu olduğu düşünülmüştür. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, etanol adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K1\_N\_700 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.86 Ticari aktif karbon, K1 ve K2 kömürlerinden NaOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                         | AC_K    | K1_N_500 | K1_N_700 | K1_N_800 | K2_N_500 | K2_N_600 | K2_N_700 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.656052)</b> |         |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.266   | 0.261    | 0.558    | 0.306    | 0.173    | 0.7      | 14.52    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 4.99    | 7.99     | 34.9     | 7.07     | 13.8     | 3.45     | 3.58     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.969   | 0.998    | 0.984    | 0.999    | 0.922    | 0.999    | 0.952    |
| <b>DA</b>                               |         |          |          |          |          |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 2.21    | 0.50     | 0.58     | 0.81     | 0.16     | 0.32     | 2.57     |
| <b>n</b>                                | 1       | 1        | 1        | 1        | 3.50     | 3.20     | 3.50     |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 1.11    | 3.26     | 57.98    | 2.32     | 7.67     | 3.04     | 3.77     |
| <b>Henderson</b>                        |         |          |          |          |          |          |          |
| <b>K</b>                                | 10.35   | 369      | 750.13   | 30.75    | 911.4    | 3.014    | 52589    |
| <b>n</b>                                | 1.512   | 3.69     | 9.265    | 4.035    | 5.15     | 0.828    | 14.03    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.624   | 0.813    | 0.922    | 0.914    | 0.976    | 0.900    | 0.994    |
| <b>Halsey</b>                           |         |          |          |          |          |          |          |
| <b>C</b>                                | 2.79E-4 | 0.554    | 8.3E-10  | 8.98E-6  | 8.50     | 0.104    | 6.93E-6  |
| <b>n</b>                                | 4.404   | 5.166    | 26.82    | 12.12    | 5.75     | 0.985    | 14.20    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.400   | 0.699    | 0.682    | 0.694    | 0.930    | 0.800    | 0.952    |
| <b>Smith</b>                            |         |          |          |          |          |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.16    | 0.146    | 0.453    | 0.374    | 0.202    | 0.028    | 0.412    |
| <b>V</b>                                | 0.04    | 0.044    | 0.019    | 0.041    | 0.058    | 0.207    | 0.044    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.452   | 0.691    | 0.652    | 0.731    | 0.916    | 0.920    | 0.920    |

#### 7.5.4 K1 ve K2 Kömüründen $ZnCl_2$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.71’de K1 ve K2 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyon izotermi verilmektedir.



Şekil 7.71 K1 ve K2 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.87’de ticari aktif karbonun (AC), K1 ve K2 kömürünün ve bu kömürlerden  $ZnCl_2$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri verilmiştir. En yüksek adsorplama kapasitesinin en yüksek yüzey alanına sahip K2\_Z\_400 isimli aktif karbonda olduğu gözlemlenmiştir. K1\_Z\_500 isimli aktif karbonun etanolü adsorplama kapasitesi % 21.82 olmasına rağmen BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu değildir.

Çizelge 7.88’de Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, ticari aktif karbonun ve K1\_Z\_500’ün etanol adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu

olmadıkları görülmektedir. K2\_Z\_400 isimli aktif karbon BET, Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermlerinden hesaplanan tek tabaka kapasitesi en yüksek olan aktif karbondur ve bu değerler sırasıyla 0.198, 0.337 ve 0.448 g/g olarak belirlenmiştir. Aynı aktif karbon etanol adsorpsiyonu için Harkins-Jura izoterm modeline uyum sağlayamamıştır.

Çizelge 7.87 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 21.12 | -             | -                  |
| K1       | 2                           | 3.59  | 1.77          | 3.29               |
| K1_Z_500 | 885                         | 21.82 | -             | -                  |
| K1_Z_600 | 783                         | 21.04 | 9.91          | 17.08              |
| K2       | 29                          | 2.90  | 1.09          | 1.87               |
| K2_Z_400 | 926                         | 38.36 | 16.53         | 25.21              |

Çizelge 7.89'da ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR izoterm modeli  $V_0$  parametresi K1\_Z\_500 için 0.545 cc/g, K2\_Z\_400 için 0.269 cc/g olarak belirlenmiştir. K2\_Z\_400 için DA izoterm modelinden hesaplanan  $W_0$  değeri 0.27 cc/g, K1\_Z\_500 için 2.38 cc/g olarak belirlenmiştir. K1\_Z\_500'ün etanol adsorpsiyonunun DA izoterm modeline uyumlu olmadığı düşünülmüştür. Henderson izoterm modeli K parametresi K1\_Z\_500 için 14967.7 iken K2\_Z\_400 için  $1.12E-8$  olarak belirlenmiştir. K2\_Z\_400'ün etanol adsorpsiyonunun Henderson izoterm modeline uyumlu olmadığı düşünülmüştür Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, etanol adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K1\_Z\_500 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

Carvalho et al. (2006) farklı aktif karbonlar üzerinde etanol adsorpsiyonunu DA modeliyle incelemişler ve E,  $W_0$  ve n değerini sırasıyla 13.9 kJ/mol,  $0.30 \text{ cm}^3/g$  ve 1.6 olarak bulmuşlardır. Bu sonuçlar K2\_Z\_400 isimli aktif karbon numunesinin sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 7.88 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $ZnCl_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |         |          |          |         |          |
|-----------------------------------------|-------|---------|----------|----------|---------|----------|
|                                         | AC    | K1      | K1_Z_500 | K1_Z_600 | K2      | K2_Z_400 |
| <b>BET</b>                              |       |         |          |          |         |          |
| <b>C</b>                                | -     | 16.89   | 0.642    | 32.36    | 58.70   | 56.72    |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | -     | 0.018   | -        | 0.110    | 0.011   | 0.198    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.997 | 0.992   | 0.205    | 0.975    | 0.998   | 0.979    |
| <b>Langmuir</b>                         |       |         |          |          |         |          |
| <b>C</b>                                | -2.86 | 5.68    | -1.286   | 7.764    | 10.10   | 11.64    |
| <b><math>W_m(g/g)</math></b>            | -     | 0.034   | -        | 0.206    | 0.019   | 0.337    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.930 | 0.964   | 0.486    | 0.946    | 0.990   | 0.938    |
| <b>Freundlich</b>                       |       |         |          |          |         |          |
| <b>K</b>                                | 0.403 | 0.037   | 0.316    | 0.00     | 0.026   | 0.448    |
| <b>n</b>                                | 0.804 | 2.214   | 1.639    | 1.899    | 2.22    | 2.493    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.837 | 0.992   | 0.810    | 0.943    | 0.95    | 0.832    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |         |          |          |         |          |
| <b>A</b>                                | 0.018 | 2.89E-4 | 0.033    | 0.012    | 1.35E-4 | 10884    |
| <b>B</b>                                | 0.161 | 0.138   | 0.426    | 0.138    | 0.155   | -0.174   |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.785 | 0.918   | 0.988    | 0.918    | 0.982   | 0.922    |

Çizelge 7.89 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $\text{ZnCl}_2$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

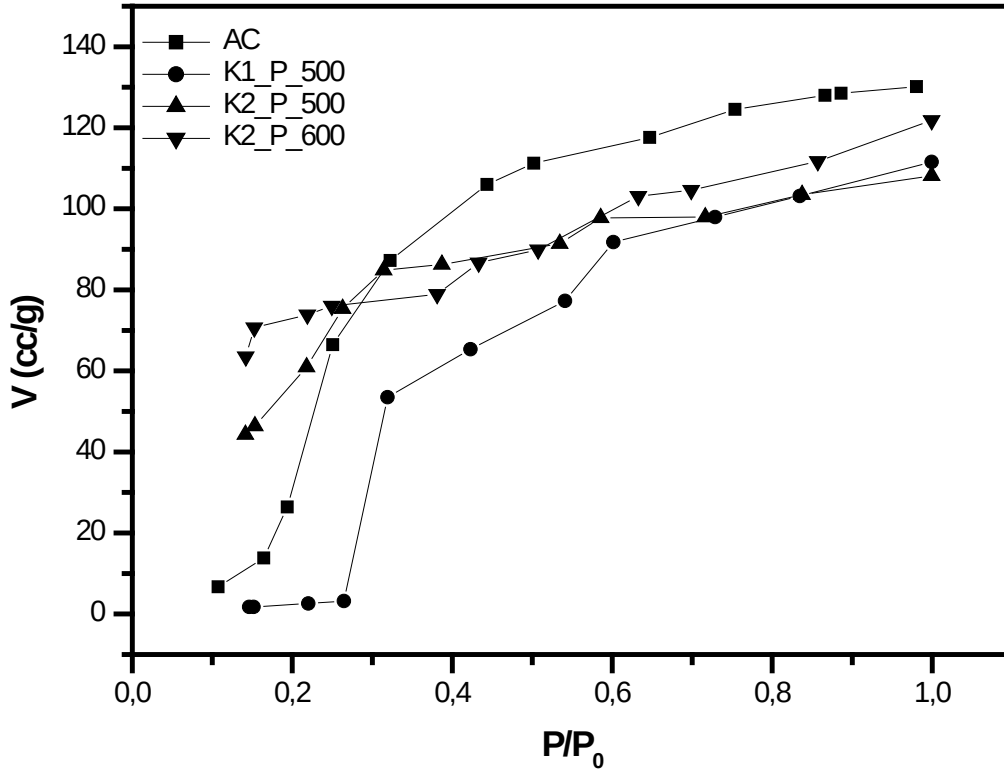
| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |         |          |          |         |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|
|                                         | AC      | K1      | K1_Z_500 | K1_Z_600 | K2      | K2_Z_400 |
| <b>DR (<math>\beta:0.656052</math>)</b> |         |         |          |          |         |          |
| <b><math>V_0(\text{cc/g})</math></b>    | 0.266   | 0.026   | 0.545    | 0.202    | 0.020   | 0.269    |
| <b><math>E_0(\text{kJ/mol})</math></b>  | 4.99    | 13.2    | 5.69     | 11.8     | 12.8    | 61.5     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.969   | 0.977   | 0.975    | 0.900    | 0.993   | 0.327    |
| <b>DA</b>                               |         |         |          |          |         |          |
| <b><math>W_0(\text{cc/g})</math></b>    | 2.21    | 0.04    | 2.38     | 0.18     | -       | 0.27     |
| <b>n</b>                                | 1       | 1       | 1        | 3.50     | -       | 3.50     |
| <b><math>E(\text{kJ/mol})</math></b>    | 1.11    | 7.88    | 1.52     | 7.06     | -       | 18.5     |
| <b>Henderson</b>                        |         |         |          |          |         |          |
| <b>K</b>                                | 10.35   | 39130.6 | 14967.7  | 19.461   | 328923  | 1.12E-8  |
| <b>n</b>                                | 1.512   | 3.014   | 6.368    | 0.049    | 3.23    | 3.573    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.624   | 0.966   | 0.945    | 0.840    | 0.988   | 0.961    |
| <b>Halsey</b>                           |         |         |          |          |         |          |
| <b>C</b>                                | 2.79E-4 | 7.15E-6 | 2.11E-13 | 7.15E-6  | 3.54E-7 | 3.76E+18 |
| <b>n</b>                                | 4.404   | 3.126   | 18.16    | 2.111    | 3.54    | 8.68     |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.400   | 0.900   | 0.654    | 0.890    | 0.965   | 0.854    |
| <b>Smith</b>                            |         |         |          |          |         |          |
| <b><math>V_b</math></b>                 | 0.16    | 0.018   | 0.197    | 0.127    | 0.012   | 128.5    |
| <b>V</b>                                | 0.04    | 0.011   | 0.013    | 0.100    | 0.007   | 24.33    |
| <b><math>r^2</math></b>                 | 0.452   | 0.890   | 0.649    | 0.764    | 0.966   | 0.925    |

#### 7.5.5 K1 ve K2 Kömüründen $\text{H}_3\text{PO}_4$ Kullanılarak Kimyasal Yöntemle Üretilen Aktif Karbonların Etanol Adsorpsiyonu İzotermi, Kapasiteleri ve Parametreleri

Şekil 7.72’de K1 ve K2 kömüründen  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun etanol adsorpsiyon izotermi verilmektedir.

Çizelge 7.90’da ticari aktif karbonun (AC), K1 ve K2 kömürünün ve bu kömürlerden  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanarak kimyasal yöntemle üretilen aktif karbonların etanolü adsorplama kapasiteleri verilmektedir. En yüksek adsorplama kapasitesinin en yüksek yüzey alanına sahip K1 ve K2 kömüründen kimyasal olarak üretilen aktif karbonlarda olduğu belirlenmiştir. K1\_P\_500’ün

etanölü % 18.67 adsorplamasına rağmen BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 7.72 K1 ve K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanarak kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonların ve ticari aktif karbonun üzerine oda sıcaklığında etanolün adsorpsiyon izotermi.

Çizelge 7.90 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonların BET yüzey alanları ve  $P/P_0 = 0.9$ 'da etanolü adsorplama kapasiteleri ve %  $W_m$  değerleri.

| Örnekler | BET Yüzey Alanı ( $m^2/g$ ) | % W   | % $W_m$ (BET) | % $W_m$ (Langmuir) |
|----------|-----------------------------|-------|---------------|--------------------|
| AC       | 745                         | 21.12 | -             | -                  |
| K1       | 2                           | 3.59  | 1.77          | 3.29               |
| K1_P_500 | 630                         | 18.67 | -             | -                  |
| K2       | 29                          | 2.90  | 1.09          | 1.87               |
| K2_P_500 | 570                         | 18.20 | 15.04         | 44.26              |
| K2_P_600 | 616                         | 20.04 | 8.80          | 15.54              |

Çizelge 7.91'de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden  $H_3PO_4$  ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura

izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, K1\_P\_500'ün etanol adsorpsiyonunun BET ve Langmuir izoterm modellerine uyumlu olmadığı fakat Freundlich izoterm modelinden hesaplanan tek tabaka kapasitesinin 0.486 ile en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir. Buradan BET ve Langmuir izoterm modellerinden hesaplanamayan tek tabaka kapasitesinin Freundlich izoterm modelinden hesaplanabileceği anlaşılmıştır. H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar arasında etanol adsorpsiyonu için Harkins-Jura izoterm modeline en az uyumlu aktif karbonun K2\_P\_500 olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.91 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün BET, Langmuir, Freundlich, Harkins-Jura izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |       |         |          |         |          |          |
|-----------------------------------------|-------|---------|----------|---------|----------|----------|
|                                         | AC    | K1      | K1_P_500 | K2      | K2_P_500 | K2_P_600 |
| <b>BET</b>                              |       |         |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | -     | 16.89   | -1.25    | 58.70   | 4.718    | 25.37    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.018   | -        | 0.011   | 0.177    | 0.097    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.997 | 0.992   | 0.65     | 0.998   | 0.990    | 0.993    |
| <b>Langmuir</b>                         |       |         |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | -2.86 | 5.68    | -2.427   | 10.10   | 0.896    | 21.08    |
| <b>W<sub>m</sub>(g/g)</b>               | -     | 0.034   | -        | 0.019   | 0.794    | 0.184    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.930 | 0.964   | 0.756    | 0.990   | 0.920    | 0.998    |
| <b>Freundlich</b>                       |       |         |          |         |          |          |
| <b>K</b>                                | 0.403 | 0.037   | 0.486    | 0.026   | 0.245    | 0.238    |
| <b>n</b>                                | 0.804 | 2.214   | 0.396    | 2.22    | 2.27     | 3.325    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.837 | 0.992   | 0.850    | 0.95    | 0.900    | 0.952    |
| <b>Harkins-Jura</b>                     |       |         |          |         |          |          |
| <b>A</b>                                | 0.018 | 2.89E-4 | 6.83E-3  | 1.35E-4 | 0.020    | 0.023    |
| <b>B</b>                                | 0.161 | 0.138   | 0.024    | 0.155   | 0.314    | 0.362    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.785 | 0.918   | 0.937    | 0.982   | 0.759    | 0.970    |

Çizelge 7.92'de ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, DR ve DA izoterm modellerinden hesaplanan V<sub>0</sub> ve W<sub>0</sub> parametrelerinin en yüksek değerinin K2\_P\_500'de olduğu belirlenmiştir. Etanol adsorpsiyonu için DA izoterm modelinden belirlenen n parametresinin K1\_P\_500 ve K2\_P\_500 için 1 olduğu, K2\_P\_600 için 3.5 olduğu

belirlenmiştir. Henderson izoterm modeli sabitleri K ve n sırasıyla 1072 ve 4.38 ile en yüksek değerlerini K2\_P\_600 için almışlardır. Çizelgede Halsey ve Smith izoterm modellerine, etanol adsorpsiyonu için en az uyumlu aktif karbonun K2\_P\_500 isimli aktif karbon olduğu belirlenmiştir.

