



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ADSORPSİYONLU ISI POMPALARINDA KULLANILAN
FARKLI SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ÇEŞİTLİ
ADSORBAN MADDELERCE ADSORBLANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Ersan GÖNÜL

Doktora Tezi



**ADSORPSİYONLU ISI POMPALARINDA
KULLANILAN FARKLI SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN
ÇEŞİTLİ ADSORBAN MADDELERCE ADSORBLANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Ersan GÖNÜL



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ADSORPSİYONLU ISI POMPALARINDA KULLANILAN FARKLI
SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ÇEŞİTLİ ADSORBAN MADDELERCE ADSORBLANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Ersan GÖNÜL

Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ ANABİLİM DALI

BURSA-2017

TEZ ONAYI

Ersan GÖNÜL tarafından hazırlanan ‘‘Adsorpsiyonlu Isı Pompalarında Kullanılan Farklı Soğutucu Akışkanların Çeşitli Adsorban Maddelerce Adsorblanma Karakteristiklerinin Belirlenmesi’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman :Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Başkan:Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye :Prof. Dr. Ömer Kaynaklı

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye :Doç. Dr. Ali Kara

Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi
Kimya Bölümü

İmza

Üye :Prof. Dr. Murat Hoşöz

Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Otomotiv Mühendisliği Bölümü

İmza

Üye :Yrd. Doç. Dr. Ümit Ünver

Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Bayram

Enstitü Müdürü

12.4.2017

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17.10/2017

İmza

Ersan GÖNÜL

ÖZET

Doktora Tezi

ADSORPSİYONLU ISI POMPALARINDA KULLANILAN FARKLI SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN ÇEŞİTLİ ADSORBAN MADDELERCE ADSORBLANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Ersan GÖNÜL

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

Yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı son yıllarda hızlı bir gelişim kaydetmektedir. Önümüzdeki 20-30 yıllık süreçte sürdürülebilir enerji sistemlerinin tamamında geleneksel enerji kaynaklarının verimli kullanılmasının yanında yenilenebilir enerjinin de yaygın biçimde kullanılması beklenmektedir. Adsorpsiyon ısı pompaları her türlü ısı enerjisi ile rahatlıkla çalışabilen ve elektrik enerjisi ihtiyacı oldukça az olan cihazlardır. Özellikle atık ısı kaynakları, güneş enerjisi, jeotermal enerjisi veya herhangi bir ısı kaynağı doğrudan kullanılarak soğutma işleminin sağlanabilmesi, bu tip ısı pompalarını cazip hale getirmiştir. Adsorpsiyonlu ısı pompalarının performanslarını arttırmaya ve kullanım alanlarını genişletmeye yönelik çalışmalar artarak devam etmektedir. Bu sistemlerin başarılı bir şekilde çalışması büyük ölçüde adsorbent- adsorbat çiftinin doğru seçimine bağlıdır.

Bu çalışma kapsamında, farklı adsorbent-adsorbat çiftlerine ait eş sıcaklık eğrilerini elde etmek için adsorpsiyon deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanımı yaygın olan hidroflorokarbon (HFC) tipi soğutucu akışkanlardan R134a ve daha sonra R404a adsorbat olarak seçilmiştir. Adsorbent olarak aktif karbon, aktif alümina, zeolit, polimer ve çeşitli silikajeller kullanılmıştır. Adsorpsiyon parametreleri izotermi ile Dubinin-Astakhov (DA) denklemi kullanılarak oluşturulmuştur. İzosterik entalpiyerin adsorpsiyon bağımlılığı adsorpsiyon için elde edilen datalardan çıkarılmıştır. Ayrıca adsorpsiyon verilerinin entalpisi çıkarılmış olup farklı numuneler için elde edilen korelasyonlar incelenmiştir. Bu veriler, çeşitli adsorpsiyon çiftleri için, termal olarak tahrik edilen adsorpsiyon soğutucu tasarımı için önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Adsorbat, Adsorbent, Adsorpsiyon çiftleri, Adsorpsiyonlu ısı pompaları, R134a, R404a

2017, xvii+161 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DETERMINATION OF THE ADSORPTION CHARACTERISTICS OF DIFFERENT REFRIGERANTS ON DIFFERENT ADSORBENTS FOR ADSORPTION HEAT PUMP APPLICATIONS

Ersan GÖNÜL

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhsin KILIÇ

The development and use of renewable energy has experienced rapid growth over the past few years. In the next 20–30 years all sustainable energy systems will have to be based on the rational use of traditional resources and greater use of renewable energy. Adsorption heat pumps can operate easily with all kinds of heat energy and devices with less electrical power needs. Adsorption heat pumps has become attractive devices which can provide direct cooling using waste heat sources, solar energy, geothermal energy or any heat source. Studies continue to improve performance and to increase usage for adsorption heat pumps. The successful operation of these systems mostly depends on the correct choice of the adsorbent-adsorbate working pair.

In this study, firstly, an adsorption experimental set-up was designed and constructed to obtain the isotherms of the working pair. R134a and then R404a is chosen as adsorbate which are commonly used and which are hidrofluorocarbon (HFC) of the refrigerating fluid. Activated carbon, activated alumina, zeolite, polimer and various silica gel are used as adsorbent. Adsorption parameters were evaluated from the isotherms using the Dubinin-Astakhov (DA) equation. The concentration dependence of the isosteric enthalpies of adsorption is extracted from the data. Further, the enthalpy of adsorption data were extracted, and correlations are provided for the different specimens investigated. These data are essential in designing a thermally driven adsorption chiller based on the assorted pair.

Key Words: Adsorbent, Adsorbate, Adsorption pairs, Adsorption heat pump, R134a, R404a

2017, xvii+161 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışmamda bana yol gösteren ve büyük katkıları olan, desteğini, sabrını ve ilgisini hiç bir zaman esirgemeyen ve çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Muhsin KILIÇ 'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması TUI205 kodlu "*Building Integration of Solar Thermal Systems (BISTS)*" isimli COST aksiyonu kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen 112M163 no'lu "*Adsorpsiyonlu ısı pompalarında kullanılan farklı tipteki soğutucu akışkanların aktif karbon, polimer ve aktif karbon katkı polimer malzemelerce adsorblanma karakteristiklerinin belirlenmesi*" isimli TÜBİTAK-COST projesi dahilinde yapılan çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. Desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında bana büyük bir anlayış gösteren ve her zaman destek veren sevgili eşim Şeyma GÖNÜL'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi benim her zaman ayakta durmamı sağlayan, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmama özverili yardımlarıyla destek veren Nuray DİNİBÜTÜN KATİP'e teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xx
1.GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK TARAMASI.....	6
2.1.Adsorpsiyon ve Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimleri ile ilgili Yapılan Çalışmalar.....	6
2.1.1.Adsorpsiyonun Yapısı ve Adsorpsiyon Çiftleri ile İlgili Çalışmalar.....	6
2.1.2.Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimleri ile İlgili Çalışmalar.....	9
2.1.3.Adsorpsiyonun Yapısı.....	13
2.1.3.1. Adsorpsiyon.....	13
2.1.3.2. Adsorpsiyon Süreci.....	14
2.1.3.3. Adsorpsiyon Denge Kuramları.....	17
2.1.3.4. Adsorpsiyon İzotermi.....	18
2.1.3.5.Adsorpsiyon Termodinamiği.....	20
2.1.3.6.Adsorpsiyon Kinetiği.....	22
2.2. Adsorpsiyon Çiftleri ve Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler.....	23
2.2.1.Adsorpsiyon İşleminde Kullanılan Adsorbatlar ve Özellikleri.....	25
2.2.1.1. R134a ve Özellikleri.....	26
2.2.1.2. R404a ve Özellikleri.....	26
2.2.2. Adsorpsiyon Çiftlerinde Kullanılan Adsorbentler ve Özellikleri.....	26
2.2.2.1. Aktif Karbon.....	27
2.2.2.2. Silikajeller.....	29
2.2.2.3.Aktif Alümina.....	31
2.2.2.4.Zeolit.....	31
2.2.2.5.Polimer.....	32
2.2.3.Adsorpsiyon Ortamının Özellikleri.....	33
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
3.1. Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimi ve Adsorpsiyon Çiftlerinde Adsorpsiyonun Matematiksel Modellemesi.....	36
3.1.1. Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemleri, Kademeleri ve Parametreleri.....	36

3.1.2.Adsorpsiyonun Matematiksel Modellemesi.....	40
3.1.2.1.Adsorpsiyon Miktarının Matematiksel Modellemesi.....	40
3.1.2.2.Adsorpsiyon Isısının Matematiksel Modellemesi.....	41
3.2.Deneylerde Kullanılan Adsorbentler ve Özellikleri.....	45
3.3.Deneylerde Kullanılan Adsorbatlar ve Özellikleri.....	49
3.4.Kullanılan Dene Sisteminin Tanıtılması.....	51
3.5.Deney Prosedürü ve Deneğin Yapılışı.....	64
3.5.1.Deney Hazırlık İşlemi.....	65
3.5.2.Birinci Dene Prosedürü.....	72
3.5.3.İkinci Dene Prosedürü.....	74
3.5.4.Deneyin Tamamlanması ve Sistemin Kapatılması.....	76
3.6.Adsorplama Kapasitelerinin Hesaplanması.....	77
3.6.1.İdeal Gaz Denkleminin Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	77
3.6.1.1.İdeal Gaz Denkleminin Kullanımı ve Açıklaması.....	77
3.6.1.2.İdeal Gaz Denklemi Kullanılarak Yapılan Hesaplar için Örnek Çalışma.....	81
3.6.2.Termodinamik Tablolar Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar.....	84
3.6.2.1.Termodinamik Tabloların Kullanımı ve Açıklaması.....	84
3.6.2.2.Termodinamik Tabloların Kullanımı ve Açıklaması.....	86
4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....	89
4.1.Birinci Prosedür Deneğlerinin Basınç-Zaman Grafikleri.....	91
4.2.İkinci Prosedür Deneğlerinin Basınç ve Zaman Grafikleri.....	106
4.3.Birinci Prosedürün Kullanıldığı Deneğlerde Adsorplama Miktarları.....	115
4.4. İkinci prosedüre göre yapılan deneğlerin adsorpsiyon izotermelerindeki, izosterlerindeki ve ısılarındaki değişimler.....	120
4.5. Birinci Prosedüre Göre Yapılan Deneğlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	136
4.6. İkinci Prosedüre Göre Elde Edilen Adsorpsiyon Parametreleri ve Yapılan Deneğlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	138
4.6.1. Adsorpsiyon Parametrelerin Bulunması ve Elde Edilebilecek Grafik örneğleri.....	138
4.6.2. İkinci Prosedüre Göre Yapılan Deneğlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	141
5.SONUÇ.....	151
KAYNAKLAR.....	156
ÖZGEÇMİŞ.....	166

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar Açıklama

HFC	Hidroflorokarbon
COP	Soğutma tesir katsayısı
SCP	Özgül soğutma gücü
kJ	kilojoule
P	Basınç (bar)
kPa	kilopaskal-basınç
bar	bar-basınç
atm	atmosfer-basınç
BET	Brunauer-Emmet-Teller
D-R	Dubinin-Radushkevich
D-A	Dubinin-Astakhov
Mpa	Megapascal
mm	milimetre
°C	Santigrad derece
kg	Kilogram
g	gram
SiO ₂	Silisyum dioksit
CaCl ₂	Kalsiyum klorür
µm	Mikrometre
cm	Santimetre

CO ₂	Karbon Dioksit
AKG	Granül aktif karbon
AKP	Pelet aktif karbon
SGM	Mavi silikajel
SGB	Beyaz silikajel
SGT	Turuncu silikajel
A	Aktif alümina
Z	Zeolit
P	Polimer
b	Van der Waals hacmi
C	Her bir kg başına düşen adsorpsiyon miktarı (kg adsorbat/kg adsorbent)
C ₀	Her bir kg başına düşen maksimum adsorpsiyon miktarı (kg adsorbat/kg adsorbent)
E ₀	Adsorpsiyon çiftlerinin karakteristik enerjisi (kJ/kmol)
MW	Moleküler ağırlık (kg/kmol)
R	Evrensel gaz sabiti (8.314 kJ/KmolK)
Q _{ads}	Izosterik adsorpsiyon ısısı(kJ/kg)
T	Sıcaklık (°C)
v _a	Adsorbe edilen fazın özgül hacmi (m ³ /kg)
v _b	Doymuş sıvının normal kaynama sıcaklığındaki özgül hacmi (m ³ /kg)
v _g	Adsorbat gazın özgül hacmi (m ³ /kg)
v ₀	Adsorbe edilen fazın T=0°C'de özgül hacmi (m ³ /kg)
n	Üstel sabit-Adsorbentin gözenek yapısından kaynaklanan heterojenlik sabiti

W	Birim adsorbent kütlesindeki adsorbe edilmiş hacim (m ³ adsorbat/kg adsorbent)
W ₀	Birim adsorbent kütlesindeki maksimum adsorbe edilmiş hacim (m ³ adsorbat/kg adsorbent)
b	Wan der Waals hacmi
CC	Sabit konsantrasyon
ads	Adsorpsiyon
S	Yoğuşma
κ	Adsorpsiyon çiftinin karakteristik sabiti
A	Adsorpsiyon potansiyeli
P _o	Doymuş Buhar Basıncı (kPa)
ΔH _{ads}	Adsorpsiyonun faz değişim entalpisi farkı (kJ)
H _{sb}	Faz değişim entalpisi (kJ)
h _{fg}	Buharlaştırma entalpisi (kJ/kg)
m ²	Metrekare
T _b	1 atm'de kaynama noktası (K)
T _c	Kritik sıcaklık (K)
P _c	Kritik basınç (kPa)
Ω	Sabit
ODP	Ozon tüketme potansiyel
GWP	Küresel ısınma etkisi
V _{A1-ideal}	Adsorpsiyon gazı kabında bulunan gazın birinci durumda ideal durum için özgül hacmi (m ³ /kg)
V _{A1-gerçek}	Adsorpsiyon gazı kabında bulunan gazın birinci durumda gerçek durum için özgül hacmi (m ³ /kg)
V _{B1-ideal}	Adsorbent kabında bulunan gazın birinci durumda ideal durum için özgül hacmi (m ³ /kg)

V_{B1} -gerçek	Adsorbent kabında bulunan gazın birinci durumda gerçek durum için özgül hacmi (m^3/kg)
V_{A2} -ideal	Adsorpsiyon gazı kabında bulunan gazın ikinci durumda ideal durum için özgül hacmi (m^3/kg)
V_{A2} -gerçek	Adsorpsiyon gazı kabında bulunan gazın ikinci durumda gerçek durum için özgül hacmi (m^3/kg)
V_{B2} -ideal	Adsorbent kabında bulunan gazın ikinci durumda ideal durum için özgül hacmi (m^3/kg)
V_{B2} -gerçek	Adsorbent kabında bulunan gazın ikinci durumda gerçek durum için özgül hacmi (m^3/kg)
m_1	Birinci durumda toplam kütle (kg)
m_2	İkinci durumda toplam kütle (kg)
m_{ads}	Adsorbe edilen gaz kütlesi (kg)
P_{A1}	Birinci durumda adsorbat depo kabı basıncı (kPa)
P_{A2}	İkinci durumda adsorbat depo kabı basıncı (kPa)
P_{B1}	Birinci durumda adsorbent kabı basıncı (kPa)
P_{B2}	İkinci durumda adsorbent kabı basıncı (kPa)
V_{A1}	Birinci durumda adsorbat depo kabı hacmi (m^3)
V_{A2}	İkinci durumda adsorbat depo kabı hacmi (m^3)
V_{B1}	Birinci durumda adsorbent kabı hacmi (m^3)
V_{B2}	İkinci durumda adsorbent kabı hacmi (m^3)
T_{A1}	Birinci durumda adsorbat depo kabı sıcaklığı (K)
T_{A2}	İkinci durumda adsorbat depo kabı sıcaklığı (K)
T_{B1}	Birinci durumda adsorbent kabı sıcaklığı (K)
T_{B2}	İkinci durumda adsorbent kabı sıcaklığı (K)
T_{cr}	Kritik sıcaklık (K)
P_{cr}	Kritik basınç (kPa)

P_r	Düşürülmüş basınç oranı
T_r	Düşürülmüş sıcaklık oranı
z	Düzeltilme faktörü
V_{ideal}	İdeal özgül hacim (m^3/kg)
$V_{gerçek}$	gerçek özgül hacim (m^3/kg)
$m_{A1-adsorbat}$	Adsorbat deposuna eklenen gazın kütlesi (kg)
$V_{A1-adsorbat}$	Birinci durumda sıcaklık ve basınca bağlı olarak adsorbat deposuna eklenen gazın özgül hacmi (m^3/kg)
$V_{A2-adsorbat}$	İkinci durumda sıcaklık ve basınca bağlı olarak adsorbat deposuna eklenen gazın özgül hacmi (m^3/kg)
m_{a1}	Birinci durumda adsorbat gazının, gaz depo tankındaki kütlesi (kg)
m_{a2}	İkinci durumda adsorbat gazının, gaz depo tankındaki kütlesi (kg)
m_{b1}	Birinci durumda adsorbat gazının, adsorbent tankındaki kütlesi (kg)
m_{b2}	İkinci durumda adsorbat gazının, adsorbent tankındaki kütlesi (kg)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Katı adsorbent yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon.....	13
Şekil 2.2.	Fiziksel adsorpsiyonun şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.3.	Kimyasal adsorpsiyonun şematik gösterimi	16
Şekil 2.4.	Karakteristik adsorpsiyon eğrilerinin genel görünümü	17
Şekil 2.5.	Langmuir modelinin şekilsel gösterimi	18
Şekil 2.6.	BET izoterm modelinin şematik gösterimi	19
Şekil 2.7.	Kurutucuda silikajelin kullanılması.....	23
Şekil 2.8.	Adsorpsiyon prosesinde kullanılan granül aktif karbon	24
Şekil 3.1.	Deneylerin gerçekleştirildiği adsorpsiyon ünitesi	35
Şekil 3.2.	Adsorpsiyonlu soğutma çevrini akış şeması: (a)lnP – 1/T diyagramı, (b)izosterik ısıtma işlemi, (c)izobarik desorpsiyon, (d)izosterik soğutma işlemi, (e)izobarik adsorpsiyon	38
Şekil 3.3.	Çift yataklı adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin her bir durum için çalışma şemaları	43
Şekil 3.4.	Granüler aktif karbon.....	45
Şekil 3.5.	Pelet aktif karbon.....	46
Şekil 3.6.	Mavi silikajel ve SEM görüntüsü.....	46
Şekil 3.7.	Beyaz silikajel ve SEM görüntüsü.....	47
Şekil 3.8.	Turuncu Silikajel ve SEM görüntüsü.....	47
Şekil 3.9.	Aktif alümina ve SEM görüntüsü	48
Şekil 3.10.	Zeolit ve SEM görüntüsü	48
Şekil 3.11.	Laboratuvar ortamında üretilen polimer ve SEM görüntüsü.....	49
Şekil 3.12.	Deneylerde kullanılan R134a tüpü.....	49
Şekil 3.13.	Deneylerde kullanılan R404a tüpü.....	50
Şekil 3.14.	Adsorpsiyon ünitesinin şeması görünüşü.....	51
Şekil 3.15.	Sirkülasyon bölümü ve şematik tanımı.....	53
Şekil 3.16.	Soğutucu bölümü ve şematik tanımı.....	54
Şekil 3.17.	Gaz tesisatının bölümleri.....	55
Şekil 3.18.	Adsorbentin adsorpsiyon ünitesi içine yerleştirilmesi.....	55
Şekil 3.19.	Gazın depolandığı ve adsorpsiyonun gerçekleştiği tanklar	56
Şekil 3.20.	Sirkülasyon suyunun sıcaklığını ayarlayan ve plc sisteminin bulunduğu adsorpsiyon ünitesi.....	56
Şekil 3.21.	Gazın depolandığı tankta ve adsorpsiyon tankında bulunan vanalar.....	57
Şekil 3.22.	Adsorpsiyon tankının içinde kalan gazların boşaltılması için kullanılan vakum pompası.....	58
Şekil 3.23.	Adsorpsiyon işlemi için sıcaklıkların ayarlandığı kontrol ekranı.....	58
Şekil 3.24.	Adsorpsiyon ünitesinde gerçekleşen deneylerdeki değerlerin izlendiği, kontrol edildiği ve kayıt altına alındığı kayıt ekranı.....	59
Şekil 3.25.	Birinci prosedürün uygulanması esnasındaki zaman-basınç değişim grafiği.....	64
Şekil 3.26.	İkinci prosedürün uygulanması esnasındaki zaman-basınç değişim grafiği.....	65
Şekil 3.27.	Deneylerde kullanılan adsorbent yataklar	66

Şekil 3.28.	Adsorbent maddelerin kurutulması için kullanılan kurutucu fırın.....	67
Şekil 3.29.	Yataklara koyulmuş olan adsorbent maddelerin adsorpsiyon kabına yerleştirilmesi.....	67
Şekil 3.30.	Adsorpsiyon kabının vakumlanması için kullanılan vakum pompası.....	68
Şekil 3.31.	Adsorbat gazın ve adsorbent malzemenin bulunduğu kaplar arasındaki vanalar.....	69
Şekil 3.32.	Gaz aktarım sistemi-Helyum gazı ve Adsorbat gaz.....	70
Şekil 3.33.	Kullanılan adsorbat gazlar.....	71
Şekil 3.34.	Deneye başlamak için kapları birbirine bağlayan vanalarının açılması	73
Şekil 3.35.	Deneyin tamamlanmasının ardından adsorpsiyon tankından adsorbatın boşaltılması.....	76
Şekil 3.36.	Farklı adsorpsiyon çiftlerinin deneyinin yapılacağı durumda adsorpsiyon yatakları kap içinden alınır.....	77
Şekil 3.37.	Sıkıştırılabilirlik faktörü.....	78
Şekil 3.38.	Kritik nokta.....	79
Şekil 3.39.	Sıkıştırılabilirlik faktörü bulunuşu.....	81
Şekil 4.1.	Deney aşamaları.....	89
Şekil 4.2.	Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40°C ve (e) 50 °C	93
Şekil 4.3.	Sabit sıcaklıkta pellet aktif karbon-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C	95
Şekil 4.4.	Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50°C.....	97
Şekil 4.5.	Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C	99
Şekil 4.6.	Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C	101
Şekil 4.7.	Sabit sıcaklıkta Aktif Alümina-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C, (b) 30 °C, (c) 40 °C ve (d) 50°C.....	103
Şekil 4.8.	Sabit sıcaklıkta Zeolit-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C ve (b) 40 °C.....	104
Şekil 4.9.	Sabit sıcaklıkta Polimer+Granül Aktif Karbon Karışımı-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20°C ve (b) 50°C.....	105
Şekil 4.10.	Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50	107

Şekil 4.11.	Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C, (b) 30 °C ve (c) 50 °C	108
Şekil 4.12.	Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C.....	109
Şekil 4.13.	Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C	110
Şekil 4.14.	Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C.....	111
Şekil 4.15.	Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C, (b) 30 °C ve (c) 50 °C.....	112
Şekil 4.16.	Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C	113
Şekil 4.17.	Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C.....	114
Şekil 4.18	Granül Aktif Karbon-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	115
Şekil 4.19.	Pelet Aktif Karbon-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	116
Şekil 4.20.	Mavi Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	116
Şekil 4.21.	Beyaz Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	117
Şekil 4.22.	Turuncu Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	117
Şekil 4.23.	Aktif Alümina-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	118
Şekil 4.24.	Zeolit-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	118

Şekil 4.25.	Granül Aktif Karbon ve Polimer Karışımı-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentin soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg).....	119
Şekil 4.26.	Granül Aktif Karbon-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler	120
Şekil 4.27.	Granül Aktif Karbon ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	121
Şekil 4.28.	Granül Aktif Karbon-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	121
Şekil 4.29.	Mavi Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler.....	122
Şekil 4.30.	Mavi Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	122
Şekil 4.31.	Mavi Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	123
Şekil 4.32.	Beyaz Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler.....	124
Şekil 4.33.	Beyaz Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	124
Şekil 4.34.	Beyaz Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	125
Şekil 4.35.	Turuncu Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler	126
Şekil 4.36.	Turuncu Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	126
Şekil 4.37.	Turuncu Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	127
Şekil 4.38.	Granül Aktif Karbon-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler.....	128
Şekil 4.39.	Granül Aktif Karbon ve R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	128
Şekil 4.40.	Granül Aktif Karbon-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	129
Şekil 4.41.	Mavi Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler.....	130
Şekil 4.42.	Mavi Silikajel-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	130
Şekil 4.43.	Mavi Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişim.....	131
Şekil 4.44.	Beyaz Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler.....	132
Şekil 4.45.	Beyaz Silikajel-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	132
Şekil 4.46.	Beyaz Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi.....	133
Şekil 4.47.	Turuncu Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler	134

Şekil 4.48.	Turuncu Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	134
Şekil 4.49.	Turuncu Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	135
Şekil 4.50.	Birinci deney prosedürüne göre bir saat süre sonunda, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C deney sıcaklıklarında adsorpsiyon çiftlerinin performanslarının karşılaştırması.....	136
Şekil 4.51.	Birinci deney prosedürüne göre sekiz saat süre sonunda, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C deney sıcaklıklarında adsorpsiyon çiftlerinin performanslarının karşılaştırması	137
Şekil 4.52.	AKG-R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 24°C, 34 °C ve 44 °C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler.....	139
Şekil 4.53.	SGM-R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 24°C, 34 °C ve 44 °C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler.....	140
Şekil 4.54.	SGB-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 24°C, 34 °C ve 44 °C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler.....	140
Şekil 4.55.	SGT-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 24°C, 34 °C ve 44 °C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler	141
Şekil 4.56.	Adsorpsiyonun grafiksel gösterimi.....	142
Şekil 4.57.	Aktif karbon ve R134A/ R404A adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması.....	143
Şekil 4.58.	Mavi silikajel ve R134A/ R404A adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması.....	143
Şekil 4.59.	Beyaz silikajel ve R134A/ R404A adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması.....	144
Şekil 4.60.	Turuncu silikajel ve R134A/ R404A adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıkla hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması.....	144
Şekil 4.61.	Granül Aktif Karbon-R134a, Mavi Silikajel-R134a, Beyaz Silikajel-R134, Turuncu Silikajel- R134a, Granül Aktif Karbon-R404a, Mavi Silikajel-R404a, Beyaz Silikajel-R404a ve Turuncu Silikajel- R404a için ikinci prosedüre göre yapılan deney sonuçlarının sıcaklık-adsorpsiyon miktarı grafiği.....	145
Şekil 4.62.	R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.2$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri.....	146

- Şekil 4.63.** R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_o=0.4$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri..... 146
- Şekil 4.64.** R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_o=0.6$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri..... 147
- Şekil 4.65.** R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_o=0.8$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri..... 147
- Şekil 4.66.** R134a ve R404a'nın ($C/C_o=0,2$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon İSİSİ..... 148
- Şekil 4.67.** R134a ve R404a'nın ($C/C_o=0,4$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon İSİSİ..... 149
- Şekil 4.68.** R134a ve R404a'nın ($C/C_o=0,6$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon İSİSİ..... 149
- Şekil 4.69.** R134a ve R404a'nın ($C/C_o=0,8$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon İSİSİ..... 150

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1.	Granüler aktif karbonun özellikleri.....	45
Çizelge 3.2.	Pelet aktif karbonun özellikleri.....	46
Çizelge 3.3.	Mavi silikajelin özellikleri.....	46
Çizelge 3.4.	Beyaz silikajelin özellikleri.....	47
Çizelge 3.5.	Turuncu silikajelin özellikler.....	47
Çizelge 3.6.	Aktif alümina özellikleri.....	48
Çizelge 3.7.	Zeolit özellikleri.....	48
Çizelge 3.8.	Polimer özellikleri	49
Çizelge 3.9.	R134a soğutucu akışkanının özellikleri.....	50
Çizelge 3.10.	R404a soğutucu akışkanının özellikleri.....	50
Çizelge 3.11.	Deney tesisatında ölçüm noktaları ve elemanları.....	62
Çizelge 3.12.	Birinci deney prosedüründe kullanılan adsorpsiyon çiftleri.....	72
Çizelge 3.13.	İkinci deneyde kullanılan adsorpsiyon çiftleri.....	75
Çizelge 3.14.	Basınç basamakları ve bekleme süreleri	75
Çizelge 4.1.	Farklı adsorpsiyon çiftlerinin hesaplanmış olan adsorpsiyon parametreleri.....	138

1. GİRİŞ

Dünyada, yenilenebilir enerji kaynakları günümüz koşullarında önemli bir yere sahip olup tüketim içindeki payı sürekli artış göstermektedir. Bir çok ülke, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmak ve bu konuda teknolojiyi geliştirmek için projeler ve destekler ortaya koymaktadır. Enerji kaynakları içerisinde önemli yere sahip olan fosil yakıtların olumsuz etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine ve kullanılmasına neden olmaktadır.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılarak sistemlerin performanslarının değerlendirilmesi diğer soğutma sistemlerine alternatif oluşturması açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak son yıllarda görülen enerji krizleri ve birincil enerji kaynaklarının sınırlı oluşu alternatif kaynaklara yönelmeyi zorunlu hale getirmiştir. Alternatif enerji ile çalışan sistemler, enerjiyi depolayabilme ve daha sonra kesikli olarak kullanabilme imkânına sahip olmalarından dolayı uygulama avantajı sağlamaktadır. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi bu açıdan önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. (Esen, 2007)

Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri birçok parametreden etkilenen yapıya sahiptirler. Özellikle adsorbent-adsorbat çiftinin özellikleri, birbirleri ile olan ilişkileri ve uygulama esnasındaki çevre koşulları adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle polimer gibi yeni bir adsorbentin soğutucu akışkanları adsorplama karakteristikleri bilinenlerden çok farklı olabilmektedir. Bununla birlikte yatak tasarımı adsorpsiyon işleminde verimi sağlamak adına önemlidir ve üzerinde düşünülmesi gerekmektedir.

Adsorpsiyonlu ısı pompalarında en önemli konu adsorpsiyon bilgisi ve bunların koşullara göre performans göstergeleridir. Zeolit, silika jel, aktif karbon ve aktif alümina, özgül yüzey alanlarını arttıran gözenekli yapıları ve sıvı veya gaz fazındaki akışkanları yüksek kapasitede adsorbe edebilme özelliklerinden dolayı kurutma, atık su ve gazların arıtılması uygulamalarında yaygın olarak kullanılan adsorbent

malzemelerdir. Zeolit ve silika jel'in su buharını adsorplama kapasitesi yüksek olduğundan ısı pompalarında adsorbat olarak su kullanılmaktadır. Suyun ısı pompalarında adsorbat olarak kullanılmasında, buharlaşma ısısının yüksek olması, yanıcı olmaması ve çevreci olması gibi avantajları mevcuttur. Fakat atmosfer basıncında buharlaşma sıcaklığı yüksek olduğundan soğutma uygulamalarında kullanılabilmesi için sistemin vakum altında tutulması gerekmektedir. Bu sistemlerde, sızdırmazlığın sağlanması önemli bir sorun olarak görülmektedir. Aktif karbon ise tüm mekanik soğutma sistemlerinde tercih edilen hidroflorokarbon (HFC) tipi soğutucu akışkanları, amonyak gibi sanayide yüksek kapasiteli soğutma sistemlerde kullanılan inorganik soğutucu akışkanı, metanol veya etanol gibi gazları yüksek miktarda adsorplayabilmektedir. Amonyak ve HFC tipi atmosfer basıncında düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen soğutucu akışkanların kullanılması sistemi vakum altında tutma gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Desorpsiyonun düşük kaynak sıcaklıklarında da gerçekleşebilmesi bir diğer avantajdır. Bu sebeplerle, buharlaşma ısılarının düşük olmasına rağmen aktif karbon - HFC tipi soğutucu akışkanın adsorpsiyonlu ısı pompalarında kullanımına yönelik çalışmalar günümüzde hızla artmaktadır.

Son yıllarda adsorpsiyon özelliği olan polimerler de, hijyenik kurutma, hidrokarbonların arındırılması, ağır metal giderimi ve farklı arıtma uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Adsorpsiyon amacıyla kullanılacak adsorbent maddelerde, yüksek bağlama kapasitesi ve hızlı bağlanma kinetiği özellikleri bulunması istenir.

Adsorpsiyon temelli soğutma veya soğutma sistemi tasarlamak için çeşitli adsorbent / adsorbat çiftlerinin adsorpsiyon izotermelerinin yanı sıra izosterik adsorpsiyon ısılarının da incelenmesi önemlidir. Fiziksel adsorpsiyon işlemi esas olarak adsorbe maddenin gözeneklerinde ve yüzeyinde gerçekleşir. Bununla birlikte, her bir adsorbent-adsorbat çiftinin karakteristiği diğer çiftlerden farklıdır ve önemlidir. Her bir sıcaklık ve basınç değişiminde adsorpsiyon çiftlerinin adsorpsiyon karakteristiklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bununla birlikte bu çiftleri üreten firmalar, bu bilgileri kullanıcılara sağlamamaktadır. Dolayısı ile adsorpsiyon çiftlerinin adsorpsiyon karakteristikleri değişen basınca ve sıcaklığa göre yapılacak deneylerle tespit edilmeli ve incelenmelidir.

Yapılan çalışmanın amacı:

Mekanik ısı pompaları genel olarak birincil enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi ile çalıştırılırlar. Günümüzde günlük yaşamda ve sanayide ısıtma ve soğutmada kullanılan ısı pompalarının toplam enerji tüketimindeki payı gittikçe artmaktadır. Dolayısı ile kullanımının artması ile birincil enerji kaynaklarındaki tüketimi de arttırmaktadır. Bu nedenle alternatif enerjilerin kullanımı, atık ısıların kullanımı ve kullanılan enerjilerin daha verimli kullanılması gerekli hale gelmiştir.