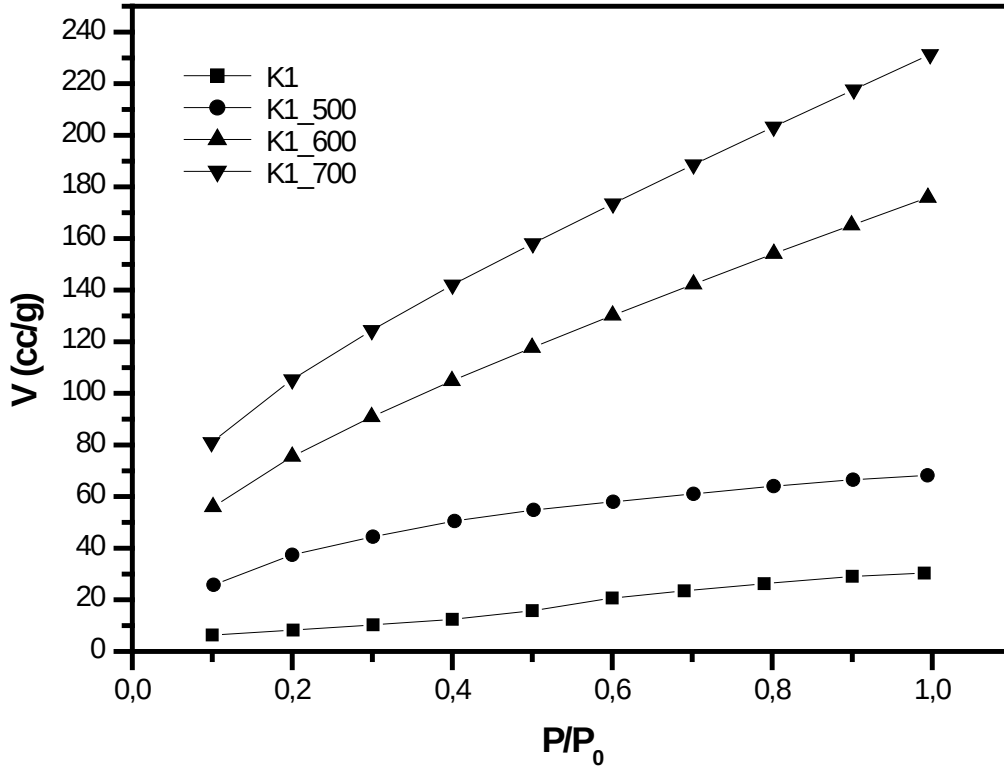
Çizelge 7.92 Ticari aktif karbon, K1, K2 kömürü ve bu kömürlerden H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar üzerine etanolün DR, DA, Henderson, Halsey ve Smith izoterm modelleri parametreleri.

| Adsorpsiyon Model Parametreleri/ Numune |         |         |          |         |          |          |
|-----------------------------------------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|
|                                         | AC      | K1      | K1_P_500 | K2      | K2_P_500 | K2_P_600 |
| <b>DR (<math>\beta</math>:0.656052)</b> |         |         |          |         |          |          |
| <b>V<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 0.266   | 0.026   | 0.007    | 0.020   | 0.261    | 0.234    |
| <b>E<sub>0</sub>(kJ/mol)</b>            | 4.99    | 13.2    | 11.7     | 12.8    | 7.99     | 13.1     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.969   | 0.977   | 0.999    | 0.993   | 0.998    | 0.834    |
| <b>DA</b>                               |         |         |          |         |          |          |
| <b>W<sub>0</sub>(cc/g)</b>              | 2.21    | 0.04    | 0.01     | -       | 0.50     | 0.21     |
| <b>n</b>                                | 1       | 1       | 1        | -       | 1        | 3.50     |
| <b>E(kJ/mol)</b>                        | 1.11    | 7.88    | 6.30     | -       | 3.26     | 7.39     |
| <b>Henderson</b>                        |         |         |          |         |          |          |
| <b>K</b>                                | 10.35   | 39130.6 | 39.81    | 328923  | 369      | 1072     |
| <b>n</b>                                | 1.512   | 3.014   | 2.13     | 3.23    | 3.69     | 4.38     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.624   | 0.966   | 0.941    | 0.988   | 0.813    | 0.958    |
| <b>Halsey</b>                           |         |         |          |         |          |          |
| <b>C</b>                                | 2.79E-4 | 7.15E-6 | 3E-3     | 3.54E-7 | 0.554    | 1.28E-4  |
| <b>n</b>                                | 4.404   | 3.126   | 2.834    | 3.54    | 5.166    | 5.04     |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.400   | 0.900   | 0.857    | 0.965   | 0.699    | 0.92     |
| <b>Smith</b>                            |         |         |          |         |          |          |
| <b>V<sub>b</sub></b>                    | 0.16    | 0.018   | 0.027    | 0.012   | 0.146    | 0.147    |
| <b>V</b>                                | 0.04    | 0.011   | 0.128    | 0.007   | 0.044    | 0.049    |
| <b>r<sup>2</sup></b>                    | 0.452   | 0.890   | 0.704    | 0.966   | 0.691    | 0.891    |

## 7.6 AKTİF KARBON NUMUNELERİ ÜZERİNE 77 K'DE HİDROJEN SORPSİYONU İZOTERMLERİ VE SORPSİYON KAPASİTELERİ

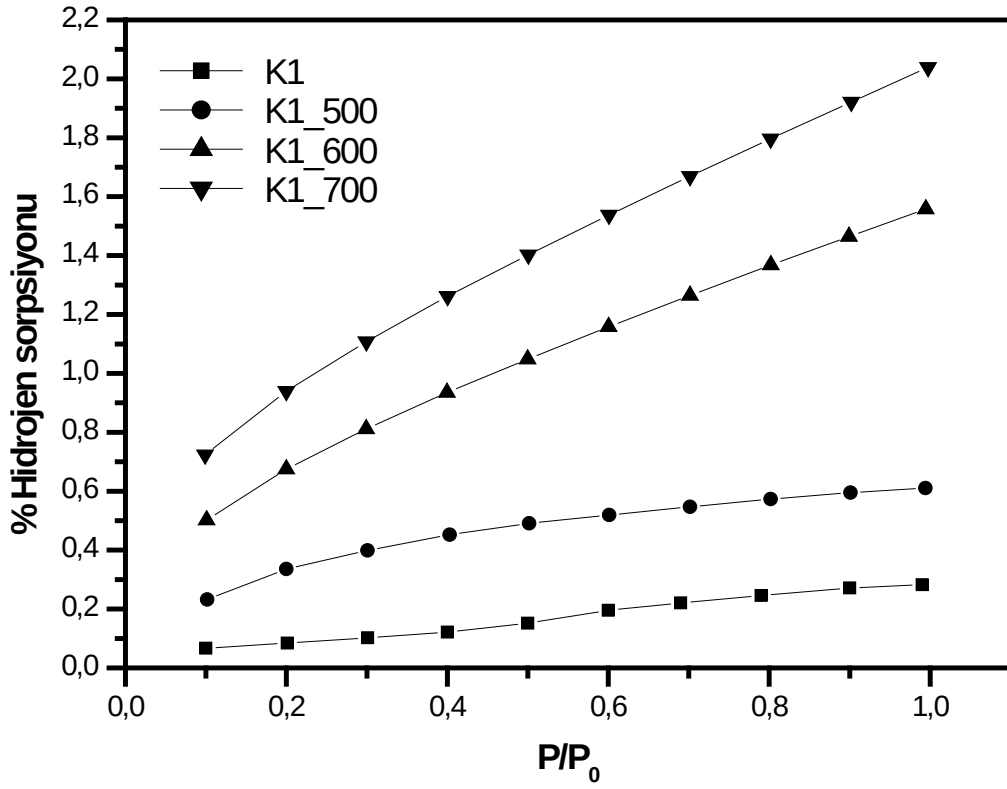
Elde edilen aktif karbon numuneleri üzerine 77 K'de H<sub>2</sub> adsorpsiyonu deneyleri Autosorp 1 cihazında atmosfer basıncına yakın bir basınçta yapılmıştır. Gaz sorpsiyon deneylerinden önce tüm numuneler 250 °C'de 12 saat boyunca vakum degasında tutulmuştur.

Şekil 7.73’de K1 kömürü ve bu kömürden azot ile fiziksel yolla elde edilen aktif karbonların  $H_2$  izotermi verilmektedir. Şekil 7.74’de ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere, K1 kömürü hidrojeni % 0.28 sorplarken, K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbon numuneleri arasında en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numune % 2.039 değerine sahip K1\_700 isimli numunedir.

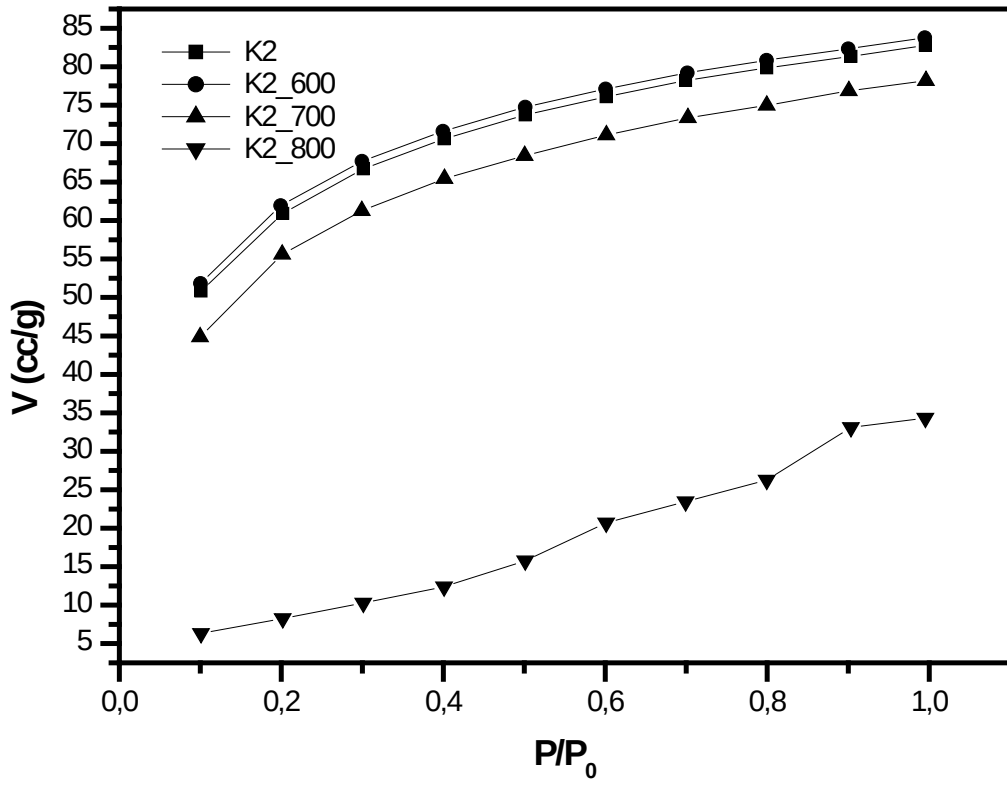


Şekil 7.73 K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de  $H_2$  izotermi.

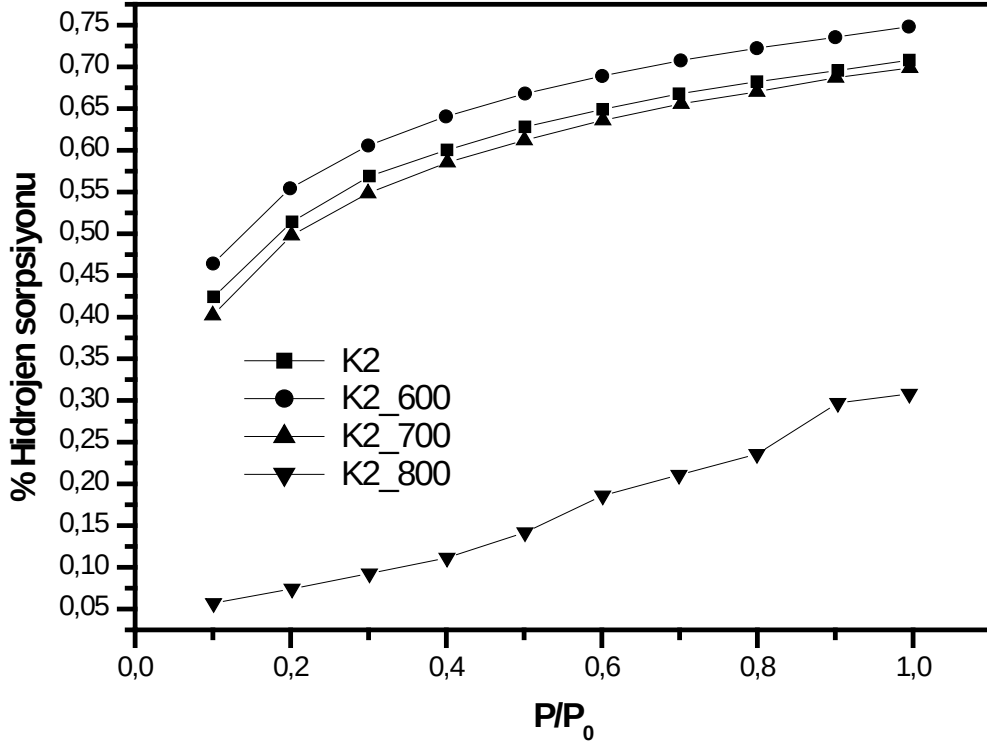
Şekil 7.75’te K2 kömürü ve bu kömürden azotla fiziksel olarak üretilen aktif karbonların  $H_2$  izotermi verilmektedir. Şekil 7.76’da ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. K2 kömürü hidrojeni % 0.708 sorplamıştır. K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen bu üç aktif karbon karşılaştırıldığında K2\_600 numunesi % 0.748 değeri ile daha yüksek sorpsiyon değerine sahiptir. Bu değer K1 kömüründen elde edilen K1\_700 isimli numunenin sorpsiyon değerine göre oldukça küçüktür.



Şekil 7.74 K1 kömürü ve K1 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.



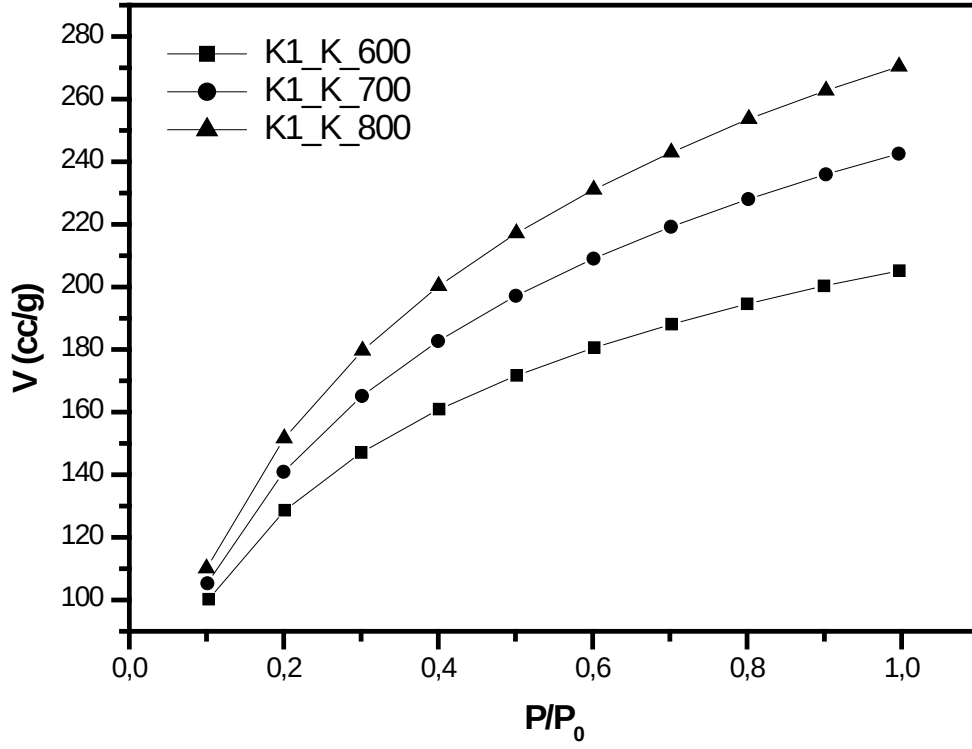
Şekil 7.75 K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de H<sub>2</sub> izotermi.



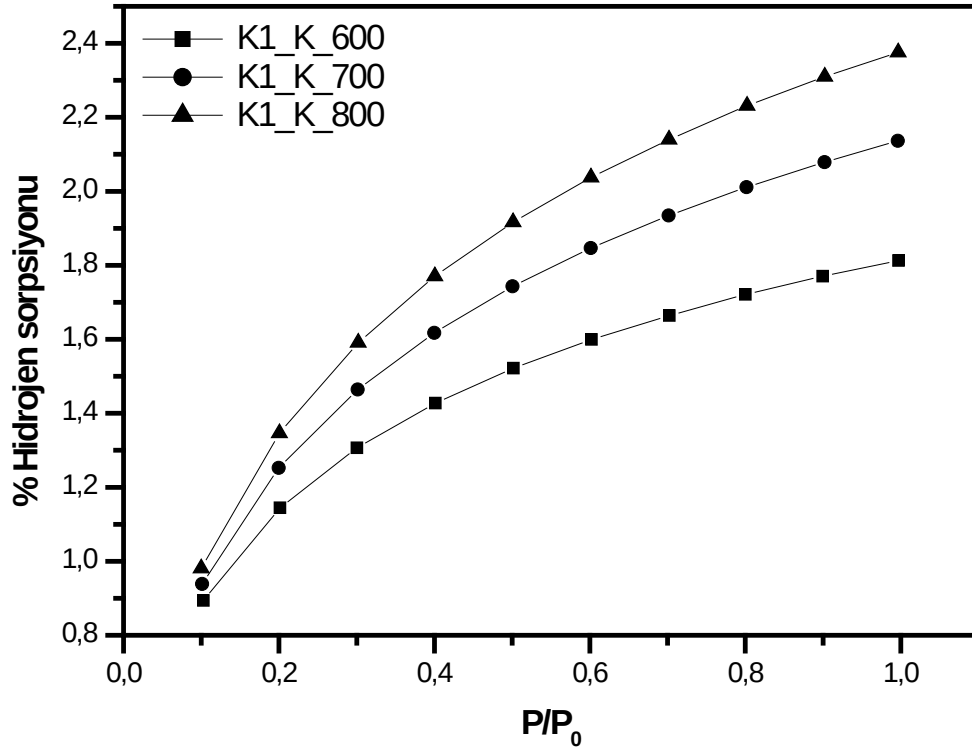
Şekil 7.76 K2 kömürü ve K2 kömüründen fiziksel yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.77'de K1 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların H<sub>2</sub> izotermi verilmektedir. Şekil 7.78'de ise aynı numunelerin P/P<sub>0</sub> basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon kapasitesine sahip numunenin % 2.376 değerine sahip K1\_K\_800 numunesi olduğu görülmektedir.

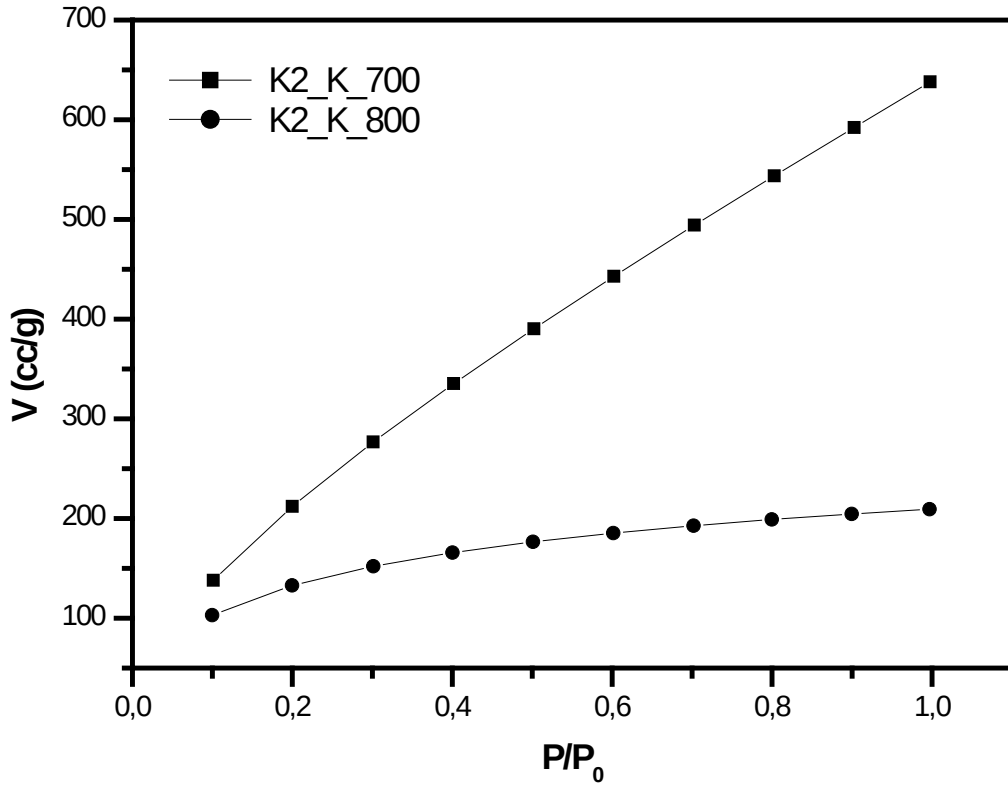
Şekil 7.79'da K2 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların H<sub>2</sub> izotermi verilmektedir. Şekil 7.80'de ise aynı numunelerin P/P<sub>0</sub> basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. Bu grafikler incelendiğinde K2\_K\_700 numunesinin % hidrojen sorpsiyon kapasitesinin 5.43 iken K2\_K\_800 numunesinin ise 1.85 olduğu görülmektedir. Panella et al. (2005) farklı karbon yapılar üzerine hidrojen adsorpsiyonunu 77 K'de incelemişlerdir. En yüksek adsorplama kapasitesini % 4.5 olarak 2560 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon için belirlemişlerdir. Yine Kojima et al. (2006) yaptıkları çalışmada farklı karbon yapılar üzerinde hidrojenin adsorpsiyonunu ve desorpsiyonunu incelemişlerdir. 3220 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı süper aktif karbonun 77 K'de hidrojeni % 5 adsorplayıp-desorpladığını belirtmişlerdir. K2\_K\_700 isimli Zonguldak kömüründen elde ettiğimiz aktif karbon 1659 m<sup>2</sup>/g yüzey alanına sahip olduğu halde hidrojeni % 5.43 adsorplamıştır.



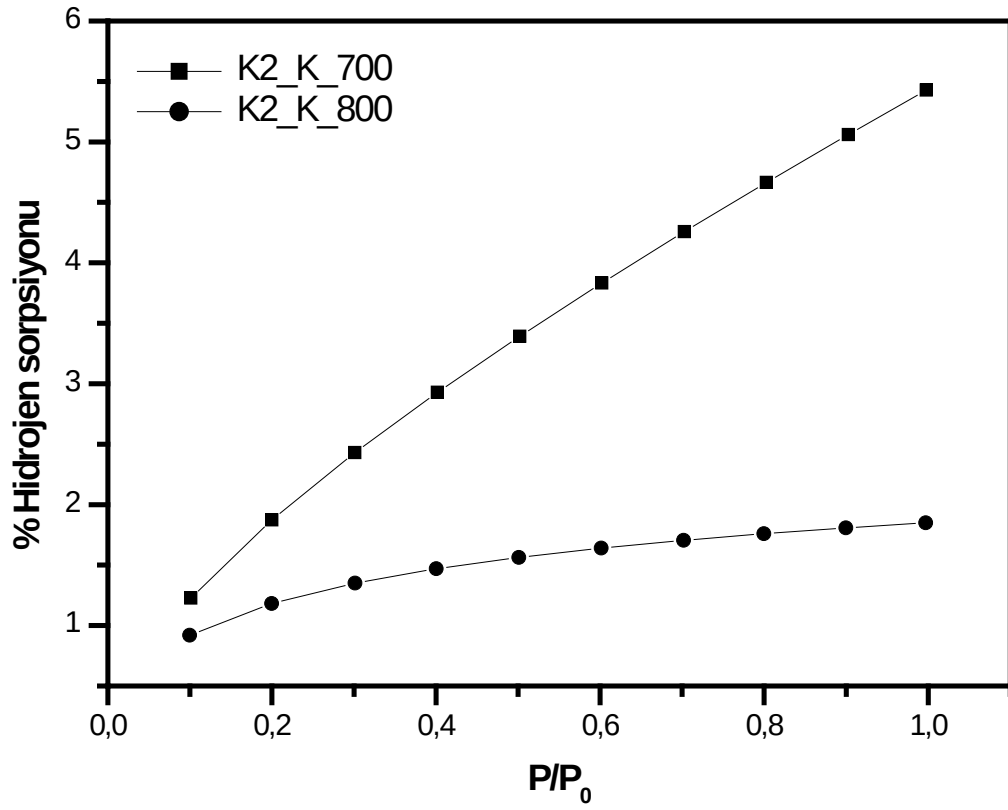
Şekil 7.77 K1 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de H<sub>2</sub> izotermi.



Şekil 7.78 K1 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

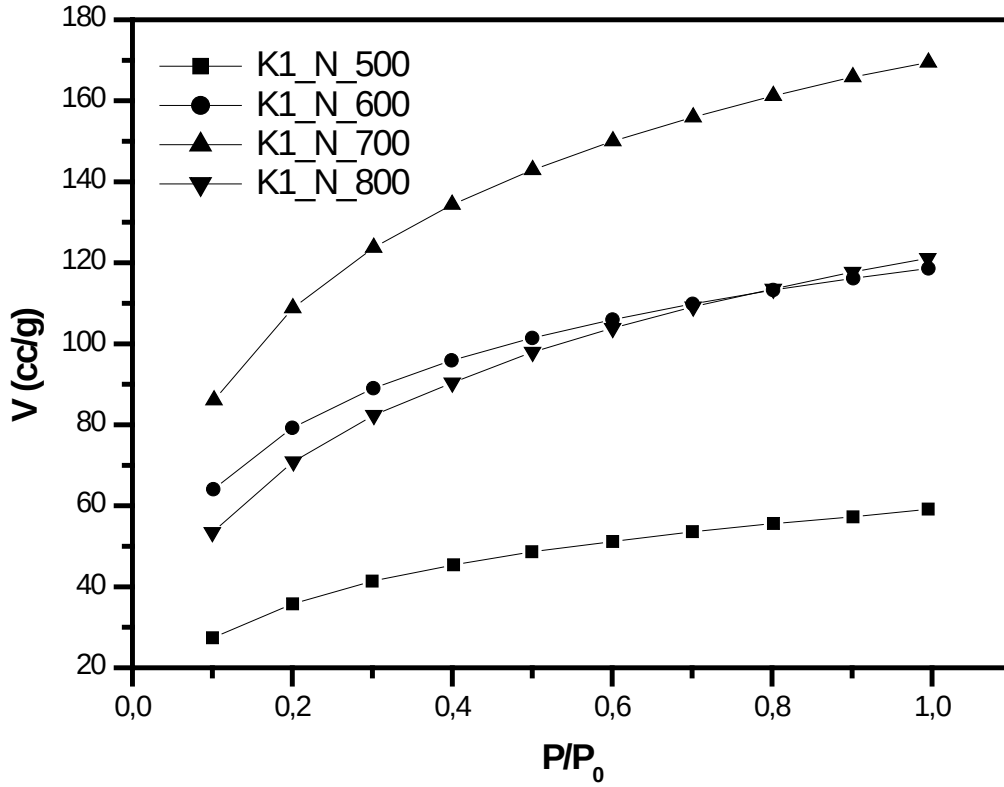


Şekil 7.79 K2 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de H<sub>2</sub> izotermi.



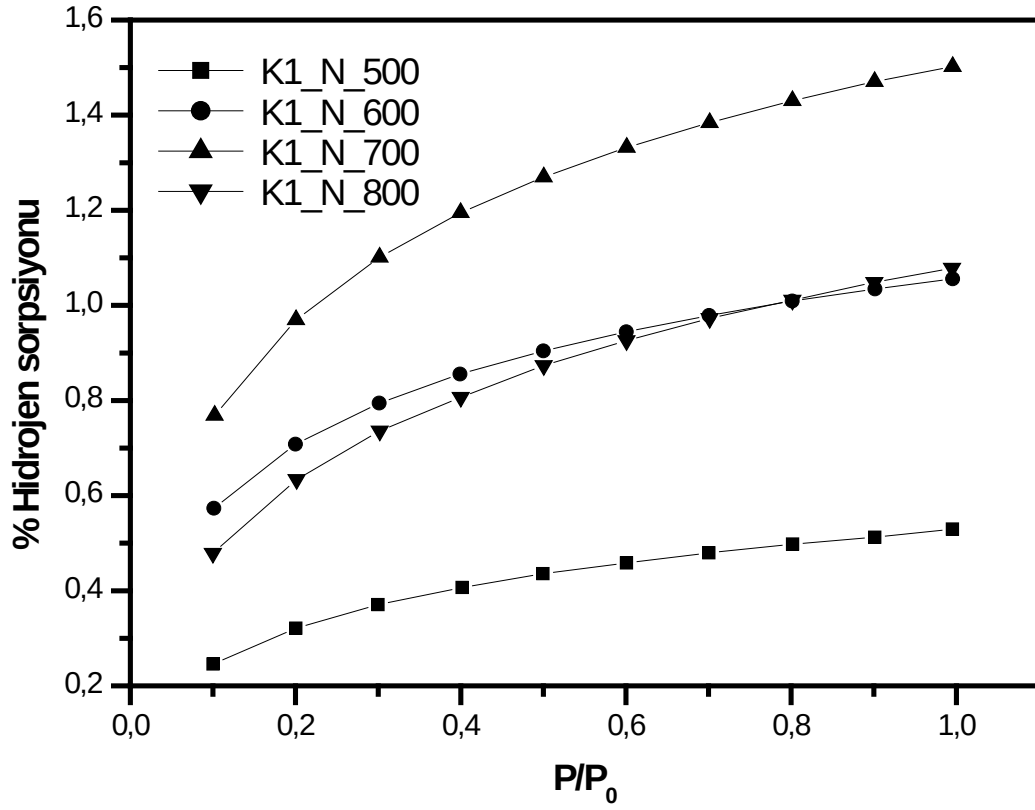
Şekil 7.80 K2 kömüründen KOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.81’de verilen grafiklerde K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $H_2$  izotermi verilmektedir. Şekil 7.82’de ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 1.502 değerine sahip K1\_N\_700 isimli numune olduğu görülmektedir.

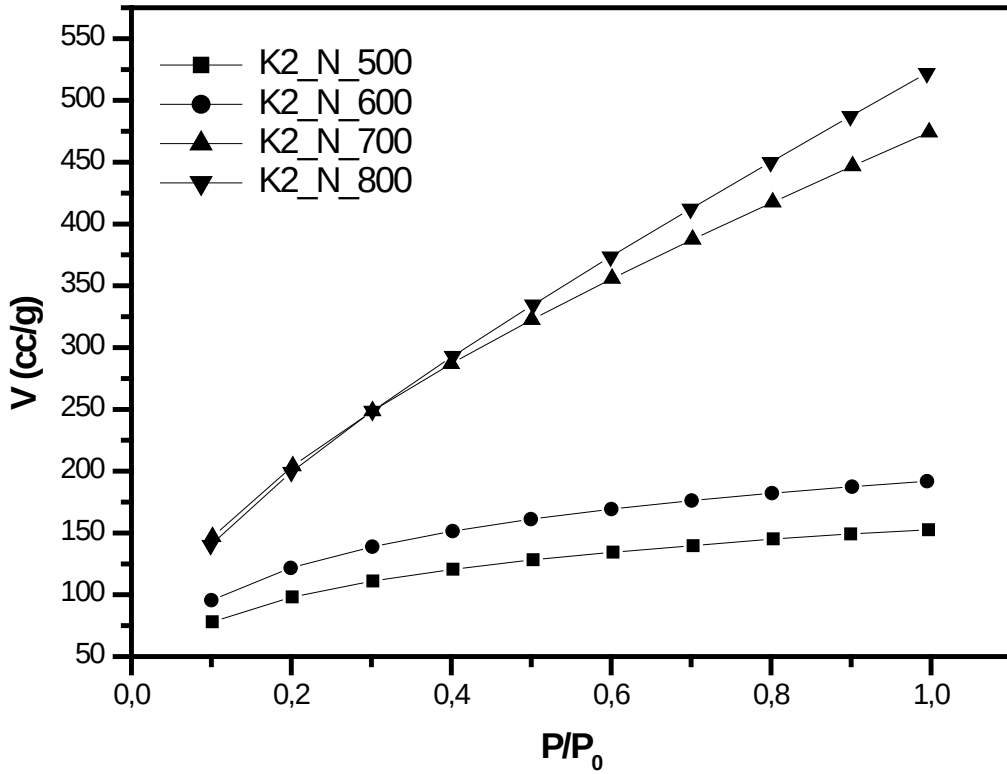


Şekil 7.81 K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de  $H_2$  izotermi.

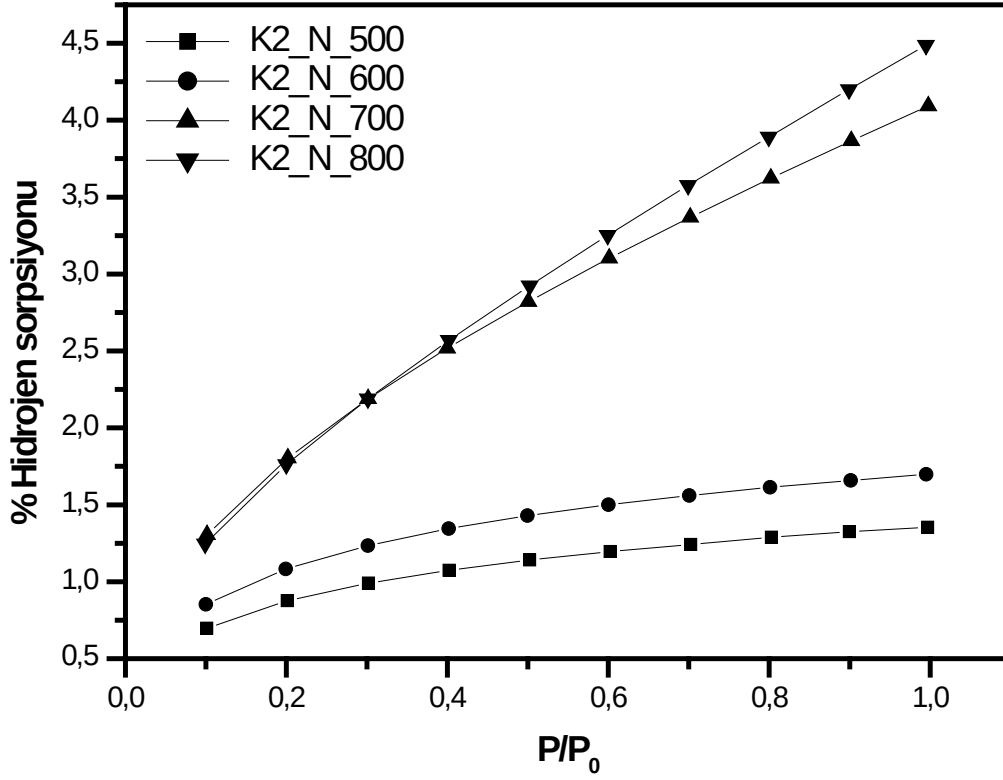
Şekil 7.83’te verilen grafiklerde K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $H_2$  izotermi verilmektedir. Şekil 7.84’de ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde K2\_N\_700 numunesinin % hidrojen sorpsiyon değerinin 4.093, K2\_N\_800 numunesinin ise 4.487 değerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7.82 K1 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyonu grafiği.

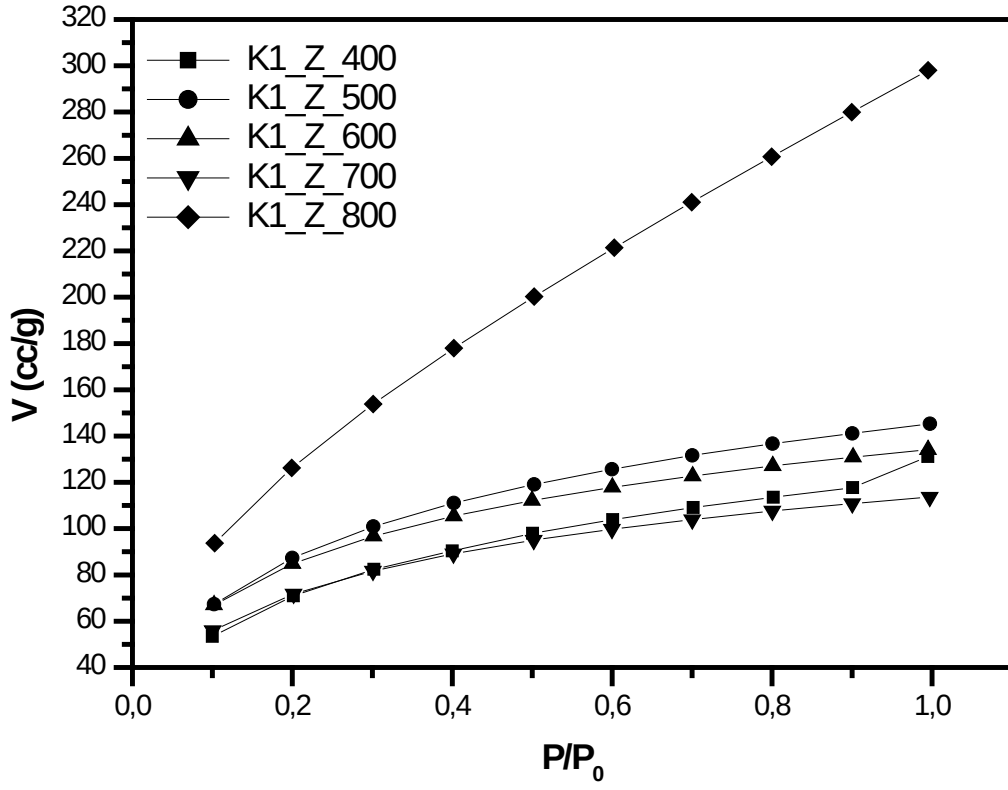


Şekil 7.83 K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de H₂ izotermi.