Soğutma çevrimleri üzerinde araştırmaların artması adsorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin ileride ne kadar yaygın kullanılacağına açıkça kanıttır. Atık ısı kaynakları başta olmak üzere, güneş enerjisi, jeotermal enerji veya herhangi bir ısı kaynağının doğrudan kullanılarak soğutma işleminin sağlanabilmesi bu tip ısı pompalarını cazip hale getirmiştir. Bu tip sistemler, enerjiyi depolayabilme ve daha sonra kesikli olarak kullanabilme imkanı yaratmasından dolayı da uygulama avantajı sağlamaktadır. Ancak adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin tasarımı ve imalatı için, sistemde kullanılacak adsorbent-adsorbat çiftine ait adsorpsiyon karakteristiklerinin detaylı olarak bilinmesini gerektirmektedir.

Farklı adsorbentlerin soğutucu akışkanları adsorplama karakteristikleri bilinenlerden çok farklı olabilmektedir. Bu çalışmada, farklı adsorbent malzemelerin (aktif karbon, silikajel, aktif alümina, zeolit, polimer) farklı soğutucu gazları (R134a-R404a) adsorplama (adsorpsiyon çiftlerinin) performansları karşılaştırılması ve adsorpsiyonlu ısı pompaları için kullanılacak adsorpsiyon çiftlerinin verilerinin / adsorpsiyon parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı adsorpsiyon çiftlerinin adsorpsiyon verimliliği ve karakterizasyonu incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, kullanılan deney düzeneği ile test edilen farklı adsorbent-adsorbat çiftleri için sabit sıcaklıkta basınca bağlı adsorplama kapasitesindeki değişimi veren izoterm eğrilerine bakılmıştır. Deneysel sonuçlar kullanılarak Dubinin Astakhov (D-A) denklemleri ile adsorpsiyon katsayıları belirlenmiştir. Bununla birlikte elde edilen verilerden yola çıkarak adsorpsiyon çiftlerinin izosterlerinin ve adsorpsiyon ısılarının bulunması ve karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Yapılan çalışma için araştırma soruları:

- Seçilen adsorpsiyon çiftlerinin adsorpsiyon kapasiteleri nedir?
- Adsorpsiyon çiftlerinde, adsorpsiyon kapasitesini etkileyen parametreler nelerdir ve performansa nasıl etkide bulunmaktadır?
- R134a ve R404a kullanımını engelleyen şartlar ve kısıtlar nelerdir?
- Adsorpsiyon çiftlerinin adsorplama kapasitelerini bulmak için hangi deney prosedürleri uygulanmalıdır ve uygulanan prosedürlerde nelere dikkat edilmelidir?
- Adsorbentlerin ve adsorbatların deneyde uygun olarak kullanılabilmesi için, deneyden önce yapılması gerekenler nelerdir?
- Adsorpsiyon çiftlerinin deneysel verileri kullanılarak teorik olarak, adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklık ve basınçtaki adsorpsiyon kapasiteleri bulunabilir mi?
- Deneylerde kullanılacak adsorpsiyon çiftlerinin izosterleri ve adsorpsiyon ısıları hesaplanabilir mi?
- Adsorpsiyon çiftlerinin deneysel sonuçları hangi izoterm eğrilerine uyum sağlamaktadır ve adsorpsiyon çiftlerinin adsorpsiyonu için nasıl bir matematiksel modelleme kullanılabilir?

Yapılan çalışmanın içeriği:

Bu çalışmada, ikinci bölümde adsorpsiyon ile ilgili daha önce yapılan araştırmalardan ve adsorpsiyonun yapısından bahsedilmiştir. Adsorpsiyonu etkileyen parametreler ve koşullar açıklanmıştır. Adsorpsiyon izotermelerinden kısaca bahsedilmiş olup, kullanılacak adsorbent ve adsorbatlar açıklanmıştır. Adsorpsiyona etki eden adsorbentin, adsorbatın ve adsorpsiyon ortamının özelliklerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, adsorpsiyonlu soğutma sistemleri açıklanmış olup bu sistemler için önemli olan ve adsorpsiyon çiftleri için hesaplanması gereken adsorpsiyon izotermelerinin ve adsorpsiyon ısılarının matematiksel modellenmesinden bahsedilmiştir. Daha sonra kullanılan adsorbentin ve adsorbatın özellikleri verilmiştir. Bu adsorpsiyon çiftlerinin deneylerinin gerçekleştirildiği adsorpsiyon ünitesinin yapısı ve özellikleri anlatılmıştır. Bu bölümde deneylerde uygulanan adsorpsiyon prosedürleri hakkında açıklamalar yapılmıştır. Bu prosedürler birinci ve ikinci deney prosedürü olarak ayrılmıştır.

Dördüncü bölümde, deney prosedürlerine göre, adsorpsiyon çiftleri için, deney esnasındaki sıcaklık-basınç grafikleri verilmiştir. Ardından birinci ve ikinci prosedüre göre yapılan deneyler sonucunda kullanılan adsorpsiyon çiftlerine göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde ikinci prosedüre göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen izosterlerin ve adsorpsiyon ısılarının sonuç grafikleri paylaşılmış ve incelenmiştir. Her bir çift için her bir prosedüre göre açıklamalar ve mukayeseler yapılmıştır.

Sonuç bölümünde ise yapılan deneyler ve bulunan sonuçlar toparlanmış ve elde edilen sonuçların yorumları yapılmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Adsorpsiyon ve Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimleri ile ilgili Yapılan

Çalışmalar

Gaz moleküllerinin malzemelerin katı yüzeylerine tutunması olayına adsorpsiyon denir. Gazı veya buharı adsorplayan katıya adsorbent, katının yüzeyinde tutunan gaz veya buhara ise adsorbat denir. Gaz veya buharın katının yüzeyinde tutunması, faz değişimine benzer zayıf bir etkileşme ile oluyorsa buna fiziksel adsorpsiyon, kimyasal reaksiyona benzer kuvvetli bir etkileşim ile oluyorsa da kimyasal adsorpsiyon olarak adlandırılır. Fiziksel adsorpsiyon kimyasal adsorpsiyona göre daha düşük sıcaklıklarda olduğundan düşük sıcaklıktaki ısı kaynakların değerlendirildiği ısı pompalarında daha fazla tercih edilmektedir.

Literatürdeki araştırmalarda, adsorpsiyonun yapısı ve adsorpsiyon çiftleri ile ilgili bir çok performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan araştırmalarda adsorpsiyonlu soğutma çevrimleri ile ilgili bir çok çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin buhar sıkıştırmalı ve adsorpsiyonlu soğutma sistemleri ile rekabet edebilmesi için, çevrimin soğutma tesir katsayısını (COP) ve özgül soğutma gücünü (SCP) arttırmak hedeflenmiştir.

2.1.1. Adsorpsiyonun Yapısı ve Adsorpsiyon Çiftleri ile İlgili Çalışmalar

Bu bölümde adsorpsiyonun genel yapısı ve adsorpsiyon çiftlerinin performansları ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Çalışmalarda adsorpsiyon çiftlerinin verimi arttıran özelliklerden ve adsorpsiyon çiftlerinin uyumundan ve bu uyumu sağlayan parametreler incelenmiştir. Adsorbent yatağı, adsorpsiyon çiftlerinin deney sıcaklıkları gibi parametrelerin önemi ön plana çıkmış olup, çeşitli adsorpsiyon çiftlerinin deneysel sonuçları verilmiştir.

Adsorbent malzemenin gözenekli yapısı kütle transferini arttırırken ısı transferini de zorlaştırmaktadır. Bu sorunun giderilmesi için adsorbentin adsorplama kapasitesini düşürmeden ısı iletim katsayısının yükseltilmesi veya kanatçıklı ısı değiştiricilerinin kullanımı ile adsorbent ile temas eden yüzey alanının arttırılması gerekmektedir. Bir yöntem olarak boru yüzeylerine adsorbent malzemenin optimum kalınlıkta sentezlenmesi ile iletkenlik arttırılarak, malzemenin homojen ve hızlı bir şekilde ısıtılıp

soğutulması sağlanacağı gibi aynı zamanda kütle transferi de iyileştirilebilir . (Tatlier M. ve ark. 2000).

Farklı çalışma şartları için uygun adsorbent / adsorbat çiftlerinin seçilmesi de çevrim verimini arttırmaktadır. Zeolit ve su çiftinin, güçlü izotermal karakteristikleri (gözenek çapı, gözenekli hacim oranı ve adsorpsiyon ısısı) gibi avantajlarının yanında yüksek kaynak sıcaklığı gereksinimi ve vakum altında çalışmasının performans kaybına neden olması gibi de dezavantajları bulunmaktadır. (Demir H. ve ark. 2008).

Zeolit ve su çiftlerinin, vakum altında çalışması adsorplama kapasitesinin ancak % 40'ının kullanımına olanak sağlamaktadır. Ayrıca silikajel – su, aktif karbon- metanol ve etanol çiftleri de vakum altında çalışan sistemlere örnek olarak verilebilir. (Wang L.W. ve ark. 2009).

Wang ve ark. (2009), aktif karbon - metanol, aktif karbon - amonyak, kompozit adsorbent - amonyak çiftlerini adsorpsiyon özellikleri ve soğutmada uygulanabilirlikleri açısından deneysel olarak karşılaştırmıştır.

Kompozit adsorbent, CaCl_2 ile aktif kömürün $\frac{1}{4}$ oranında karıştırılması ile elde edilmiştir. CaCl_2 , kompozit malzemeye yüksek adsorplama kapasitesi özelliği verirken, aktif karbon da gözenekli yapısı ile yüzey alanını arttırmaktadır. (Akkimaradi B. S. 2001). Aktif karbonun metanolü adsorplama kapasitesi, amonyağı adsorplama kapasitesinden % 59 daha fazladır. Metanolün bir diğer avantajı da, amonyak gibi toksin etkilerinin bulunmamasıdır. Kompozit adsorbent kullanıldığında sistemin COP'si 1,4, SCP'si 14 katına çıkmıştır. (Lu Z.S. ve ark. 2006).

Aktif karbon, pudra halinde veya lif şeklinde üretilebilmektedir. Lif tipi aktif karbonların adsorplama kapasiteleri ve adsorpsiyon olayındaki ısı transferi pudra tipinden daha yüksektir. Dezavantajı ise düşük ısıl iletkenliği ve yüksek temas direncidir. Örnek olarak, aktif karbon liflerinin metanolü adsorblama kapasitesi tanecikli yapıdaki aktif karbon adsorplama kapasitesinin 3 katı kadardır ve adsorpsiyon süreleri ise 1/5 oranında kısaltılabilmektedir. (Sumathy K. ve ark. 2003).

Habib ve ark. (2007), R134a ve R507a soğutucu akışkanlarının Maxorb firmasından temin edilen adsorbentte adsorplanma kapasitesinin zamana bağlı olan değişimini 2 bar

basınç altında, 25 °C ile 60 °C arasında değişen sıcaklık aralığında deneysel olarak ölçmüş ve elde edilen deneysel sonuçların Fickian difüzyon modeli ile uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. 25 °C sıcaklığında, adsorbent R134a'ya 1200 saniyede doymuştur ve bu zaman diliminde 1 kg adsorbant için 1.56 kg R134a adsorplabilmiştir. 60 °C için ise adsorplama kapasitesi 0.9 kg/kg'a düşmüştür. Bu durumda adsorbent 600 saniye içerisinde doymuş hale gelmiştir.

Daha kapsamlı bir çalışmada, 5 °C ile 70 °C sıcaklık ve 0 bar ile 12 bar basınç aralığında Maxorb 3 aktif karbonu - R134a çifti için izoterm eğrileri Saha ve arkadaşları tarafından deneysel olarak ölçülmüştür. Deneylerde adsorbent R134a'ya doyurulduktan sonra sabit kütlede istenilen adsorpsiyon sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Daha sonra vana açılarak desorpsiyona izin verilmiş ve sabit sıcaklıkta tutulan adsorbent yatağın basıncındaki değişim ile adsorplama kapasitesinin değişimi kaydedilmiştir. Çalışmada Dubinin–Astakhov eşitliğinden faydalanılarak izosterik adsorpsiyon ısısı hesaplanmıştır. Adsorpsiyon ısısının adsorplama kapasitesindeki artışla orantılı olarak 28 kJ/mol'den 22 kJ/mol'e düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin R134a'nın öncelikle fiziksel reaksiyon enerjisi yüksek olan küçük çaplı gözenekler tarafından tutulması olduğunu belirtmişlerdir. (Saha B. B. ve ark. 2009).

El-Sharkawy ve ark. (2007), aktif karbon lifi - etanol çifti ile pudra halindeki aktif karbon - R134a çiftinin izosterik adsorpsiyon ısısını, konsantrasyonun ve adsorbent yatak sıcaklığının etkisini de dikkate alınarak deneysel olarak ölçülmüşlerdir. Adsorpsiyon ısısı fiziksel bağ enerjisi ile adsorbantın buharlaşma gizli ısısının toplamına eşittir. Konsantrasyonun artması ile fiziksel bağ enerjisinin düşmesi, sıcaklığın artması ile de adsorbant akışkanın buharlaşma gizli ısısının düşmesi nedenleri ile izosterik adsorpsiyon ısısı azalmaktadır. Aktif karbon – etanol çifti için adsorpsiyon ısısı konsantrasyon değişimine bağlı olarak 900 kJ/kg ile 1200 kJ/kg arasında değişirken, aktif karbon – R134a çiftleri için 220 kJ/kg ile 270 kJ/kg arasında değişim göstermektedir. (El-Sharkawy I. I. ve ark. 2007.)

Ghazy ve ark. (2016) adsorpsiyonlu soğutma çevrimlerinde kullanılacak adsorpsiyon çiftleri ile ilgili inceleme yapmışlardır. Maxorb III/HFC-152a çiftiyle ilgili adsorpsiyon izotermi ve kinetiğini çıkarmışlardır. Adsorplama miktarları Dubinin-Astakhov ve Toth denklemleri ile incelenmiştir. Dubinin-Astakhov denkleminin daha

uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçlardan, 1 kg Maxorb III'ün 1,3 kg HFC-152a adsorbe edebileceği görülmüştür. Çalışmada ayrıca izosterik adsorpsiyon ısısı incelenmiştir.

2.1.2. Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Adsorpsiyonlu soğutma çiftlerinin tasarımı ve verimi, bu alanda bilinmesi gereken önemli özelliklerinden biridir. Yapılan çalışmalarda, adsorpsiyonlu soğutma çevrimleri, bu soğutma çevrimlerinin verimlerinin araştırması ve soğutma çevrimlerinde kullanılan adsorpsiyon çiftlerinden bahsedilmiştir. Bu yapıların ticari olarak kullanılması için yapılan çalışmalar ve sonuçları hakkında incelemeler yapılmıştır.

Hamamoto ve ark. (2006), aktif karbon lifi - metanol ve silikajel – su çiftlerini kullanan adsorpsiyonlu soğutma sisteminin teorik modelini hazırlayarak, özgül soğutma gücü (SCP) ve soğutma tesir katsayısı (COP) bakımından karşılaştırmışlardır 10 °C'den düşük soğutma suyu sıcaklıkları için aktif karbon lifli sistemin daha verimli olduğunu belirlemişlerdir.

Lambert (2007), kompozit adsorbent (CaCl₂, aktif kömür) – amonyak çiftini kullanan güneş enerjisi kaynaklı buz depolama sisteminin teorik modelini hazırlamıştır. Adsorbent yatak alüminyum malzemeden imal edilen gövde boru tipli bir ısı değiştiricisi olarak kabul edilmiştir. Boruların iç ve dış kısımlarına kanatçıklar ilave edilerek yüzey ısı transferi yüzey alanı önemli ölçüde arttırılmıştır. Dizayn edilen sistemin soğutma tesir katsayısı 1,6 ve özgül soğutma gücü 264 W/kg olarak bulunmuştur.

Adsorpsiyonlu ısı pompalarının tasarlanabilmesi için sabit sıcaklıkta basınca bağlı olarak adsorplama kapasitesinin değişimini veren izotermilerin, adsorplama kapasitenin farklı basınç ve sıcaklıklarda zamanla değişimini veren grafiklerin ve sabit kütlede (izosterik) adsorpsiyon olayının exotermik reaksiyon ısısının bilinmesi gereklidir. Vakum altında çalışma gereksinimi olmaması ve amonyak gibi toksin etkilerinin bulunmaması gibi avantajları nedeniyle, aktif karbon – R134a çifti için adsorpsiyon karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Banker ve ark. (2004), Akkimaradi ve arkadaşlarının çalışmasında verilen izoterm grafiklerini kullanarak Matlab ortamında teorik olarak tasarladıkları adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performansını analiz etmişlerdir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon sonu adsorplama kapasiteleri arasındaki farkın, buharlaşma basıncının ve yatak malzemesinin, çevrimin soğutma tesir katsayısına (COP) etkisini teorik olarak incelemişlerdir. Adsorplama kapasiteleri arasındaki fark arttıkça, adsorbent malzeme gereksinimi düşeceğinden COP artar. Benzer şekilde, yüksek buharlaşma basınçlarında (adsorpsiyon basıncı) izoterm eğrilerinde verilen adsoplama kapasiteleri arasındaki farkın artması da çevrimin COP'sini arttırmaktadır. Yatak gövde malzemesi olarak paslanmaz çelik yerine alüminyum malzeme kullanımı da alüminyumun ısı kapasitesinin düşük olması ve daha az ısıtma gücü gereksiniminden dolayı COP'yi arttırır.

Banker ve ark. (2008) bir diğer teorik modellemelerinde ise mekanik kompresörlü ısı pompası sisteminin buharlaştırıcı çıkışına adsorbent yatak ilave edilmesi ile oluşan hibrit çevrimin COP' sinin %40 oranında arttırılabileceğini teorik hesaplar ile göstermişlerdir. Çok kademeli ve hibrit çevrimlerde adsorpsiyon ve desorpsiyon sonu adsorplama kapasiteleri arasındaki farkın yüksek olması aynı soğutma ihtiyacını daha az miktarda adsorbent malzeme kullanımı ile elde edilmesini sağlamakta, ısıtma ve soğutma talebini azaltmaktadır.

Zhai ve ark. (2010) ısı depolama özelliğine sahip / olmayan güneş adsorpsiyonlu soğutma sistemi üzerinde deneysel araştırma ve performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda ısı depolama özelliğine sahip olmayan sistemlerin daha yüksek elektriksel COP'lerin yanısıra, daha yüksek güneş enerjisi depolama avantajlarına sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Solmuş ve ark. (2013) silika jel- su adsorpsiyon çiftini kullanarak adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sistemde kullanılan adsorpsiyon çiftlerinin kapasiteleri modifiye edilmiş Dubinin-Astakhov (D-A) denklemi ile hesaplanmıştır. Çalışmalar sonucunda sistemin performansının artan evaporatör-desorpsiyon ve azalan kondenser-adsorpsiyon sıcaklığı ile birlikte artış gösterdiği görülmüştür.

Hassan ve ark. (2011), adsorpsiyonlu soğutma sisteminin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. C++ bilgisayar programı ile yazılmış program ile çözüm işlemleri yapılmıştır. Geliştirilen program çevrim boyunca çalışan tüm ekipmanları kapsamakta olup, bun ekipmanların işlemlerinde hesaba katıldığı çalışmayı gerçekleştirmişlerdir.

Ugale ve ark (2015) çeşitli adsorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin performansları hakkında incelemelerde bulunmuştur. Bu sistemlerin performanları arttırmak için kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Özellikle adsorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin tasarımları, kullanılan adsorpsiyon çiftleri, adsorpsiyon yataklarının dizaynı gibi konular üzerinde avantajlar ve dezavantajlar ile ilgili karşılaştırmalar yapmış ve yapılan çalışmalar hakkında bilgi vermiştir.

Sah ve ark. (2015) adsorpsiyonlu soğutma sistemlerini, aktif karbon ve silikajel kullanım durumları için incelemiştir. Çalışmada deneysel ve sayısal modeller hakkında araştırmalar yapılmıştır. Silikejelin ve aktif karbonun kullanıldığı adsorpsiyonlu soğutma sistemlerine, güneş enerjisi entegre edilebilmektedir. Ayrıca ısı ve kütle geri kazanımları, çok yataklı ve çok kademeli adsorpsiyonlu soğutma çevrimleri teknolojilerine sahip sistemlerde COP ve SCP değerlerinde iyileşme görülmektedir.

Banker ve ark. (2009), iki kademe adsorpsiyonlu soğutma çevriminin analizini yapmışlardır. İki kademeli çevrimde, adsorbent yatak bir ara basınca ulaşınca kadar vanalar kapalı olarak (izosterik) ısıtıldıktan sonra, buharlaştırıcı ile adsorbent yatak arasındaki vana tekrardan açılır ve ara soğutma uygulanırken buharlaştırıcıdan gaz adsorpsiyonuna izin verilir. Çevrim sistemin izosterik olarak tekrardan ısıtılıp basınçlandırılması ile devam eder. İki kademeli sistem ile 56 °C'ye kadar düşebilen kaynak sıcaklıkları değerlendirilebilmektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşurucu basınçları arasındaki farkın yüksek olduğu çevrimlerde de çok kademeli adsorpsiyonlu soğutma sisteminin kullanılması uygun olmaktadır. Buharlaşma sıcaklığı 0 °C' nin üzerinde ise tek kademeli çevrimin COP'si daha yüksektir.

Yukarıdaki literatür araştırmasından, adsorbent olarak aktif karbon ve adsorbat olarak da florakarbon (HFC) tipi soğutucu akışkanların kullanıldığı adsorpsiyonlu ısı pompası sisteminin performans analizlerinin deneysel olarak çok az yapıldığı görülmektedir.

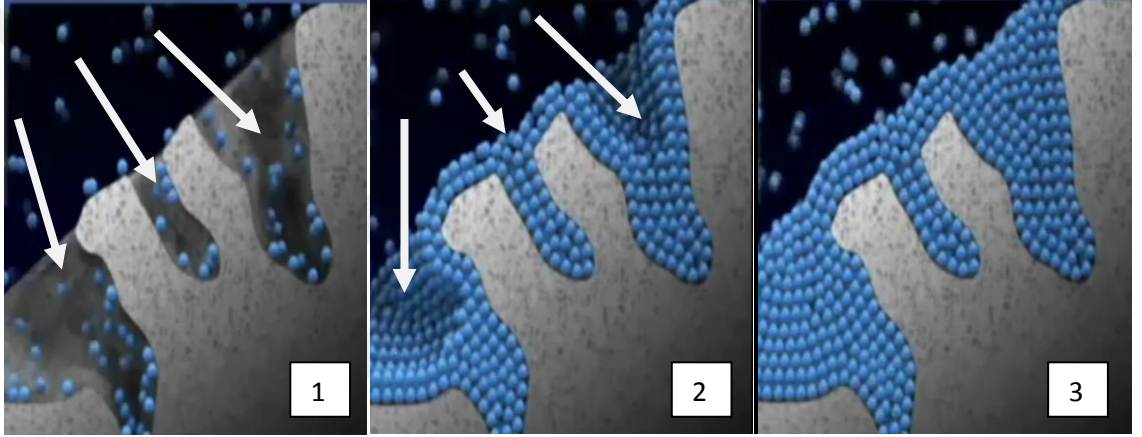
Ayrıca bu adsorpsiyon çiftinin karakteristikleri konusundaki çalışmalar son birkaç yıldır hız kazanmasına rağmen tam olarak çözümlenebilmiş değildir.

Günümüzde hava ve gaz saflastırılması veya atık su artımı gibi çevresel uygulamalarda yaygın bir kullanım alanına sahip aktif karbon, zeolit, silika jel ve kil gibi adsorbent maddelerin yanında polimerler de çeşitli ayırma ve saflaştırma işlemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Adsorpsiyon kabiliyetine sahip olarak üretilen polimerler ile ağır metal iyonları ve organik kirleticilerin sulu ortamlardan giderilmesi üzerine yapılan çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır. Bu polimerlerin yüzey alanı, gözenekliliği, gözenek boyutunun çeşitliliği ve kontrol edilebilirliği adsorpsiyonda önemli bir araştırma konusudur. Adsorpsiyon özelliği olan polimerler, klasik adsorbentlere karşılık, istenilen formlarda ve istenilen gözenek boyutuna sahip olarak üretilibilmeleri sayesinde adsorpsiyon spesifik alanlarda kullanım imkanı bulmaktadır.

2.1.3. Adsorpsiyonun Yapısı

2.1.3.1. Adsorpsiyon

Bir gaz, sıvı veya homojen bir karışımın katı bir yüzey tarafından depolanmasına adsorpsiyon denilir. Adsorpsiyon işlemi esnasında depo edilen malzemeye adsorplanan yada adsorbat, depolayan malzemeye ise adsorbent denilir. Bu sürecin tersi ise desorpsiyon olarak tanımlanır. Moleküllerin katı adsorbent yüzeyinde yer alan aktif merkezlere tutunması işlemine ise adsorpsiyon ve tutunan adsorbatların yüzeyden ayrılması işlemine ise desorpsiyon denilir. Katı adsorbent yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon prosesi şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Katı adsorbent yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon

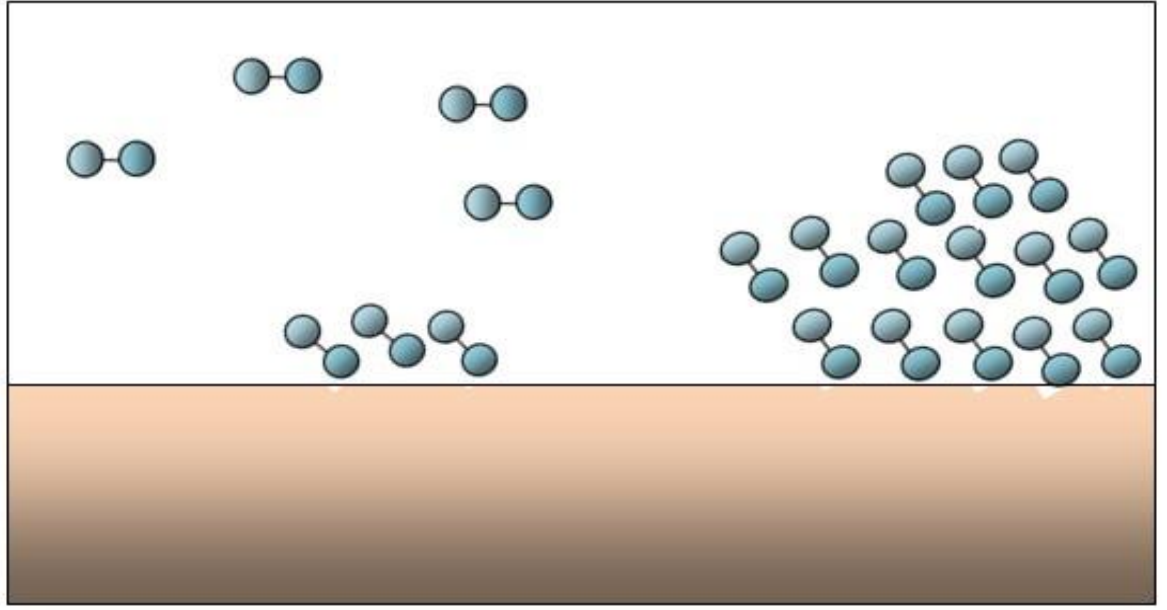
Adsorpsiyonun başka bir tanımı ise; bir gazın/sıvının sıvı/katı halde bulunan başka bir malzemenin yüzeyi ile fiziksel veya kimyasal etkileşmesi işlemidir. Gaz veya çözünen madde 'adsorplanan' ya da 'adsorbat', bunları adsorplayan katıda 'adsorbent' ya da 'adsorbent' olarak adlandırılır. Adsorpsiyon süreci gerçekte, ara yüzeyde birikme veya derişimin artmasıyla birlikte yürüyen, maddeyi bulunduğu fazdan ayırma işlemidir. Bu nedenle, maddenin bir fazdan diğerinin içine nüfuz etmesi şeklinde gerçekleşen absorpsiyon olayından farklıdır. Bu iki olayın birlikte gerçekleştiği süreçler için ise sorpsiyon terimi kullanılır. (Özcan, 2010)

2.1.3.2.Adsorpsiyon Süreci

Adsorpsiyon süreci, adsorpsiyon sırasında adsorplanan molekülleri ile adsorbent malzeme arasında oluşan bağ kuvvetlerine bağlı olarak kimyasal veya fiziksel olarak sınıflandırılabilir.

Fiziksel adsorpsiyonda, adsorplanan moleküller ile adsorbent malzeme arasında oluşan bağlar zayıftır ve bu yüzden fiziksel adsorpsiyon süreci tersinirdir. Yüzey üzerinde hareketli bir durumdadır ve dolayısıyla yüzeyden ayrılma kolaydır. Spesifik değildir; yeteri kadar düşük sıcaklıklarda herhangi bir adsorbent-adsorbat ikilisi arasında oluşabilir. (Özcan, 2010). Adsorbent malzeme tarafından fiziksel olarak adsorb edilen adsorplanan molekülleri daha sonra adsorbent malzemeye ısı uygulanarak serbest bırakılabilirler (desorpsiyon). Sonuç olarak, fiziksel adsorpsiyon süreci tersinir olması nedeni ile termal sistemlerde ve soğutma makinalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada da incelenen adsorpsiyon türü fiziksel adsorpsiyondur.

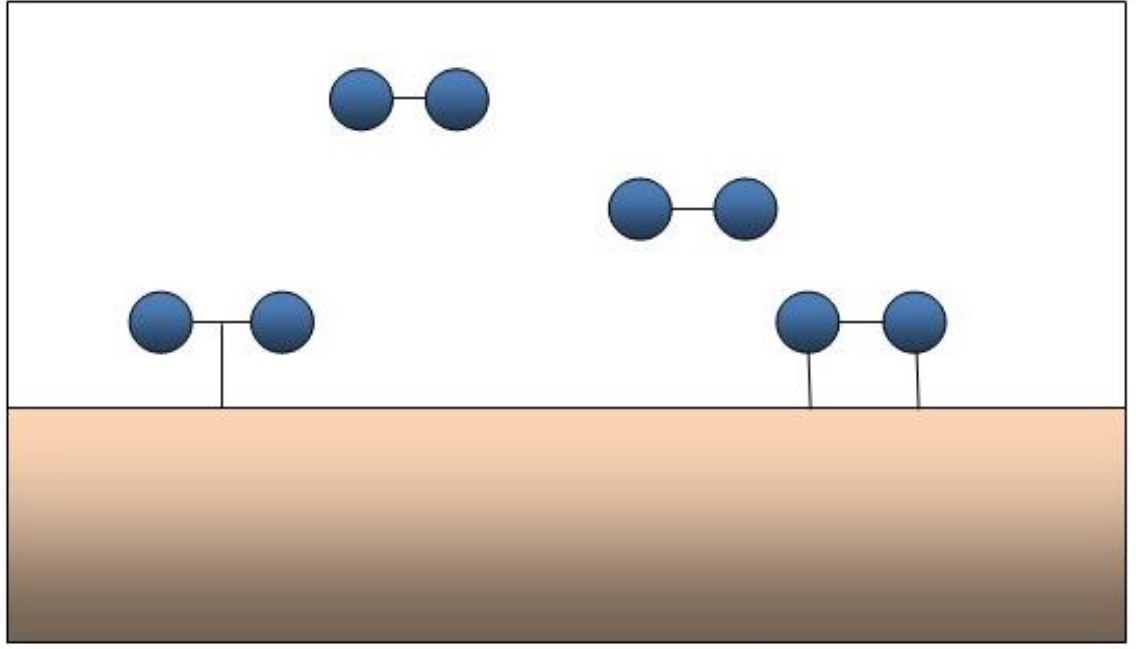
Katı yüzey ile adsorplanan madde arasında zayıf Van der Waals etkileşimlerinin olduğu adsorpsiyon olayıdır. Fiziksel adsorpsiyon düşük sıcaklıklarda meydana gelir ve ortamın sıcaklığının artması ile azalmaktadır. Adsorpsiyon ısı, genellikle 10 kcal/mol'den düşüktür. Bu adsorpsiyon türü oldukça hızlı olup sifıra yakın bir aktivasyon enerjisi eşliğinde yürür. Adsorpsiyon dengesi ekzotermik ve tersinirdir. Bu nedenle adsorplanmış gaz fazı sıcaklığının yükseltilip basıncın düşürülmesi ile kolaylıkla desorplanabilir (Yörükoğulları,1997). Yüzey örtünmesi tek tabaka veya çok tabakalı olabilmektedir. Bir yüzey üzerindeki adsorpsiyon miktarı adsorbentten çok adsorbata bağlıdır. Adsorbatın basıncı arttıkça adsorplama miktarı artar. Adsorbe olan molekül katı yüzeyinde belirli bir yere bağlanmayıp, yüzey üzerinde hareketli durumdadır.



Şekil 2.2. Fiziksel adsorpsiyonun şematik gösterimi

Yüzey moleküllerinin değerlik kuvvetleri nedeniyle yüzey üzerinde adsorplanan maddenin monomoleküler tabakası ile bir kimyasal bağın oluşması sonucu meydana gelen adsorpsiyon olayına kimyasal adsorpsiyon denir. Adsorbent ile adsorbat arasında kovalent bağ oluşmaktadır. Adsorpsiyon olayı yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve sıcaklık yükseldikçe adsorpsiyon artar. Adsorpsiyon ısısı 40 kcal/mol'den daha büyüktür. Kimyasal adsorpsiyon endotermiktir ve tersinmezdir. Kemisorplanmış bir gazın desorpsiyonu çok zordur ve desorpsiyon ürünleri, adsorplayıcı ile adsorplanan arasındaki bir kimyasal tepkime ürünü olabilir(Mayers, 1999).

Adsorpsiyon prosesi için aktivasyon enerjisi gerekir ve adsorpsiyon hızını aktivasyon enerjisinin büyüklüğü belirler. Adsorbatın basıncındaki artış adsorpsiyon miktarının azalmasına neden olur. Kimyasal adsorpsiyon katının tüm yüzeyinde gerçekleşmez, adsorbat aktif merkezler yüzeylere bağlanır. Bu nedenle yüzey örtünmesi en fazla tek tabakalı olabilir ve moleküller yüzey üzerinde hareket etmezler. Diğer tabakalar ancak fiziksel adsorpsiyonla oluşabilir.



Şekil 2.3. Kimyasal adsorpsiyonun şematik gösterimi

Katı maddelerin gazların adsorpsiyonu olayında şu özellikler görülür. (Berkem ve diğ., 1994)

- Adsorpsiyon olayında, adsorplama işlemi hızlı bir olay olup, doyuma yaklaştıkça hızın azaldığı görülmektedir.
- Fakat bunun yanında adsorbentin kimyasal yapısı ve kullanımdan önce yapılan prosesleri önemlidir.
- Adsorpsiyon olayında, adsorbentin adsorbe edeceği adsorbat önemlidir ve her çift farklı özellik gösterir.
- Adsorpsiyon olayın çift yönlüdür.
- Adsorbentin birim kütlesi veya hacmi tarafından adsorbe edilen gazın miktarı gazın derişimi veya kısmi basıncıyla orantılıdır. Adsorbent doygunluğa ulaştınca bu etkiler ortadan kalkar.

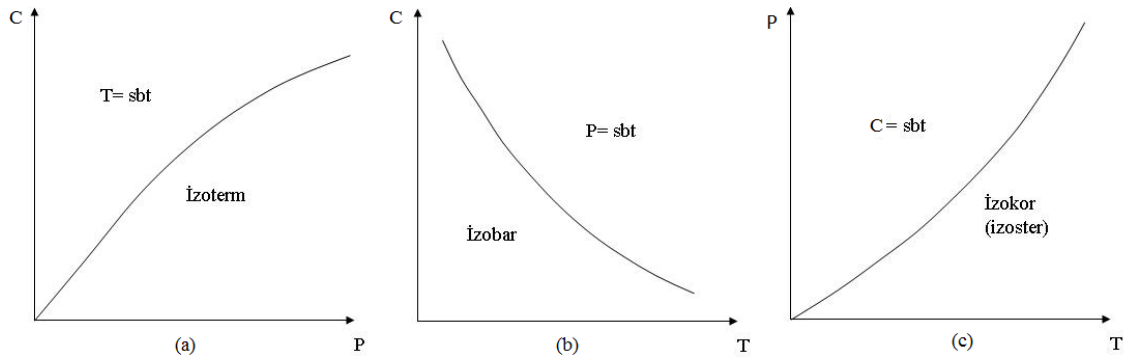
2.1.3.3.Adsorpsiyon Denge Kuramları

Katı bir yüzey bir gaz ile etkileşimde bulunduğunda, gaz molekülleri katı yüzeyine çarpar. Çarpan moleküllerin bir kısmı katının yüzeyine tutunarak adsorbe olurken, bir kısmı geri döner. Adsorpsiyon miktarı başlangıç durumunda büyüktür fakat adsorpsiyon süresi ilerledikçe bu miktar düşmektedir. Dolayısı ile dengeye ulaşana kadar adsorpsiyon miktarında azalma görülürken, desorpsiyon miktarı artma görülmektedir.

Belirli bir adsorpsiyon sistemi için adsorpsiyon kapasitesi gazın basıncına ve adsorpsiyon sıcaklığına bağlı olarak değişim gösterir. Adsorpsiyon sistemleri için denge halinde; sabit sıcaklıkta adsorpsiyon izotermi, sabit basınçta adsorpsiyon izobarı ve sabit denge halindeyken ise adsorpsiyon izotermi kavramlarından söz edilebilir.

Fiziksel adsorpsiyonda birim adsorbentte adsorplanan gaz kütlesi, basıncın ve sıcaklığın fonksiyonu olmaktadır. Adsorpsiyonda bu 3 değişkenden biri sabit tutularak karakteristik eğriler elde edilir. Sıcaklık sabit tutulduğunda izoterm, basınç sabit tutulduğunda izobar ve adsorplanan kütle sabit tutulduğunda da izosterik eğriler elde edilmiş olur.

Karakteristik eğrilerin genel görünümü Şekil.3.4'deki gibidir.



Şekil 2.4. Karakteristik adsorpsiyon eğrilerinin genel görünümü

2.1.3.4. Adsorpsiyon İzotermi

Sabit sıcaklıkta adsorbent tarafından adsorblanan madde miktarı ile denge basıncı veya denge konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi gösteren bağıntıya adsorpsiyon izotermi denir. Adsorpsiyon izotermelerinin en önemli kullanım alanlarından biri adsorpsiyon denge verilerini sorbent materyallerin karakterizasyonu ile ilişkilendirmek olup diğeri ise endüstriyel adsorpsiyon proseslerini dizaynıdır. (Kaller J. Ve ark., 2005)

Adsorpsiyon süreçleri için çeşitli adsorpsiyon izoterm modelleri tanımlanmıştır. Bu bölümde yaygın olarak uygulanan adsorpsiyon denklemleri olan; Langmuir, Freundlich, Brunauer Emmet Teller (BET) ve Dubinin – Radushkevich izotermi kısaca açıklanmıştır.

Langmuir İzotermi

Adsorpsiyon izotermelerinin ortaya atılması için bir takım teoriler ortaya konmuştur. Bu adsorpsiyon izotermi, sadece tek tabakalılara uygulanır. Bu kuramsal bağıntı, çok sayıda sistemin denge adsorpsiyon davranışını yorumlamak ve katı yüzeylerinin toplam yüzey alanını belirlemek için ortaya çıkmış olup her basınç aralığında kullanılabilir. İki hipoteze dayanır. (Khan, 2012)

- Birbirine komşu iki molekülün birbirini çekmediği ve itmediği farz edilir.
- Adsorbent adsorbe edilen moleküller tarafından sıkı moleküllerle kaplandığından, adsorbe edilen maddeyle doymun hale gelir.



Şekil 2.5. Langmuir modelinin şekilsel gösterimi

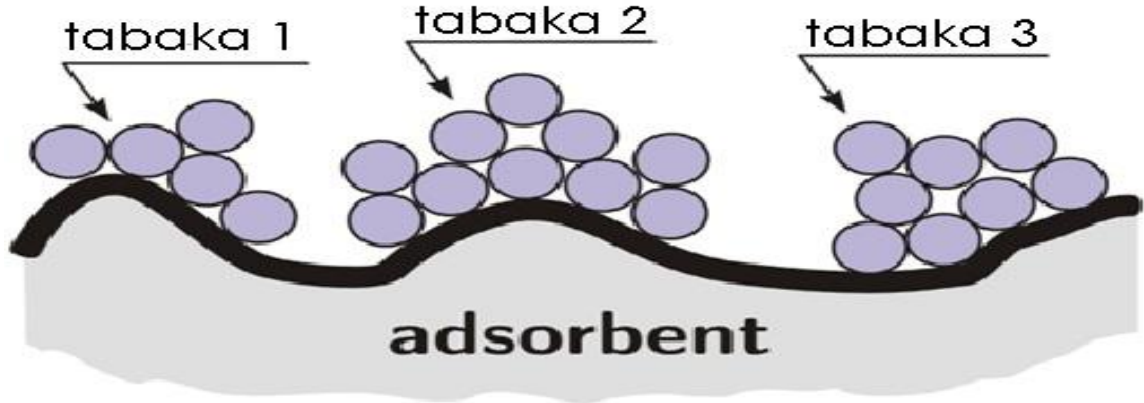
Freundlich Teoremi

Sabit sıcaklıkta adsorbent tarafından adsorblanan madde miktarı ile çözültideki etkin madde arasındaki derişimde bağıntıyı veren izotermdir. İdeal olarak temiz ve homojen olmayan katı yüzeylerindeki adsorpsiyonlar için izoterm denklemi önerilmiştir. Bu denklemin geçerliliği için adsorpsiyon olayının fiziksel bir proses olması gerekir.

Branaur-Emmet-Teller (BET) izotermi

Langmuir adsorbsiyon izoterminin çok tabakalılarına uygulanmış olanıdır. Genellikle iki adsorpsiyon tabakası olduğunu ve her tabakanın eşit adsorpsiyon enerjisine sahip olduğunu kabul eder ve çok tabakalı adsorpsiyonu gösteren izotermi verir. Buharların adsorbsiyonuna uygulanır. Adsorblanan gazın miktarından adsorblanan maddenin yüzey alanı hesaplanabilir. En sağlıklı yöntemdir. Buna göre geliştirilmiş pek çok alet vardır.

Bir adsorpsiyon olayı ile çevresindeki adsorpsiyon olayları arasında etkileşim olmadığı kabul edilir. Ancak BET modelinde adsorpsiyonun gerçekleşmesiyle oluşan ilk tabakanın yeni bir adsorpsiyon yüzeyi oluşturduğu düşünülerek yeni tabakaların da oluştuğunu kabul edilir. (Sözüğeçer, 2013).



Şekil 2.6. BET izoterm modelinin şematik gösterimi

Dubinin-Radushkevich (D-R) ve Dubinin-Astakhov (D-A) İzotermi

Dubinin-Radushkevich Polonyi karakteristik eğrisinin mikro gözenek hacimlerinin adsorpsiyon potansiyeline göre değişimini veren bir Gauss dağılımı olduğunu ileri

sürdükleri ampirik bir eşitlik geliştirmiştir. D-R adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyon enerjisini hesaplamak için kullanılır. Ayrıca D-R izotermi adsorbentın gözenekliliği ile ilgilidir ve adsorpsiyonun fiziksel ya da kimyasal olması ile ilgili bilgi verir.

Bu eşitlik şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = W_0 \exp(-\kappa \cdot A^2) \quad (2.1)$$

Eşitlikte W; adsorbentın mikrogözenek hacmi (m^3), W_0 ; adsorbentın maksimum gözenek hacmi (m^3/kg), κ ; adsorbent-adsorbat çiftinin karakteristik sabiti, A; adsorpsiyon potansiyelini ifade eder (Hutson ve ark, 1997).

$$A = R T \ln \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (2.2)$$

(3.19) eşitliğinde T; adsorbentın sıcaklığı, P; denge basıncı, P_0 doymuş buhar basıncı, R; gaz sabiti olarak tanımlanır.

Dubinin–Astakhov (D-A), D-R denklemini geliştirerek eşitliği şu şekilde türetmişlerdir: (Soong, 2010)

$$W = W_0 \exp - \left(\frac{A}{\beta E_0} \right)^n \quad (2.3)$$

2.1.3.5. Adsorpsiyon Termodinamiği

Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon, termodinamik verilerden biri olan entalpi değişiminin büyüklüğüyle ayırt edilebilir. Bazı kimyasal adsorpsiyonlar hariç fiziksel adsorpsiyon, sabit sıcaklık ve basınçta özel durumlar dışında, adsorpsiyon ekzotermiktir. Fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyona göre daha düşük sıcaklıklarda olduğundan düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının değerlendirildiği ısı pompalarında daha fazla tercih edilmektedir. (Özcan, 2010)

Adsorpsiyon termodinamiğinde en önemli niceliklerden biri adsorpsiyon serbest entalpidir. Serbest entalpi, sabit basınç ve sıcaklıkta olan prosesler için,

termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarının birleştirilmesiyle tariflenmiştir. ΔH , entalpi değişimi; ΔS , entropi değişimi; ΔG ' de serbest enerji değişimi olarak tanımlayabiliriz. Kendiliğinden gerçekleşen bir olayda ΔG negatiftir. Ayrıca gaz veya sıvı ortamında daha düzensiz olan tanecikler katı yüzeyinde tutunarak daha düzenli hale geldiği için adsorpsiyon sırasındaki entropi değişimi (ΔS) de negatiftir. Bunların arasındaki termodinamik bağıntı,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

şeklindedir. Buna göre negatif entropili bir işlem, ΔG serbest enerjisinin negatif olabilmesi, yani işlemin belli bir dereceye kadar gerçekleşmesi için, negatif bir ΔH değerine sahip olmalıdır. Adsorpsiyon ısısı da denilen adsorpsiyon entalpisinin negatif olması, adsorpsiyon olayının ekzotermik olduğunu göstermektedir.(Özcan, 2010)

Buradan adsorpsiyon olayının ısıveren (exotermik), desorpsiyon olayının da ısı alan (endotermik) bir tepkime olduğu görülmektedir. Adsorpsiyon olayında açığa çıkan ısıya adsorpsiyon ısısı denilmektedir.

Adsorpsiyonda tutunma adsorbent yüzeyinde gerçekleştiği için adsorpsiyon işlemi yüzey belli bir molekül kalınlığında kaplandığında duracaktır. Bu sebeple adsorbent malzemeler, gözenekli yapıda ve birim hacim başına büyük yüzey alanına sahip olmalıdır.

Kaynama sıcaklığı yüksek olan bir sıvı buharının molekülleri arası çekim kuvveti, düşük kaynama sıcaklığı olanından daha büyüktür. Çekim kuvvetlerinin artmasından dolayı, kaynama sıcaklığı yükseldikçe adsorpsiyon ısısı da artar.

Fiziksel adsorpsiyonda birim adsorbentte adsorplanan gaz kütlesi, basıncın ve sıcaklığın fonksiyonu olmaktadır. Adsorpsiyonda bu 3 değişkenden biri sabit tutularak karakteristik eğriler elde edilir. Sıcaklık sabit tutulduğunda izoterm, basınç sabit tutulduğunda izobar ve adsorplanan kütle sabit tutulduğunda da izosterik eğriler elde edilmiş olur. Clausius – Clapeyron eşitliği adsorpsiyon ısısının bulunmasında en fazla kullanılan eşitliktir.(Attalla ve akr. 2014)

$$\Delta H_{ads} = -R \partial(\ln P) / \partial(1/T) \quad (2.4)$$

Bu eşitliğe, sıcaklık, basınç ve konsantrasyon değişimlerinin de neden olduğu ideallsizlikler eklendiğinde adsorpsiyon ısısı en genel hali ile aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\Delta H_{ads} = H_{sb} + E_0 \ln(C_0/C)^{1/n} + T v_g \partial P / \partial T \quad (2.5)$$

burada “H_{sb}“ faz değişimi entalpisi, “E₀“ karakteristik adsorpsiyon enerjisi, “C₀” birim adsorbentın maksimum adsorplayabileceği gaz hacmi, n adsorbentın gözenek yapısından kaynaklanan heterojenlik sabiti ve “v_g” adsorbat gazın özgül hacimidir. (Saha ve ark. 2007)

İzosterik adsorpsiyon ısısı adsorbent tek tabaka ile tam olarak örtününceye kadar giderek azalır ve yoğunlaşma ısisına yakın bir değerde seyrederek. Bunun nedeni gazın ilk önce adsorpsiyon ısısı yüksek olan küçük gözenekler tarafından tutulmasıdır

2.1.3.6. Adsorpsiyon Kinetiği

Adsorpsiyon kinetiği; etkin adsorbat-adsorbent temas süresinin belirlenmesinde önemlidir. Adsorpsiyon kinetiğinin incelenmesinde adsorpsiyon işleminin hızına etki eden basamaklar vardır. Adsorbatın adsorbent tarafından adsorplanması 4 ana basamağı gerektirir. (Basibuyuk ve Forster, 2003)

Genel olarak kinetik anlamda adsorpsiyon basamaklarını da şöyle açıklayabiliriz;

- Gaz ya da sıvı fazda bulunan adsorbat molekülleri, adsorbenti kaplayan bir film tabakasına difüze olur.
- Film tabakasına gelen adsorbat, adsorbentın gözeneklerine yönelir. (sınır tabakası difüzyonu)
- Adsorbatın, adsorbentın gözenek boşluklarında hareket ederek adsorpsiyonun meydana geleceği yüzeylere difüzyonu (tanecik içi difüzyon) gerçekleşir.
- Son olarak adsorbat, adsorbentın gözenek yüzeyine tutunur ve adsorpsiyon olayı tamamlanır.

Eğer adsorbent hareketsiz fazda ise; birinci basamak yavaş ilerler ve bu basamak adsorpsiyon hızının belirlenmesinde rol oynar. Bu fazın hareketli halde olması durumunda yüzey tabakasının kalınlığı artacağı için buna bağlı olarak adsorpsiyon hızında da artış gözlenecektir. Adsorpsiyon işleminde son basamak ölçülemeyecek kadar hızlıdır. Adsorpsiyon prosesinin ilk birkaç dakikasında 2. basamak gerçekleşirken 3. basamak adsorpsiyonun prosesinin geri kalan kısmını oluşturur ve daha uzun sürede meydana gelir. Bu nedenle 3. basamağın adsorpsiyon hızını tam olarak etkilediği söylenebilir. (Kayacan, 2007)

2.2. Adsorpsiyon Çiftleri ve Adsorpsiyonu Etkileyen Faktörler

Günümüzde silikajel, aktif karbon ve aktif alümina en yaygın olarak kullanılan adsorbentlerdir. Silikajel ve aktif alümina ise daha çok kurutma ve arındırma işlemlerinde tercih edilmektedir.



Şekil 2.7. Kurutucuda silikajelin kullanılması

Kimyasal ve fiziksel adsorbentlerin belli oranlarla karıştırıldığı kompozit adsorbentler, aktif karbon lifleri ve polimerler yeni gelişmekte olan adsorbent çeşitleridir. Silikajel ve zeolitin adsorbent olarak kullanıldığı adsorpsiyonlu ısı pompası sistemlerinde adsorbat

olarak su buharı kullanılmaktadır. Suyun faz değişimi entalpisinin yüksek olması bu sistemlerin adsorpsiyon ısısının da yüksek olmasına sebep olmaktadır. Fakat suyun soğutmada kullanılabilmesi için bu adsorpsiyon çiftleri ile tasarlanan sistemlerin vakum altında çalışması gerekmektedir. Vakum altında çalışma sızdırmazlık problemi yarattığı gibi konstrüksiyonda da zorluklar yaratmaktadır. Adsorpsiyon ısısının yüksek olması, desorpsiyon prosesi için gerekli rejenerasyon sıcaklığını da arttıracığından güneş enerjisi, jeotermal gibi düşük sıcaklıktaki ısıl enerji kaynaklarının kullanımını zorlaştırmaktadır. Aktif karbon ise metanol, etanol, amonyak gibi gazları ve tüm hidroflorakarbon (HFC) tipi soğutucu akışkanları adsorbe edebilmektedir. Rejenerasyon sıcaklığının düşük olması da aktif karbonlu sistemlerin en önemli avantajını oluşturmaktadır. Metanollü ve etanollü sistemlerde de yine vakum altında çalışma zorunluluğu mevcuttur. Buharlaşma sıcaklığı düşük olan amonyak ve HFC tipi soğutucu akışkanları adsorbat olarak kullanan sistemler ile bu güçlük ortadan kaldırılabilir. HFC tipi soğutucu akışkanların adsorpsiyon ısısının düşük olmasına rağmen toksin etkilerinin bulunmaması ve kötü kokmaması amonyak ile karşılaştırıldığında en önemli artılarıdır. Uluslararası literatürde, son yıllarda özellikle aktif karbon/R134a çifti üzerine çeşitli çalışmalar yapıldığı, sistem iyileştirme ve performans artırımı konusunda araştırmaların devam ettiği görülmektedir.



Şekil 2.8. Adsorpsiyon prosesinde kullanılan granül aktif karbon

Adsorpsiyonun gerçekleşmesinde birçok parametre sürece etki etmektedir. Laboratuvar çalışmalarında olduğu kadar endüstriyel uygulama sürecinde de adsorbent seçimi ve

adsorpsiyon işleminde hangi parametrelerin süreci ne yönde etkilediğinin belirlenmesi adsorpsiyonun verimi ve tekrarlanabilirliği açısından oldukça önemlidir.

Genel olarak adsorpsiyonu etkileyen faktörler;

- Kullanılan adsorbentler ve özellikleri
- Kullanılan adsorbatlar ve özellikleri
- Adsorpsiyon ortamının özellikleri

olarak sınıflandırılabilir. Bundan sonraki bölümde konuyla ilgili açıklamalara yer verilmiştir.

2.2.1. Adsorpsiyon Çiftlerinde Kullanılan Adsorbatlar ve Özellikleri

Adsorpsiyon işlemini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kullanılan adsorbatın özellikleridir. Bu özellikleri kısaca özetlemek gerekirse, çözünürlük, molekül büyüklüğü ve iyon yükü önemli yer tutmaktadır.

1. **Çözünürlük:** Adsorplanacak moleküllerin çözünürlüğü arttıkça, moleküllerin çözelti ortamında kalmak istemeyip adsorbent yüzeyine daha az adsorplanacağı sonucuna varılabilir.
2. **Molekül büyüklüğü:** Adsorbatın seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli özelliklerden biri de adsorbatın molekül büyüklüğüdür. Molekül büyüklüğü seçilen adsorbentın gözeneklerine göre büyük olan adsorbatın, adsorbentın gözeneklerine tutunması zordur. Bu nedenle molekül büyüklüğünün artması adsorpsiyon işlemini zorlaştırır dolayısıyla adsorpsiyon süresinin artmasına ve adsorpsiyon verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır.(Weber, 1992).
3. **İyon yükü:** Dikkat edilmesi gereken önemli bir özelliktir. Nötr moleküller yüklü moleküllere göre adsorpsiyonları daha hızlıdır.

Deneyle için adsorbat olarak soğutucu akışkanlar kullanılmıştır. Bunlar;

- R134a
- R404a

Bir soğutma sisteminde, ısının bir ortamdan alınıp başka bir ortama taşınmasında bu ısının taşıyıcısı olarak soğutucu akışkanlardan yararlanır. Birçok durumda kullanılan

bu soğutucu akışkanlar ısı taşıma işlemini buhar halinde ve buhar halden sıvı haline dönüşerek sağlarlar. Soğutucu akışkanların ekonomik ve güvenilir olarak görevlerini yerine getirebilmeleri için bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri bulundurmaları gerekir. Genel olarak bu özelliklerin hepsini yerine getirmek mümkün olmayabilir. Bu özellikler çalışma ve uygulama ortamına göre değişiklik gösterebilmektedir.

2.2.1.1.R134a ve Özellikleri

Genel olarak R134a, HFC-134a veya tetrafloretan olarak isimlendirilmiştir. Bu gaz 90'lı yıllarda R12'nin (diklordiflormetan) yasaklanması üzerine, bu akışkanların alternatifi olarak üretilmeye başlanmıştır. Ozon tüketme potansiyeli sıfır olan bu akışkanların diğer özellikleri ile de kullanılabilir en uygun soğutucu akışkanlardır. R134a, eskiden R12 kullanan soğutucu cihazlarda fazla bir değişiklik yapmadan kullanılabilen ve yatırım masrafları ile de makul olan bir soğutucu akışkandır.

R134a tek bir bileşimden oluşmaktadır. Dolayısı ile bir fazdan diğerine(buhardan sıvıya geçiş gibi) geçişlerde sıcaklık kaymaları meydana gelmemektedir. Ev tipi soğutucular ve araç soğutucuları için kullanılan uygun gazlardan en önemlisidir.

2.2.1.2.R404a ve Özellikleri

Bu gaz ise R22 ve R502 soğutucu akışkanların ozon tabakasına zarar vermesi nedeniyle geliştirilmiş olan soğutucu akışkandır. Dolayısı ile ozon tabakasına zararlı bir etkisi bulunmamaktadır. R404a gazı R125, R134a ve R143a akışkanlarının karışımından oluşmaktadır. R404a gazı incelendiğinde ağırlıkça %44 R125, %4 R134a, %52 R143a gazlarından oluştuğu görülmektedir. Bu sebepten dolayı yapısında yüksek oranda R134a bulunması nedeniyle küresel ısınma etkisi yüksektir. R404a gazı genel olarak süpermarket soğutucuları gibi düşük ve orta düzeyde buharlaştırıcı sıcaklığı gereksinimi olan uygulamalar için kullanılmaktadır. En önemli dezavantajı ise R404a gazının sera etkisinin yüksek olmasıdır.

2.2.2. Adsorpsiyon Çiftlerinde Kullanılan Adsorbentler ve Özellikleri

Adsorpsiyon işlemleri için seçilen adsorbentlerin özellikleri, adsorpsiyon verimliliği açısından çok büyük öneme sahiptir. Bu verimliliğe etki eden adsorbent özellikleri şöyledir;

- 1) **Yüzey alanı:** Adsorpsiyon işlemlerinde, adsorbentin geniş bir yüzey alanına sahip olması adsorpsiyon verimliliği açısından önemlidir. (Weber,1992).
- 2) **Gözenek yapısı:** Adsorpsiyon işlemlerinde adsorbentin gözenek yapısı adsorpsiyon verimliliğine etkisi büyüktür. Adsorbentin gözenek yapısı; gözeneklerin büyüklüğünü, toplam adsorbent hacmi içerisindeki oranı ve gözenek boyut dağılımını ifade etmektedir.
- 3) **Tanecik boyutu:** Adsorbentin tanecik boyutu da adsorpsiyon verimliliğinde önemli bir yere sahiptir. Adsorbentin tanecik sayısının artması, adsorpsiyon işleminde birim adsorbent yüzeyine tutunacak molekül sayısını arttırmaktadır.

Deneylerin gerçekleştirilmesi için ise aşağıdaki adsorbentler seçilmiştir. Bunlar;

- 1) Granül Aktif Karbon
- 2) Pelet Aktif Karbon
- 3) Mavi Silikajel
- 4) Beyaz Silikajel
- 5) Turuncu Silikajel
- 6) Aktif Alümina
- 7) Zeolit
- 8) Polimer

2.2.2.1.Aktif Karbon

Endüstride kullanılan en önemli adsorbentlerden birisi aktif karbondur. Aktif karbon, farklı gözenek hacmi, farklı gözenek sayısı ve farklı yüzey alanına sahip, adsorplama kapasitesi yüksek olan ve modifiye edilmiş karbonlardan meydana gelir. Aktif karbon, yüksek olan reaktif yüzeyi, büyük spesifik yüzey alanı ve çok iyi dağılmış gözenek boyutu gibi özellikleri ile adsorpsiyon işlemleri için çok önemli bir yere sahiptir.

Toplam spesifik yüzey alanı, gözenek yapısı ve gözenek yüzeyindeki fonksiyonel gruplar, aktif karbon için adsorplama kapasitesinin belirlenmesi için çok önemlidir.

Adsorpsiyon ile ilgili olarak, adsorplanacak molekül eğer ki karbon yüzeyi ile aynı elektriksel yükte ise moleküllerin birbirini ittiği görülür, bu durum adsorpsiyon işleminin engellenmesini sağlar. Bu durumun aksi olması halinde, yani adsorplanacak molekül eğer ki karbon yüzeyi ile zıt elektriksel yükte ise moleküller birbirini çeker, bu durum ise adsorpsiyon işleminin artmasını sağlar. Bu sebepten dolayı, adsorpsiyon işlemi için yüzey alanı tek bir etkin parametre değildir. Yüzey alanları aynı olan ama farklı yöntem ve aktivasyon işlemleriyle meydana getirilen aktif karbonların genel olarak farklı adsorpsiyon karakteristiklerine sahip olduğu görülür. Adsorpsiyon kapasitesinin iyi olması için aktif karbonun, adsorplanacak molekülü tutacak uygun gözenek büyüklüğüne, bu molekül ile zıt elektriksel yüke ve büyük bir spesifik yüzey alanına sahip olmalıdır.

Aktif Karbon Türleri

Endüstriyel üretim olarak, kullanılacak yere ve amaçlara göre farklı üretim yöntemleri kullanılarak ve farklı hammadelere sahip olan aktif karbonların farklı türlerde üretimleri mümkündür. Başlıca aktif karbon türleri:

- Toz halindeki aktif karbonlar,
- Granül aktif karbonlar,
- Pelet halindeki aktif karbonlardır.

Elde edilecek aktif karbonun türünü; kullanılan hammadde, aktivasyon yöntemi (fiziksel veya kimyasal aktivasyon) ve kimyasal belirler. Granül aktif karbonlar; granül haldeki hammaddelerden elde edilirken, toz aktif karbonlar ise genellikle granüler ürünlerin toz haline getirilmesiyle elde edilir. Silindirik formdaki hammaddenin uygun hücrelere sıkıştırılıp karbonize edilmesiyle de pelet halindeki aktif karbonlar üretilmektedir.

Toz Aktif Karbon

Toz aktif karbon, öğütülmüş toz halde olan ve boyutları 0,18 mm'den daha küçük olan karbonun kimyasal aktivasyonu ile meydana gelen bir aktif karbon çeşididir. tip aktif karbonun geniş yüzey alanı vardır. Endüstriyel kullanımı için sıvı ve gaz fazı uygulamaları bulunmaktadır. Genel olarak çözelti fazı adsorpsiyonu uygulamalarında kullanılabilir. Toz aktif karbonun sıvı faz uygulamalarında atık suların

temizlenme ve koku giderimi uygulamalarında, gaz faz uygulamalarında ise baca gazlarının arıtılması işlemlerinde kullanılmaktadır. Bununla birlikte toz aktif karbonlar ayrıca, tıbbi amaçlar ve renk giderme işlemleri için de yaygın olarak kullanılmaktadır.

Granül Aktif Karbon

Granül aktif karbon, granül hammaddelerden elde edilmekte ve boyutları 0,2 mm -5 mm olan bir aktif karbon çeşitidir. Bu aktif karbon genel olarak gaz aktivasyonu ile üretilmekte olup, gazların sıvılaştırılması işlemlerinde yaygın olarak kullanılır ve difüzyon hızlarının yüksek olduğu bilinmektedir. Granül aktif karbonun kullanımında boyut önemli bir yer tutmaktadır. Bunun nedeni, adsorbe edilecek gazın adsorpsiyon yatağından geçirilmesi ve parçacık boyutunun yatağın yüksekliğine göre seçilmesidir. Dolayısı ile adsorpsiyon yatağının yüksek olması, granül boyutunun artmasına sebep olmaktadır. Eğer parçacık boyutu olması gerekenden daha düşük seçilir ise yataktan gaz geçişi esnasında basınç düşüşü olur karbon parçalarının sürüklendiği gözlemlenir.

Granül aktif karbonlar genel olarak suların saflaştırılması işleminde, renk giderimi işleminde ve akışkan sistemlerin bileşenlerine ayrılmasında kullanılmaktadır. Bunun dışında organik ve inorganik maddelerin ortamdan uzaklaştırılması işlemleri içinde kullanılabilir. Toz aktif karbona kıyasla büyük tanecik boyutuna ve daha küçük yüzey alanına sahiptir.

Pelet Aktif Karbon

Pelet aktif karbonlar, Toz aktif karbonların 0,8-5 mm çapında silindirik kaplarda basınç ile sıkıştırılma işlemi sonucunda oluşturulur. Pelet aktif karbonlar genel olarak yüksek mekanik kararlılığından ve düşük toz içeriğinden dolayı gaz fazı uygulamaları için daha çok tercih edilir. Koku, solvent ve atık su arıtma tesislerinde H₂S giderim uygulamalarında ve organik buharların gideriminde kullanılmaktadır.

2.2.2.2.Silikajeller

Silikajeller silisyum dioksit altyapısına sahip olan ve geniş gözenek çapı ile yüksek kısmi basınçta iyi bir nem adsorpsiyon özelliğine sahip adsorbentlerdir. Endüstride çoğunlukla adsorpsiyon kurutma ünitelerinde kullanılmakta olup, düşük maliyeti ile ve atıklarının çevreye zarar vermemesinden dolayı avantajlıdır. Silikajeller spesifik

yüzeyine oranla iyi bir kurutma kapasitesine sahip olan adsorbenttir. Gözenekli bir yapıya ve geniş yüzey alanına sahip olan silika jel, siloksan (Si-O-Si) ve silanol (Si-OH) gruplarından oluşur.

Silikajelin avantajları:

- Silika jel üzerine çeşitli silanol grupları bağlanarak istenilen fonksiyonelleştirme sağlanabilir.
- Organik destekler üzerine bağlanma, silikajel üzerine bağlanmadan daha zor olup, bu silikajel için bir avantajdır. (Organik polimerik destekler çok fazla çapraz bağlar içerdiğinden yüzey aktivasyon dengesine ulaşması saatler alır.)
- Silika jelinsabit bileşimi ve geniş yüzey alanı onu adsorpsiyon gibi yüzey çalışmaları için en popüler substrat haline getirmiştir.
- Silikajel şişme özelliğine sahip değildir.
- Silikajel su ve organik çözücülere karşı büyük bir dirence sahiptir.
- Silikajeller ısı işlemlerde iyi bir termal kararlılığı vardır.

Tüm bu avantajları ile birlikte seçiciliğin az olması silikajellerin kullanım alanlarını daraltmaktadır.

Silikajel Türleri

Silikajelin çeşitli türleri endüstride çokça kullanılmaktadır. Bu türler;

- Mavi Silikajel
- Beyaz Silikajel
- Turuncu Silikajel

Beyaz silikajel: Beyaz silikajellerin, geniş gözenekli, renksiz veya birazcık sarı saydam camsı bir yapıları vardır. Kurutucu olarak, nem absorplayıcı, elektronik aletler, ilaç, tekstil ürünleri ve diğer paketlenen materyalleri korumak için ve organik ürünlerin dehidratasyonla arıtılmasında kullanılan bir silikajel türüdür. Tüm bunlarla birlikte düşük nem oranı altında yüksek nem tutma kapasitesinden dolayı, havayı temizleme işleminde, giyim eşyalarını kurutma işleminde, bebek bezleri ve soğutma sistemlerinde de silikajeli uygulamalar bulunmaktadır.

Mavi silikajel: Mavi silikajeller geniş gözenek çapında, yine beyaz silikajeller gibi yüksek kısmı basınç altında iyi nem adsorpsiyon kapasitesine sahip silika jeldir. Dahası ağırlıkça %35'inden fazla nem tutabilirler. Mavi silikajeller, nemi içine almaları ile birlikte açık mavi rengine dönerler, pembeye döndükleri durumda ise ilk hallerine dönmeleri gerekir çünkü adsorblamaları azalmaya başlar ve kapasiteleri dolar. Mavi silikajel genel olarak nem absorpsiyonu için kullanılmaktadır. Ayrıca laboratuvarlarda (desikatör, kurutma kolonları vs.), hassas birçok malzemenin kuru ve güvenli saklanması için kullanılmaktadır.

Turuncu Silikajel: Turuncu silikajeller 2 mm- 5 mm boyutunda olup boncuk şeklindedirler. Genel kullanım için uygundur. Turuncu Silikajel geniş gözenek çapında, yüksek kısmı basınç altında iyi nem adsorpsiyon kapasitesine sahip silika jeldir.