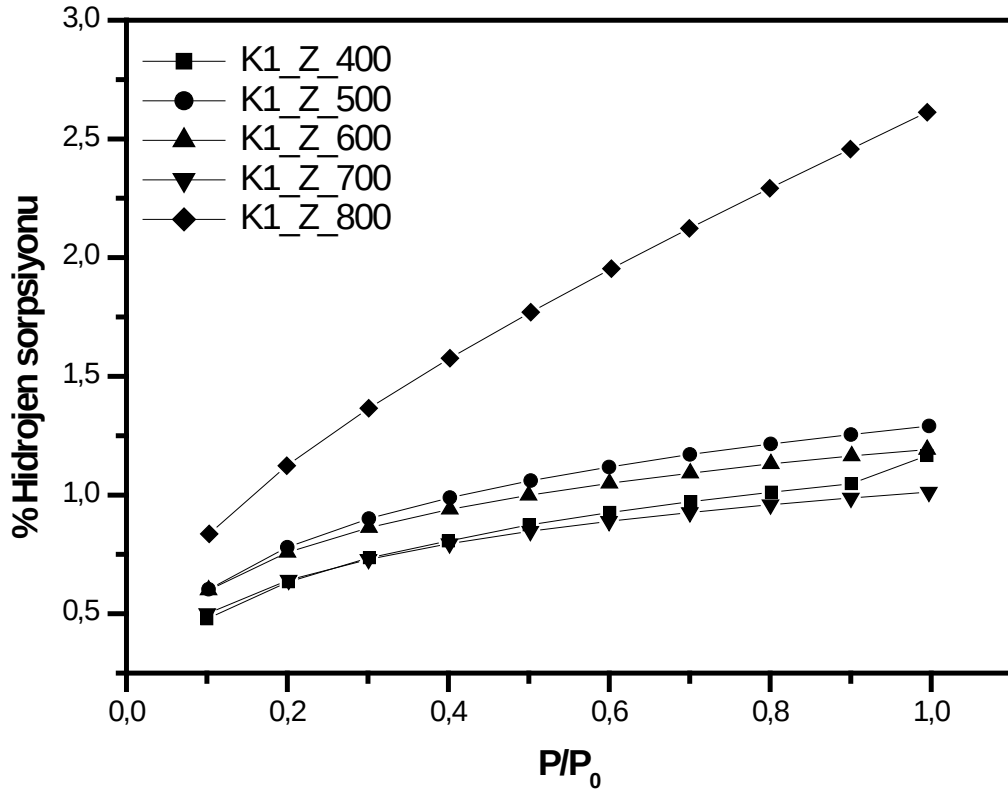


Şekil 7.84 K2 kömüründen NaOH kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.85’te K1 kömüründen  $ZnCl_2$  kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $H_2$  izotermi Şekil 7.86’da ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmiştir. Bu numuneler arasında, en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 2.611 değerine sahip K1\_Z\_800 isimli numune olduğu görülmektedir.

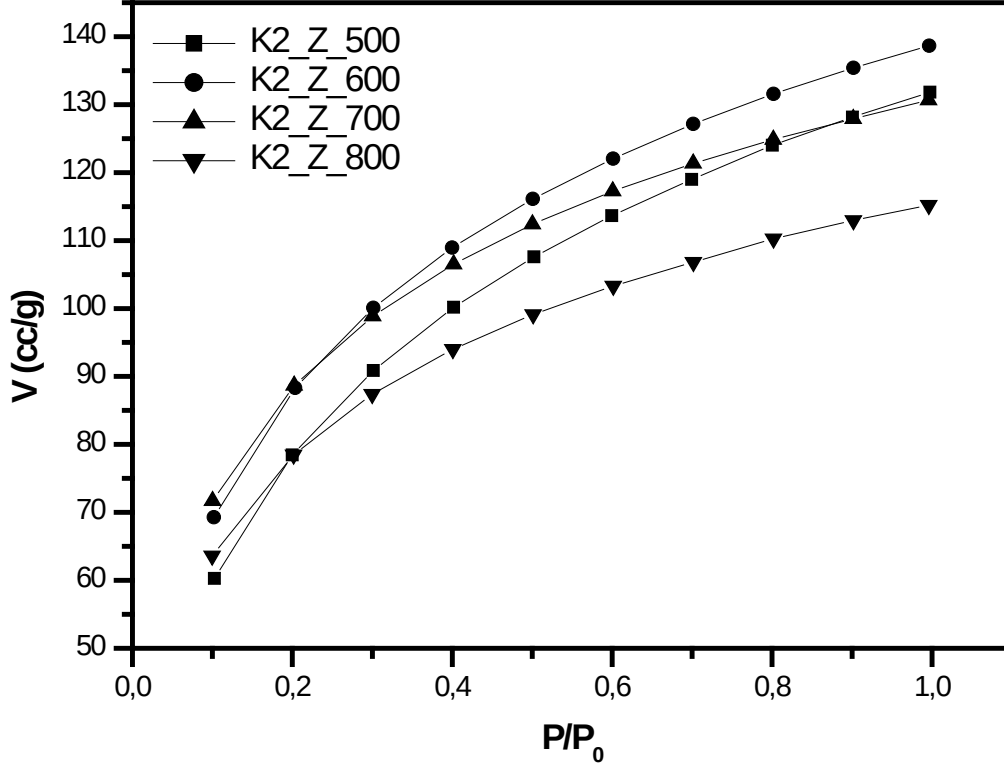


Şekil 7.85 K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de  $\text{H}_2$  izotermi.



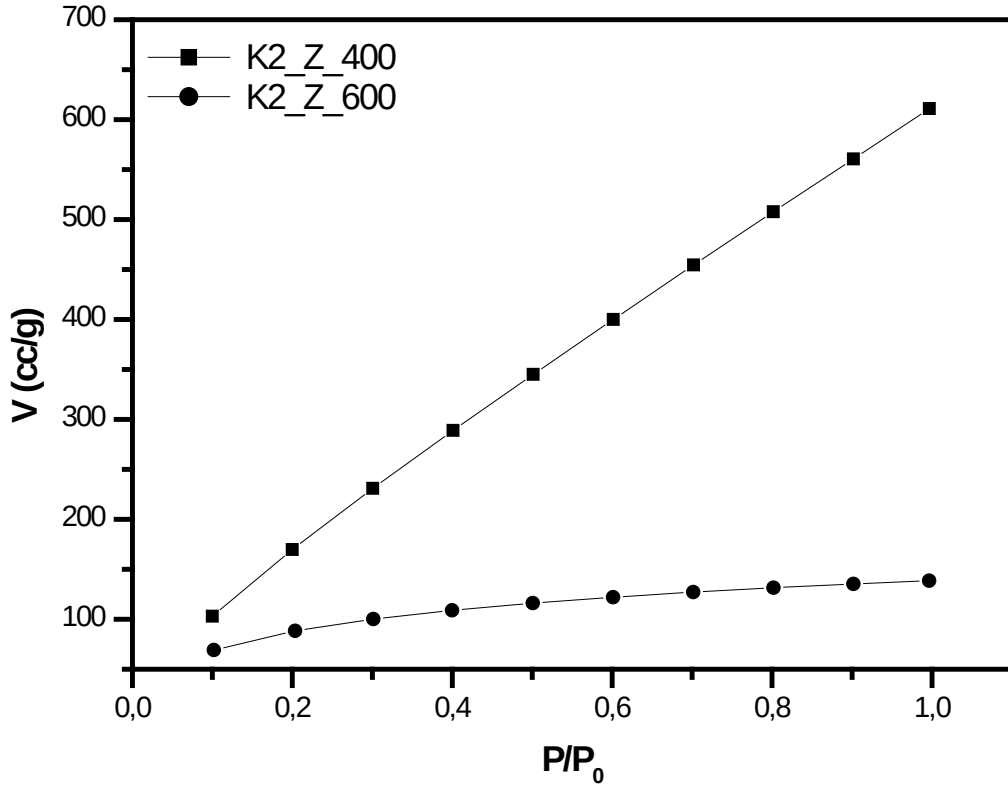
Şekil 7.86 K1 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K'de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.87’de K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 500, 600, 700 ve 800°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $\text{H}_2$  izotermi Şekil 7.88’de ise 400 ve 600°C’de elde edilen aktif karbonların  $\text{H}_2$  izotermi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

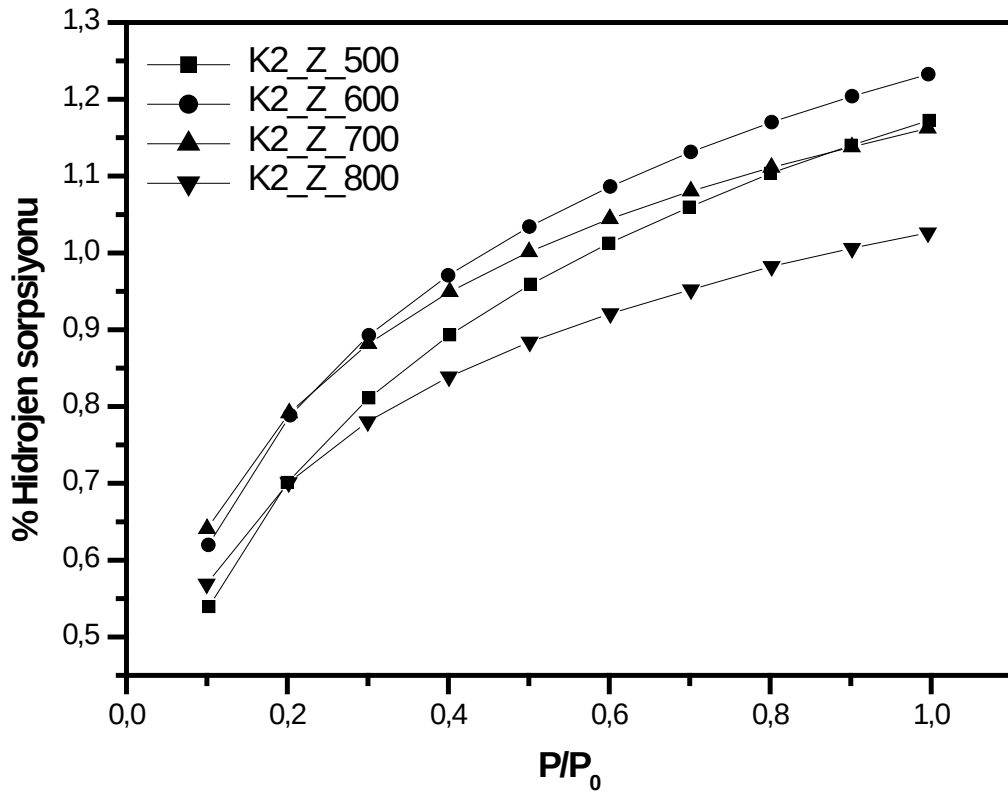


Şekil 7.87 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 500, 600, 700 ve 800°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de  $\text{H}_2$  izotermi.

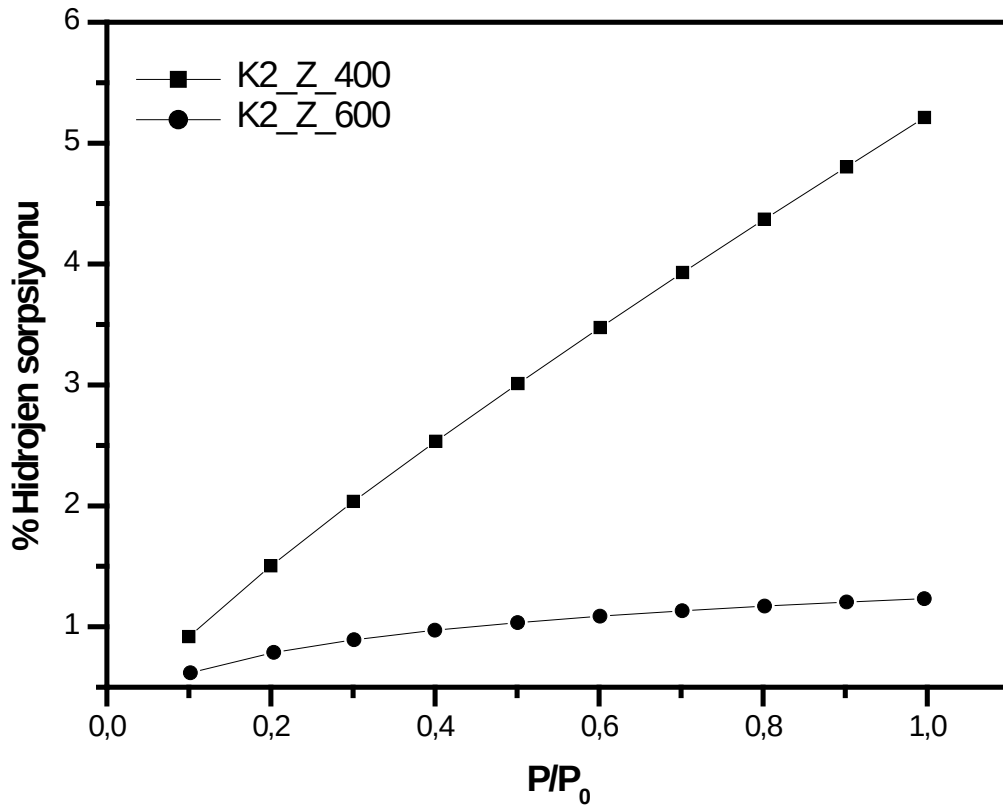
Şekil 7.89’da K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 500, 600, 700 ve 800°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların Şekil 7.90’da ise 400 ve 600°C’de elde edilen aktif karbonların  $\text{P/P}_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 5.211 değerine sahip K2\_Z\_400 isimli numune olduğu görülmektedir. Bu değer K1 kömüründen elde edilen aktif karbonların sahip olduğu değer yaklaşık 2 katıdır.



Şekil 7.88 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 400 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de  $\text{H}_2$  izotermi.



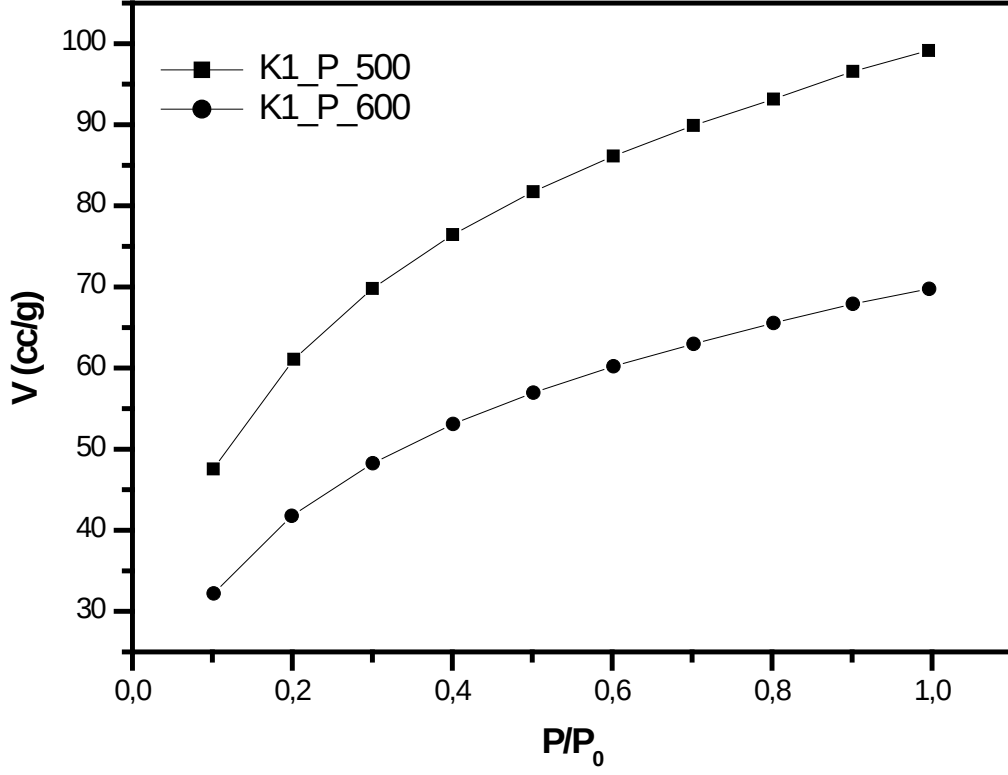
Şekil 7.89 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 500, 600, 700 ve 800°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.



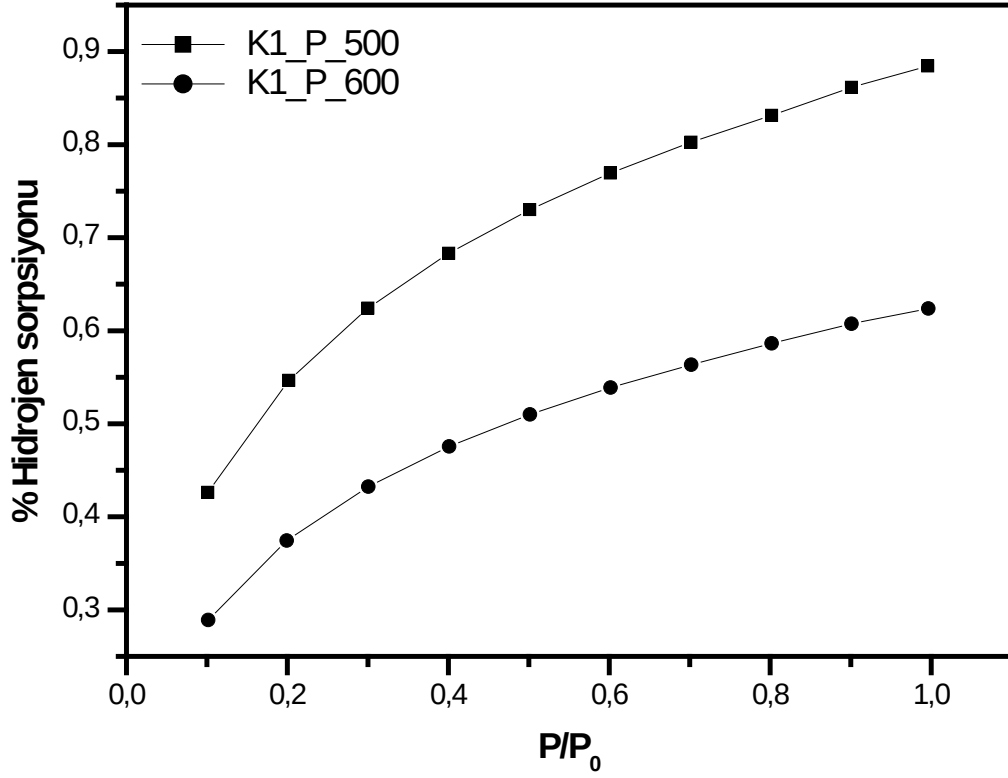
Şekil 7.90 K2 kömüründen  $\text{ZnCl}_2$  kullanılarak 400 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.91’de K1 kömüründen  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $\text{H}_2$  izotermi Şekil 7.92’de ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 0.885 değerine sahip K1\_P\_500 isimli numune olduğu görülmektedir. Bu değer diğer aktivasyon ajanı ile elde edilen aktif karbon numunelerinden daha küçük olduğu görülmektedir.