2.2.2.3.Aktif Alümina

Alüminyum hidroksitlerin 1000 °C 'nin altındaki aktive etme ısıl işlemi ile aktif alümina oluşturulmaktadır. Aktif alüminanın iç yüzey alanı yaklaşık olarak 200 m²/g-300 m²/g civarındadır. Aktif alümina iç yüzeyinin anyonları adsorplama özelliği ile fosfat giderme özellikleri vardır. Yapılan çalışmalar sonucunda aktif alüminanın adsorplama kapasitesinin m² iç yüzey başına 0,1 mgP civarında olduğu bilinmektedir.

Aktif alüminanın yüzeyinin kuvvetli polar olduğu bilinmektedir ve metalin amfoterik doğasını yansıtabilecek şekilde hem asidik, hem de bazik bir karaktere sahiptir. Aktif alüminanın bir diğer özelliği ise su ile buluşmasında yumuşamaması, şişmemesi ve parçalanmamasıdır. Genel olarak sarsıntıya ve aşınmaya karşı kuvvetlidirler. Bunlar su ile temasta yumuşamaz, şişmez ve parçalanmaz. Adsorplanmış maddeler, belli bir sıcaklıkta desorplanırlar ve alümina yeniden eski etkinliğini kazanır.

2.2.2.4.Zeolit

Alüminyum, silikon ve oksijen içeren sulu Alumino silikat mineralleri zeolitin doğal yapılarında bulunmaktadır. Zeolitler doğada volkanik tüf ve tuzlu su arasındaki kimyasal reaksiyonun sonucu olarak meydana gelirler. Zeolitin yapısı incelendiğinde

kanallar oluşturan geniş boşluklar dikkati çeker. Bu kanallar, iyonların ve moleküllerin zeolit yapısından kolayca geçebilmeleri avantajını sağlamaktadır. Bu yapısından dolayı zeolitler “moleküler elek” olarak ta tanımlanırlar.

Zeolitler bir alanda kullanılırlar. Bunlardan bazıları, iyon değişimi, filtrasyon, kimyasal elek, su yumuşatma, koku giderimi, ve gaz adsorbsiyonudur. Zeolitin bir diğer önemli kullanım alanı tarımdır. Tarımda gübre etkinliğini artırma özelliği olduğundan bitki büyümesinde pozitif bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte gözenekli yapısı ile suyu adsorbe etmektedir. Bu özelliği sayesinde bitki için su ve besin elementleri bitkiler için her zaman toprakta hazır olması sağlanır. Zeolitler, suyun ve besin elementlerinin topraktan buharlaşması ya da yıkanma gibi nedenler ile kaybın önüne geçtiği için, tarım için gerekli olan sulama ve gübreleme işlemlerinin daha az olmasını sağlar. Bununla birlikte zeolitler tarım ve hayvancılığın yanında endüstriyel işlemlerde de kullanılabilir. İnşaat sektöründe çimento katkısı, tuğla yapımında veya yapı malzemesi olarak veya antikorozyon özellikleri ile boyalarda, endüstriyel atıklardan florun uzaklaştırılmasında, atıkların geri dönüşümünde, kanalizasyonların temizlenmesinde, ağır metal ve amonyum iyonlarının adsorbsiyonunda ve medikal uygulamalarda kullanımı mevcuttur.

Deneysel çalışmalarda R134a'nın adsorpsiyon işlemlerinde zeolit kullanılmış olup, adsorpsiyon kapasitelerinin düşük olduğu görülmüştür.

2.2.2.5.Polimer

Günümüzde kaliteli, yüksek performanslı, ucuz ve kullanım açısından kolay malzemelere yaşamın her alanında ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda geliştirilen teknikler ile bu malzemeler arasından en önemli yere sahip olanlardan birisi de polimerlerdir. Polimerler, tarım alanında, tıp alanında, çevre kirliliğinin önlenmesinde, gıda sektöründe, otomotiv sektöründe ve daha bir çok alanda kullanılmakta ve yapılan çalışmalar ile her geçen gün kullanım alanları artmaktadır.

Polimerlerin en önemli özellikleri;

- Hafif olmaları,
- Korozyona karşı dayanıklı olmaları,
- Kolay bir şekilde işlenebilmeleridir.

Geliştirilen polimer sentez yöntemleri sayesinde bu teknolojiye her geçen gün yeni özelliklere sahip polimerler eklenmektedir. Bu şekilde gelişmesi ile polimerler, yaşamın her alanında yer bulmuş olup, vazgeçilmez bir malzeme haline gelmişlerdir. Hayatın her alanında bu kadar fazla tercih edilmelerinin nedeni sentez edilirken yapısal özelliklerinin üreticiler tarafından istenildiği şekilde oluşturulabilmeleri ve ekonomik olarak ta avantajlı olmalarıdır.

Polimerler üretimleri esnasında bilimsel araştırmalar için laboratuvarlarda az miktarda üretilebildikleri gibi endüstriyel olarak ta seri bir şekilde yüksek miktarlarda üretilebilirler. Bu proje kapsamında da polimer üretimi yapılmıştır. Ardından laboratuvar ortamında üretilen polimer deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda gerçekleştirilen adsorpsiyon işlemlerinde, üretilen polimer ve R134a/R404a adsorpsiyon çiftlerinde, üretilen polimerlerin adsorpsiyon kapasitelerinin düşük olduğu görülmüştür.

2.2.3. Adsorpsiyon Ortamının Özellikleri

Kullanılan adsorpsiyon çiftleri kadar adsorpsiyon ortamının özellikleri de büyük bir öneme sahiptir. Adsorpsiyon ortamının sıcaklığı, pH değeri, ortamda bulunan moleküllerin çeşitliliği ve temas süresi adsorpsiyon verimliliği için dikkat edilmesi gereken özelliklerdir. (Çelebi ve ark., 2000)

- 1. Sıcaklık:** Adsorpsiyon reaksiyonları genel olarak ekzotermiktir, bunun anlamı adsorpsiyon esnasında ortama ısı aktarılması demektir. Bu yüzden de adsorpsiyon derecesi genellikle sıcaklığın düşmesi ile artar. Eğer reaksiyon endotermik yani ortamdan ısı alan bir reaksiyonsa, adsorpsiyon sıcaklığının artması ile artacaktır.
- 2. pH:** Eğer katı madde elektriksel yönden yüklü bir iyon veya kolloit bir partikül ise, pH'nın etkisi önemli bir parametredir. Çözeltinin pH'sı adsorbe olan maddenin çözülme derecesini etkilemekte ve çözülmeyen moleküllere göre daha kolay adsorbe olmaktadır. Amfoterik yapıdaki maddeler izoelektrik noktadaki pH'da daha kolay adsorbe olurlar. Elektrolit özellik göstermeyen maddelerin adsorpsiyonu çözeltinin pH'sından etkilenmez. Genelde alkali ortamda adsorpsiyonun daha fazla olduğu saptanmıştır.

- 3. Ortamda bulunan diğer çözünmüş maddeler:** Adsorpsiyon ortamında bulunan diğer çözünmüş maddelerin adsorpsiyona etkisi yarışan iyonların etkisi olarak tanımlanabilir. Çok bileşenli ortamda bulunan bir madde genellikle saf olarak bulunduğu hale göre daha az adsorplanmaktadır. Çünkü diğer iyonların adsorbent yüzeyine doğru yönelmeleri esas uzaklaştırılmak istenen maddenin adsorpsiyonunu engeller.
- 4. Temas süresi:** Temas süresi, adsorpsiyon çiftlerinin temas halinde olduğu süredir. Bu süre deneysel olarak belirlenmektedir. Belirli bir temas süresi sonunda adsorbatla adsorbent dengeye ulaşır. Temas süresinin uzatılmasıyla adsorpsiyonda artış gözlenmez.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması TUI205 kodlu "Building Integration of Solar Thermal Systems (BISTS)" isimli COST aksiyonu kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen 112M163 no'lu "Adsorpsiyonlu ısı pompalarında kullanılan farklı tipteki soğutucu akışkanların aktif karbon, polimer ve aktif karbon katkılı polimer malzemelerce adsorblanma karakteristiklerinin belirlenmesi" isimli TÜBİTAK-COST projesi dahilinde yapılan çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ikinci kısımda sunulan bilgiler kapsamında, farklı adsorbent malzemelerin (aktif karbon, zeolit, silikajel, aktif alimüna ve çalışma kapsamında mikroküre formunda sentezlenerek üretilen polimer) R134a ve R404a gibi HFC tipi soğutucu akışkanları (adsorbatları) adsorplama performanslarını bulmak için deneyler yapılmış, incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.1. Deneylerin gerçekleştirildiği adsorpsiyon ünitesi

Çalışmada kullanılan deney düzeneği ile test edilen farklı adsorbent-adsorbat çiftleri için sabit sıcaklıkta basınca bağlı adsorplama kapasitesindeki değişimi veren izoterm eğrileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile birlikte Dubinin-Astakhov (D-A) adsorpsiyon teorisi kullanılarak analizler ve incelemeler gerçekleştirilmiştir. Ardından incelenen adsorpsiyon çiftlerinin izosterleri ve adsorpsiyon ısıları hesaplanmıştır.

Bu bölümde öncelikle çalışmada kullanılan adsorbent malzemeler ve adsorbat akışkanlardan bahsedilmektedir. Daha sonra kullanılan deney düzeneği ve ekipmanların

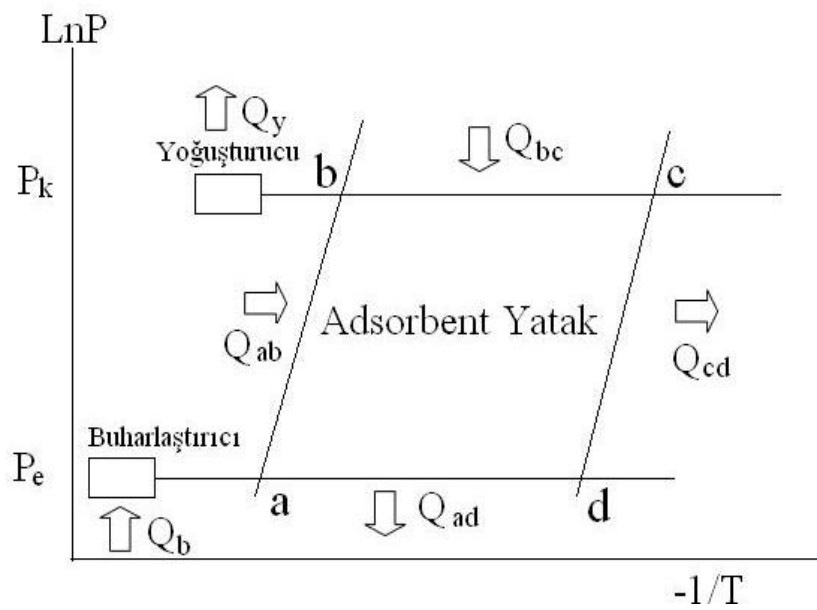
özellikleri tanıtılmaktadır. Ardından deneysel çalışma prosedürlerinin detayları anlatılmıştır. Çalışmada adsorpsiyon kapasitelerini hesaplamak için kullanılan matematiksel denklemler örneklerle açıklanmıştır. Kullanılan prosedürlere ve adsorpsiyon çiftlerine göre elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

3.1. Adsorpsiyonlu Soğutma Çevrimi ve Adsorpsiyon Çiftlerinde Adsorpsiyonun Matematiksel Modellemesi

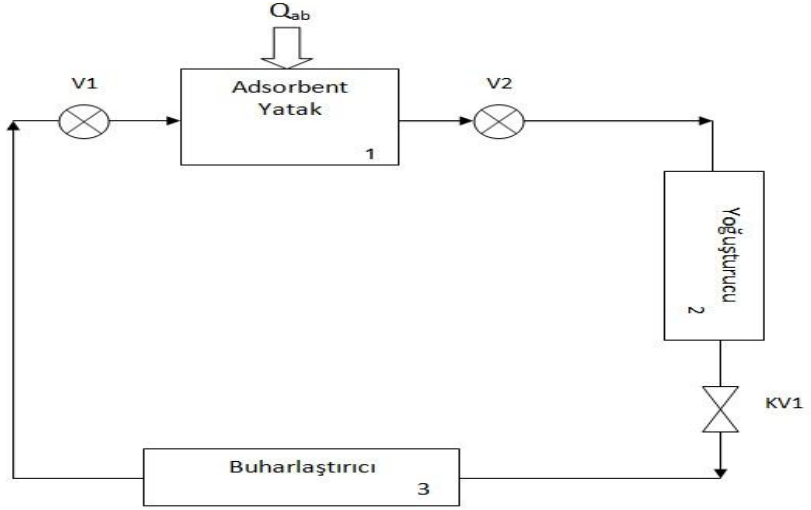
3.1.1. Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemleri, Kademeleri ve Parametreleri

Adsorpsiyonun doyma kapasitesi, basınçtan daha çok sıcaklıktan etkilenir. Düşük sıcaklıklarda adsorbe edilebilen gaz miktarının yüksek sıcaklıktakine göre daha fazla olması ve ısıtıldığında da adsorbentin adsorbe ettiği gazı geri verebilmesi termal ısı pompalarının temelini oluşturmaktadır. Temel prensibe göre eğer ayrı kaplardaki adsorbent ile sıvı halindeki adsorbat arasındaki vanalar açıldığında adsorbat buharlaşmaya başlayacak ve sıcaklığı düşecektir. Bu süreçte adsorbentin de sıcaklığı artacaktır.

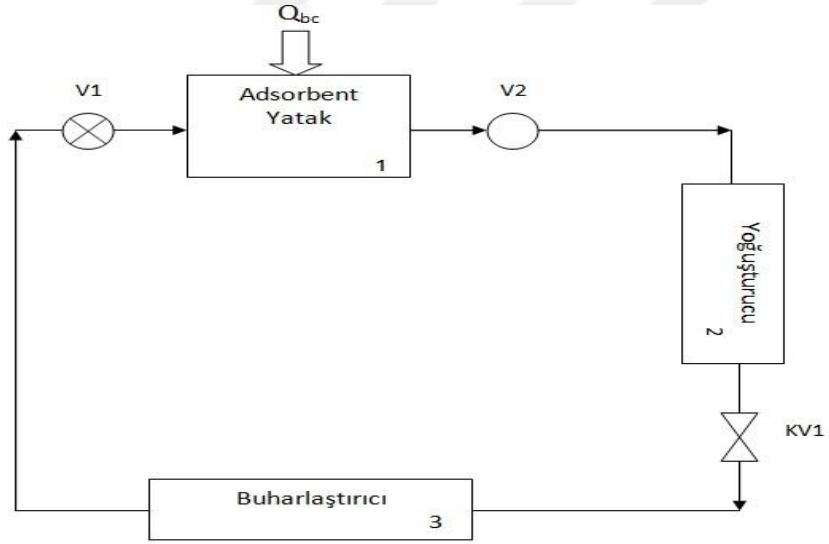
Adsorpsiyonlu soğutma sistemi genel olarak adsorbent yatağı (1), yoğuşturucu (2), buharlaştırıcı (3), kısılma vanası (KV1) ve adsorbent yatağının giriş ve çıkışında bulunan vanalardan (V1 ve V2) oluşmaktadır. Adsorbent yatakta adsorbent bulunmakta olup sistemde dolaşımı sağlayan adsorbattır.



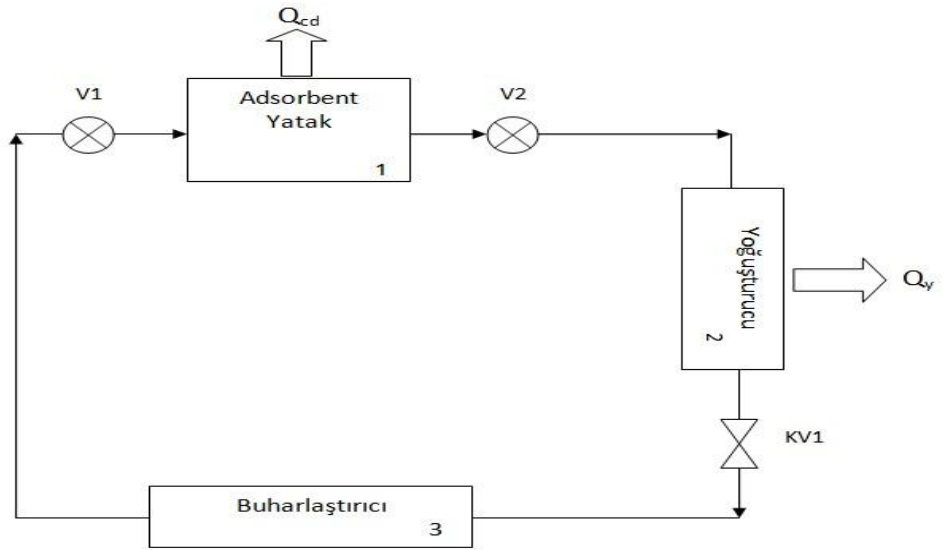
(a) $\ln P - 1/T$ diyagramı



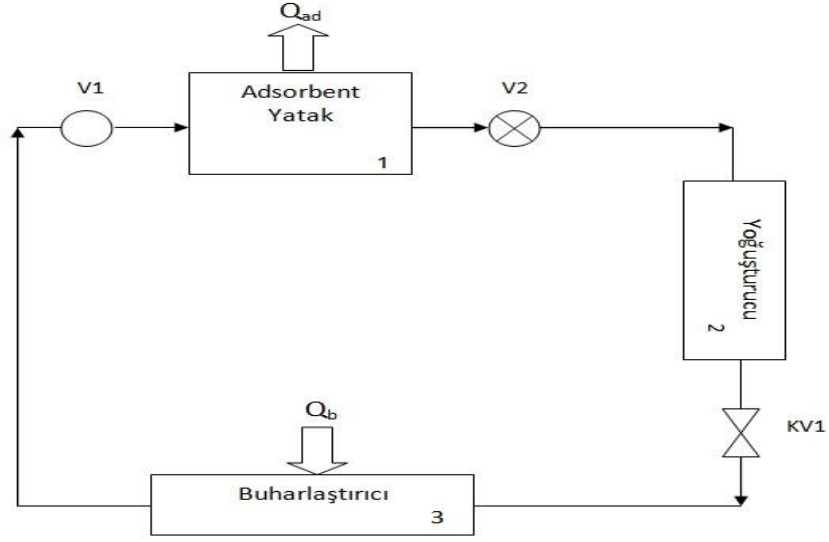
(b) İzosterik ısıtma işlemi



(c) İzobarik desorpsiyon



(d) İzosterik soğutma işlemi



(e) İzobarik adsorpsiyon

Şekil 3.2. Adsorpsiyonlu soğutma çevrini akış şeması: (a) $\ln P - 1/T$ diyagramı, (b) izosterik ısıtma işlemi, (c) izobarik desorpsiyon, (d) izosterik soğutma işlemi, (e) izobarik adsorpsiyon

Bu cihazlarda adsorbat akışkan çevrimde sürekli dolaşım halinde iken, adsorbent malzeme adsorbent yatak içerisinde yerleştirilmiş halde bulunur.

Bu sistemler basit bir çalışma prensibine sahip olup, termal enerji ile çalışmaktadır. Soğutma periyodunda buharlaştırıcıda bulunan adsorbat çevreden ısı çekerek buharlaşmakta, adsorbent yatağında kuru durumda bulunan adsorbent tarafından adsorplanmaktadır. Adsorbent adsorplama kapasitesi doluncaya kadar bu işlem sürecektir. Yoğuşma sırasında ise, adsorbent yatağına transfer edilen ısı ile adsorbat desorbe (adsorbatın adsorbent yüzeyinden uzaklaşması) edilip, adsorbent yatağına terk etmekte ve yoğuşturucuda çevreye ısı bırakarak yoğuşmaktadır. Desorplama işlemi, adsorbatın adsorbent yataktan tamamen desorplanması durumuna kadar devam etmektedir. Yoğuşturucuda yoğuşan adsorbat daha sonra genleşme vanasından geçirilerek buharlaştırıcıya aktarılmaktadır. Adsorpsiyonlu sistemler iyi bir alternatif olmalarının yanında dezavantajları kesikli çalışan sistemler olmalarıdır. Buharlaştırıcıda buharlaşan adsorbat, adsorbent tarafından adsorplanırken yoğuşturucuda herhangi bir işlem yapılmamaktadır. Kesikli çalışma dezavantajını ortadan kaldırmak için şekil 3.3'te gösterilen çift yataklı adsorpsiyonlu soğutma sistemleri tasarlanmıştır. Birinci

adsorbent yatakta adsorpsiyon işlemi tamamlandığında, adsorbent yatağın evaporatörle olan ilişkisi kesilir ve ısıtma işlemi başlar. Aynı anda da diğer yatağın evaporatörle olan bağlantıları açılır ve sistemin sürekli çalışması sağlanmış olur. (Demir, 2005)

Adsorbatın adsorbent ile buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasında dolaşımı, bu birimler arasındaki basınç farkı sayesinde gerçekleşir. Fakat basınçtaki değişimler nispeten küçük olduğu için, teorik olarak adsorpsiyon ve desorpsiyon sırasında sabit basınç kabulü yapılabilir. Bir çevrim şeklinde tekrarlanan bu işlemler sonucunda, yoğunlaşma sırasında ortama bırakılan ısı sayesinde ısıtma gücü, buharlaşma sırasında ortamdan çekilen ısı sayesinde ise soğutma gücü elde edilir.

Adsorpsiyonlu soğutma çevrimleri çalışma prensibine göre sistemi 4 ana kısma ayırarak incelemek mümkündür. Buna göre kütle değişiminin yaşanmadığı ısıtma ve soğutma süreçleri izosterik, sabit basınç altında yapılan adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçleri ise izobarik karakteristik taşımaktadır. Adsorpsiyonlu ısı pompası çevriminin $\ln P - 1/T$ diyagramı Şekil 3.2’te verilmiştir.

İzosterik ısıtma işlemi, (a-b): Adsorbent yatak sıcaklığı dışarıdan ısı girişi ile T_a ’dan T_b ’ye yükseltilir. V1 ve V2 vanası kapalıdır.(Şekil 3.2-b) İşlem sırasında desorpsiyon olmaz, gaz basıncı artar (c sabit).

İzobarik desorpsiyon, (b-c): Bu aşamada da adsorbent yatağa ısı girişi devam etmektedir. Ancak desorpsiyon başlamakta ve desorpsiyonla açığa çıkan buhar yoğunlaştırılmaktadır. V1 vanası kapalı ve V2 vanası açıktır.(Şekil 3.2-c) Adsorbent yatakta basınç sabit kabul edilir. Yatak sıcaklığı maksimum değere (T_c) ulaşır.

İzosterik soğutma işlemi, (c-d): Desorpsiyon işlemi tamamlandıktan sonra, adsorbent yatak T_d sıcaklığına soğutulur, dolayısıyla basınç düşer. Bu durumda V1 ve V2 vanası kapalıdır.(Şekil 3.2-d)

İzobarik adsorpsiyon, (d-a): Yataktan ısı çekilmeye devam edilir. Bu süreçte, buharlaştırıcıda çevreden ısı çekerek buharlaşan adsorbat, adsorbent tarafından adsorbe edilmektedir. Dolayısı ile V1 vanası açık ve V2 vanası kapalıdır.(Şekil 3.2-e) Yatak sıcaklığının sabit basınçta T_a sıcaklığına düşmesi ile çevrim tamamlanır.

Dolayısı ile soğutma çevrimlerinde verimi ve kapasiteyi hesaplamak için, kullanılan adsorpsiyon çiftlerinin izotermelerini ve adsorpsiyon ısılarını bilmek önemlidir. Bu

bağlamda bir sonraki bölümde adsorpsiyon miktarının ve adsorpsiyon ısısının matematiksel modellemesi anlatılmıştır.

3.1.2. Adsorpsiyonun Matematiksel Modellemesi

3.1.2.1. Adsorpsiyon Miktarının Matematiksel Modellemesi

Adsorpsiyon kapasitesi tespiti ve katsayıların bulunması için başlangıç modeli, Dubinin-Astakhov (D-A) adsorpsiyon izoterm modelidir. (Dubinin, 1975) Bu model aşağıdaki gibidir;

$$W = W_0 \exp \left\{ - \left[\frac{RT}{E} \ln \left(\frac{p_f}{p} \right) \right]^n \right\} \quad (3.1)$$

Burada;

$$W = C v_a \text{ and } W_0 = C_0 v_0 \quad (3.2)$$

Burada E, deneysel verilerden elde edilen çeşitli adsorpsiyon çiftlerine göre karakteristik enerjidir. n parametresi, deneysel izotermelerin en iyi uyumunu sağlayan üstel bir sabittir. C miktarı, adsorpsiyonun spesifik kütesini belirtir (birim adsorbent kütle başına düşen Kg adsorbat). V_a ise adsorbe edilen fazın özgül hacmini belirtir. Aşağıdaki denklemlerle açıklanır.

$$v_a = v_b \exp (\Omega(T - T_b)) \quad (3.3)$$

Burada;

$$\Omega = \ln(b/v_b) / (T_c - T_b) \quad (3.4)$$

b miktarı Van der Waals hacmini, v_b ise normal kaynama noktasındaki doymuş sıvının özgül hacmi ifade eder. T, kritik ve normal kaynama noktalarına atıfta bulunan c ve b alt indisleriyle belirtilen sıcaklıktır.

V_0 parametresi ise $T=0$ sıcaklığında denklem (2.34) ile ifade edilir. Çizelge 2.2 deneysel çalışmalarda kullanılan adsorbatların özelliklerini ve parametrelerini içermektedir. Ayrıca denklem (3.1) aşağıdaki şekilde de yazılabilir;

$$\ln p = \ln p_s - E/(RT)[\ln(C_0 v_0 / C v_a)]^{1/n} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) $1/T$ 'ye göre izosterik durumlar için diferansiyeli alındığında (C =sabit) ve v_a 'yı ayrıca sıcaklığın bir fonksiyonu olarak düşünersek aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\frac{\partial \ln p}{\partial (1/T)} = \frac{\partial \ln p_s}{\partial (1/T)} - \left(\frac{E}{R}\right) [\ln(C_0 v_0 / C v_a)]^{1/n} - (ET\Omega / (nR)) [\ln(C_0 v_0 / C v_a)]^{(1-n)/n} \quad (3.6)$$

3.1.2.2. Adsorpsiyon Isısının Matematiksel Modellemesi

İzosterik adsorpsiyon ısısı, sabit konsantrasyonlarda Clausius-Clapeyron ilişkisi ile aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$Q_{ads}|_{CC} = -R(\partial \ln p) / \partial (1/T) \quad (3.7)$$

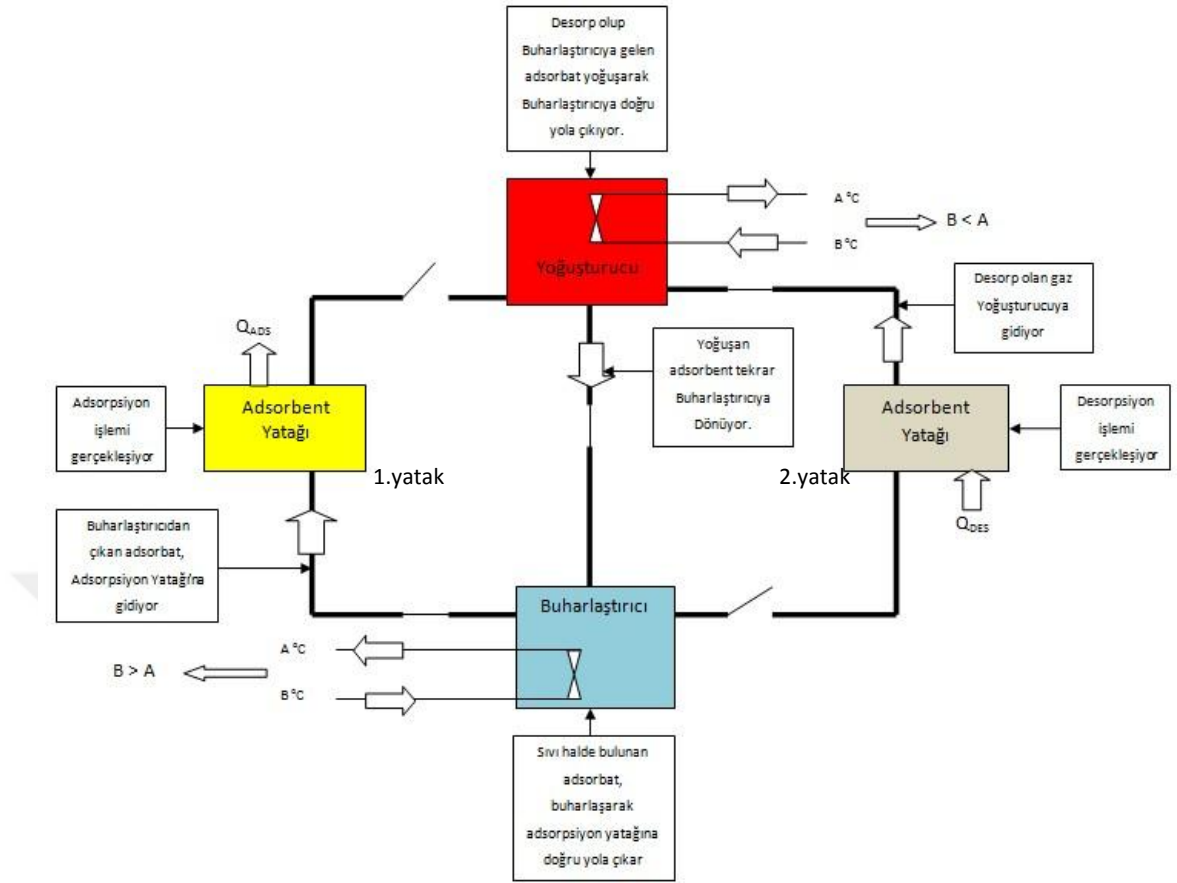
Ve buharlaşma ısısı ise aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$h_{fg} = -R(\partial \ln p_s) / \partial (1/T) \quad (3.8)$$

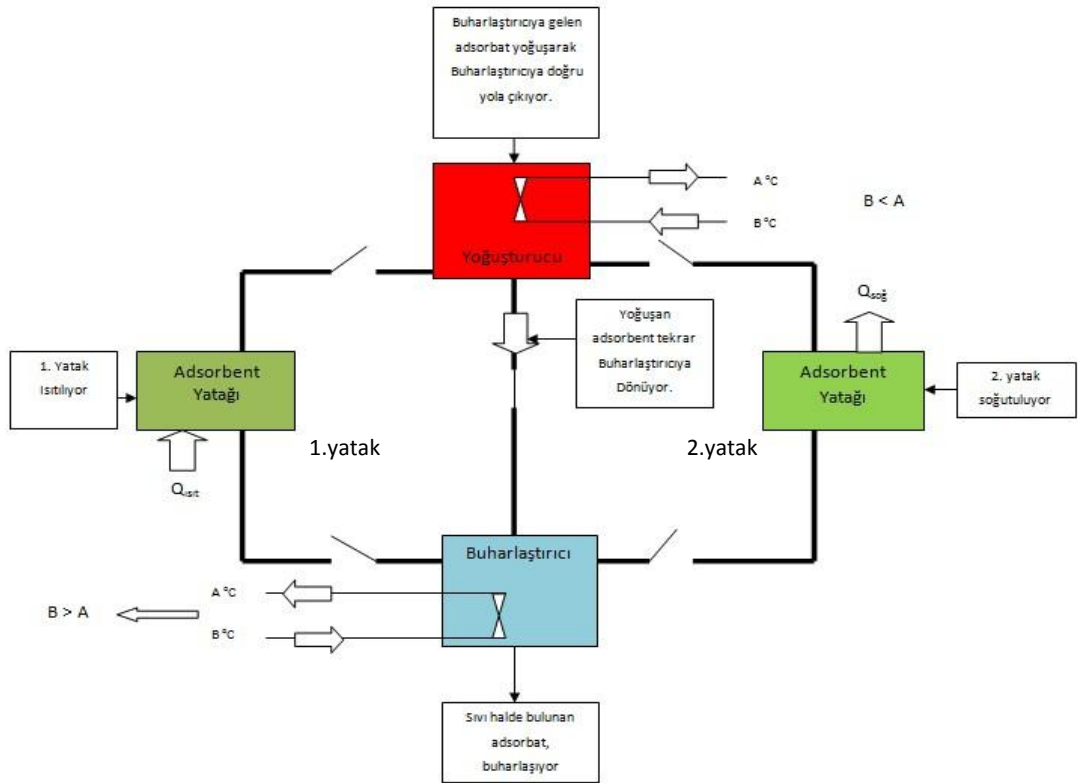
3.7 numaralı ve 3.8 numaralı denklemini değiştirerek 3.6 numaralı denkleme girildiğinde, adsorpsiyon ısısı için aşağıdaki denklem türetilebilir. (El-Sharkawy ve ark. 2007)

$$Q_{ads} = h_{fg} + (E)[\ln(C_0 v_0 / C v_a)]^{1/n} + (ET\Omega / n) [\ln(C_0 v_0 / C v_a)]^{(1-n)/n} \quad (3.9)$$

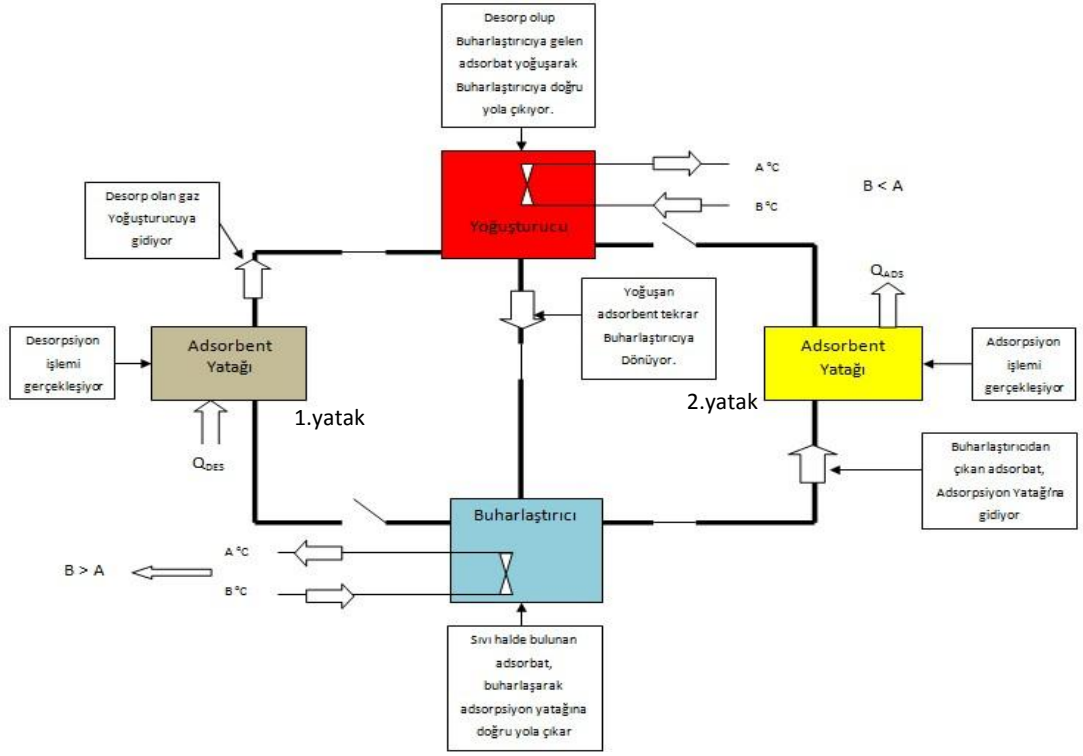
Denklem (3.7)'da tanımlandığı gibi izosterik adsorpsiyon ısısının sonucu için standart prosedür, izosterleri $1/T$ düzlemine karşı $\ln p$ 'de çizmektir. Normalde, adsorbatın kritik noktasının çok üzerindeki sıcaklıklarda bir eğim sabitliği gözlemlenir.