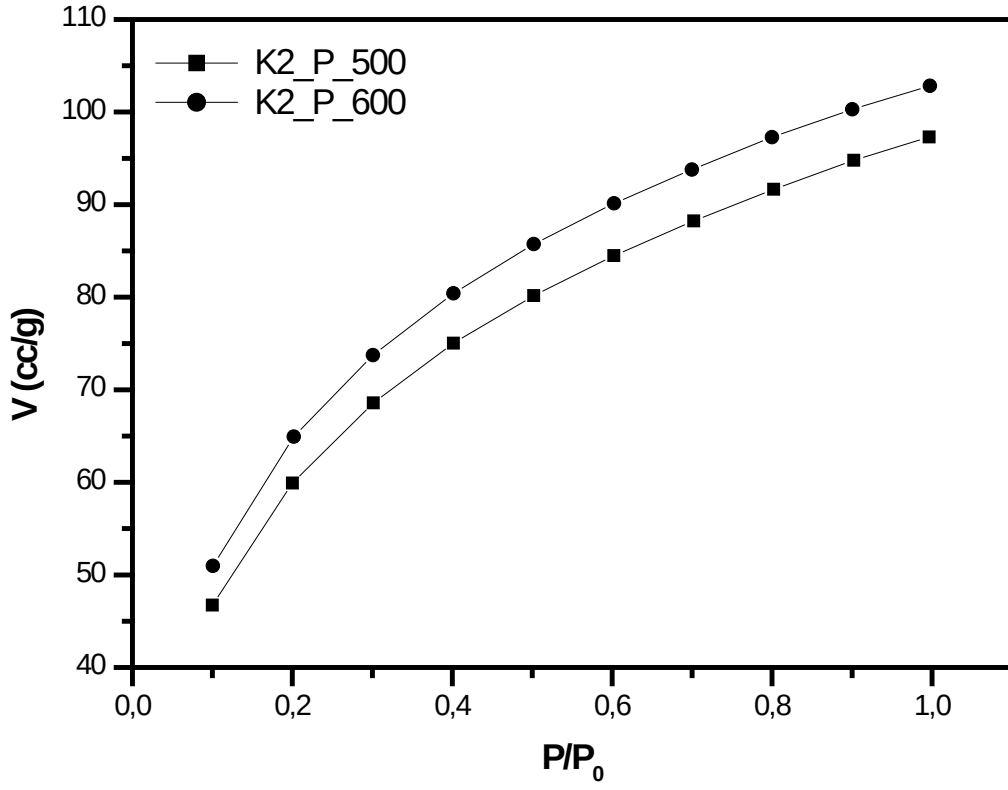
Şekil 7.93’te K2 kömüründen  $\text{H}_3\text{PO}_4$  kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların  $\text{H}_2$  izotermi Şekil 7.94’te ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 0.917 değerine sahip K2\_P\_600 isimli numune olduğu görülmektedir. Bu değer diğer aktivasyon ajanı ile elde edilen aktif karbon numunelerinden daha küçük olduğu görülmektedir.



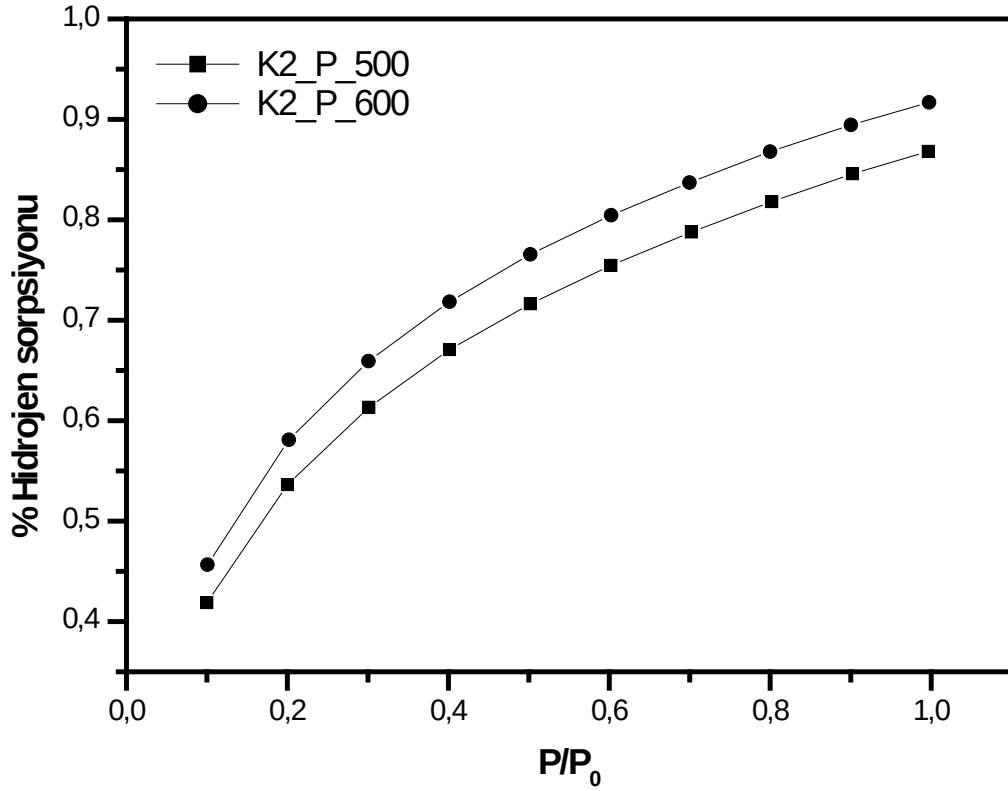
Şekil 7.91 K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de H<sub>2</sub> izotermi.



Şekil 7.92 K1 kömüründen H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

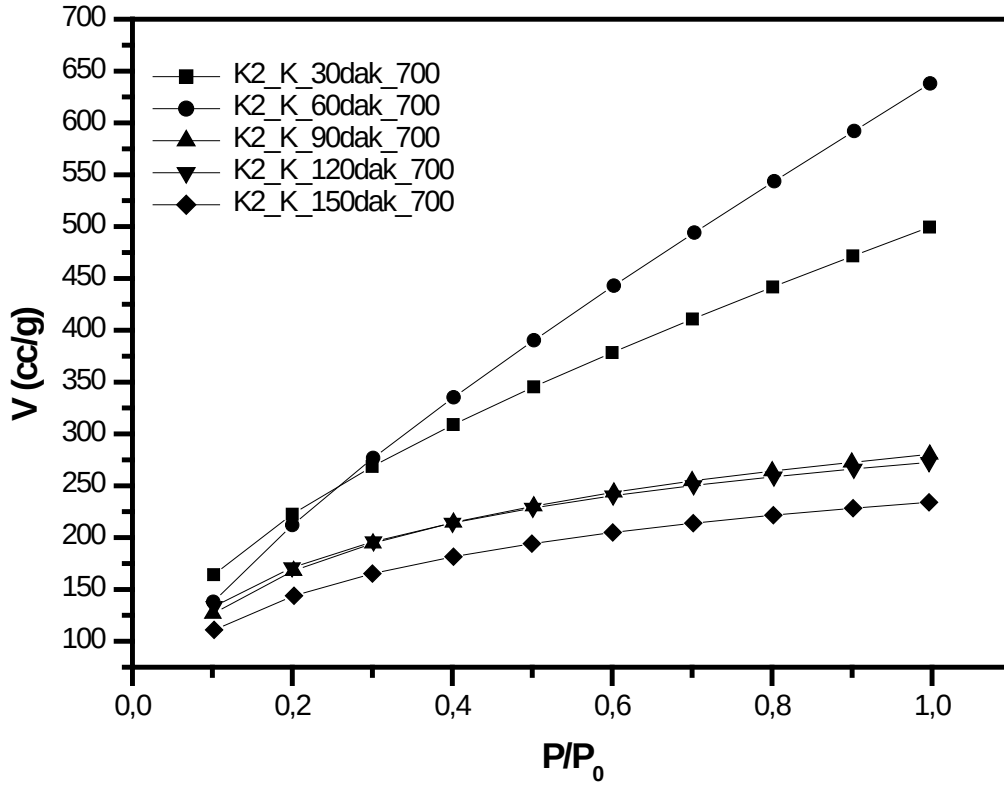


Şekil 7.93 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de  $H_2$  izotermi.



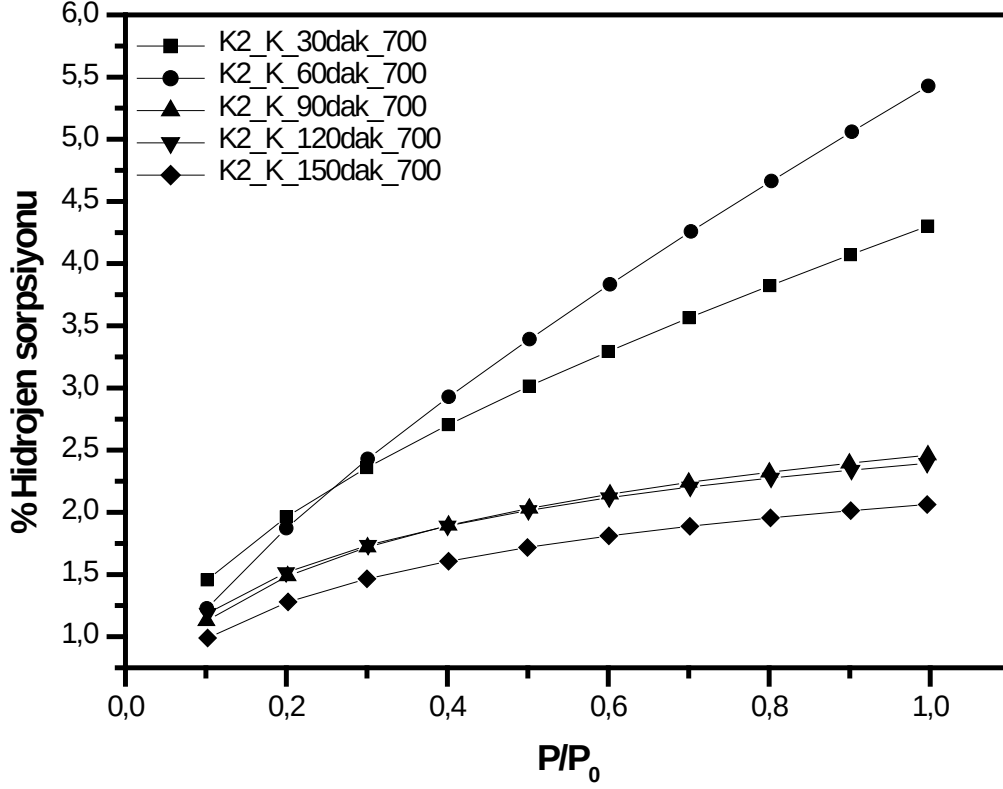
Şekil 7.94 K2 kömüründen  $H_3PO_4$  kullanılarak 500 ve 600°C’de kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Şekil 7.95'te optimum aktivasyon süresini belirlemek amacıyla hazırlanan aktif karbon numunelerinin  $H_2$  izotermi Şekil 7.96'da ise aynı numunelerin  $P/P_0$  basıncına karşı % hidrojen sorpsiyon değerleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde en yüksek hidrojen sorpsiyon değerine sahip numunenin % 5.430 değerine sahip K2\_K\_60dak700 isimli numune olduğu görülmektedir.



Şekil 7.95 K2 kömüründen optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbonların 77 K'de  $H_2$  izotermi.

Çizelge 7.93'de kömür numunelerinden fiziksel ve kimyasal yöntemle elde edilen aktif karbon örneklerinin 77 K'de  $P/P_0 = 0.999$  değerindeki hidrojen sorpsiyonu değerleri verilmektedir. Bu tabloya göre en yüksek hidrojen adsorpsiyonu değerleri K2\_K\_30min\_700, K2\_N\_800, K2\_Z\_400 ve K2\_K\_700 isimli numunelerde sırasıyla % 4.302, 4.487, 5.211 ve 5.430 olarak belirlenmiştir. K1 kömüründen elde edilen aktif karbon örneklerinde ise en yüksek hidrojen adsorpsiyonu değerleri K1\_K\_800 ve K1\_Z\_800 numunelerinde sırasıyla % 2.376 ve 2.611 olarak bulunmuştur. Buradan da hidrojen adsorpsiyonu için K2 numunesinden elde edilen aktif karbon örneklerinin adsorpsiyon özelliklerinin K1 numunesine göre daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 7.96 K2 kömüründen optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla elde edilen aktif karbonların 77 K’de yüzde hidrojen sorpsiyon grafiği.

Zhu et al. (2001) özel bir tip karbon fiber üzerinde hidrojenin adsorpsiyonunun maksimum % 4’e ulaştığını açıklamışlardır. Nishiyama et al.(2002) tek duvarlı karbon nanotüp üzerine hidrojen sorpsiyonunu volumetrik olarak 295 ve 77 K’de 110kPa basınç altında ölçmüşlerdir. Maksimum hidrojen konsantrasyonu 295 K’de % 0.932’ye ulaşırken 77 K’de % 2.37’ye ulaşmıştır. Bu sonuçlarla karşılaştırıldığında Zonguldak kömüründen elde edilen aktif karbonların hidrojeni adsorplama kapasiteleri oldukça iyidir.

Çizelge 7.93 Numunelerin yüzde hidrojen sorpsiyonu değerleri ( $P/P_0 = 0.999$ ).

| Örnekler       | % W   | Örnekler        | % W   |
|----------------|-------|-----------------|-------|
| K1             | 0.282 | K2              | 0.708 |
| K1_500         | 0.610 | K2_600          | 0.748 |
| K1_600         | 1.558 | K2_700          | 0.700 |
| K1_700         | 2.039 | K2_800          | 0.308 |
| K1_800         | 0.272 | K2_K_500        | 1.008 |
| K1_K_600       | 1.813 | K2_K_600        | 2.830 |
| K1_K_700       | 2.136 | K2_K_700        | 5.430 |
| K1_K_800       | 2.376 | K2_K_800        | 1.850 |
| K1_N_500       | 0.530 | K2_N_500        | 1.354 |
| K1_N_600       | 1.056 | K2_N_600        | 1.698 |
| K1_N_700       | 1.502 | K2_N_700        | 4.093 |
| K1_N_800       | 1.078 | K2_N_800        | 4.487 |
| K1_P_500       | 0.885 | K2_P_500        | 0.868 |
| K1_P_600       | 0.624 | K2_P_600        | 0.917 |
| K1_Z_400       | 1.166 | K2_Z_400        | 5.211 |
| K1_Z_500       | 1.291 | K2_Z_500        | 1.173 |
| K1_Z_600       | 1.192 | K2_Z_600        | 1.233 |
| K1_Z_700       | 1.012 | K2_Z_700        | 1.162 |
| K1_Z_800       | 2.611 | K2_Z_800        | 1.026 |
| K2_K_30dak_700 | 4.302 | K2_K_120dak_700 | 2.394 |
| K2_K_90dak_700 | 2.481 | K2_K_150dak_700 | 2.063 |



## BÖLÜM 8

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, Zonguldak İşletmeleri'nden çıkarılan kömürlerin aktif karbon üretiminde hammadde olarak kullanılabilme özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla; Kozlu ve Karadon İşletmeleri'nden temin edilen bitümlü kömürlerin farklı koşullardaki (farklı gaz, akış hızı, sıcaklık) fiziksel aktivasyonları ve farklı aktivasyon kimyasalı varlığında (KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub>) farklı koşullardaki (farklı aktivasyon kimyasalı miktarı, gaz akış hızı, sıcaklık) kimyasal aktivasyonları sonuçlarında elde edilen ürünlerin ne ölçüde aktif karbon özellikleri taşıdıkları ve bu aşamalarda ne gibi değişikliklere uğradıkları deneysel bir sistematik çerçevesinde incelenmiştir.

Elde edilen karbon yapıların organik buharlardan izopropil alkol, aseton, etanol ve hidrojeni adsorplama kapasiteleri belirlenmiş ve sonuçlar birbirleriyle ve ticari aktif karbonla karşılaştırılmıştır. Organik buharların adsorpsiyonunda elde edilen bazı aktif karbonların ticari aktif karbona üstünlükleri açıkça belirlenmiştir. Ayrıca aktif karbon örneklerinin organik buharları adsorplama kapasitelerinin aktivasyon şartları ile ilişkisi belirlenmiş ve BET, Langmuir, Freundlich, DR (Dubinin-Radushkevich), DA (Dubinin-Astakhov), Harkins-Jura, Henderson, Halsey ve Smith gibi farklı matematik modellere uygunlukları araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. Alınan kömür numuneleri ilk olarak gözenekleri genişletebilmek ve kül oranlarını düşürebilmek için HCl, HF ve tekrar HCl bol bol sıcak su ile muamele edilmiştir. Başlangıçta K1 ve K2 kömürünün kül oranları % 10-11 seviyelerinde iken bu işlemlerden sonra % 0.3-0.4'e düşmüştür. Kül oranları düşürülen kömür numunelerinden fiziksel olarak N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> gazlarıyla aktif karbonlar üretilmiştir. K1 kömüründen N<sub>2</sub> ile fiziksel olarak üretilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanlı aktif karbon 700°C'de elde edilirken, K2 kömüründen 600°C'de elde edilmiştir. Fiziksel olarak CO<sub>2</sub> ile K1 (Kozlu) kömüründen elde edilen aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanlı aktif

karbon 800°C’de 251 m<sup>2</sup>/g olarak bulunurken, K2 kömüründen (Karadon) 700°C’de 108 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur.

2. Kimyasal yöntemle aktif karbon üretmeden önce optimum şartları belirlemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Optimum akış hızını belirlemek amacıyla gaz akış hızları 100, 150, 200, 250, 300, 400 mL/dak ayarlanarak yeni aktif karbonlar elde edilmiştir. Bu aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanı ve gözenek hacmi 200 mL/dak akış hızında elde edilmiştir. Optimum aktivasyon süresinin belirlenmesi amacıyla aktif karbonlar 30, 60, 90, 120, 150 dakika sürelerle hazırlanmışlardır. Bunun sonucunda en yüksek yüzey alanlı ve gözenek hacimli aktif karbon 60 dakika aktivasyon süresinde elde edilmiştir. Optimum kimyasal madde miktarının belirlenmesi amacıyla da karbon/kimyasal oranları 1/2, 1/3, 1/4 ve 1/5 oranında alınarak yeni aktif karbonlar üretilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda en yüksek yüzey alanlı ve gözenek hacimli aktif karbon 1/4 oranında hazırlanabilmiştir.
3. Optimum koşullar belirlendikten sonra kimyasal olarak KOH, NaOH, ZnCl<sub>2</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalları kullanılarak farklı sıcaklıklarda aktivasyon yapılarak aktif karbonlar hazırlanmıştır. KOH ile K1 kömüründen en yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon (1904 m<sup>2</sup>/g) 800°C’de elde edilirken, K2 kömüründen en yüksek yüzey alanlı aktif karbon (1659 m<sup>2</sup>/g) 700°C’de elde edilmiştir.
4. NaOH kimyasalı ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlar arasında K1 kömüründen 800°C’de 1188 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilirken, K2 kömüründen 700°C’de 1335 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilmiştir.
5. ZnCl<sub>2</sub> kimyasalı ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlar arasında K1 kömüründen 500°C’de 885 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilirken, K2 kömüründen 400°C’de 926 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilmiştir. Bu kimyasal kullanıldığında daha düşük sıcaklıklarda geniş yüzey alanlı aktif karbonlar elde edilebildiği gözlemlenmiştir.
6. H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalı ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlar arasında K1 kömüründen 700°C’de 636 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilirken, K2 kömüründen 700°C’de 767 m<sup>2</sup>/g yüzey alanlı aktif karbon elde edilmiştir.