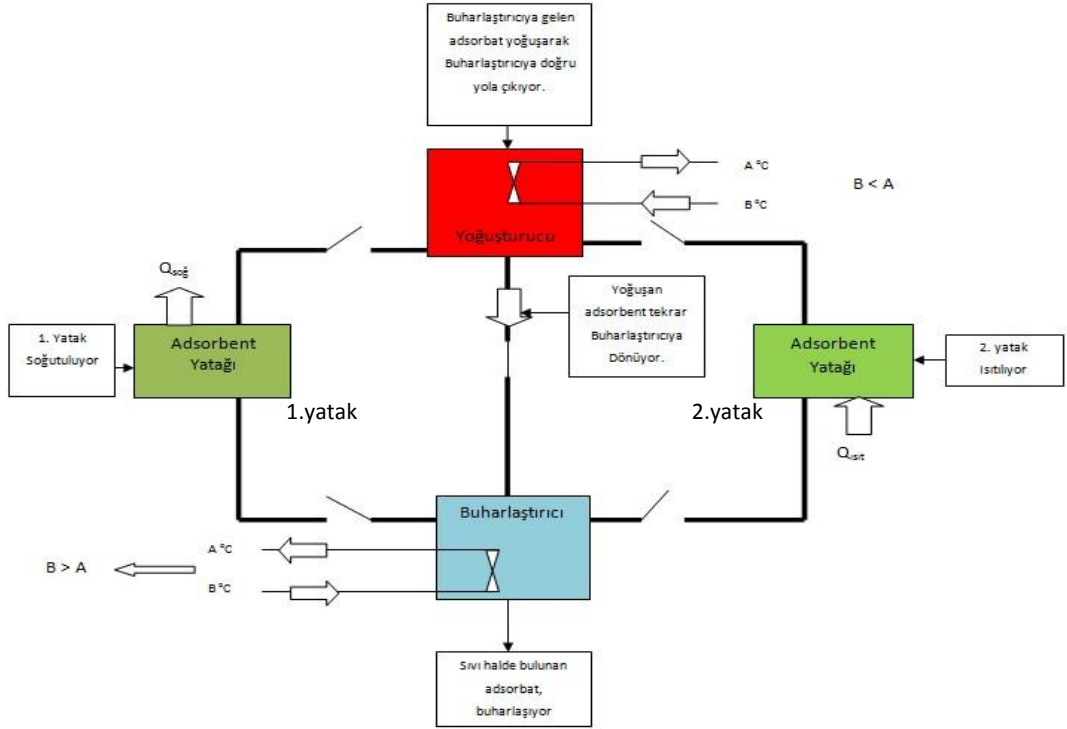
(a)1. yatak adsorpsiyon, 2. yatak desorpsiyon sürecinde



(b)1. yatak izosterik ısıtma, 2. yatak izosterik soğutma sürecinde



(c)1. yatak desorpsiyon, 2. yatak adsorpsiyon sürecinde



(d)1. yatak izosterik soğutma, 2. yatak izosterik ısıtma sürecinde

Şekil 3.3. Çift yataklı adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin her bir durum için çalışma şemaları: (a)1. yatak adsorpsiyon, 2. yatak desorpsiyon sürecinde, (b)1. yatak izosterik ısıtma, 2. Yatak izosterik soğutma sürecinde, (c)1. yatak desorpsiyon, 2. yatak adsorpsiyon sürecinde, (d)1. yatak izosterik soğutma, 2. yatak izosterik ısıtma sürecinde

Sonuç olarak, klasik uygulamalarda izosterik adsorpsiyon ısısının adsorpsiyon miktarına bağlı bir fonksiyon olarak gösterilmesi, Dubinin'in izotermelerini geniş ölçüde izleyen adsorbent-adsorbat kombinasyonları için iyi bir yaklaşımdır. Gaz fazının ideal olmaması nedeniyle, adsorbat molekülünün, çeşitli adsorbentlere adsorpsiyonu sırasında, adsorpsiyon işlemi basınç ve sıcaklık değişimlerinden etkilenir. Basınç ve sıcaklık değişimlerinden meydana gelen etkileri dikkate almak amacı ile adsorpsiyon ısısı denklem (3.9) ile hesaplanabilir.

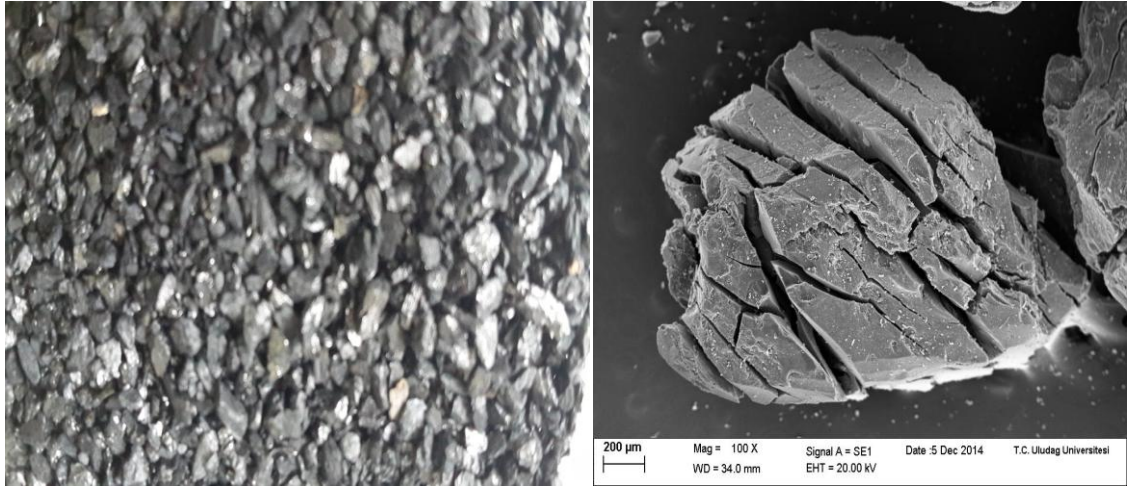
3.2. DeneYlerde Kullanılan Adsorbentler ve Özellikleri

DeneYlerde adsorbent olarak, granül aktif karbon, pelet aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel, turuncu silikajel, aktif alümina, zeolit ve polimer kullanılmıştır

Granül Aktif Karbon Özellikleri

Çizelge 3.1. Granüler aktif karbonun özellikleri

Fiziksel Özellikler	Granüler Aktif Karbon
Boyut (mm)	0.6-2.6
Yoğunluk (kg/m ³)	470
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0.472
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,949
Gözenek Çapı (Å)	17.6

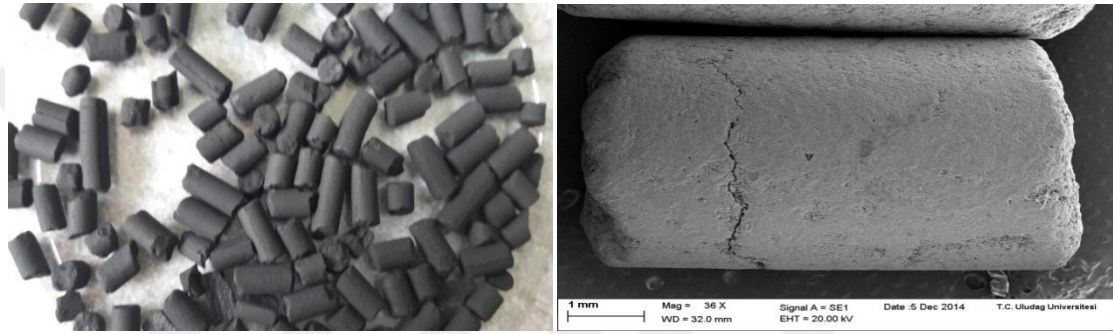


Şekil 3.4. Granüler aktif karbon

Pelet Aktif Karbonun Özellikleri

Çizelge 3.2. Pelet aktif karbonun özellikleri

Fiziksel Özellikler	Pelet Aktif Karbon
Boyut (mm)	D=4
Yoğunluk (kg/m ³)	600
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0.283
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,597
Gözenek Çapı (Å)	15.2

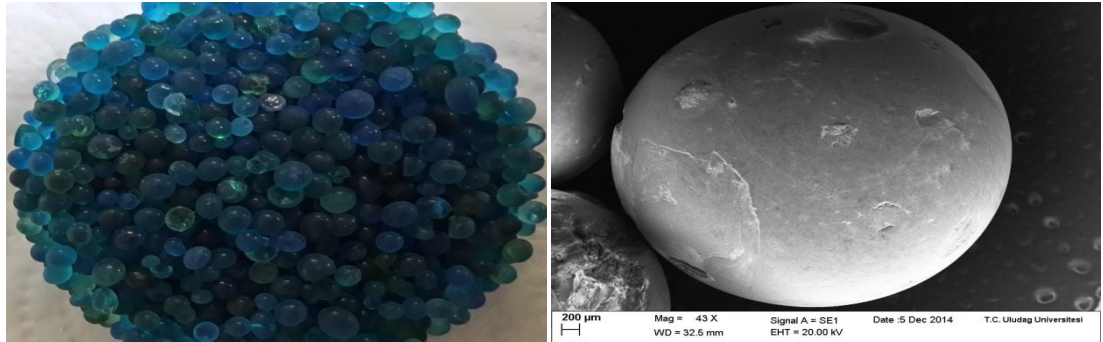


Şekil 3.5. Pelet aktif karbon

Mavi Silikajel Özellikleri

Çizelge 3.3. Mavi silikajelin özellikleri

Fiziksel Özellikler	Mavi Silikajel
Boyut (mm)	3-5
Yoğunluk (kg/m ³)	720
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0.276
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,556

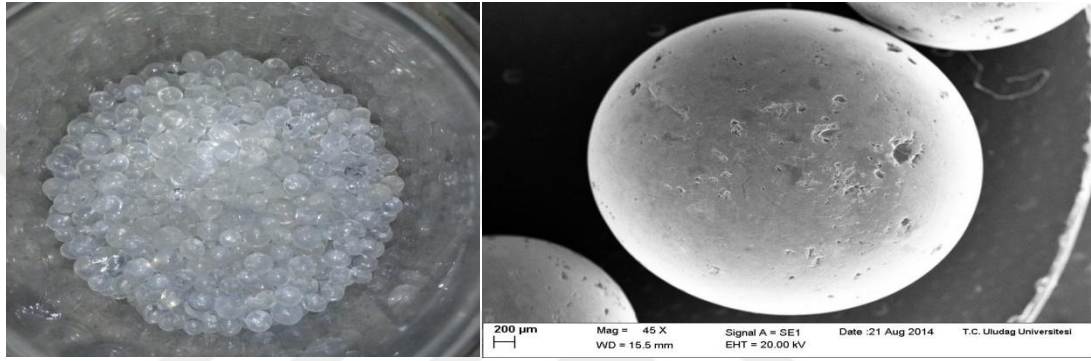


Şekil 3.6. Mavi silikajel ve SEM görüntüsü

Beyaz Silikajelin Özellikleri

Çizelge 3.4. Beyaz silikajelin özellikleri

Fiziksel Özellikler	Beyaz Silikajel
Boyut (mm)	3-5
Yoğunluk (kg/m ³)	720
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0,35
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,650-0,800

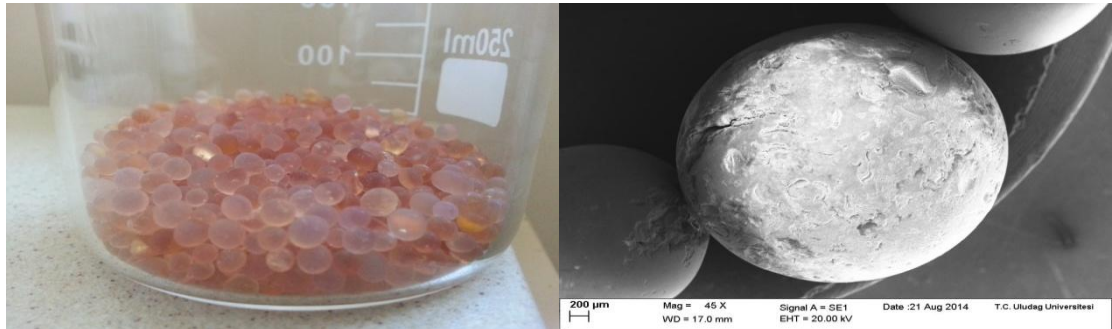


Şekil 3.7. Beyaz silikajel ve SEM görüntüsü

Turuncu Silikajelin Özellikleri

Çizelge 3.5. Turuncu silikajelin özellikleri

Fiziksel Özellikler	Turuncu Silikajel
Boyut (mm)	2-5
Yoğunluk (kg/m ³)	800-923
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0,4
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,750

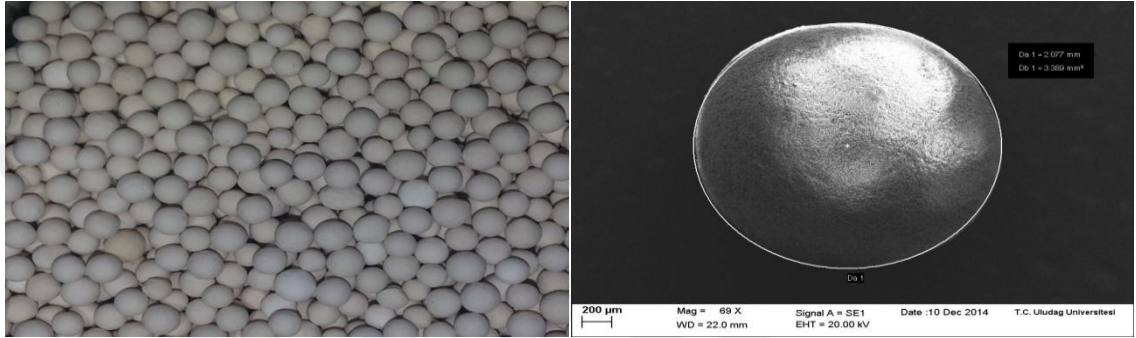


Şekil 3.8. Turuncu Silikajel ve SEM görüntüsü

Aktif Alüminanın Özellikleri

Çizelge 3.6. Aktif alümina özellikleri

Fiziksel Özellikler	Aktif alümina
Boyut (mm)	1.4-2.8
Yoğunluk (kg/m ³)	753
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	0.166
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	0,350



Şekil 3.9. Aktif alümina ve SEM görüntüsü

Zeolitin Özellikleri

Çizelge 3.7. Zeolit özellikleri

Fiziksel Özellikler	Zeolit
Boyut (mm)	2,5-5
Yoğunluk (kg/m ³)	720
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	-
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	-

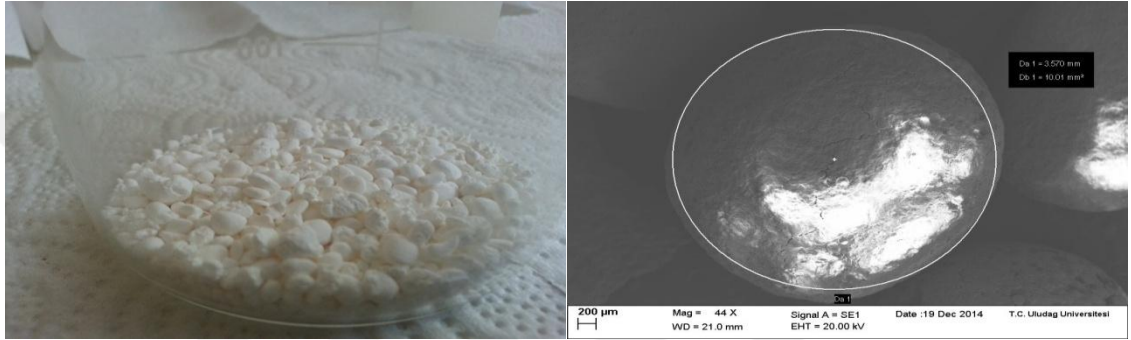


Şekil 3.10. Zeolit ve SEM görüntüsü

Polimerin Özellikleri

Çizelge 3.8. Polimer özellikleri

Fiziksel Özellikler	Polimer alümina
Boyut (mm)	0,6-2,5
Yoğunluk (kg/m ³)	500
Mikro Gözenek Hacmi(m ³ /kg)	-
Spesifik Yüzey Alanı (m ² /kg)	-



Şekil 3.11. Laboratuvar ortamında üretilen polimer ve SEM görüntüsü

3.3. DeneYlerde Kullanılan Adsorbatlar ve Özellikleri

DeneYlerde adsorbat olarak R134a ve R404a kullanılmıştır. Bu soğutucu akışkanların kullanımındaki temel farklılık, R404a ile daha düşük sıcaklıklarda deney yapabilmek imkanı varken, R134a ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir.

R134a Özellikleri



Şekil 3.12. DeneYlerde kullanılan R134a tüpü

Çizelge 3.9. R134a soğutucu akışkanının özellikleri

Özellikler ve Parametreler	R-134a
Moleküler Ağırlık (MW)	102.03
1 atm'de Kaynama Noktası (T_b)	-26.06 °C
Kritik Sıcaklık (T_c)	101.08 °C
Kritik Basınç (P_c)	4059kPa
Kritik Yoğunluk (kg/m^3)	515.3 kg/m^3
Sıvı yoğunluğu 25°C(kg/m^3)	12100
Isı iletim katsayısı,25°C sıvı(W/mK)	0,0824
Van Der Walls Hacmi (b)	0.0009390
normal kaynama noktasındaki doymuş sıvının özgül hacmi $v_b(\text{kg/m}^3)$	0.0007260
Adsorbe edilen fazın $T=0^\circ\text{C}$ 'de özgül hacmi $v_0 (\text{m}^3/\text{kg})$	0.0007657
Ω	0.002018
Ozon delme potansiyeli(ODP)	0
Küresel ısınmaya etkisi(GWP)	1300

R404a Özellikleri



Şekil 3.13. Deneysel olarak kullanılan R404a tüpü

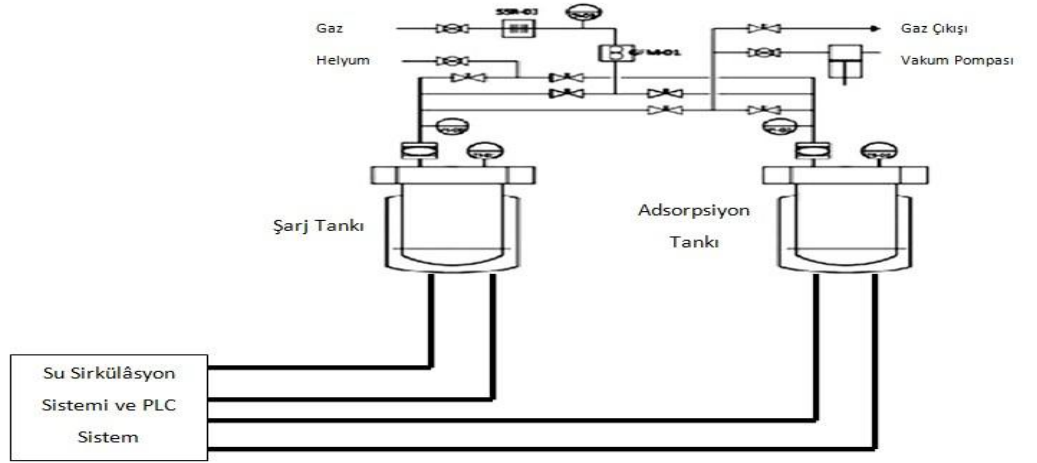
Çizelge 3.10. R404a soğutucu akışkanının özellikleri

Özellikler ve Parametreler	R-404a
Moleküler Ağırlık (MW)	97.60
1 atm'de Kaynama Noktası (T_b)	-46.45 °C
Kritik Sıcaklık (T_c)	72.07 °C
Kritik Basınç (P_c)	3729kPa
Kritik Yoğunluk(kg/m^3)	484.5 kg/m^3
Sıvı yoğunluğu 25°C(kg/m^3)	1048
Isı iletim katsayısı,25°C sıvı(W/mK)	0,0394
Van Der Walls Hacmi (b)	0.0009857
normal kaynama noktasındaki doymuş sıvının özgül hacmi $v_b(\text{kg/m}^3)$	0.0007655
Adsorbe edilen fazın $T=0^\circ\text{C}$ 'de özgül hacmi $v_0 (\text{m}^3/\text{kg})$	0.0008445
Ω	0.002125
Ozon delme potansiyeli(ODP)	0
Küresel ısınmaya etkisi(GWP)	3260

3.4.Kullanılan Deney Sisteminin Tanıtılması

Yapılan çalışmada ilk aşamada sistemin tanınması, performansı ve kontrolleri üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Genel olarak adsorpsiyon cihazının bölümleri şu şekilde ayrılabilir;

- Adsorpsiyon bölümü
- Sirkülasyon bölümü
- Soğutma bölümü



Şekil 3.14. Adsorpsiyon ünitesinin şeması görünüşü

Deneyin yapılması, deneyin kontrol edilmesi ve verilerin kayıt edilmesi için ise çeşitli ekipmanlar kullanılmıştır. Kullanılan ekipmanlar şunlardır;

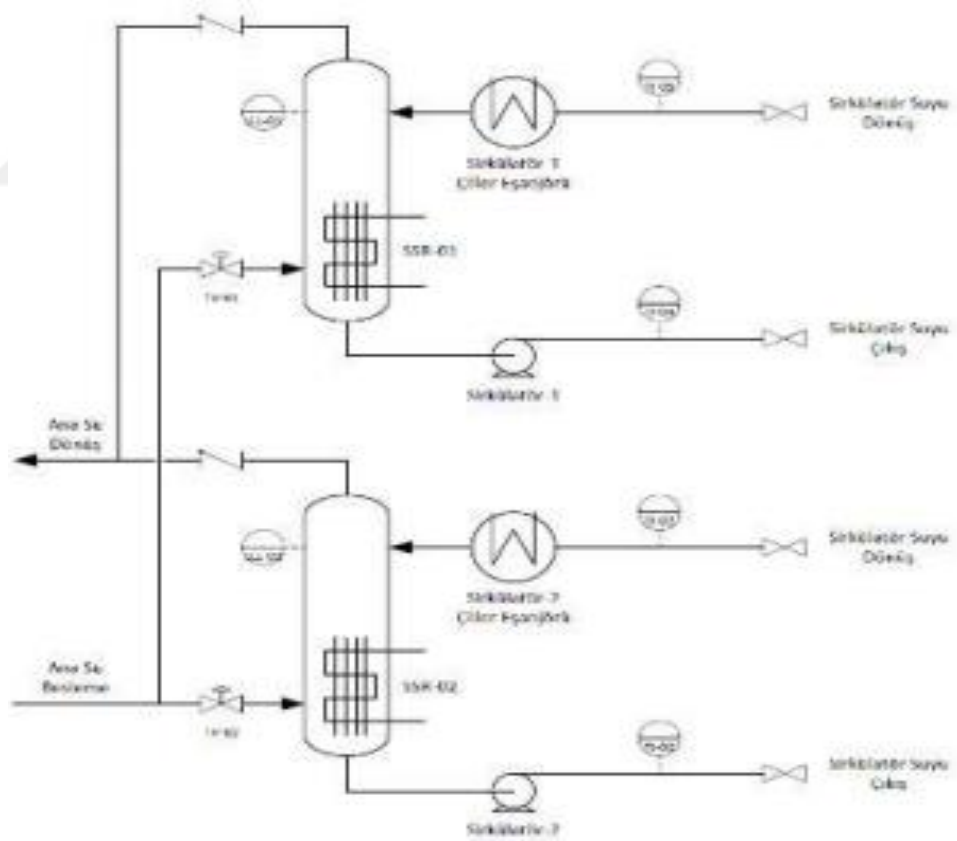
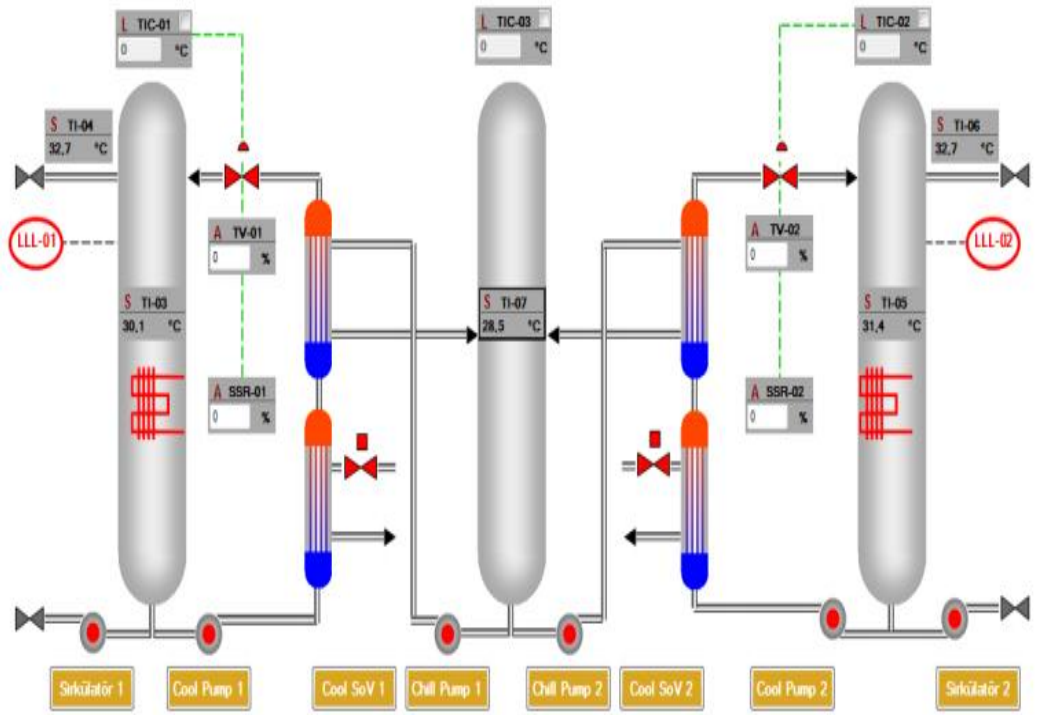
- Soğutma ve Isıtma Sistemi (Su sirkülasyon sistemi)
- Depolama tankı,
- Adsorpsiyon tankı,
- Basınç ölçer,
- Termometreler,
- Doğrudan sıcaklık ölçümü için ayrı sensörler,
- Vakum pompası,
- Test sistemini kontrol etmek ve verileri kaydetmek için bilgisayar.

Basınç ölçümü için kullanılan basınç ölçerlerde, yapılan ölçümler için yaklaşık %0.2'lik bir hata payı bulunmaktadır (0 MPa-1.6 MPa). Sıcaklık ölçümü için kullanılan termometrelerde ise yapılan ölçümlerde % 0.2'lik bir hata payı bulunmaktadır.

Adsorbentler için doğrudan sıcaklık ölçümünde kullanılan sensörlerde ise % 0,2'lik bir hata payı bulunmaktadır.

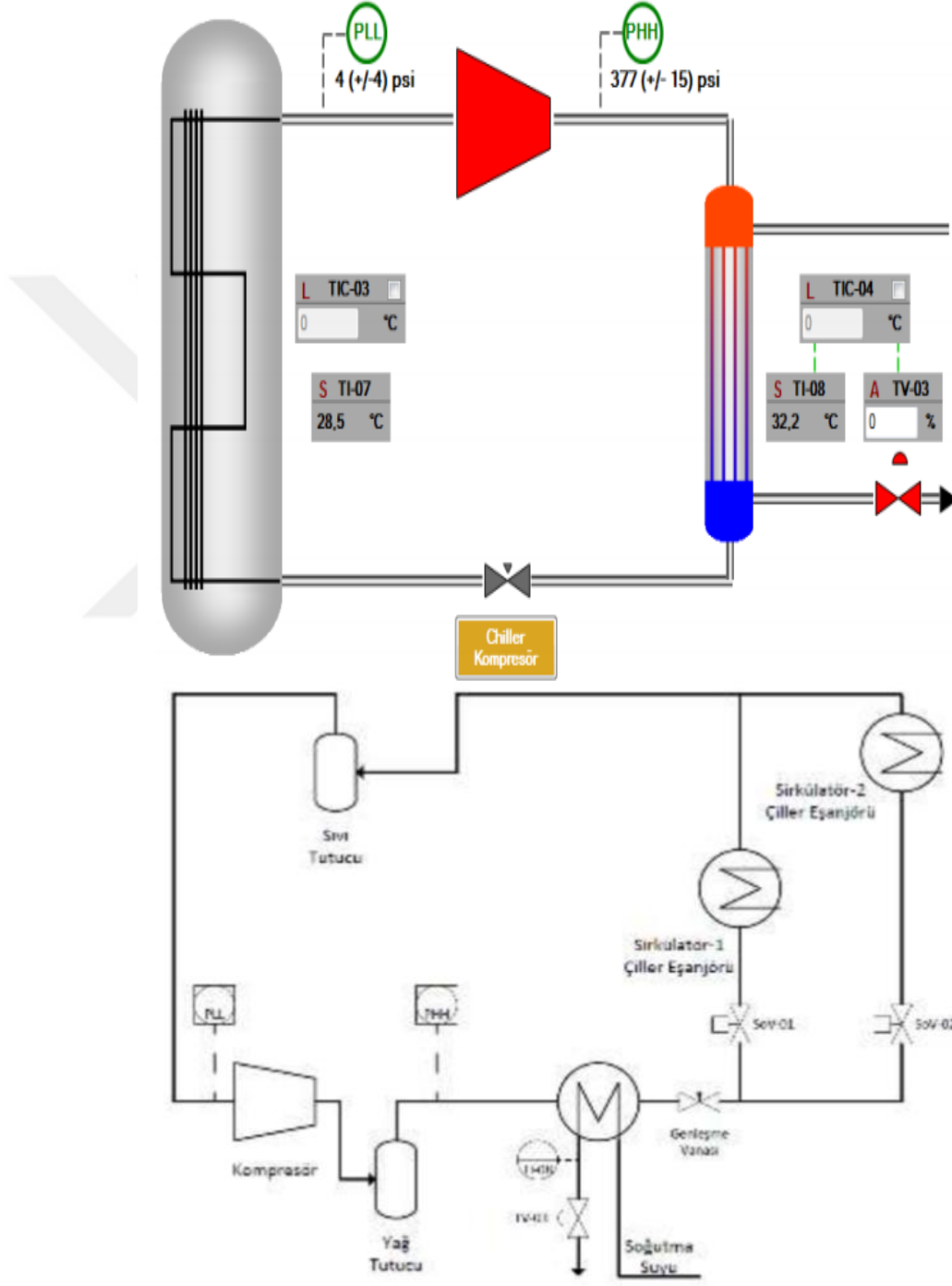
Adsorpsiyon kısmı genel olarak adsorpsiyon olayının gerçekleştirildiği kısımdır. Bu kısımda 2 adet depolama kabı bulunmaktadır. Bu depolama kaplarından birine adsorbent malzeme koyulmaktadır. Diğer kaba ise adsorbat gaz depolanmaktadır. Bu iki sistemin boşaltılması, vakumlanması, yüklenmesi ve birleştirilmesi aradaki vanalar sayesinde gerçekleştirilebilmektedir.

Adsorpsiyonun gerçekleşmesi amacı ile sistemin istenilen sıcaklıklara gelmesini sağlayan en önemli bölümlerden birisi de sirkülasyon bölümüdür. Sistemde bulunan soğutma kompresörü ve ısıtıcı rezistanslar yardımı ile, sirkülasyon işlemini sağlayan pompalar kullanılarak, adsorpsiyon bölümü, ayarlanan sıcaklık değerine ulaştırılabilmektedir.



Şekil 3.15. Sirkülasyon bölümü ve şematik tanımı

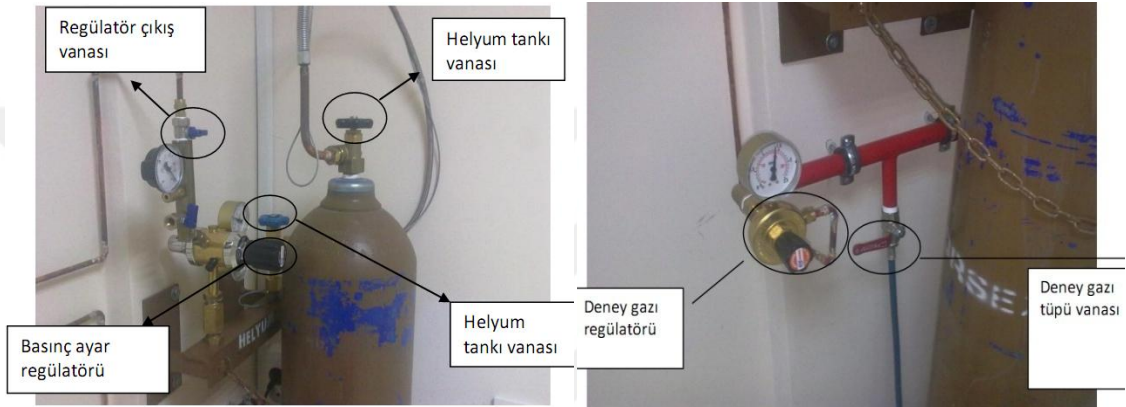
Soğutma bölümü ise şebeke suyunun sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta çalışmak istediğimizde genel olarak devreye sokulan bölümdür. Bu bölüm, kompresör sayesinde sirkülasyon suyunu soğutmaktadır. Şebekeden gelen ve soğutulan su ise sirkülasyon suyunu eşanjörler sayesinde soğutmaktadır. Böylelikle düşük sıcaklıklarda deney yapma imkânına ulaşılabilmektedir.