7. Her iki kömürden de kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek yüzey alanı ve gözenek hacmi KOH ile hazırlanan aktif karbonlar arasında gözlemlenmiştir. Zonguldak kömüründen aktif karbon üretirken KOH'un çok etkin bir aktivasyon kimyasalı olduğu belirlenmiştir.
8. Hazırlanan aktif karbonlar üzerine organik buharlardan izopropil alkol, aseton ve etanol adsorpsiyonu incelenmiştir. Fiziksel olarak hazırlanan aktif karbonlar izopropil alkolü K1 kömüründen ve ticari aktif karbondan daha az adsorplayabilmişlerdir.
9. K1 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar arasında 800°C'de hazırlanan aktif karbon izopropil alkolü % 39.7 adsorplarken, ticari aktif karbon % 28, K1 kömürü ise % 23.8 adsorplamışlardır. K2 kömüründen KOH ile kimyasal olarak üretilen aktif karbonlar arasında 700°C'de hazırlanan aktif karbon izopropil alkolü % 38.8 adsorplamıştır. K2 kömürü ise ancak % 0.58 adsorplamıştır. KOH ile kimyasal yöntemle hazırlanan aktif karbonlar oldukça yüksek adsorplama kapasitelerine sahiptir. NaOH ile hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek adsorplama kapasitesi K1 kömürü için % 35.6 ile K1\_N\_800 isimli aktif karbonda gözlemlenirken, K2 kömürü için % 34.7 ile K2\_N\_600 isimli aktif karbonda gözlemlenmiştir. Her iki kömürden  $ZnCl_2$  ve  $H_3PO_4$  kimyasalları ile hazırlanan aktif karbonlar arasında bu kadar yüksek adsorplama kapasiteleri gözlemlenmemiştir.
10. Elde edilen aktif karbonların aseton adsorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde her iki kömür içinde en yüksek adsorplama kapasitelerinin KOH ile hazırlanan aktif karbonlarda olduğu gözlemlenmiştir. K1\_K\_800 numunesi % 44 adsorplarken, K2\_K\_700 isimli aktif karbon % 45, K2\_K\_800 isimli aktif karbon ise % 46 adsorplamıştır.
11. Elde edilen aktif karbonların etanol adsorpsiyon kapasiteleri incelendiğinde her iki kömür içinde en yüksek adsorplama kapasitelerinin KOH ile hazırlanan aktif karbonlarda olduğu gözlemlenmiştir. K1 kömüründen KOH ile kimyasal yöntemle 700°C'de hazırlanan aktif karbon etanolü % 34.5 adsorplarken, 800°C'de hazırlanan aktif karbon % 43.5 adsorplamıştır. K2 kömüründen KOH ile 700°C'de hazırlanan aktif karbon etanolü % 38.3 adsorplamıştır.

12. Hazırlanan aktif karbonların hidrojen adsorpsiyonları atmosferik basınçta 77 K'de çalışılmıştır. Azot ile K1 kömüründen 700°C'de hazırlanan aktif karbon hidrojeni % 2.04 adsorplamıştır. Bu değer yüzey alanına oranda oldukça ilgi çekicidir. K1 kömüründen hazırlanan aktif karbonlar arasında en yüksek adsorplama kapasitesi % 2.6 ile K1\_Z\_800 isimli aktif karbonda gözlemlenmiştir. K2 kömüründen hazırlanan aktif karbonlar arasında K2\_K\_600 % 2.83, K2\_K\_700 % 5.43, K2\_N\_700 % 4.09, K2\_N\_800 % 4.5, K2\_Z\_400 % 5.2 adsorplamışlardır. Buradan hidrojen adsorpsiyonu için K2 kömüründen elde edilen aktif karbonların oldukça etkin oldukları gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Agnihotri S, Rood J M and Rostam-Abadi M** (2005) Adsorption Equilibrium of Organic Vapors on Single-Walled Carbon Nanotubes. *Carbon*, 43: 2379-2388.
- Al-Degs Y S, El-Barghouthi M I, El-Sheikh A H and Walker G M** (2008) Effect of Solution pH, Ionic Strength, and Temperature on Adsorption Behavior of Reactive Dyes Activated Carbon. *Dyes and Pigments*, 77: 16-23.
- Alyüz V ve Veli S** (2006) İç Ortam Havasında Bulunan Uçucu Organik Bileşikler ve Sağlık Üzerine Etkileri. *Trakya Univ. J. Sci.*, 7(2): 109-116.
- Ansón A, Callejas M A, Benito A M, Maser W K, Izquierdo M T, Rubio B, Jagiello J, Thommes M, Parra J B and Martínez M T** (2004) Hydrogen adsorption studies on single wall carbon nanotubes. *Carbon*, 42: 1243–1248.
- Atasoy E** (2001) Eskişehir’de Uçucu Organik Bileşiklerin (VOC) Emisyon Potansiyelinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, 143 s.
- Atkins P W** (2001) *Fizikokimya*. Bilim Yayıncılık, Ankara, 1014 s.
- Azevedo D C S, Araújo J C S, Bastos-Neto M, Torres A E B, Jaguaribe E F and Cavalcante C L** (2007) Microporous Activated Carbon Prepared from Coconut Shells Using Chemical Activation with Zinc Chloride. *Microporous and Mesoporous Materials*, 100: 361-364.
- Balcı S, Doğu T and Yücel H**, (1994) Characterization of Activated Carbon Produced from Almond Shell and Hazelnut Shell. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 60: 419-426.
- Bansal R C and Goyal M** (2005) *Activated Carbon Adsorption*. Taylor & Francis Group, CRC Press, USA, 472 p.
- Bansode R R, Losso J N, Marshall W E, Rao R M and Portier R J** (2003) Adsorption of Volatile Organic Compounds by Pecan Shell- and Almond Shell-Based Granular Activated Carbons. *Bioresource Technology*, 90: 175-184.
- Bao M L, Griffini O, Santianni D, Barbieri K, Burrini D and Pantani F** (1999) Removal of Bromate Ion from Water Using Granular Activated Carbon. *Wat. Res.*, 33: 2959-2970.
- Bapat H D** (1999) Biochar, A Novel Low Ash Matrix for the Chemchar Gasification. Ph.D. Thesis. University of Missouri-Columbia. 147 p.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Biron E and Evans J B M** (1998) Dynamic Adsorption of Water-Soluble and Insoluble Vapours on Activated Carbon. *Carbon*, 36: 1191-1197.
- Bittner W E, Smith R M and Bockrath C B** (2003) Characterization of The Surfaces of Single-Walled Carbon Nanotubes Using Alcohols and Hydrocarbons: A Pulse Adsorption Technique. *Carbon*, 41: 1231-1239.
- Carvalho P A, Mestre S A, Pires J, Pinto L M and Emília Rosa M** (2006) Granular Activated Carbons from Powdered Samples Using Clays as Binders for The Adsorption of Organic Vapours. *Microporous and Mesoporous Materials*, 93: 226-231.
- Cheremisinoff P N and Ellerbusch F** (1978) *Carbon Adsorption Handbook*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich.388 p.
- Chirkova J, Andersons B and Andersone I** (2004) Determination of Standard Isotherms of The Sorption of Some Vapors With Cellulose. *Journal of Colloid and Interface Science*, 276: 284-289.
- Condon J B** (2006) *Porosity Determinations by Physisorption Measurements and Theory*. Elsevier, UK, 274 p.
- Çiçek İ** (1998) Tarımsal Kaynaklı Atıklardan Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 65 s.
- Dawson E A, Barnes P A and Chinn M J** (2006) Preparation and Characterisation of Carbon-Coated Ceramic Foams for Organic Vapour Adsorption. *Carbon*, 44: 1189-1197.
- DeBarr J A, Lizzio A A and Daley M A** (1997) Adsorption of SO<sub>2</sub> on Bituminous Coal Char and Activated Carbon Fiber. *Energy & Fuels*, 11: 267-271.
- Dillon, A.C. and Heben M.J.** (2001) Hydrogen Storage Using Carbon Adsorbents: Past, Present and Future, *Applied Physics A*,72:133–142.
- Díaz E, Ordóñez S and Vega A** (2007) Adsorption of Volatile Organic Compounds onto Carbon Nanotubes, Carbon Nanofibers, and High-Surface-Area Graphites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 305: 7-16.
- Díaz E, Ordóñez S, Vega A and Coca J** (2004) Adsorption Characterisation of Different Volatile Organic Compounds Over Alumina, Zeolites and Activated Carbon Using Inverse Gas Chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1049: 139-146.
- Dural H N and Chen C H** (1997) Analysis of Vapor Phase Adsorption Equilibrium of 1,1,1-Trichloroethane on Dry Soils. *Journal of Hazardous Materials*,53: 75-02.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Erdogan F O and Kopac T** (2007) Dynamic Analysis of Sorption of Hydrogen in Activated Carbon. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 3448-3456.
- Figuerola-Torres M.Z, Robau-Sánchez A, Torre-Sáenz L.D and Aguilar-Elguézabal A** (2007) Hydrogen adsorption by nanostructured carbons synthesized by chemical activation. *Microporous and Mesoporous Materials*. 98:89–93.
- Fletcher A J and Thomas K M** (1999) Adsorption and Desorption Kinetics of n-octane and n-nonane Vapors on Activated Carbon. *Langmuir*, 15: 6908-6914.
- Fuertes B A, Marbán G and Nevskaja M D** (2003) Adsorption of Volatile Organic Compounds by Means of Activated Carbon Fibre-Based Monoliths. *Carbon*, 41: 87-96.
- Galiatsatou P, Metaxas M and Kasselouri-Rigopoulou V** (2002) Adsorption of Zinc by Activated Carbons Prepared from Solvent Extracted Olive Pulp. *Journal of Hazardous Materials B*, 91: 187-203.
- Gañán Gómez J, Macías-García A, Díaz-Díez M A, González-García C and Sabio-Rey E** (2006) Preparation and Characterization of Activated Carbons from Impregnation Pitch by  $\text{ZnCl}_2$ . *Applied Surface Science*, 252: 5976-5979.
- Giaya A, Thompson W R and Denkwicz Jr R** (2000) Liquid and Vapor Phase Adsorption of Chlorinated Volatile Organic Compounds on Hydrophobic Molecular Sieves. *Microporous and Mesoporous Materials*, 40: 205-218.
- Gironi F, Capparucci C and Marrelli L** (2003) Adsorption of MTBE Vapors onto Activated Carbon. *J. Chem. Eng. Data*, 48: 783-788.
- Gonzalez-Serrano E, Cordero T, Rodriguez-Mirasol, Cotoruelo L and Rodriguez J J** (2004) Removal of Water Pollutants with Activated Carbons Prepared from  $\text{H}_3\text{PO}_4$  Activation of Lignin from Kraft Black Liquors. *Water Research*, 38: 3043-3050.
- Gregg S J and Sing K S W** (1982) *Adsorption, Surface Area and Porosity*, Academic Press INC., London, 303 p.
- Guo J and Lua A C** (1999) Textural and Chemical Characterisations of Activated Carbon Prepared from Oil-Palm Stone with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and KOH Impregnation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 32: 111-117.
- Guo J and Lua A C** (2000a) Adsorption of Sulfur dioxide onto Activated Carbons Prepared from Oil-Palm Shells Impregnated with Potassium Hydroxide. *J Chem. Technol. Biotechnol.*, 75: 971-976.
- Guo J and Lua A C** (2000b) Effect of Surface Chemistry on Gas-Phase Adsorption by Activated Carbon Prepared from Oil-Palm Stone with Pre-Impregnation. *Separation and Purification Technology*, 18: 47-55.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Haimour N M and Emeish S** (2006) Utilization of Date Stones for Production of Activated Carbon Using Phosphoric Acid. *Waste Management*, 26: 651-660.
- Hamdi B, Houari M, Hamoudi A S and Kessaïssia Z** (2004) Adsorption of Some Volatile Organic Compounds on Geomaterials. *Desalination*, 166: 449-455.
- Hassler J W** (1963) *Activated Carbon*, Chemical Publishing Co., Inc. New York, 426 p.
- Hirscher M and Panella B** (2005) Nanostructures with high surface area for hydrogen storage. *J. of Alloys and Compounds*, 404-406:399-401.
- Hu Z, Guo H, Srinivasan M P and Yaming N** (2003) A Simple Method for Developing Mesoporosity in Activated Carbon. *Separation and Purification Technology*, 31: 47-52.
- Huang Z H, Kang F, Liang K M and Hao J** (2003) Breakthrough of Methylethylketone and Benzene Vapors in Activated Carbon Fiber Beds. *Journal of Hazardous Materials*, B98: 107-115.
- Hynek S, Fuller W and Bentley J.** (1997) Hydrogen Storage by Carbon Sorption, *International Journal of Hydrogen Energy*, 22:601-610.
- İlgar G** (2001) Kömür Esaslı Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 76 sayfa.
- Illian-Gomez M J, Garcia-Garcia A, Salinas-Martinez de Lecea C and Lineras-Solano A** (1996) Activated Carbon from Spanish Coals. 2. Chemical Activation. *Energy & Fuels*, 10: 1108-1114.
- IUPAC Recommendations**, *Pure Applied Chemistry* (1985) 57: 603-619.
- IUPAC Recommendations**, *Pure Applied Chemistry* (1994) 66: 1739-1758.
- Jibril B Y, Al-Maamari R S, Hegde G, Al-Mandhary N and Houache O** (2007) Effects of Feedstock Pre-Drying on Carbonization of KOH-Mixed Bituminous Coal in Preparation of Activated Carbon. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 80: 277-282.
- Kara G** (2004) Bazı Uçucu Organik Bileşiklerin Aktif Karbon, Pomza Taşı ve Zeolitle Giderimi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, OMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun, 52 sayfa.
- Kojima Y, Kawai Y, Koiwai A, Suzuki N, Haga T, Hioki T and Tange K** (2006) Hydrogen adsorption and desorption by carbon materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 421: 204-208.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kopaç T** (1999) Non-isobaric Adsorption Analysis of SO<sub>2</sub> on Molecular Sieve 13X and Activated Carbon by Dynamic Technique. *Chemical Engineering and Processing*, 38: 45-53.
- Kopac T and Erdogan F O** (2009) Temperature and Alkaline Hydroxide Treatment Effects on Hydrogen Sorption Characteristic of Multi-walled Carbon Nanotube-Graphitw Mixture. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 15:730-5.
- Koppmann R** (2007) *Volatile Organic Compounds in the Atmosphere*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, 508 p.
- Kula İ, Uğurlu M, Karaoğlu H and Çelik A** (2007) Adsorption of Cd(II) Ions from Aqueous Solutions Using Activated Carbon Prepared from Olive Stone by ZnCl<sub>2</sub> Activation. *Bioresource Technology*, 99: 492-501.
- Lamari M, Aoufi A and Malbrunot P.** (2000) Thermal Effects in Dynamic Storage of Hydrogen by Adsorption, *AIChE Journal*, 46:632-646.
- Lee W H and Reucroft P J** (1999a) Vapor Adsorption on Coal- and Wood-Based Chemically Activated Carbons (II) Adsorption of Organic Vapors. *Carbon*, 37: 15-20.
- Lee W H and Reucroft P J** (1999b) Vapor Adsorption on Coal- and Wood-Based Chemically Activated Carbons (III) NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>S Adsorption in The Low Relative Pressure Range. *Carbon*, 37: 21-26.
- Li M, Gu A, Lu X and Wang R** (2004) Supercritical Methane Adsorption Equilibrium Data on Activated Carbon with Prediction by the Adsorption Potential Theory. *J. Chem. Eng. Data*, 49: 73-76.
- Li S** (2007) Nanostructural activated carbons for hydrogen storage. Ph.D. Thesis, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York, 322 p.
- Lillo-Ródenas M A, Lozano-Castelló D, Cazorla-Amorós D and Linares-Solano A** (2001) Preparation of Activated Carbons from Spanish Anthracite II. Activation by NaOH. *Carbon*, 39: 751-759.
- Lillo-Ródenas M A, Marco-Lozar J P, Cazorla-Amorós D and Linares-Solano A** (2007) Activated Carbons Prepared by Pyrolysis of Mixtures of Carbon Precursor/Alkaline Hydroxide. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 80: 166-174.
- Lowell S and Shields J E** (1984) *Powder Surface Area and Porosity*. Second Editions, Chapman and Hall Ltd., London, 234 p.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Lozano-Castelló D, Lillo-Ródenas M A, Cazorla-Amorós D and Linares-Solano A** (2001) Preparation of Activated Carbons from Spanish Anthracite I. Activation by KOH. *Carbon*, 39: 741-749.
- Luo L, Ramirez D, Rood M J, Grevillot G, Hay K J and Thurston D L** (2006) Adsorption and Electrothermal Desorption of Organic Vapors Using Activated Carbon Adsorbents with Novel Morphologies. *Carbon*, 44: 2715-2723.
- Maciá-Agulló J A, Moore B C, Cazorla-Amorós D and Linares-Solano A** (2004) Activation of Coal Tar Pitch Carbon Fibres: Physical Activation vs. Chemical Activation. *Carbon*, 42: 1367-1370.
- Marsh H and Rodríguez-Reinoso F** (2006) *Activated Carbon*. Elsevier Science & Technology Books, UK, 536 p.
- Mohanty K, Das D and Biswas M N** (2005) Adsorption of Phenol from Aqueous Solutions Using Activated Carbons Prepared from Tectona Grandis Sawdust by ZnCl<sub>2</sub> Activation. *Chemical Engineering Journal*, 115: 121-131.
- Molina-Sabio M and Rodríguez-Reinoso F** (2004) Role of Chemical Activation in the Development of Carbon Porosity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 241: 15-25.
- Namane A, Mekarzia A, Benrachedi K, Belhaneche-Bensemra N and Hellal A** (2005) Determination of the Adsorption Capacity of Activated Carbon Made from Coffee Grounds by Chemical Activation with ZnCl<sub>2</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. *Journal of Hazardous Materials*, 119: 189-194.
- Nishimiya N, Ishigaki K, Takikawa H, Ikeda M, Hibi Y, Sakakibara T, Matsumoto A and Tsutsumi K** (2002) Hydrogen sorption by single-walled carbon nanotubes prepared by a torch arc method. *J Alloy Compd.* 339:275-282.
- Noll E K, Gounaris V and Hou W S** (1991) *Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control*, Lewis Publ. Inc., Michigan, 323 p.
- Oğuz F** (2004) Gözenekli Katılarda Gaz Adsorpsiyon ve Difüzyonu. Yüksek Lisans Tezi, ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Zonguldak, 99 s.
- Otowa T, Nojima Y and Miyazaki T** (1997) Development of KOH Activated High Surface Area Carbon and Its Application to Drinking Water Purification. *Carbon*, 35: 1315-1319.
- Panella B, Hirscher M and Roth S** (2005) Hydrogen adsorption in different carbon nanostructures. *Carbon*, 43:2209–2214.
- Park S and Jung W** (2002) Preparation and Structural Characterization of Activated Carbons Based on Polymeric Resin. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250: 196-200.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Paulsen D P and Cannon S F** (1999) Polytherm Model for Methylisobutylketone Adsorption onto Coconut-Based Granular Activated Carbon. *Carbon*, 37: 249-260.
- Paulsen D P, Moore C B and Cannon S F** (1999) Applicability of Adsorption Equations to Argon, Nitrogen and Volatile Organic Compounds Adsorption Onto Activated Carbon. *Carbon*, 37: 1843-1853.
- Pires J, Carvalho A and de Carvalho B M** (2001) Adsorption of Volatile Organic Compounds in Y Zeolites and Pillared Clays. *Microporous and Mesoporous Materials*, 43: 277-287.
- Poirier E, Chahine R and Bose T K** (2001) Hydrogen adsorption in carbon nanostructures. *Int. J. Hydrogen Energy*, 26:831-835.
- Polatoğlu B R** (2006) Sucuk ve Pastırmanın Nem Sorpsiyon İzotermlerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, 86 s.
- Qian Q, Chen Q, Machida M, Tatsumoto H, Mochidzuki K and Sakoda A** (2009) Removal of Organic Contaminants from Aqueous Solution by Cattle Manure Compost (CMC) Derived Activated Carbons. *Applied Surface Science*, 255: 6107-6114.
- Quantachrome Instruments** (2002) *Nova Manual*.
- Rodríguez-Reinoso F, Molina-Sabio M and González M T** (1995) The Use of Steam and CO<sub>2</sub> as activating agents in the preparation of activated carbons. *Carbon*, 33:15-23.
- Rouquerol F, Rouquerol J and Sing K** (1999) *Adsorption by Powders and Porous Solids Principles, Methodology and Applications*. Academic Press, UK, 455 p.
- Ruthven D M** (1984) *Principles of Adsorption & Adsorption Processes*, John Wiley & Sons, New York, 433 p.
- Ryu Y, Lee H, Yoo H and Lee C** (2002) Adsorption Equilibria of Toluene and Gasoline Vapors on Activated Carbon. *J. Chem. Eng. Data*, 47: 1222-1225.
- Serrano-Talavera B, Munoz-Guillena J, Lineras-Solano A and Salinas-Martinez de Lecea C** (1997) Activated Carbons from Spanish Coals. 3. Preoxidation Effect on Anthracite Activation. *Energy & Fuels*, 11: 785-791.
- Shih Y and Li M** (2008) Adsorption of Selected Volatile Organic Vapors on Multiwall Carbon Nanotubes. *Journal of Hazardous Materials*, 154: 21-28.
- Shim G W, Lee W J and Moon H** (2006) Adsorption Equilibrium and Column Dynamics of VOCs on MCM-48 Depending on Pelletizing Pressure. *Microporous and Mesoporous Materials*, 88: 112-125.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Skodras G, Diamantopoulou I, Zabaniotou A, Stavropoulos G and Sakellaropoulos G P** (2007) Enhanced Mercury Adsorption in Activated Carbons from Biomass Materials and Waste Tires. *Fuel Processing Technology*, 88: 749-758.
- Song L and Rees L V C** (2000) Adsorption and Diffusion of Cyclic Hydrocarbon in MFI-Type Zeolites Studied by Gravimetric and Frequency-Response Techniques. *Microporous and Mesoporous Materials*, 35-36: 301-314.
- Spahis N, Addoun A, Mahmoudi H and Ghaffour N** (2008) Purification of Water by Activated Carbon Prepared from Olive Stones. *Desalination*, 222: 519-527.
- Sun J, Brady T A, Rood M J and Lehmann C M** (1997) Adsorbed Natural Gas Storage with Activated Carbons Made from Illinois Coals and Scrap Tires. *Energy & Fuels*, 11: 316-322.
- Takagi H, Hatori H, Yamada Y, Matsuo S and Shiraishi S** (2004) Hydrogen adsorption properties of activated carbons with modified surfaces. *J. of Alloys and Compounds*, 385:257-263
- Teng H and Hsu L** (1998) Preparation of Activated Carbons from Bituminous Coal with Zinc Chloride Activation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37: 58-65.
- Teng H, Yeh T S and Hsu L Y** (1998) Preparation of Activated Carbon from Bituminous Coal with Phosphoric Acid Activation. *Carbon*, 36: 1387-1395.
- Teng H and Hsu L** (1999) High-Porosity Carbons Prepared from Bituminous Coal with Potassium Hydroxide Activation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38: 2947-2953.
- Ubago-Pérez R, Carrasco-Marín, Fairén-Jiménez D and Moreno-Castilla C** (2006) Granular and Monolithic Activated Carbons from KOH-Activation of Olive Stones. *Microporous and Mesoporous Materials*, 92: 64-70.
- Üçer A, Uyanık A and Aygün Ş F** (2006) Adsorption of Cu(II), Cd(II), Zn(II), Mn(II) and Fe (III) Ions by Tannic Acid Immobilised Activated Carbon. *Separation and Purification Technology*, 47: 113-118.
- Wang S and Zhu Z H** (2007) Effects of Acidic Treatment of Activated Carbons on Dye Adsorption. *Dyes and Pigments*, 75: 306-314.
- Wartelle L H, Marshall W E, Toles C A and Johns M M** (2000) Comparison of Nutshell Granular Activated Carbons to Commercial Adsorbents for The Purge-And-Trap Gas Chromatographic Analysis of Volatile Organic Compounds. *Journal of Chromatography A*, 879: 169-175.
- Wu H M and You J H** (2007) Destruction of Methyl Ethyl Ketone Vapor by Ozone on Activated Carbon. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 38: 117-124.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