Şekil 3.16. Soğutucu bölümü ve şematik tanımı

Ayrıca bu çalışmada gazları adsorpsiyon ünitesine iletebilmek için gaz tesisatı kurulmuştur. Gaz tesisatında, helyum ve adsorbat olarak kullanılan soğutucu akışkan tüpleri bulunmakta ve kurulan tesisat ile adsorpsiyon ünitesine iletilmektedir.

Portatif imal edilen adsorbat tankının değiştirilmesi ile amonyak, R134a ve diğer HFC tipi sistemde vakum gereksinimi yaratmayan soğutucu akışkanlar deney düzeneğinde test edilebilmektedir. Soğutucu akışkanlar, adsorbat tankında yüksek basınçlar altında depolandığından, basınç regülatörü kullanılarak istenen test basınçları sağlanmaktadır.



Şekil 3.17. Gaz tesisatının bölümleri

Sistemde adsorbent malzemeyi koymak için özel olarak üretilmiş olan adsorbent dolum yataklarının bulunduğu adsorbent yatak ve deney için gerekli olan ve adsorbentın bulunduğu tanka aktarılacak gazı depolamayı ve şartlamayı gerçekleştiren adsorbat şarj tankı, bulunmaktadır.



Şekil 3.18. Adsorbentın adsorpsiyon ünitesi içine yerleştirilmesi

Farklı adsorbent malzemelerin test edilebilmesi için, adsorbent yatak ve şarj kolaylıkla takılıp sökülebilir şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.19. Gazın depolandığı ve adsorpsiyonun gerçekleştiği tanklar

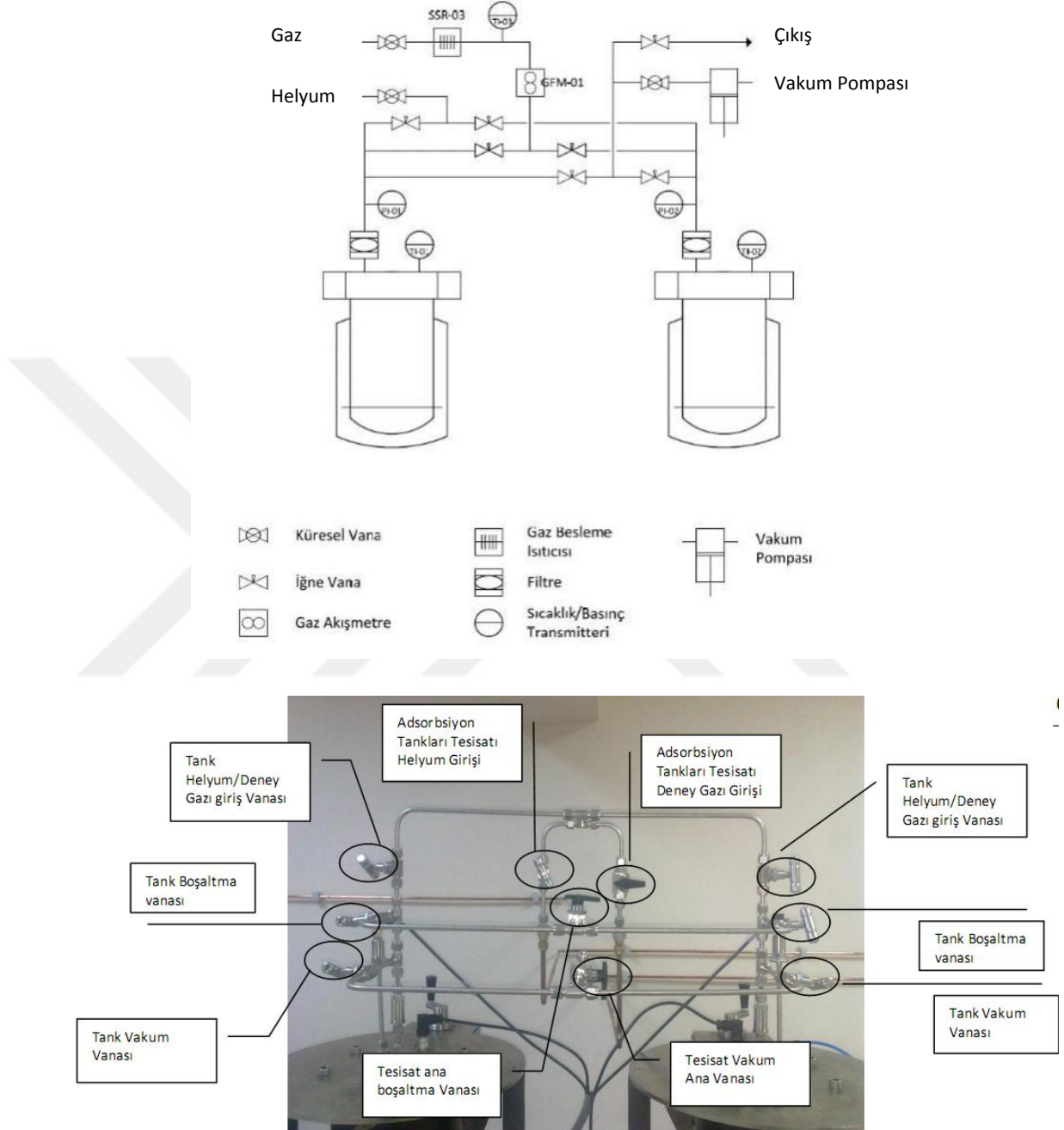
Sabit sıcaklık şartının sağlanabilmesi için, içerisine glikol eklenmiş su, bir pompa ile adsorpsiyon ünitesinden adsorpsiyon ve şarj tankına basılmakta ve tankın çeperinden sirkülasyon sağlanmaktadır. Böylelikle tanklar istenen sıcaklığa şartlandırılmaktadır. Suyun ısıtılması için adsorpsiyon ünitesinde bulunan rezistanslar, soğutulması içinde chiller ünitesi kullanılmaktadır.



Şekil 3.20. Sirkülasyon suyunun sıcaklığını ayarlayan ve plc sisteminin bulunduğu adsorpsiyon ünitesi

Adsorbat gaz, çeyrek inç kalınlığında 1 cm çapındaki borular ile, su ise çeyrek inç kalınlığında 2 cm çapındaki borular ile taşınmaktadır. Test düzeneğindeki her bir

ekipmanın boru hattı üzerinden kolaylıkla değiştirilebilmesi için sistem ekipmanlarının giriş ve çıkışlarında vanalar kullanılmaktadır.



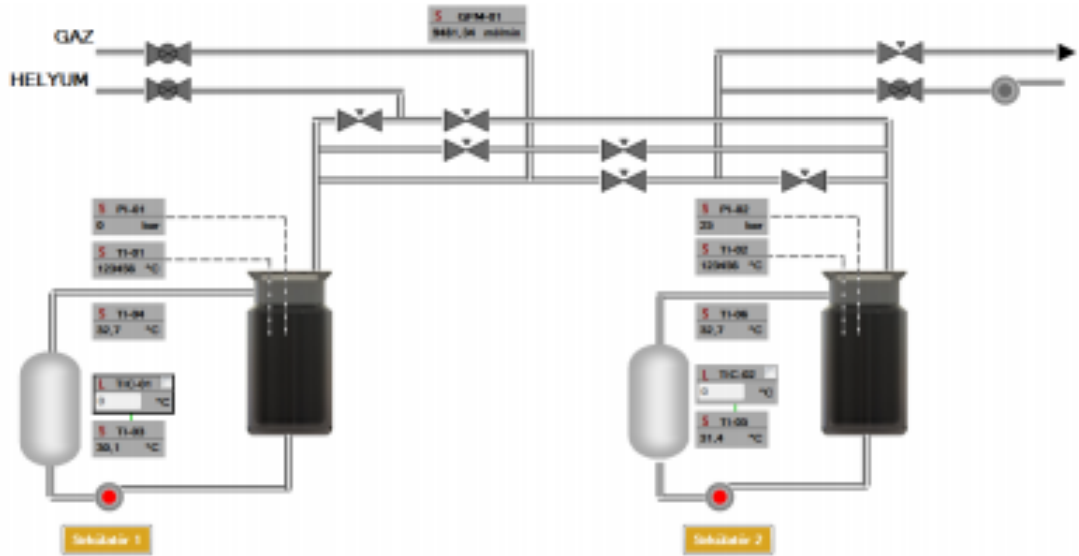
Şekil 3.21. Gazın depolandığı tankta ve adsorpsiyon tankında bulunan vanalar

Test düzeneğinin hava veya su buharı gibi gazlardan arındırılması, adsorbentin de adsorbattan tamamen arındırılması ve sistemde kullanılacak adsorbattın yeniden depolanabilmesi için vakum pompası kullanılmaktadır.



Şekil 3.22. Adsorpsiyon tankının içinde kalan gazların boşaltılması için kullanılan vakum pompası

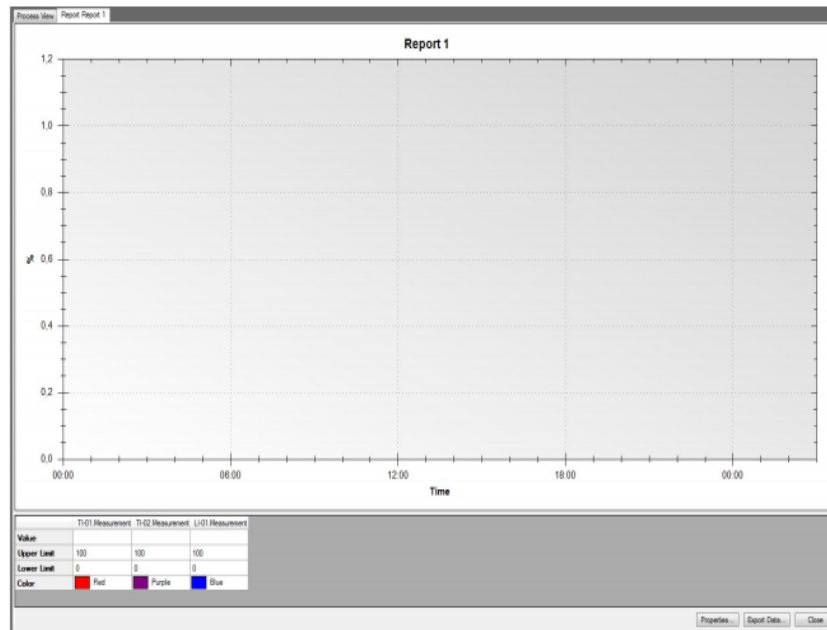
Adsorplanan gaz kütlesi, şarj tankındaki sıcaklık ve basınç değişimi kayıt altına alınarak hesaplanabilmektedir (Şarj tankı sabit hacimdir). Adsorbent yatak içindeki sıcaklık dağılımı farklı noktalara konumlandırılan sıcaklık ölçerler tarafından ölçülmektedir. Adsorbent yatak ve şarj tankının basınçları basınç sensörleri kullanılarak, sıcaklıkları ise 2 adet sıcaklık sensörü ile ölçülmekte ve sonuçlar izlenip sürekli olarak kayıt altına alınmaktadır. Test düzeneğinde, suyun adsorpsiyon sistemindeki, tanktaki sıcaklığı ve basıncının ölçülmesi için de sıcaklık ölçer ve basınç ölçer kullanılmaktadır. Sistem, sürekli kayıt altında tutulabilmekte ve izlenebilmektedir.



Şekil 3.23. Adsorpsiyon işlemi için sıcaklıkların ayarlandığı kontrol ekranı

Sistemin hazırlanması ve adsorpsiyon işleminin takibi için sistemde kayıt ekranı bulunmaktadır. Bu kayıtlar bilgisayar ile takip edilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir. Kayıt sisteminde, adsorpsiyon sisteminin her bölümü grafiksel olarak gözlemlenebileceği gibi sıcaklık değişimleri, basınç değişimleri ve bu esnada geçen sürelerin de kayıtları tutulabilmektedir. İstenildiği takdirde çıktı olarak alınabilmekte ve excel formatında inceleme yapmak üzere kayıt yapılabilmektedir.

Selected	Field Name	Lower Limit	Upper Limit	Color
<input checked="" type="checkbox"/>	TI-01.Measurement	0	100	Red
<input type="checkbox"/>	TI-02.Measurement	0	100	Purple
<input type="checkbox"/>	LJ-01.Measurement	0	100	Blue
<input type="checkbox"/>	FI-01.Measurement	0	12	Green
<input type="checkbox"/>	FV-01.Set Value	0	100	Gray
<input type="checkbox"/>	FV-01.Realtime Value	0	100	Chocolate
<input type="checkbox"/>	LV-01.Set Value	0	100	YellowGreen
<input type="checkbox"/>	LV-01.Realtime Value	0	100	Olive
<input type="checkbox"/>	Heater.Set Value	0	100	DarkKhaki



Şekil 3.24. Adsorpsiyon ünitesinde gerçekleşen deneylerdeki değerlerin izlendiği, kontrol edildiği ve kayıt altına alındığı kayıt ekranı

Hata Analizi

Deneysel olarak gerçekleştirilen basınç ve sıcaklık ölçümleri için hata oranları Gauss hata teoremi ile hesaplanabilir. Bu kurala göre eğer sonuç (r), her bir veri (x_n) için R=f(x₁,x₂,x₃...x_n) fonksiyonuna göre açıklanacaksa;

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2}$$

olarak açıklanabilir. Burada w_n, n. bağımsız değişkenin hata payıdır.

Kullanılan ekipmanların hata oranları aşağıdaki gibidir;

- Termometrenin hata payı: Sıcaklık ölçümü için %0,2'dir. Yapılan ölçümlerde yaklaşık ±0,1 °C'dir. (e1)
- Basınçölçerin hata payı: basınç ölçümleri için %0,15'tir. Yapılan ölçümlerde yaklaşık ±0,0075 bardır. (e2)
- Veri kaydedici sistemin hata payı: Sıcaklık için ±0,02 °C ve basınç için 0,00015 bardır. (e3)
- Bağlantılardan kaynaklanan hatalar: Sıcaklık için ±0,1 °C ve basınç için 0,0001 bardır. (e4)
- Adsorbent kütlesinin ölçümünden kaynaklanan hatalar: ±2 mg'dır. (e5)
- Adsorpsiyon kaplarının hacimlerinin ölçümünden kaynaklanan hatalar: ±2 ml'dir. (e6)

Aşağıda sıcaklık ve basınç ölçümlerindeki toplam hatalar hesaplanmıştır. Gauss hata teoremine göre sıcaklık için;

$$w_s = [(e1)^2 + (e3)^2 + (e4)^2]^{\frac{1}{2}} = [(0,1)^2 + (0,02)^2 + (0,1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$w_t = \pm 0,143 \text{ °C hata payı hesaplanmıştır.}$$

Basınç için;

$$w_b = [(e2)^2 + (e3)^2 + (e4)^2]^{\frac{1}{2}} = [(0,0075)^2 + (0,00015)^2 + (0,0001)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$w_b = 0,0075 \text{ bar hata payı hesaplanmıştır.}$$

Adsorpsiyon oranı, c için EES programı kullanılarak yapılan hata hesaplamalarında, hata oranı %2'yi geçmemektedir. Adsorpsiyon oranı hata hesaplamalarında değişkenler

olarak sıcaklık ve basınca bağılı olan adsorbatın özgül hacmi v_o için hata payı, şarj ve adsorpsiyon kaplarının hacminin (V_1 ve V_2) ölçümündeki hata payı, adsorbentın kütlelerinin tartılmasındaki hata payı hesaba katılmıştır. Ayrıca yine izosterik adsorpsiyon ısısı Q_{ads} için EES programı kullanılarak hata oranı %0,3'ü geçmediği görülmüştür.. İzosterik adsorpsiyon ısısı hata hesaplamalarında değişkenler olarak hesaplamaların yapıldığı sıcaklık (T) ve adsorpsiyon oranı (c) hesaba katılmıştır.



Çizelge 3.11. Deney tesisatında ölçüm noktaları ve elemanları

Eleman İsmi	Ekran Şekli	Kod	Sinyal Tipi	Modül	I/O
Kap-1 Sıcaklığı	TAG	TI-01	PT-100	SM1231 RTD	Input
Kap-2 Sıcaklığı	TAG	TI-02	PT-100	SM1231 RTD	Input
Besleme Sıcaklığı	TAG	TI-03	PT-100	SM1231 RTD	Input
Sirkülatör-1 Çıkış	TAG	TI-04	PT-100	SM1231 RTD	Input
Sirkülatör-1 Dönüş	TAG	TI-05	PT-100	SM1231 RTD	Input
Sirkülatör-2 Çıkış	TAG	TI-06	PT-100	SM1231 RTD	Input
Sirkülatör-2 Dönüş	TAG	TI-07	PT-100	SM1231 RTD	Input
Chiller Kondenser	TAG	TI-07	PT-100	SM1231 RTD	Input
Kap-1 Basıncı	TAG	PI-1	AI(0-10V)	SM1231	Input
Kap-2 Basıncı	TAG	PI-2	AI(0-10V)	SM1231	Input
Gaz Debi Metre	TAG	GFM-01	AI(0-5 V)	SM1231	Input
Presostat	LED	PHH	DI	CPU 1214 C	Input
Presostat (Alçak)	LED	PLL	DI	CPU 1234 C	Input
Seviye Anahtarı-1	LED	LLL-01	DI	CPU 1214 C	Input
Seviye Anahtarı-2	LED	LLL-02	DI	CPU 1214 C	Input
Klima Kompresörü	TAG	Kompresör	DO	CPU 1214 C	Output
Sirkülatör-1 Solenoid	Push Button	So V-01	DO	CPU 1214 C	Output
Sirkülatör-2 Solenoid	Push Button	So V-02	DO	CPU 1214 C	Output
Sirkülatör-1 Pompa	Push Button	Sirkülatör-1	DO	CPU 1214 C	Output
Sirkülatör-2 Pompa	Push Button	Sirkülatör-2	DO	CPU 1214 C	Output
Vakum Pompası	Push Button	Vakum	DO	CPU 1214 C	Output

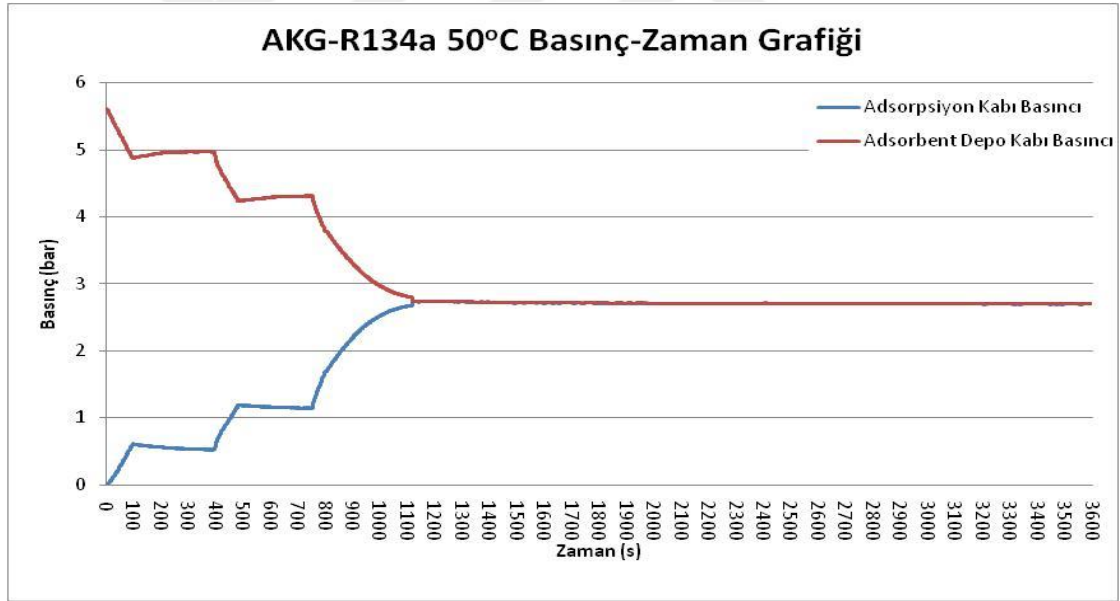
Isitici-1	TAG	SSR-01	DO	CPU 1214 C	Output
Isitici-2	TAG	SSR-02	DO	CPU 1214 C	Output
Hat Isitici	TAG	SSR-03	DO	CPU 1214 C	Output
Soğutma Vanası-1	TAG	TV-01	AO (0-5VDC)	SM1232	Output
Soğutma Vanası-2	TAG	TV-02	AO (0-5VDC)	SM1232	Output
Soğutma Vanası-3	TAG	TV-03	AO (0-5VDC)	SM1232	Output



3.5. Deney Prosedürü ve Deneyin Yapılışı

Deneyde farklı adsorbent-adsorbat çiftlerinin adsorpsiyon karakteristiklerini belirlemek amacı ile farklı prosedürler ve farklı sıcaklıklar kullanılmıştır. Farklı prosedürler için her bir deneyden önce yapılan hazırlık aşamaları aynı olup deney esnasındaki prosedürler ve deneyi sonlandırma işlemleri farklılık göstermektedir.

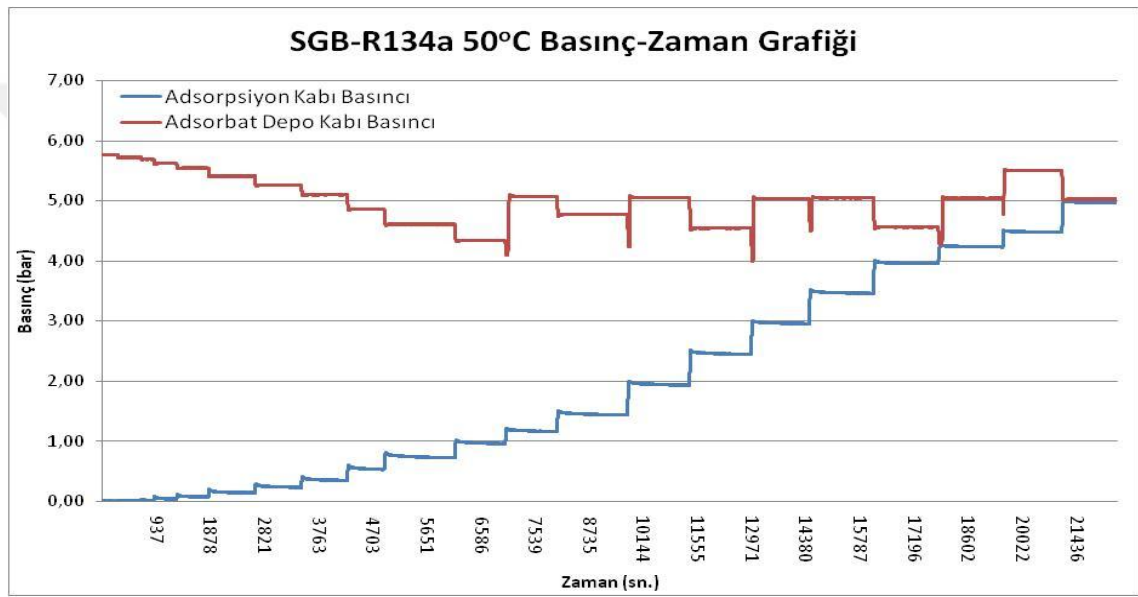
Deneyler iki prosedür ile gerçekleştirilmiştir. Birinci prosedürde adsorpsiyon kabına adsorbat malzeme aktarımı, her iki kapta basınç dengeleninceye kadar sıcaklık değişimi göz önünde bulundurularak, sürekli olarak devam etmektedir. Deney sisteminde aktarım esnasında kaplardaki sıcaklık değişimi olmaması ve kapların deney sıcaklığında kalması sağlanmaktadır. Eğer deney sıcaklığından daha düşük ve yüksek sıcaklıklara ulaşırsa vanalar kapatılmakta ve kapların sıcaklığının tekrar deney sıcaklığına ulaşması için beklenmektedir. Bu durum deney sıcaklıkları için farklılık göstermektedir.



Şekil 3.25. Birinci prosedürün uygulanması esnasındaki zaman-basınç değişim grafiği

İkinci prosedürde ise adsorbent malzemenin bulunduğu kabın sabit sıcaklıkta 5 bar basınca gelmesi hedeflenmiştir. Bunun için ilk aşamada gaz deposu kabı 5 bara getirilmiş ve malzeme kabının 0 barda olması sağlanmıştır. Ardından adsorbat gazın belirli basınç aralıkları ve belirli bekleme süreleri ile malzeme tarafına aktarılması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen bekleme, sıcaklık-basınç değerlerinin tam olarak okunması ve kararlı duruma geçmesi içindir. Bu deney prosedüründe de

aktarım esnasında, kaplardaki sıcaklık değişiminin olmaması ve kapların deney sıcaklığında kalması sağlanmıştır. Yapılan aktarımlarla en son durumda adsorpsiyon bölümündeki her iki kabın 5 bar olması sağlanmıştır. Yapılan deneylerde her bir basınç kademesinde bekleme gerçekleştirildiği için her bir kademedeki, kullanılan malzemelerin adsorplama işlemlerini tamamlaması ve sıcaklık-basınç değerlerinin kararlı hale geçmesi sağlanmıştır. Böylece sabit sıcaklıkta ve her bir basınç kademesinde adsorplama miktarı karşılaştırılabilmiştir. Yapılan deney prosedürlerinin zaman-basınç değişimini gösteren grafikler aşağıdadır.



Şekil 3.26. İkinci prosedürün uygulanması esnasındaki zaman-basınç değişim grafiği

3.5.1. Deney Hazırlık İşlemleri

Deney hazırlık işlemleri, deney işlemleri ve deney sonrası işlemler için aşağıdaki ekipmanlar kullanılmıştır.

- a) Kurutucu Fırın
- b) Adsorpsiyon Ünitesi
- c) Gaz Dağıtım Sistemi
- d) Vakum Ünitesi
- e) Hassas Terazi
- f) Adsorpsiyon Yatağı

Ekipmanlar için gerekli kontroller her deneyden önce gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deney aşamaları kısaca açıklanmıştır.

1) Malzemelerin adsorpsiyon yataklarına koyulması

Adsorpsiyon performansı değerlendirilecek olan adsorbent malzeme adsorpsiyon yataklarına yerleştirilmiştir. Adsorpsiyon yatakları 6 adet olup tüm adsorpsiyon yatakları adsorbent malzeme ile doldurulmuştur.



Şekil 3.27. Deneylerde kullanılan adsorbent yataklar

2) Hücrelerin ağırlıklarının tartılması

Yatakların üretiminden sonra her bir yatak seti (3 adet yatak konstrüksiyonu, 2 adet tel levha, 4 adet civata ve 4 adet somun) hassas terazi ile tartılmış olup daraları not edilmiştir. Her bir deneyden önce adsorbent malzeme ile doldurulan adsorpsiyon yatağı hassas terzi ile tartılmıştır ve yatağın darası toplam ağırlıktan çıkarılarak sisteme deney için koyulacak adsorbent malzemenin toplam ağırlığı kayıt altına alınmıştır.

3) Hücrelerin fırında kurutulması

Adsorbent malzeme ile doldurulmuş olan adsorpsiyon yatakları kurutucu fırında kurutulmuştur. Kurutucu sıcaklığı yaklaşık 120 °C'de sabitlenmiş olup yataklar 8 saat boyunca kurutucu fırın içinde kalması sağlanmaktadır.



Şekil 3.28. Adsorbent maddelerin kurutulması için kullanılan kurutucu fırın

4) Hücrelerin adsorpsiyon kabına yerleştirilmesi

Kurutma fırınından sonra adsorpsiyon yatakları fırından alınıp hiç bekletilmeden adsorpsiyon kabına yerleştirilmektedir. Adsorpsiyon yataklarının yerleştirilme şekli aşağıdaki şekil 3.5.'de görülmektedir. Adsorpsiyon kabına yerleştirilmeden önce 2 adet adsorpsiyon yatağı konstrüksiyonu adsorpsiyon kabının en altına yerleştirilmektedir. Bunun nedeni adsorpsiyon yataklarında bulunan adsorbent adsorbat malzeme ile daha rahat buluşmasını sağlamaktır.



Şekil 3.29. Yataklara koyulmuş olan adsorbent maddelerin adsorpsiyon kabına yerleştirilmesi

5) Malzemenin koyulduğu ve gazın depolanacağı adsorpsiyon kaplarının vakumlanması

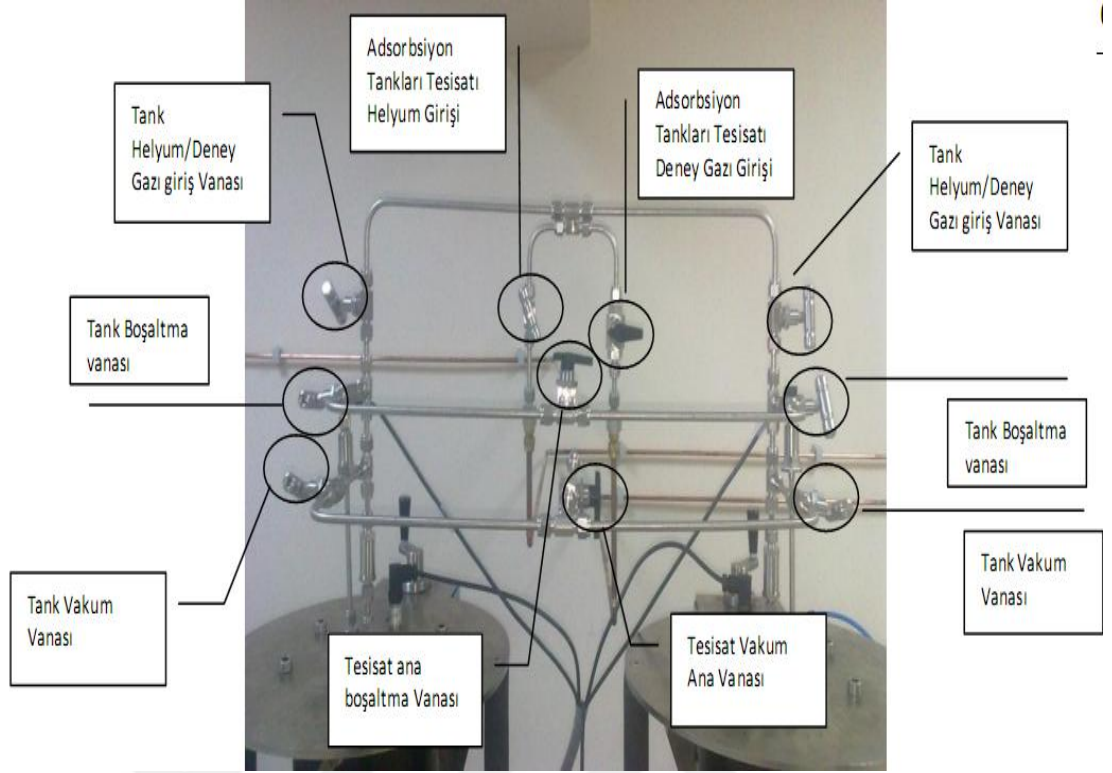
Adsorbent maddenin bulunduğu adsorpsiyon yatakları adsorpsiyon kabına yerleştirildikten sonra adsorpsiyon kabı ve gazın depolandığı kap vakum altına alınmaktadır. Vakumlama 0 bar oluncaya kadar devam etmektedir. Vakumlama vakum pompası yardımı ile gerçekleştirilmektedir.



şekil 3.30. Adsorpsiyon kabının vakumlanması için kullanılan vakum pompası

6) Tüm vanaların kapatılması

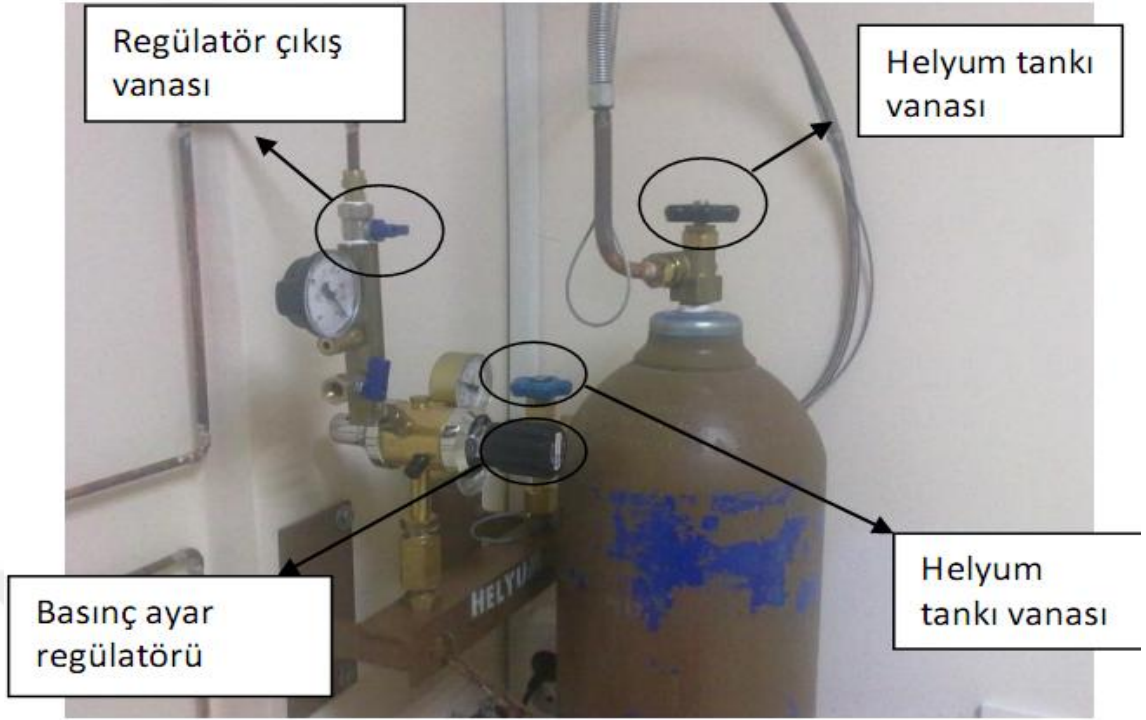
Vakumlama işlemi gerçekleştirildikten sonra iki kap arasındaki vanalar, vakum vanası, boşaltma vanası ve dolum vanalarının kapalı olduğu kontrol edilir, açık olan vanalar kapatılır. Sistemin vakum altında belirli bir süre beklemesi sağlanır.