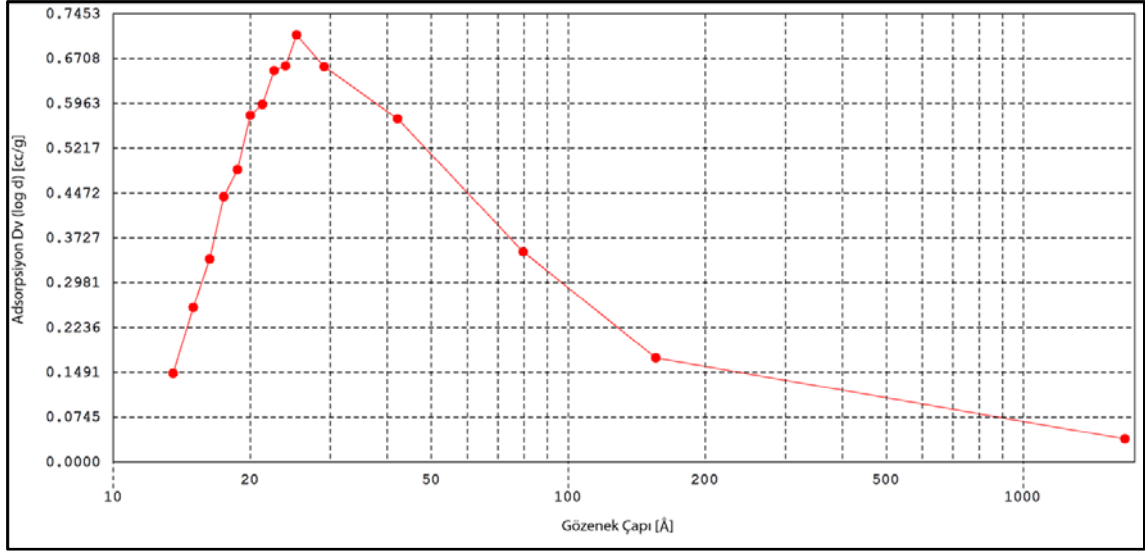
- Wu J, Hammarstrom L G, Claesson O and Fangmark I** (2003) Modeling the Influence of Physico-Chemical Properties of Volatile Organic Compounds on Activated Carbon Adsorption Capacity. Letters to the Editor, *Carbon*, 41: 1309-1328.
- Yalçın M ve Arol A İ** (1993) Altın Metalürjisi için Yerli Kaynaklardan Aktif Karbon Üretimi. Türkiye XIII. Madencilik Kongresi.
- Yang T and Lua A C** (2006) Textural and Chemical Properties of Zinc Chloride Activated Carbons Prepared from Pistachio-Nut Shells. *Materials Chemistry and Physics*, 100: 438-444.
- Yener J, Kopaç T, Doğu G and Doğu T** (2008) Dynamic Analysis of Sorption of Methylene Blue Dye on Granular and Powdered Activated Carbon. *Chemical Engineering Journal*, 144: 400-406.
- Yılmaz D** (2006) Bazı Uçucu Organik Bileşiklerin Adsorpsiyonla Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Samsun, 69 s.
- Yörükoğulları E** (1997) *Doğal zeolitlerde fiziksel adsorpsiyon uygulamaları*, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Fen Fakültesi Yayınları, Eskişehir.
- Yun J and Choi D** (1997) Adsorption Isotherms of Benzene and Methylbenzene Vapors on Activated Carbon. *J. Chem. Eng. Data*, 42: 894-896.
- Yun J, Hwang K and Choi D** (1998) Adsorption of Benzene and Toluene Vapors on Activated Carbon Fiber at 298, 323, and 348 K. *J. Chem. Eng. Data*, 43: 843-845.
- Zhang T** (2004) Preparation and Characterization of Carbon Molecular Sieves and Activated Carbons. Doktora Tezi, Kansas State University, Department of Chemical Engineering, Manhattan, Kansas, 163 p.
- Zhou L and Zhou Y P** (1998) Linearization of Adsorption Isotherms For High Pressure Applications, *Chemical Engineering Science*, 53:2531-2536.
- Zhu H, Li C, Li X, Xu C, Mao Z, Liang J and Wu D** (2002) Hydrogen storage by platelet-carbon fibers at room temperature. *Materials Letters*, 57:32-35
- Zondlo J W and Velez M R** (2007) Development of Surface Area and Pore Structure for Activation of Anthracite Coal. *Fuel Processing Technology*, 88: 369-374.
- Zou Y and Han B** (2001) High-Surface-Area Activated Carbon from Chinese Coal. *Energy & Fuels*, 15: 1383-1386.



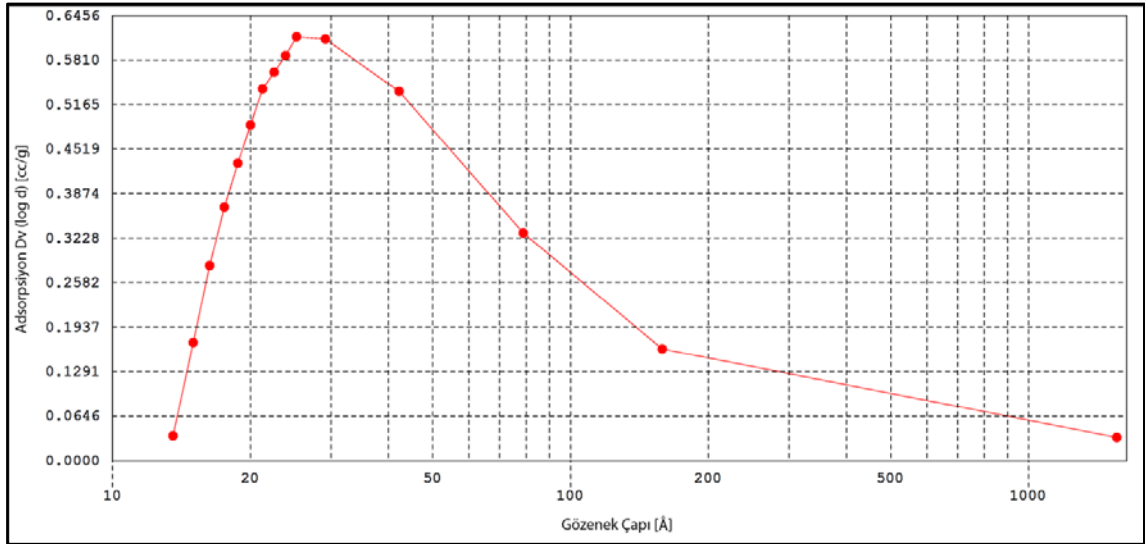
## EK AÇIKLAMALAR A

### AKTİF KARBONLARIN GÖZENEK BOYUTU DAĞILIMLARI

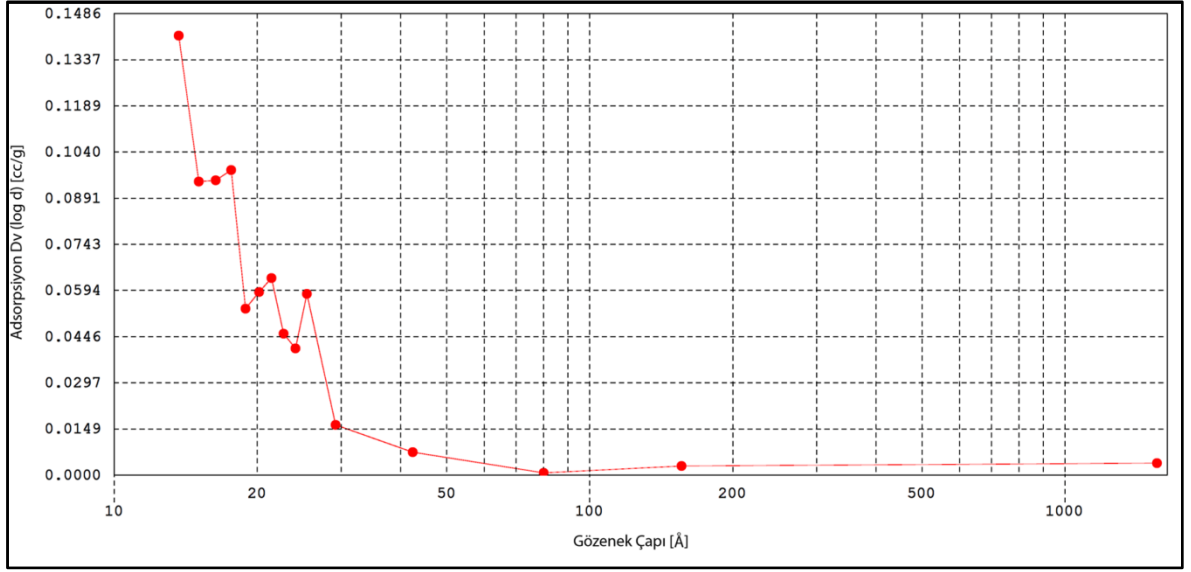
Aktif karbonların gözenek boyutu dağılımları N<sub>2</sub> gazı ile 77 K'de BJH (Barrett, Joyner ve Halenda) yöntemiyle belirlenmiştir.



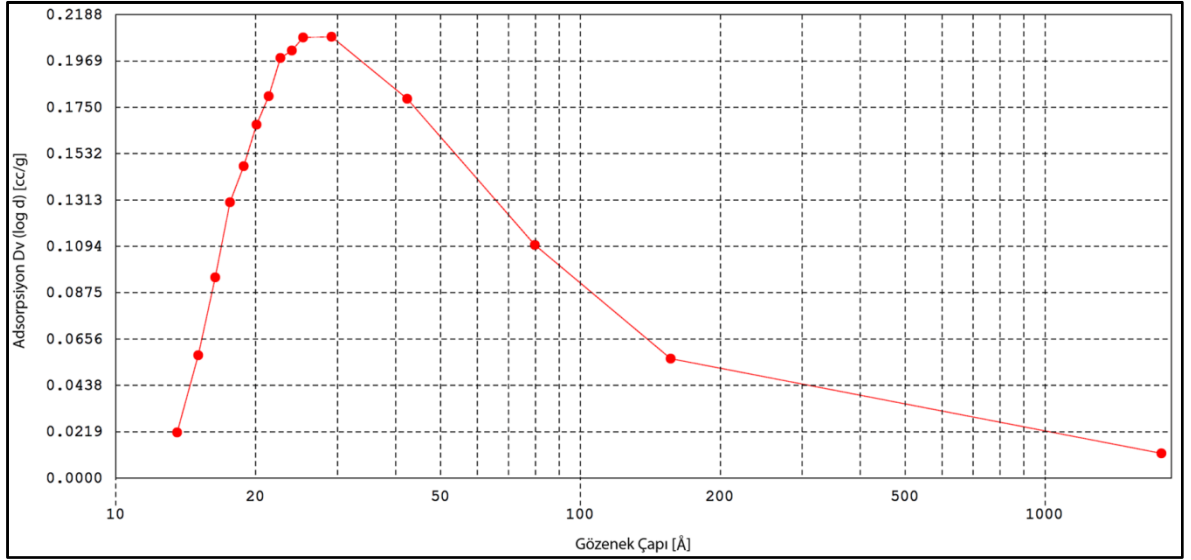
Şekil A.1 K1\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



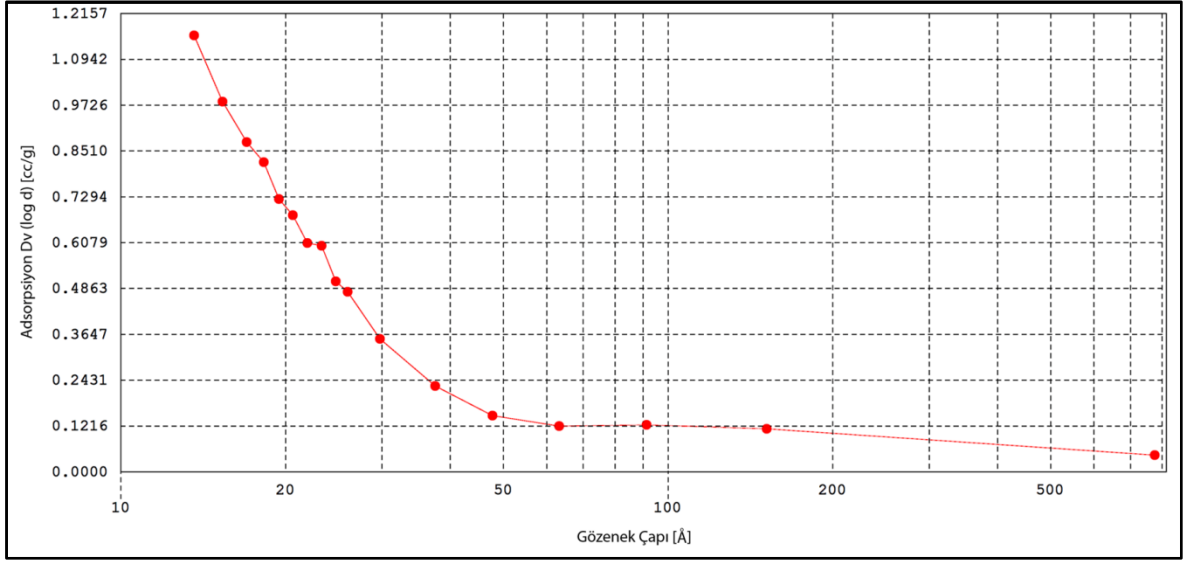
Şekil A.2 K2\_600 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



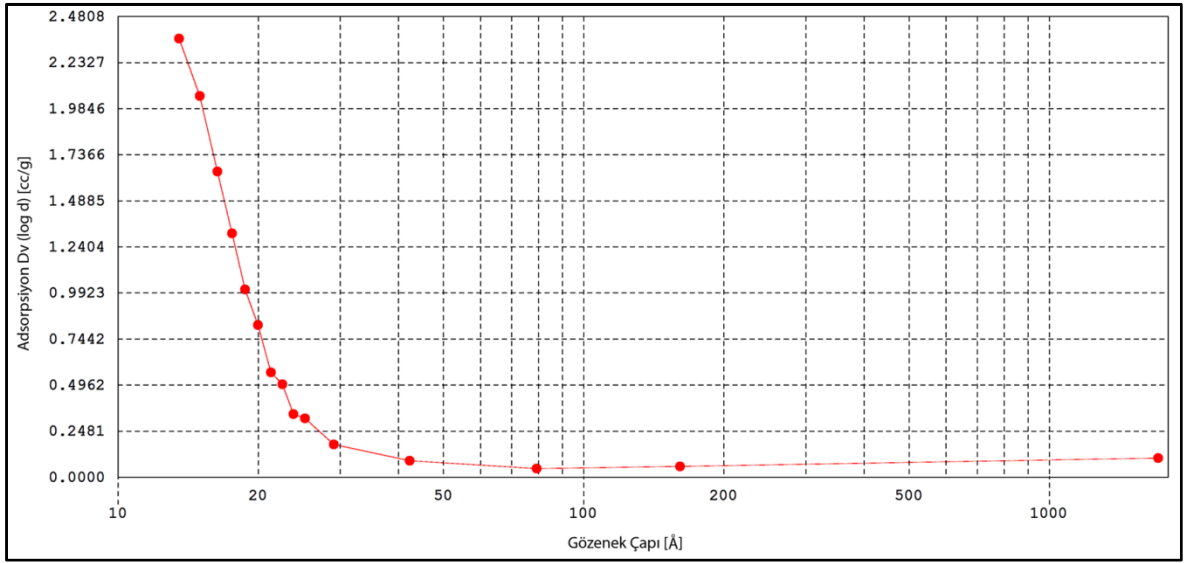
Şekil A.3 K1\_CO2\_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



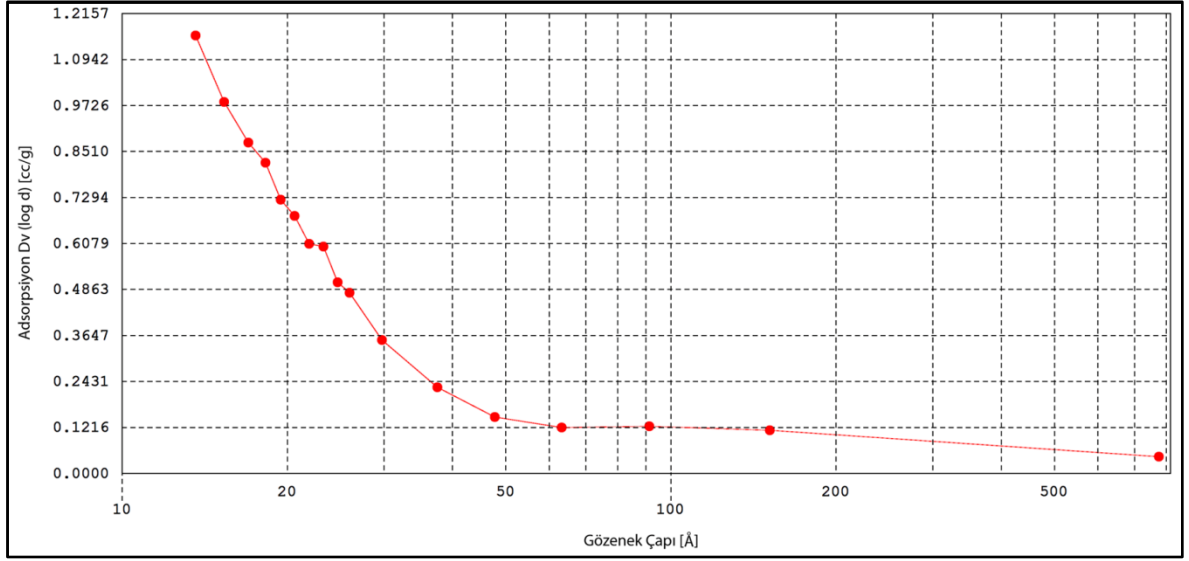
Şekil A.4 K2\_CO2\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



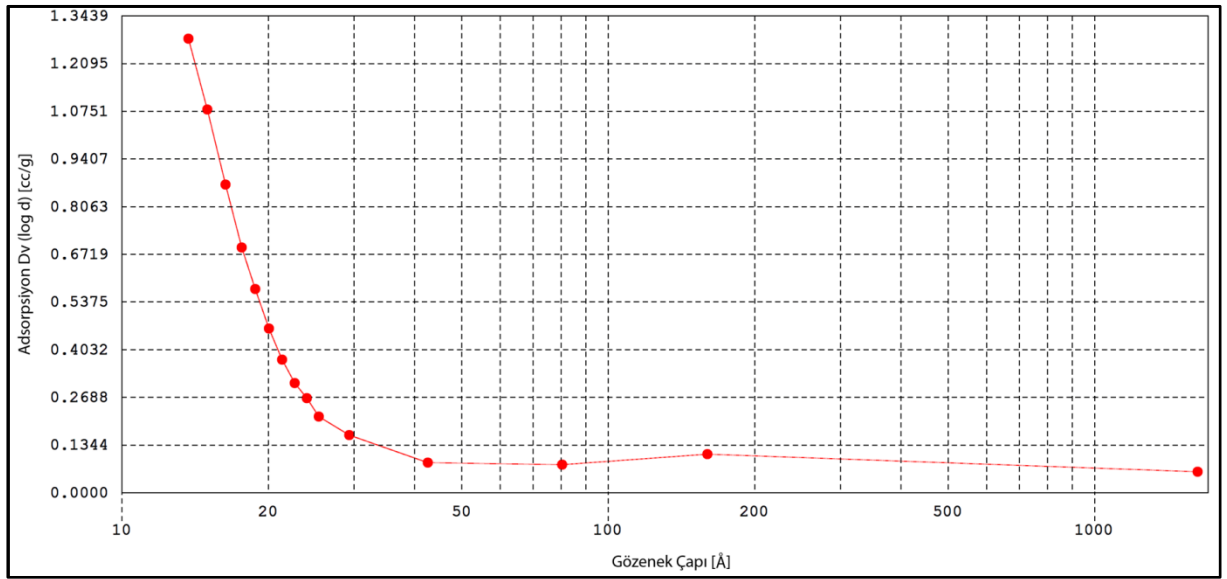
Şekil A.5 K1\_K\_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



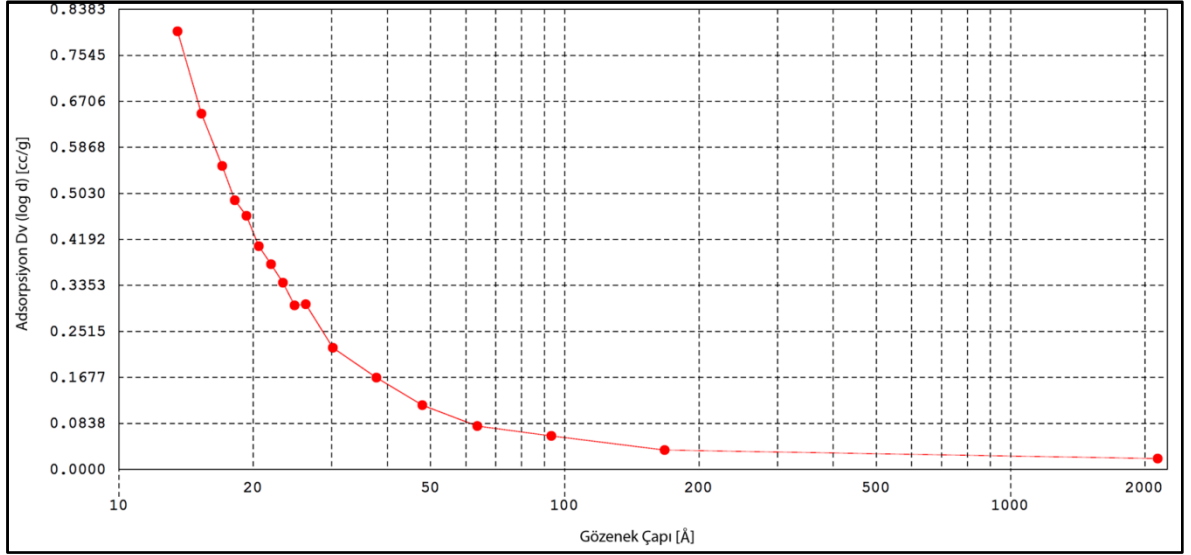
Şekil A.6 K2\_K\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



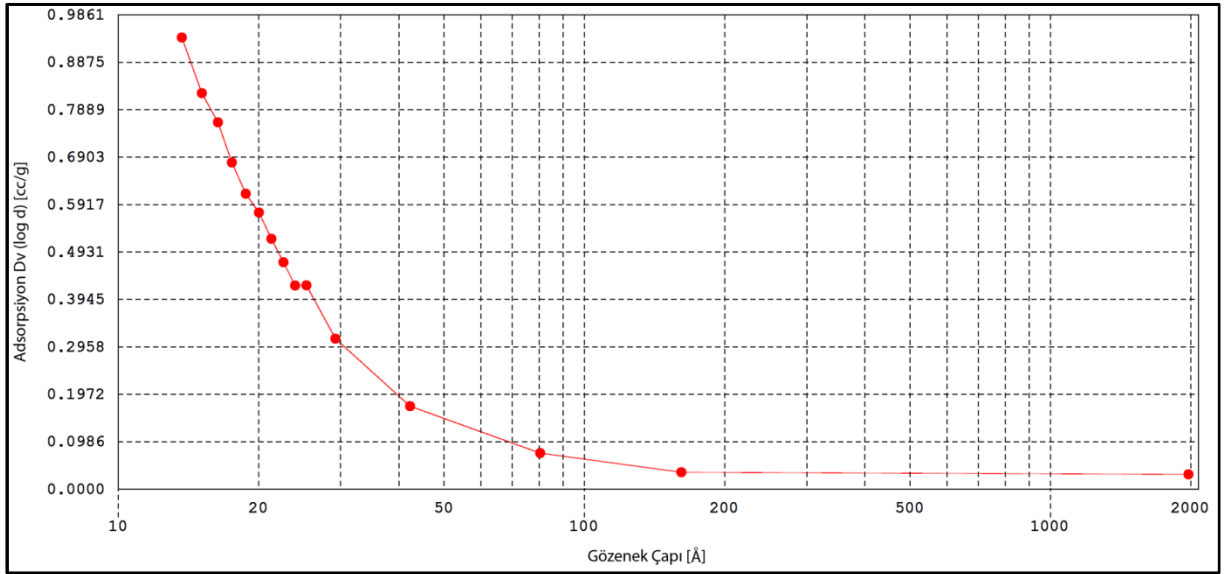
Şekil A.7 K1\_N\_800 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



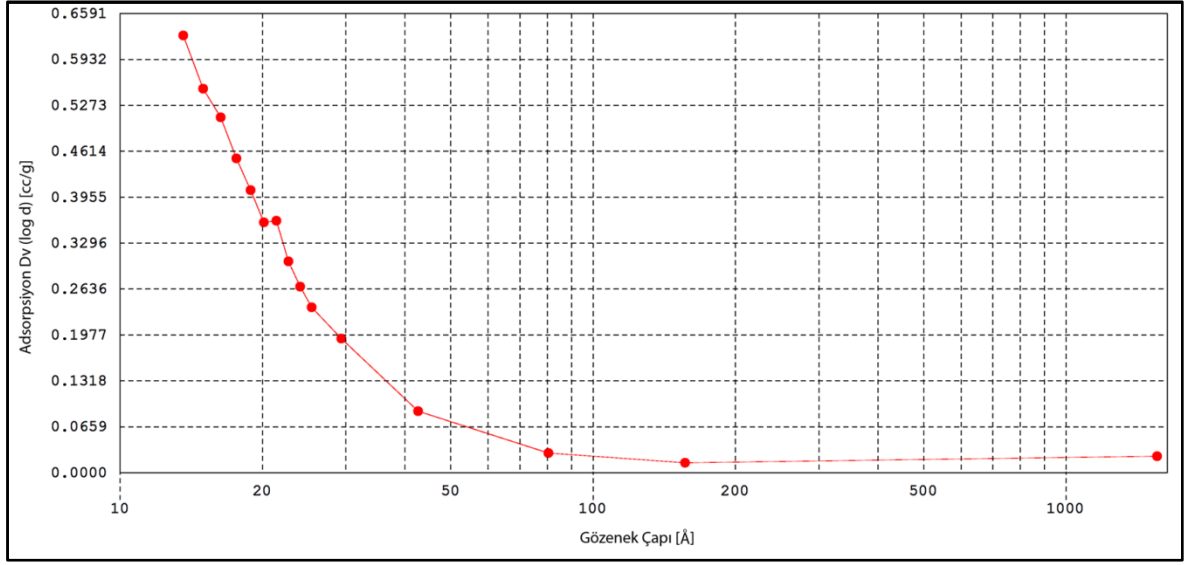
Şekil A.8 K2\_N\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



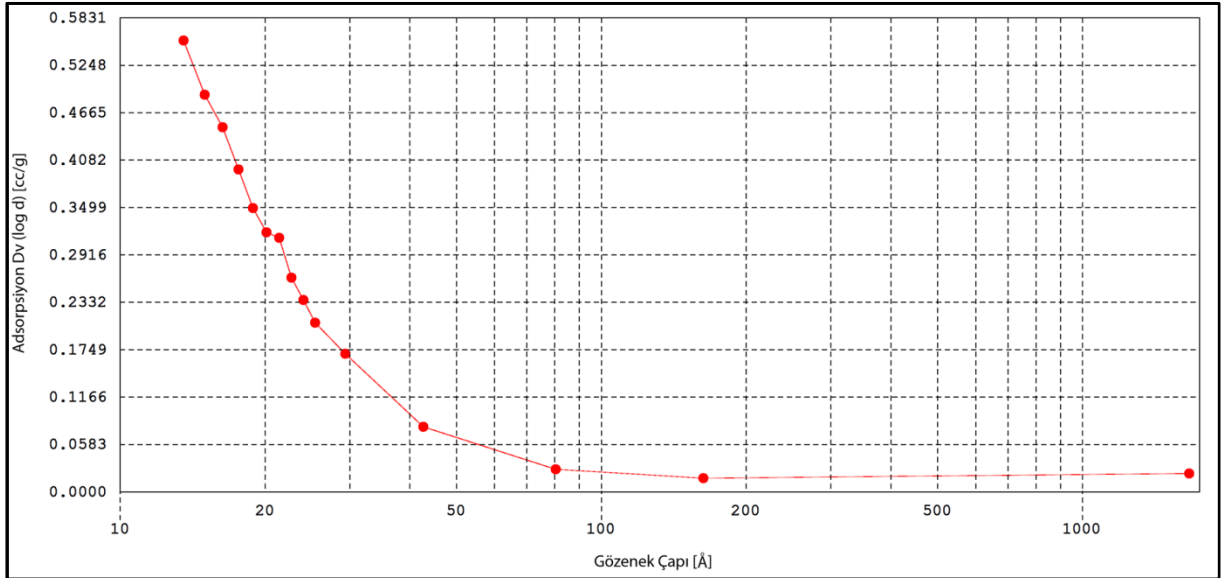
Şekil A.9 K1\_Z\_500 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



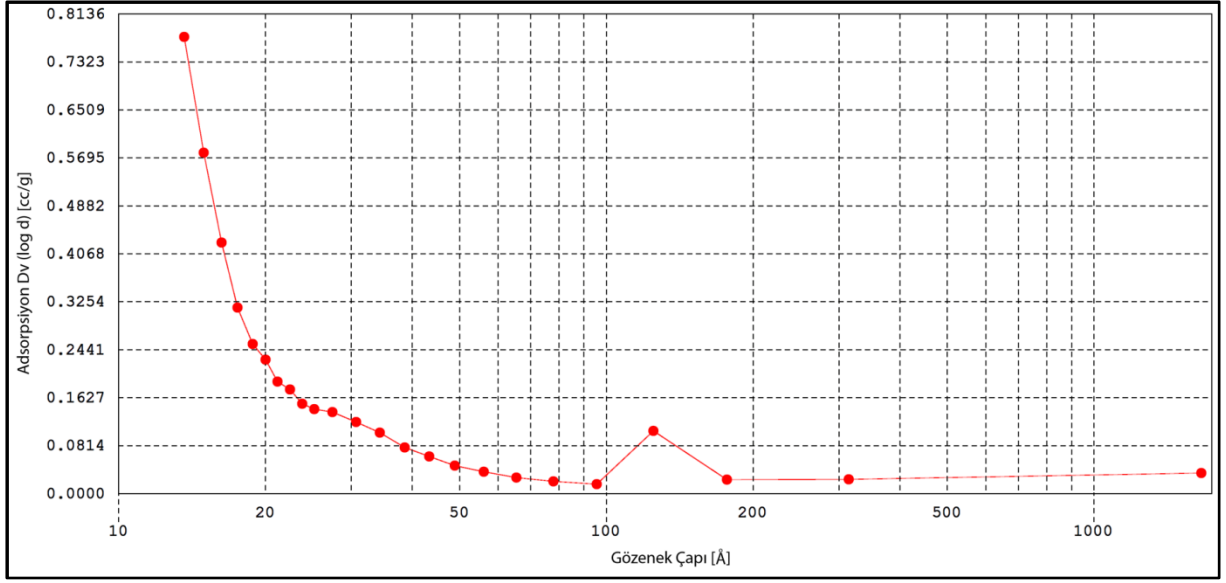
Şekil A.10 K2\_Z\_400 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



Şekil A.11 K1\_P\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



Şekil A.12 K2\_P\_700 numunesinin gözenek boyutu dağılımı.



Şekil A.13 Ticari aktif karbonun gözenek boyutu dağılımı.

## ÖZGEÇMİŞ

Fatma OĞUZ ERDOĞAN 1979 yılında İzmit'te doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Körfez Atatürk Lisesi'nden mezun olduktan sonra 1997 yılında ZKÜ Devrek Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü'ne girdi. 2001 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2004 yılında yüksek lisansını tamamlayarak aynı yıl doktora eğitimine başladı. 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Aynı yıl Taner ERDOĞAN'la evlenen Fatma OĞUZ ERDOĞAN, halen ZKÜ FBE Kimya ABD'nda eğitimine, ZKÜ FEF Kimya Bölümü'nde görevine devam etmektedir.

## ADRES BİLGİLERİ

Adres : Zonguldak Karaelmas Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi  
Kimya Bölümü  
67100 Zonguldak  
Telefon : 0 372 2574010 – 1450  
E-posta : [foerdogan@gmail.com](mailto:foerdogan@gmail.com)