Şekil 3.31. Adsorbat gazın ve adsorbent malzemenin bulunduğu kaplar arasındaki vanalar

7) Adsorpsiyon ünitesi kaplarına helyum basmak için kapların vanaların açılması ve helyum basılması

Vakum altında belirli bir süre beklenildikten sonra adsorpsiyon ünitesinin her iki kabı da helyum ile doldurulur. Helyum basıncı 6 barda sabit tutulur. Bu basınç altında yaklaşık 15 dakika sistemin helyum gazı ile beklenilmesi sağlanır.



Şekil 3.32. Gaz aktarım sistemi-Helyum gazı ve Adsorbat gaz

8) Adsorpsiyon ünitesi kaplarından helyumun boşaltılması ve kabın vakumlanması

Adsorpsiyon ünitesi kapları 15 dakika 6 barlık helyum ile bekletildikten sonra helyum gazı önce boşaltma vanası ile boşaltılmaktadır. Ardından vakum pompası kullanılarak her iki kaptan 0 bara gelmesi sağlanmakta ve bir sonraki aşama için bekletilmektedir.

9) Gazın depolanacağı kabın 20°C'ye ve malzemenin bulunduğu adsorpsiyon kabının 55°C'ye set edilmesi ve en az 8 saat bekletilmesi

Her iki kaptan vakum altına alındıktan sonra bilgisayar programı yardımı ile gazın depolanacağı kap 20°C'ye ve adsorpsiyon yatağının bulunduğu kap ise 55°C'ye ayarlanmaktadır. Bu durumda sistem 8 saat bekletilmektedir.

10) Adsorpsiyon ünitesi kaplarının tekrar vakumlanması

Set edilen sıcaklıklarsa sistem 8 saat bekletildikten sonra adsorpsiyon kaplarında hiçbir yabancı gazın kalmaması için vakum pompası ile kaplar tekrar vakumlanır.

11) Adsorpsiyon ünitesi kaplarının tekrar helyum ile doldurulması

Vakumlanan kaplara tekrar helyum doldurulur. Yine bu helyum 6 bar basınçta ve 15 dakika sürede kaplar içerisinde bekletilir.

12) Adsorpsiyon ünitesi kaplarının vakumlandırılması

Helyum boşaltma işleminin gerçekleştirilmesinin ardından kapların içerisinde hiçbir gazın kalmaması için vakumlama işlemi yapılır. Böylece tüm sistem temizlenmiş bir şekilde deney yapılmasına uygun hale getirilir.

13) 20 °C'ye ayarlanan gaz deposu kabının (Boş olan kabın) adsorbat gaz ile 5 bar basınca kadar doldurulması

Temizlenmiş adsorpsiyon ünitesi kaplarından gaz depolama kabına adsorbat gaz tankından gaz depolanması yapılır. Bu depolama işlemi kap toplam 5 bar oluncaya kadar ve saniyede yaklaşık 0.1 bar yükselecek şekilde adsorbat gaz vanası ve ana tank vanası açılarak gerçekleştirilir. 5 bar olunca tüm vanalar kapatılır ve sistem deney sıcaklığına gelinceye kadar tekrara beklenilir.



Şekil 3.33. Kullanılan adsorbat gazlar

3.5.2. Birinci Deney Prosedürü

İlk deney prosedüründe seçilen adsorbent malzemeler ile adsorbat olarak soğutucu akışkan olan R134a kullanılmıştır. Bu prosedürde sabit sıcaklıkta deneyin gerçekleşmesine dikkat edilmiş olup, tüm deney boyunca verilerin hepsi kayıt altına alınmıştır. Burada deneyler genel olarak (Adsorbent malzemeye göre farklılık sıcaklık değerlerinin seçildiği durumlar da mevcuttur.) 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde 10 °C için farklı prosedür uygulanmış olup, R134a'nın yoğuşma basıncı ve sıcaklığı dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.12. Birinci deney prosedüründe kullanılan adsorpsiyon çiftleri

NO	Kullanılan Malzeme	Kullanılan Gaz	Deney Prosedürü
1	Granüllü Aktif Karbon	R-134a	1.prosedür
2	Mavi Silikajel	R-134a	1.prosedür
3	Beyaz Silikajel	R-134a	1.prosedür
4	Turuncu Silikajel	R-134a	1.prosedür
5	Pellet Aktif Karbon	R-134a	1.prosedür
6	Zeolit	R-134a	1.prosedür
7	Aktif Alümina	R-134a	1.prosedür
8	Polimer	R-134a	1.prosedür

Birinci deney prosedüründe aşağıdaki işlemler uygulanmıştır;

1) Sistem ile ilgili deney sıcaklıklarının ayarlanması

Deneyler ağırlıklı olarak 5 farklı sıcaklık değerlerinde yapılmıştır. Bu sıcaklık değerleri 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C'dir. Deneye başlamadan önce adsorbat malzemenin bulunduğu gaz depolama kabı 5 bar basınca getirilmektedir. Bu basınç deneyin uygulanacağı sıcaklık değeri içindir. Bununla birlikte R134a için 10 °C sıcaklıkta kullanılan adsorbat malzemede yoğuşma riski mevcuttur. Bu sebepten dolayı R134a'nın adsorbat malzeme olarak kullanıldığı deneylerde diğer sıcaklıklardan farklı olarak 10 °C sıcaklıktaki deneyin yapılışı biraz farklılık göstermektedir.

a) 20 °C - 30 °C - 40 °C -50 °C için,

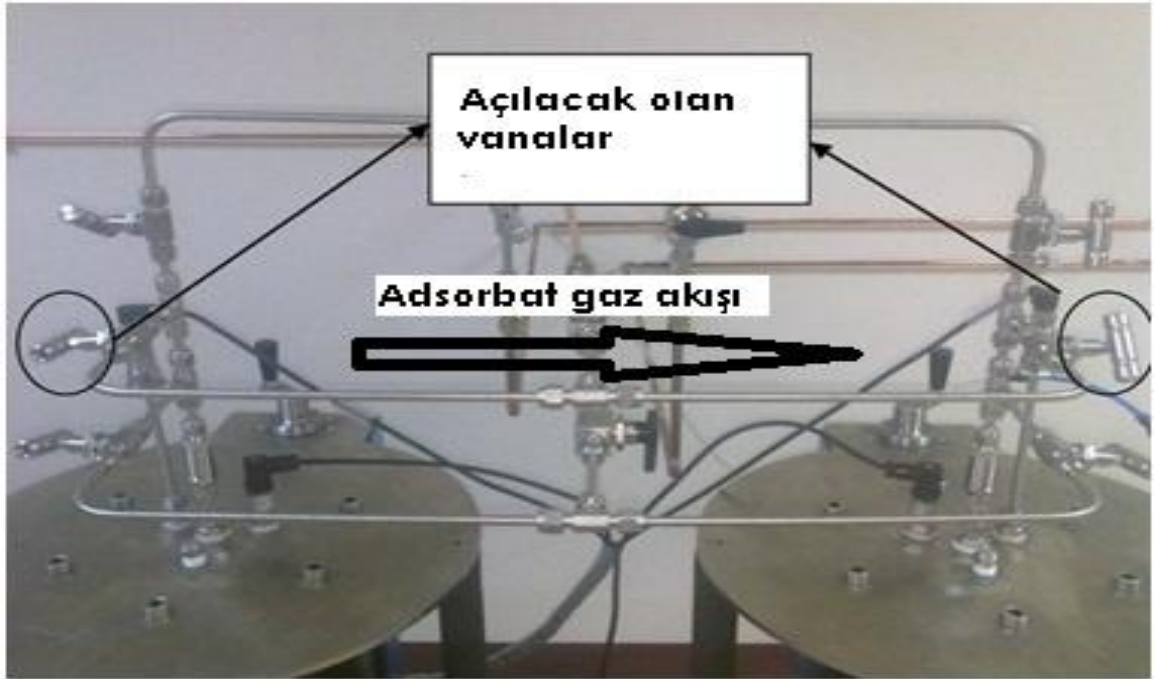
İlk olarak yapılacak olan deneyin sıcaklığının her iki adsorpsiyon kabının da ayarı yapılır ve deney için ayarlanan sıcaklıklara ulaşıncaya kadar sistem beklenir.

b) 10 °C için:

Malzemenin bulunduğu adsorpsiyon kabının 10 °C'ye düşürülmesi(deney boyunca 10 °C'de kalmasının sağlanması) ve gazın depolandığı adsorpsiyon kabının 20 °C'de bırakılması sağlanır. Böylece gazın depolandığı kaptaki 5 bar basınçta adsorbat malzemenin yoğunlaşması sağlanır.

2) Sistem set edilen sıcaklıklara ulaşıncaya gazın depolandığı adsorpsiyon kabı ile malzemenin bulunduğu adsorpsiyon kabı arasındaki vanaların açılması ve adsorpsiyon işleminin başlatılması.

Ayarlanan sıcaklıklara ulaşıncaya her iki kap arasındaki vanalar açılmaktadır ve deney başlatılmaktadır. Bu vanalar çok kısık bir şekilde açılır ve adsorbat gazının adsorbent malzemenin bulunduğu kaba ulaşması çok yavaş bir şekilde olması sağlanmaktadır. Bu aktarım gazın depolandığı kaptaki basıncın düşmesi 0.01 bar olacak şekilde ayarlanır.



Şekil 3.34. Deneye başlamak için kapları birbirine bağlayan vanalarının açılması

3) Her iki kapta adsorbat gazın basıncının dengelenmesi

Adsorbat malzeme aktarımı her iki kapta basınç dengeleninceye kadar devam etmektedir. Aktarım esnasında kaplardaki sıcaklık değişimlerin deney sıcaklığında kalması sağlanmaktadır. Eğer deney sıcaklığından daha düşük ve yüksek sıcaklıklara ulaşırsa vanalar kapatılmakta ve kapların sıcaklığının tekrar deney sıcaklığına ulaşması için beklenmektedir. Bu durum deney sıcaklıkları için farklılık göstermektedir.

a) 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C deney sıcaklıklarında her iki kapta da basınç sabit oluncaya kadar sıcaklıkların da sabit olarak kalması sağlanır ve basınç dengeye ulaşıncaya kadar beklenilir.

b) 10 °C deney sıcaklığı için gaz aktarımı sırasında gazın depolandığı kabın sıcaklığının 4 bara kadar 20 °C'ye, 4 bar ile 3 bar arasında 15 °C'ye ve 3 bardan sonra 10 °C'ye ayarlanmakta ve basınçların dengelenmesinin için beklenilmektedir. Böylelikle gaz aktarımı esnasında adsorbat gazın yoğunlaşması engellenmektedir.

4) Her iki kapta basınç sabitlendikten sonra deney sıcaklığında sistemin 8 saat bekletilmesi

Adsorbat malzeme aktarımı tamamlandıktan ve basınçlar dengeye geldikten sonra deney ünitesi sıcaklıkları sabitlenir ve 8 saat boyunca adsorpsiyon işlemi için çalışır durumda bırakılmaktadır.

5) 8 saatin tamamlanmasının ardından iki kap arasındaki vanaların kapatılması

Deney süresi sonunda her iki kabın bir birinden ayrılması için tüm vanalar kapatılmaktadır.

6) Malzemenin bulunduğu kabın gazının boşaltılması ve ardından vakumlanması

3.5.3. İkinci Deney Prosedürü

Yapılan ilk çalışmada sonuçlar karşılaştırıldıktan sonra ikinci deney prosedürüne geçilmiştir. Bu deney prosedüründe, çalışma yüksek basınçta yapılmıştır yani 5 bara kadar yükleme gerçekleştirilmiştir. İkinci deneyde gerçekleştirilen adsorpsiyon çiftleri aşağıdaki gibidir;

Çizelge 3.13. İkinci deneyde kullanılan adsorpsiyon çiftleri

NO	Kullanılan Malzeme	Kullanılan Gaz	Deney Prosedürü
1	Granül Aktif Karbon	R-404a	2.prosedür
2	Mavi Silikajel	R-404a	2.prosedür
3	Beyaz Silikajel	R-404a	2.prosedür
4	Turuncu Silikajel	R-404a	2.prosedür
5	Granüllü Aktif Karbon	R-134a	2.prosedür
6	Mavi Silikajel	R-134a	2.prosedür
7	Beyaz Silikajel	R-134a	2.prosedür
8	Turuncu Silikajel	R-134a	2.prosedür

Yapılan Çalışmanın basamakları ise aşağıdaki gibidir;

- 1) Gaz dolun kabının 5 bara getirilmesi ve malzeme kabının vakum-helyum-vakum ile 0 barda olması sağlanması
- 2) Ardından gazın belirli adımlarla malzeme tarafına yüklenmesi
- 3) Her yükleme sonrasında sıcaklık-basınç değerlerinin oturması için beklenmesi
- 4) Adsorbat depo kabının 4 bara düşmesi ile tekrar 5 bara yükseltilmesi
- 5) Her iki kabın 4,5 bara gelmesi ile gaz tarafına 5,5 bar yükleme yapılması ve en son durumda her iki kabın 5 bar olması sağlanması

Basınç ve bekleme aralıkları ise aşağıdaki gibidir;

Çizelge 3.14. Basınç basamakları ve bekleme süreleri

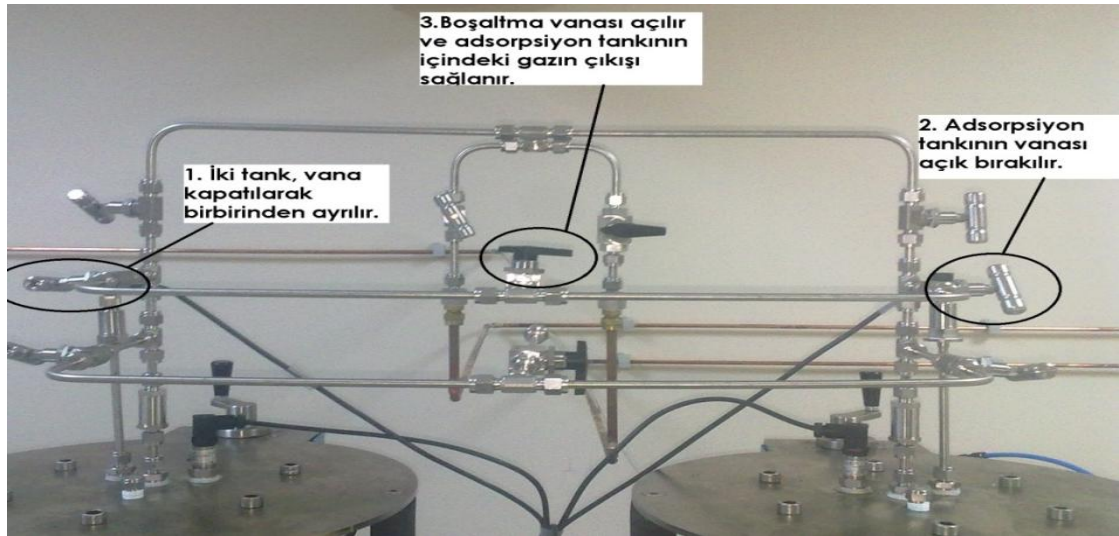
Sıra	Basınç Basamağı	Basınç Artışı	Bekleme Süresi
1	0,01	0,01	5 Dakika
2	0,05	0,04	5 Dakika
3	0,1	0,05	10 Dakika
4	0,2	0,1	10 Dakika
5	0,4	0,2	10 Dakika
6	0,6	0,2	10 Dakika
7	0,8	0,2	15 Dakika
8	1	0,2	15 Dakika

9	1,2	0,2	15 Dakika
10	1,5	0,3	30 Dakika
11	2	0,5	30 Dakika
12	2,5	0,5	30 Dakika
13	3	0,5	30 Dakika
14	3,5	0,5	30 Dakika
15	4	0,5	30 Dakika
16	4,5	0,5	30 Dakika
17	5	0,5	30 Dakika

Bu deney prosedüründe, her bir basınç kademesinde bekleme gerçekleştirildiği için her bir kademe, kullanılan malzemelerin adsorplama işlemlerini tamamlaması ve sıcaklık-basınç değerlerinin kararlı hale geçmesi sağlanmıştır. Böylece her bir basınç kademesinde de adsorplama miktarı karşılaştırılabilecektir.

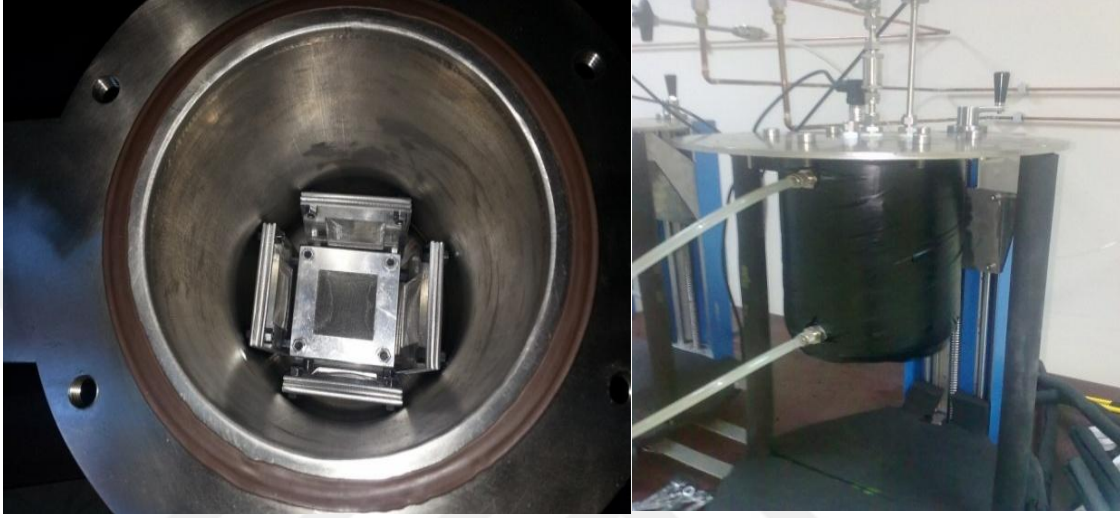
3.5.4. Deneyin Tamamlanması ve Sistemin Kapatılması

Deneyler tamamlandıktan sonra tüm vanalar kapatılır. Ana boşaltma vanası açılır ve sistemdeki adsorbat malzeme atmosfer basıncına gelinceye kadar boşaltılmaktadır. Ardından vakum pompası kullanılarak sistemdeki tüm adsorbat gaz boşaltılır ve sistem vakum altına alınmaktadır.



Şekil 3.35. Deneyin tamamlanmasının ardından adsorpsiyon tankından adsorbatın boşaltılması

Deneyin tamamlanmasının ardından yapılacak olan deneyler yine aynı adsorpsiyon çifti ve farklı sıcaklıklarda devam edecekse sistem vakumlanmış ve helyumla temizlenmiştir. Eğer farklı bir adsorpsiyon çifti ile devam edilecekse vakumdan sonra deney tesisatının içersine atmosfer havası alınır ve adsorpsiyon kabı sökülür. İçersindeki adsorpsiyon yatakları alınarak tüm prosedürler aynen tekrarlanır.



Şekil 3.36. Farklı adsorpsiyon çiftlerinin deneyinin yapılacağı durumda adsorpsiyon yatakları kap içinden alınır.

3.6. Adsorplama Kapasitelerinin Hesaplanması

3.6.1. İdeal gaz denklemleri kullanılarak yapılan hesaplamalar

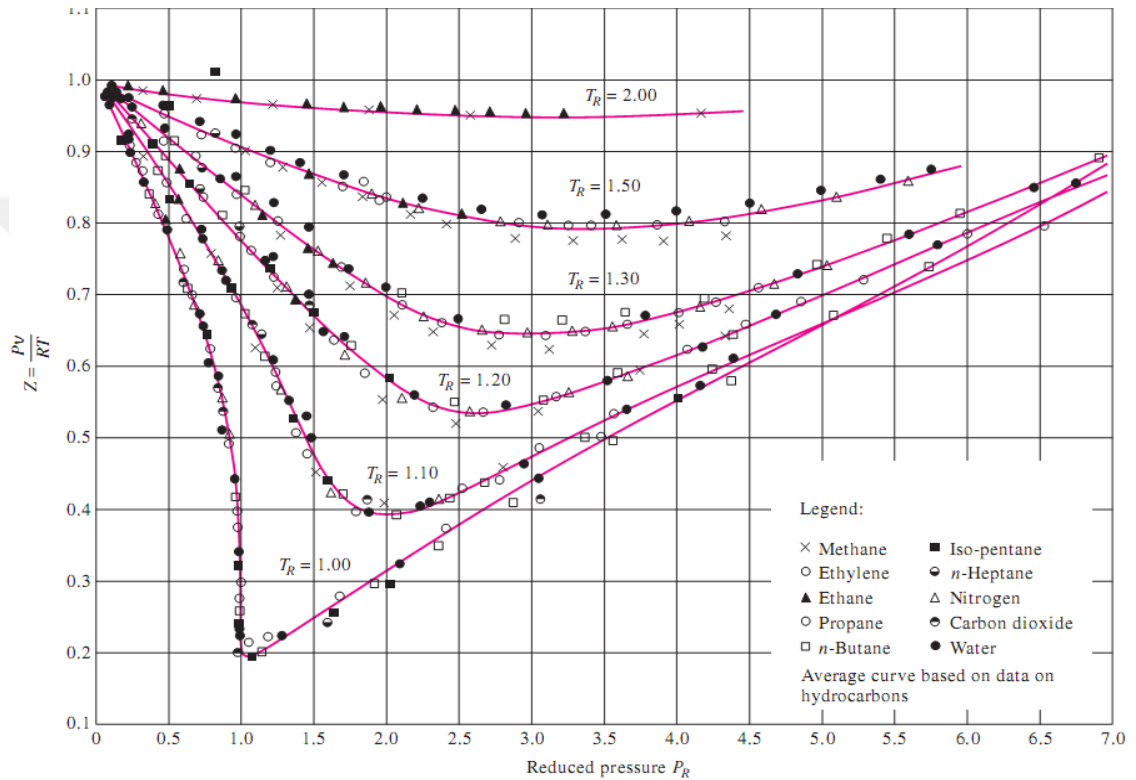
3.6.1.1. İdeal gaz Denkleminin Kullanımı ve Açıklaması

Çalışma esnasında cihazdan aldığımız veriler aşağıdaki gibidir:

- 1) 1. kabın basıncı (bar)
- 2) 1. kabın sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- 3) 1. kabın sirkülasyon suyu dağıtım deposu giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- 4) 1. kabın sirkülasyon suyu dağıtım deposu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- 5) 2. kabın basıncı (bar)
- 6) 2. kabın sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- 7) 2. kabın sirkülasyon suyu dağıtım deposu giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- 8) 2. kabın sirkülasyon suyu dağıtım deposu çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

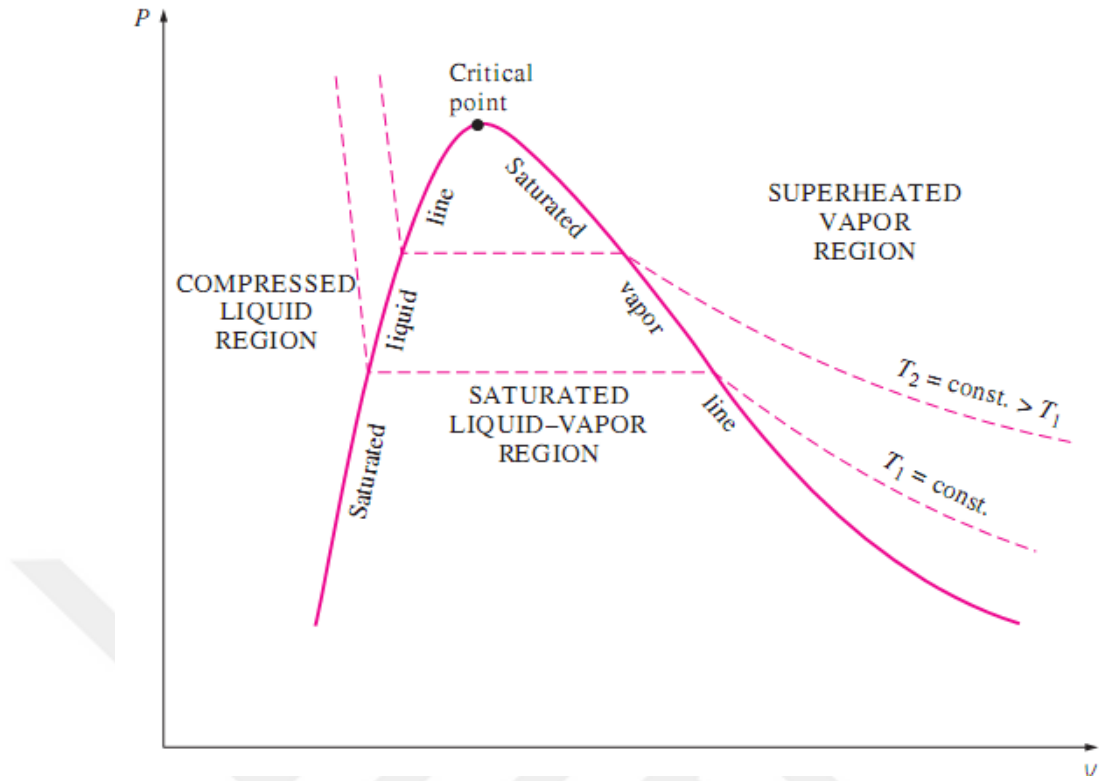
Dolayısı ile bu veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma esnasında R134a'nın kızgın buhar bölgesinde olmasına dikkat edilmiş ve sürekli olarak kızgın buhar bölgesinde olması sağlanmıştır.

Bununla birlikte R134a hiçbir zaman tam olarak ideal gaz gibi davranmamaktadır ve ideal durumdan sapmaktadır. Bu sapma miktarını bulmak için 'Genelleştirilmiş Sıkıştırılabilirlik Tablosu' kullanılmıştır.



Şekil 3.37. Sıkıştırılabilirlik faktörü (Çengel Y. ve ark. 2006)

Genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik tablosunu kullanabilmek için ilk önce R134a'nın kritik noktadaki basıncının ve sıcaklığının bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.38. Kritik nokta (Çengel Y. ve ark. 2006)

Kritik nokta yukarıdaki grafikten de görülebileceği gibi hal değişimi esnasında maddenin sıkıştırılmış sıvı bölgesinden kızgın buhar bölgesine direk olarak geçiş yaptığı noktadır. R134a'nın kritik bölgedeki basınç ve sıcaklık değerleri aşağıdaki gibidir;

$$P_{cr}=4,059 \text{ MPa}= 40,59 \text{ bar}=4059 \text{ kPa}$$

$$T_{cr}=372,4 \text{ K}$$

$$R=0,0815 \text{ kPa.m}^3/\text{kg. K}$$

Tabloyu kullanabilmemiz için düşürülmüş basınç oranını ve düşürülmüş sıcaklık oranının kullanılması gerekmektedir. Bu durum içinse aşağıdaki formül kullanılmalıdır;

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}}$$

ve

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

Böylelikle P_r ve T_r bulunarak z değeri elde edilir ve z değeri düzeltme faktörü olarak kullanılır. Düzeltme faktörü aşağıdaki şekilde kullanılır;

$$\vartheta_{IDEAL} = \frac{R.T}{P}$$

ve

$$\vartheta_{gerçek} = z \times \vartheta_{IDEAL} \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

olarak özgül hacim bulunabilir.

Genelleştirilmiş sıkıştırılabilirlik tablosundan aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

- Düşük basınçlarda ($P_r \ll 1$) sıcaklık ne olursa olsun gazlar ideal gaz gibi davranır.
- Yüksek sıcaklıklarda ($T_r > 2$) basınçtan bağımsız olarak yüksek doğrulukta ideal gaz davranışı gösterirler.
- Bir gazın ideal gaz davranışından sapma gazın kritik noktasında en fazla olmaktadır.

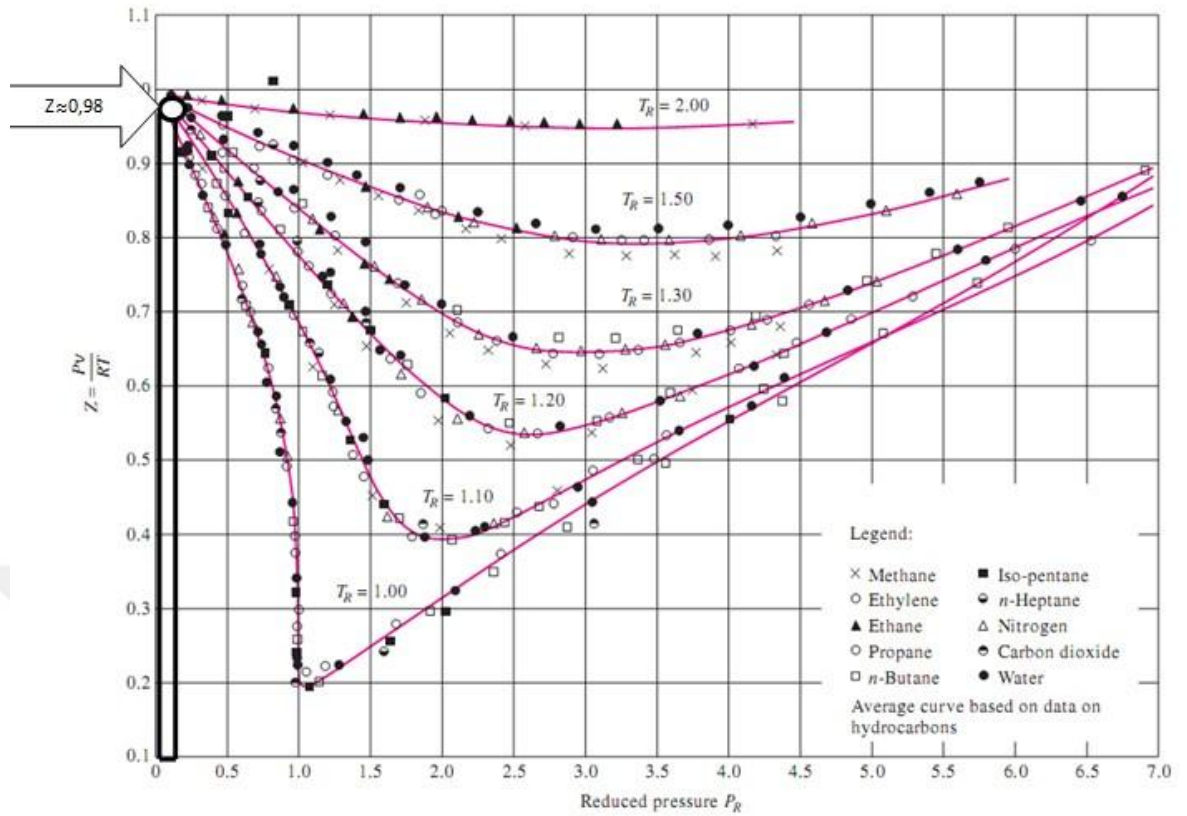
Yapılan deneylerde çalışma 5 bar ile 0 bar arasında çalışma yapılmıştır. Dolayısı ile P_r ;

$$0 < P_r < 0,12$$

olarak bulunur. Ayrıca yine deneyler 10^0C ile 80^0C arasında çalışma yapılmıştır. Bu durumda T_r ;

$$0,72 < T_r < 0,948$$

olarak bulunur.



Şekil 3.39. Sıkıştırılabilirlik faktörü bulunuşu (Çengel Y. ve ark. 2006)

Sonuçlara göre en büyük basınç değeri $P_r=0.12$ olduğu için ve P_{cr} 'ten çok küçük olduğu için sıcaklığa bağlı olmadan deney koşullarında R134a ideal gaz davranışı gösterir. Buna rağmen belirlenen aralıklar arasında z yaklaşık olarak;

$$z \approx 0,98$$

olarak bulunur. Bu deneylerde yaklaşık olarak düzeltme faktörü 0,98 alınarak işlemler yapılmıştır.

3.6.1.2. İdeal gaz denklemi kullanılarak yapılan hesaplamalar için örnek çalışma:

Birinci Durum için(Gaz aktarımı başlamadan önceki son durum):

Bu aşama ilk aşama olup 1.kap (gaz depo kabı) 5 bara kadar 20°C 'de adsorpsiyon öncesine hazırlanmaktadır. Bu durumda;

Birinci Kaptaki bulunan gazın durumu (A kabı, gaz depo kabı):

$$P_{A1} = 4,98 \text{ bar} = 498 \text{ kPa}$$

$$V_{A1}=3,146 \text{ lt}=0,003146 \text{ m}^3$$

$$T_{A1}=293,15 \text{ K}$$

İkinci Kapta bulunan gazın durumu (B kabı, malzemenin bulunduğu kap):

$$P_{B1}= 0 \text{ bar}=0 \text{ kPa}$$

$$V_{B1}=3,146 \text{ lt}=0,002946 \text{ m}^3$$

$$T_{B1}=293,15 \text{ K}$$

Bu aşama ilk aşama olup 1.kap (gaz depo kabı) 5 bara kadar 20°C'de adsorpsiyon öncesine hazırlanmaktadır. 2. Kapta gaz bulunmadığı için hesaplama yapılmayacaktır ve toplam gaz kütlesi '0 gr' olarak alınacaktır. Bu durumda;

$$\vartheta_{A1-iDEAL} = \frac{R.T}{P} = \frac{0,0815 \text{ kPa} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,15 \text{ K}}{498 \text{ kPa}}$$

$$\vartheta_{A1-iDEAL} = 0,047975 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\vartheta_{A1-ger\ çek} = z \cdot \vartheta_{A2-iDEAL} \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

$$\vartheta_{A1-ger\ çek} = 0,98 \times 0,047975 = 0,0470155 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Ve birinci durumda gazın depolandığı kapta R134A kütlesi;

$$m_{A1-R134A} = \frac{V_{A1} \text{ (m}^3\text{)}}{\vartheta_{A1-ger\ çek} \text{ (}\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\text{)}} = \frac{0,003146 \text{ (m}^3\text{)}}{0,0470155 \text{ (}\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\text{)}} = 0,0669141 \text{ kg} = 66,9141 \text{ gr}$$

Birinci durumda başlangıçta R134A toplam kütlesi;

$$m_1 = m_{A1-R134A} + m_{B1-R134A} = 66,9141 \text{ gr} + 0 \text{ gr} = 66,9141 \text{ gr}$$

İkinci Durum için (Gaz aktarımı tamamlandıktan sonraki durum):

Bu durumda gaz aktarım işlemi tamamlanmış olup yaklaşık 1 saat süre sonundaki durumdur. Gaz aktarımı yapılırken en son durumdaki adsorpsiyon miktarı hesaplanacaktır.

Birinci Kabın durumu (A kabı, gaz depo kabı):

$$P_{A2} = 2,3276 \text{ bar} = 232,76 \text{ kPa}$$

$$V_{A2} = 3,146 \text{ lt} = 0,003146 \text{ m}^3$$

$$T_{A2} = 293,15 \text{ K}$$

$$\vartheta_{A2-iDEAL} = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{0,0815 \text{ kPa} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,15 \text{ K}}{232,76 \text{ kPa}}$$

$$\vartheta_{A2-iDEAL} = 0,10264 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$\vartheta_{A2-ger çek} = z \cdot \vartheta_{A2-iDEAL} \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

$$\vartheta_{A2-ger çek} = 0,98 \times 0,10264 = 0,100592 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Ve ikinci durumda gazın depolandığı kaptaki R134A kütlesi

$$m_{A2-R134A} = \frac{V_{A1} \text{ (m}^3\text{)}}{\vartheta_{A2-ger çek} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)} = \frac{0,003146 \text{ (m}^3\text{)}}{0,100592 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)} = 0,031274 \text{ kg} = 31,2748 \text{ gr}$$

İkinci Kabın durumu (B kabı, malzemenin bulunduğu kap):

$$P_{B2} = 2,3276 \text{ bar} = 232,76 \text{ kPa}$$

$$V_{B2} = 3,146 \text{ lt} = 0,002946 \text{ m}^3$$

$$T_{B2} = 293,15 \text{ K}$$

$$\vartheta_{B2-iDEAL} = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{0,0815 \text{ kPa} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,15 \text{ K}}{232,76 \text{ kPa}}$$

$$\vartheta_{B2-IDEAL} = 0,10264 \frac{m^3}{kg}$$

$$\vartheta_{B2-gerçek} = z \cdot \vartheta_{B2-IDEAL} \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

$$\vartheta_{B2-gerçek} = 0,98 \times 0,10264 = 0,100592 \frac{m^3}{kg}$$

Ve ikinci durumda malzemenin bulunduğu kaptaki toplam R134-A kütlesi;

$$m_{B2-R134A} = \frac{V_{A1} (m^3)}{\vartheta_{B2-gerçek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = \frac{0,002946 (m^3)}{0,100592 \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = 0,0292866 kg = 29,2866 gr$$

İkinci durumda aktarım tamamlandıktan sonra R134A toplam kütlesi;

$$m_2 = m_{A2-R134A} + m_{B2-R134A} = 29,2866 gr + 31,2784 gr = 60,565 gr$$

Aktarım tamamlandıktan sonra ise toplam adsorpsiyon miktarı birinci durumda kaplarda bulunan kap kütlelerinden ikinci durumda kaplarda bulunan kap kütlesi çıkarılarak bulunmuştur. Bu durumda;

$$m_{ads} = m_1 - m_2 = 66,9141 gr - 60,565 gr$$

$$m_{ads} = 6,3491 gr$$

3.6.2. Termodinamik Tablolar Kullanılarak Yapılan Hesaplamalar

3.6.2.1. Termodinamik Tabloların Kullanımı ve Açıklaması

Kullanılan deney sistemi sabit hacim ve değişen basınç prensibi ile deneyleri gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla deney sisteminde bilinen sabit hacim bulunmakta ve aktarılan gazın basıncı ve sıcaklığı bilinebilmektedir. Buradan aktarılan gazın kütlesi bulunabilmektedir;

$$m_{A1-adsorbat} = \frac{V_{A1} (m^3)}{\vartheta_{A1-gerçek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)}$$

Burada $m_{a1-Adsorbat}$ adsorbat deposuna eklenen gazın kütlesi, V_{A1} adsorbat deposu hacmi, $V_{A1-gerçek}$ ise gaz aktarım olayında sıcaklık ve basınca bağlı olarak adsorbat deposuna eklenen gazın özgül hacmidir.

Adsorbat deposuna gaz aktarımı esnasında, adsorpsiyon kabının tüm vanaları kapalı olup içerisinde hiçbir gaz bulunmamaktadır. Sadece yataklara koyulmuş adsorbent bulunmaktadır. Prosedürlere göre birinci durumda adsorpsiyon kabındaki adsorbat m_1 kütlesi sıfırdır ve toplam kütle $m_{A1-adsorbat}$ 'a eşit olmaktadır.

$$m_1 = m_{A1-adsorbat}$$

Gaz eklenip bir süre beklendiğinde ise adsorpsiyon olayı gerçekleşmektedir. Bu durumda toplam adsorpsiyon bulunabilmektedir. İkinci durumda adsorbat depo kabında adsorbat gazın kütlesi

$$m_{A2-adsorbat} = \frac{V_{A1} (m^3)}{\vartheta_{A2-gerçek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)}$$

olarak belirtilebilir. Burada $m_{a2-adsorbat}$ ikinci durumda adsorbat depo kabındaki toplam adsorbat kütlesidir. $V_{A2-gerçek}$ son durumda adsorbat kabında adsorbat gazın sıcaklık ve basınca bağlı olan özgül hacmidir. İkinci durumda adsorpsiyon kabında adsorbat gazın kütlesi;

$$m_{B2-adsorbat} = \frac{V_{B1} (m^3)}{\vartheta_{B2-gerçek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)}$$

olarak belirtilebilir. Burada $m_{B2-adsorbat}$ ikinci durumda adsorpsiyon kabındaki toplam adsorbat kütlesidir. $V_{B2-gerçek}$ son durumda adsorbat kabında adsorbat gazın sıcaklık ve basınca bağlı olan özgül hacmidir. İkinci durumda toplam adsorbat kütlesi ise (m_2);

$$m_2 = m_{A2-adsorbat} + m_{B2-adsorbat}$$

Şeklinde hesaplanabilir. Son olarak adsorpsiyon kabında bulunan adsorbentin adsorpladığı toplam adsorbat (m_{ads});

$$m_{ads} = m_1 - m_2$$

olarak hesaplanır.

3.6.2.2. Termodinamik Tablolar Kullanılarak Yapılan Örnek Hesaplama

Birinci Durum için (Gaz aktarımı başlamadan önceki son durum):

Bu aşama ilk aşama olup 1.kap (gaz depo kabı) 5 bara kadar 20°C’de adsorpsiyon öncesine hazırlanmaktadır. Bu durumda;

Birinci Kapta bulunan gazın durumu (A kabı, gaz depo kabı):

$$P_{A1} = 4,98 \text{ bar} = 498 \text{ kPa}$$

$$V_{A1} = 3,146 \text{ lt} = 0,003146 \text{ m}^3$$

$$T_{A1} = 293,15 \text{ K}$$

$$V_{A1} = 0,0424$$

İkinci Kapta bulunan gazın durumu (B kabı, malzemenin bulunduğu kap):

$$P_{B1} = 0 \text{ bar} = 0 \text{ kPa}$$

$$V_{B1} = 3,146 \text{ lt} = 0,002946 \text{ m}^3$$

$$T_{B1} = 293,15 \text{ K}$$

Bu aşama ilk aşama olup 1.kap (gaz depo kabı) 5 bara kadar 20°C’de adsorpsiyon öncesine hazırlanmaktadır. 2. Kapta gaz bulunmadığı için hesaplama yapılmayacaktır ve toplam gaz kütlesi ‘0 gr’ olarak alınacaktır. Bu durumda;

$$m_{A1-R134A} = \frac{V_{A1} (m^3)}{\vartheta_{A1-gerçek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = \frac{0,003146 (m^3)}{0,0424 \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = 0,074198 \text{ kg} = 74,198 \text{ gr}$$

Birinci durumda başlangıçta R134A toplam kütlesi;

$$m_1 = m_{A1-R134A} + m_{B1-R134A} = 74,198 \text{ gr} + 0 \text{ gr} = 74,198 \text{ gr}$$

İkinci Durum için (Gaz aktarımı tamamlandıktan sonraki durum):

Bu durumda gaz aktarım işlemi tamamlanmış olup yaklaşık 1 saat süre sonundaki durumdur. Gaz aktarımı yapılırken en son durumdaki adsorpsiyon miktarı hesaplanacaktır.

Birinci Kabin durumu (A kabı, gaz depo kabı):

$$P_{A2} = 2,3276 \text{ bar} = 232,76 \text{ kPa}$$

$$V_{A2} = 3,146 \text{ lt} = 0,003146 \text{ m}^3$$

$$T_{A2} = 293,15 \text{ K}$$

$$V_{A2} = 0,0977$$

Ve ikinci durumda gazın depolandığı kaptaki R134A kütlesi,

$$m_{A2-R134A} = \frac{V_{A1} (m^3)}{\vartheta_{A2-ger\ çek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = \frac{0,003146 (m^3)}{0,0977 \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = 0,0322 \text{ kg} = 32,200 \text{ gr}$$

İkinci Kabin durumu (B kabı, malzemenin bulunduğu kap):

$$P_{B2} = 2,3276 \text{ bar} = 232,76 \text{ kPa}$$

$$V_{B2} = 3,146 \text{ lt} = 0,002946 \text{ m}^3$$

$$T_{B2} = 293,15 \text{ K}$$

$$V_{B2} = 0,0977$$

Ve ikinci durumda malzemenin bulunduğu kaptaki toplam R134-A kütlesi;

$$m_{B2-R134A} = \frac{V_{B1} (m^3)}{\vartheta_{B2-ger\ çek} \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = \frac{0,002946 (m^3)}{0,0977 \left(\frac{m^3}{kg}\right)} = 0,030153 \text{ kg} = 30,153 \text{ gr}$$

İkinci durumda aktarım tamamlandıktan sonra R134A toplam kütlesi;

$$m_2 = m_{A2-R134A} + m_{B2-R134A} = 32,200 \text{ gr} + 30,153 \text{ gr} = 62,353 \text{ gr}$$

Aktarım tamamlandıktan sonra ise toplam adsorpsiyon miktarı birinci durumda kaplarda bulunan kap kütlesinden ikinci durumda kaplarda bulunan kap kütlesi çıkarılarak bulunmuştur. Bu durumda;

$$m_{ad} = m_1 - m_2 = 74,198 \text{ gr} - 62,353 \text{ gr}$$

$$m_{ad} = 11,845 \text{ gr}$$

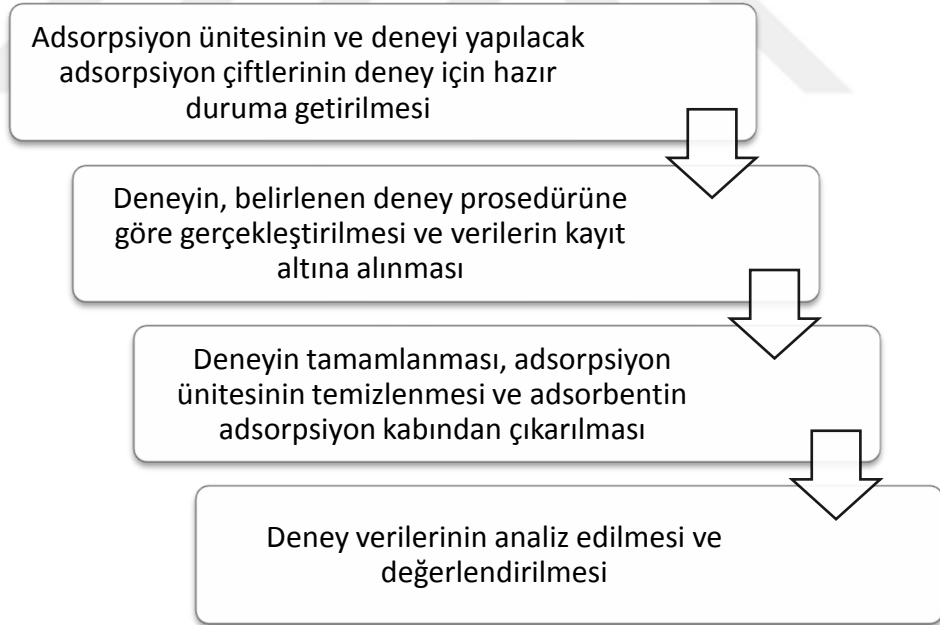
Sonuçlara bakıldığında ideal gaz kavramı ile hesaplamaların yapılması durumunda hata payının yüksek olmasından dolayı, hesaplamalar R134a tabloları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada EES yazılımı kullanılarak R134a'nın termodinamik özellikleri ve adsorplama miktarları hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

‘Literatür Araştırması Bölümü’nde verilen literatür ve bilgiler kullanılarak ‘Adsorpsiyon Ünitesi Bölümü’nde tanıtılan ve imalatı yapılan sistemde gerçekleştirilen ölçümler ve bulunan sonuçlar bu bölümde verilerek tartışılmıştır. ‘‘Kullanılan Ekipmanlar ve Uygulanan Prosedürler’’ bölümünde tanıtılan deney prosedürlerine göre, her bir numune için yapılan hazırlık aşaması yaklaşık bir gün sürmektedir.

Birinci deney prosedüründe, adsorbat gazın depolandığı kaptan, adsorbentin bulunduğu kaba sabit sıcaklıkta aktarım gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.25) Her bir adsorpsiyon çifti için aktarım yaklaşık 1 saat sürmüş olup, 8 saat boyunca deney devam ettirilmiştir.

İkinci deney prosedüründe ise her bir deney boyunca adsorbentin bulunduğu kaba gaz aktarma işlemi 0,01 bardan başlamış olup 5 bar oluncaya kadar devam etmiştir. (Şekil 3.26) Bir deneyin tamamlanması yaklaşık 5 ile 6 saat aralığında sürmüştür.



Şekil 4.1. Deney aşamaları

Bu bölümde ilk önce yapılan her deney için basınç zaman grafikleri verilmiş olup daha sonra sonuç grafikleri verilmiştir.

Verilen sonuç grafiklerinde birinci deney prosedürü için 2 çeşit grafik kullanılmıştır. Bu grafikler;

- 1) Adsorpsiyon çiftlerinin bir saatlik zaman dilimi sonucundaki 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 50 °C sıcaklıklardaki adsorpsiyon miktarları,
- 2) Adsorpsiyon çiftlerinin sekiz saat sonunda 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 50 °C sıcaklıklardaki adsorpsiyon miktarları,

İkinci deney prosedüründen elde edilen sonuçlar için 3 çeşit grafik kullanılmıştır. Bu grafikler şöyledir;

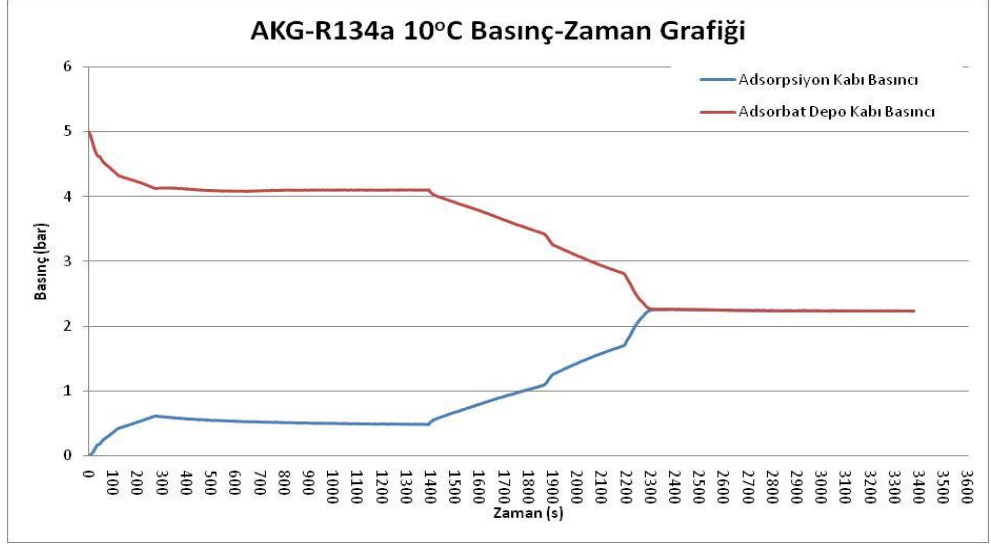
- 1) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R134a kullanımında 20 °C, 30 °C ve 50 °C deki C (kg/kg) ve P (bar) grafikleri
- 2) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R404a kullanımında 20 °C, 30 °C ve 50 °C deki C (kg/kg) ve P (bar) grafikleri
- 3) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R134a kullanımında C/C_o 'nin 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 olması durumu için $\ln(P)$ (kPa) ve $1/T$ (1/K) grafikleri
- 4) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R404a kullanımında C/C_o 'nin 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 olması durumu için $\ln(P)$ (kPa) ve $1/T$ (1/K) grafikleri
- 5) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R134a kullanımında C/C_o 'nin 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 olması durumu için Q_{ads} (kJ/kg) ve T (°C) grafikleri
- 6) Her bir adsorbent için adsorbat gaz olarak R404a kullanımında C/C_o 'nin 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 olması durumu için Q_{ads} (kJ/kg) ve T (°C) grafikleri

4.1. Birinci Prosedür Deneylerinin Basınç-Zaman Grafikleri

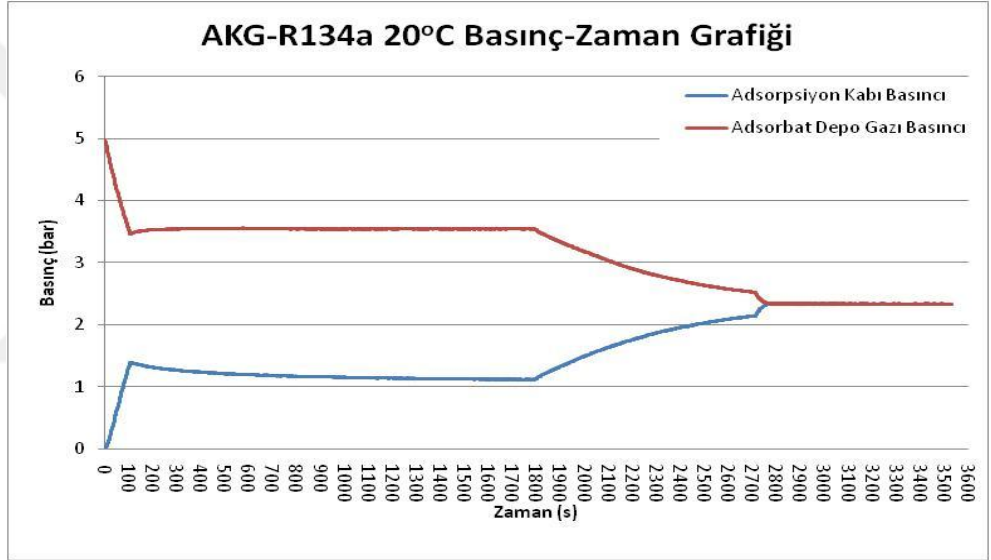
Yapılan deneysel çalışmalarda, birinci prosedür deneyi uygulamalarında R134a soğutucu akışkan adsorbent olarak kullanılarak yaklaşık 250-300 kPa basınçta öncelikle 20 °C ve 30 °C sıcaklıklarda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Test edilen malzemelerin gazı adsorblama kapasitesi bu sıcaklıklarda belirlendikten sonra adsorblama performansı yeterli görülmesi durumunda testler 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C sıcaklıklar için gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde adsorblama hızının yüksek olduğu başlangıç sürecinde basınç ve sıcaklık değerleri 1 saniye aralıklarla kaydedilmiş, sonraki süreçte kayıt süresi 2 ila 10 saniye arasına çekilerek ölçümler en az 8 saat süresince kaydedilmiştir.

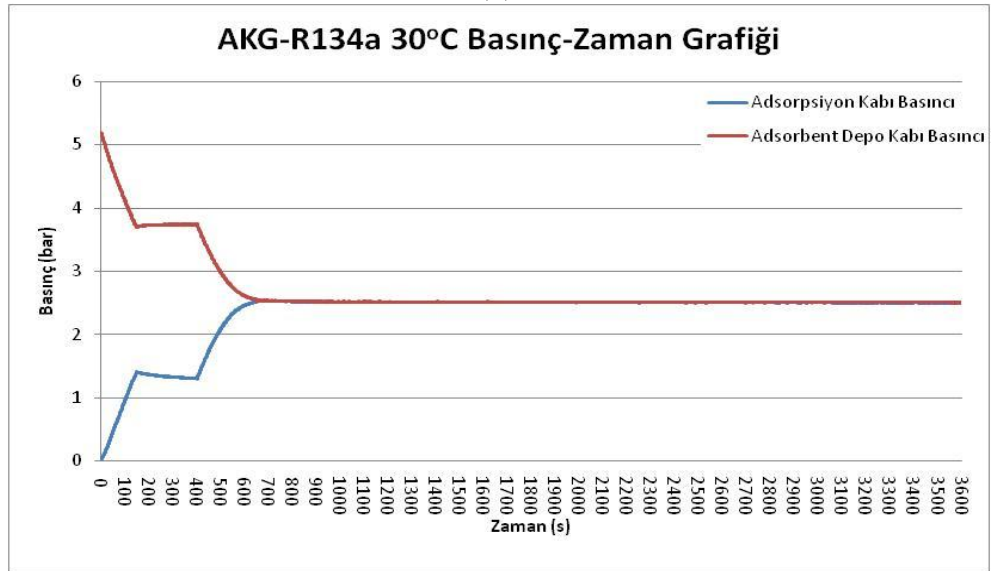
Şekil 4.2. – 4.9. arasında R134a ve farklı adsorbent maddelerinin farklı sabit sıcaklıklıklarda adsorbsiyon prosesi esnasında oluşan zamana göre basınç değişimleri görülmektedir. Şekiller birlikte değerlendirildiğinde genel olarak adsorplamaya bağlı basınç düşümünün büyük oranda ilk bir ila iki saat içinde gerçekleştiği görülmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte basınç düşümü bağıl olarak azalmaktadır. Dolayısıyla düşük sıcaklıklarda daha yüksek basınç düşümü ve dolayısıyla adsorblama olduğu söylenebilir. Diğer taraftan yükselen sıcaklıklarda basınç düşümü bağıl olarak daha kısa sürdüğü gözlenmiştir. Şekil 4.2. – 4.9. arasında verilen grafikler adsorblama sürecinin kinetiği hakkında da bilgi vermektedir.



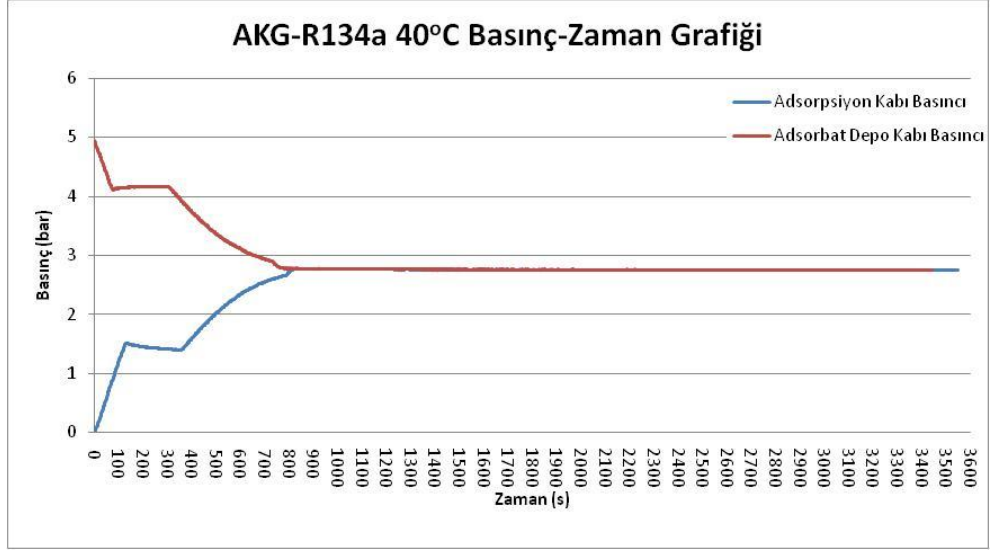
(a)



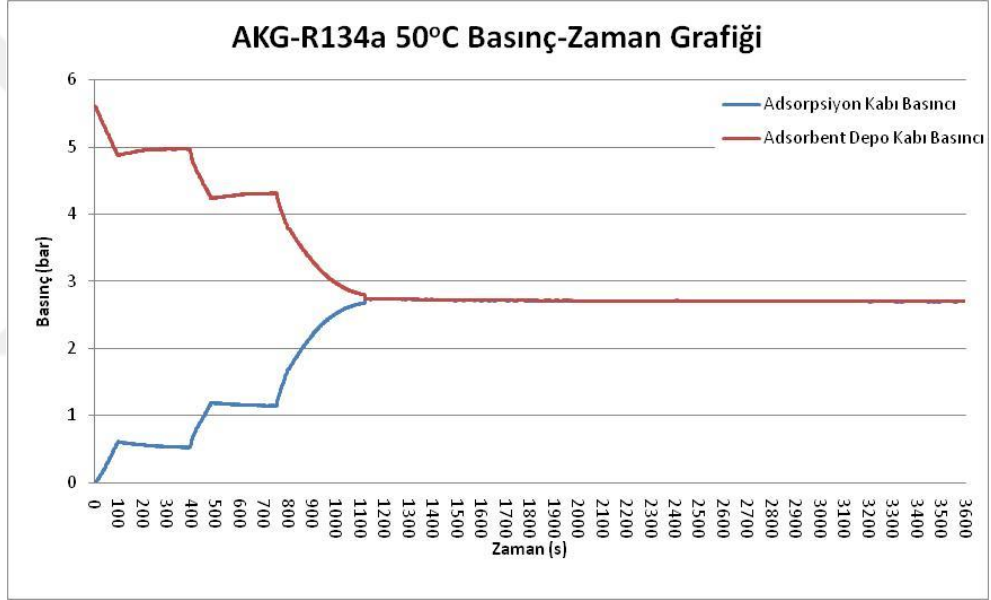
(b)



(c)

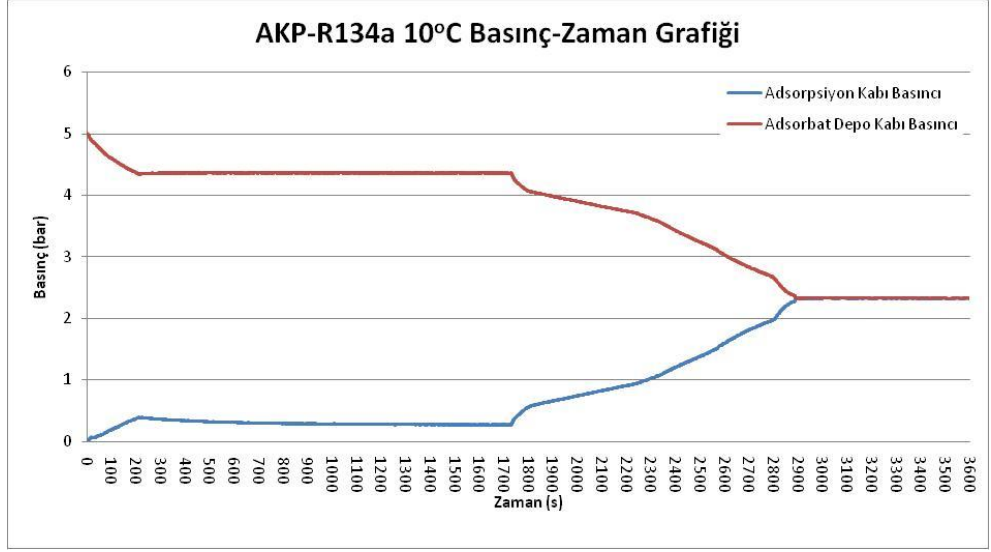


(d)

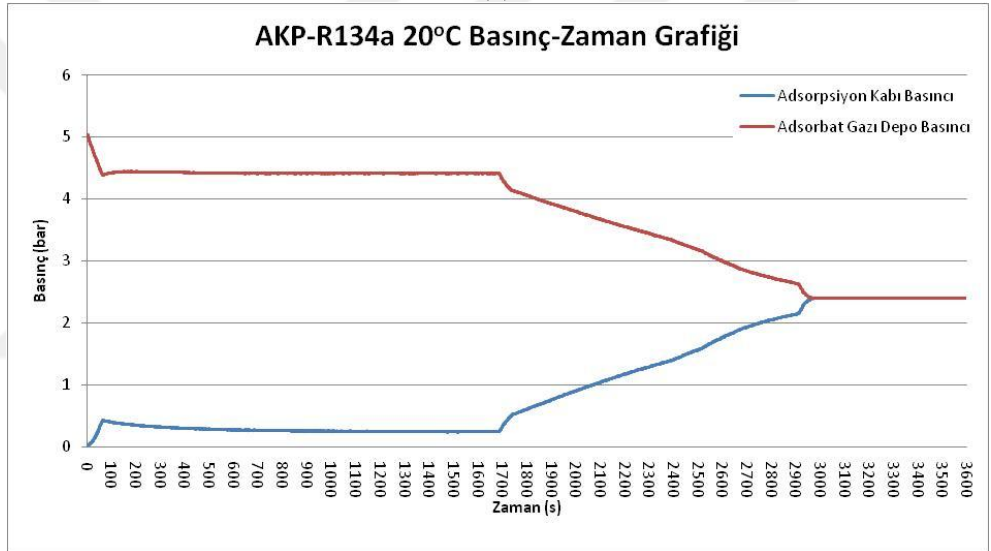


(e)

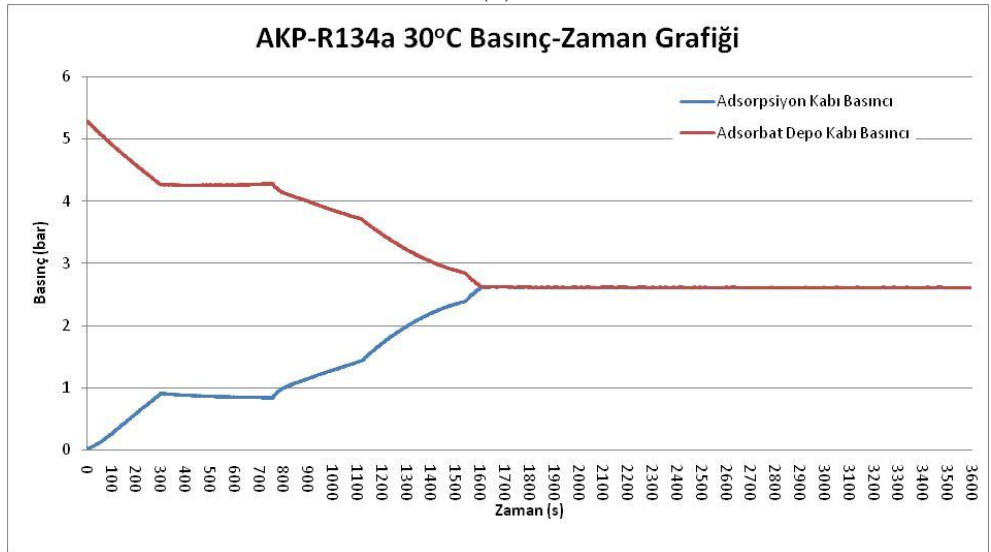
Şekil 4.2. Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C



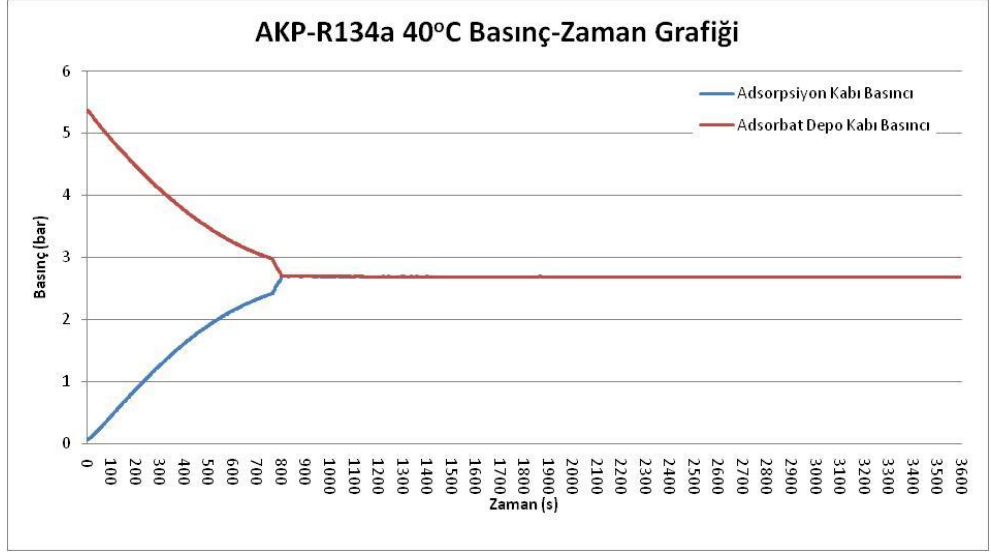
(a)



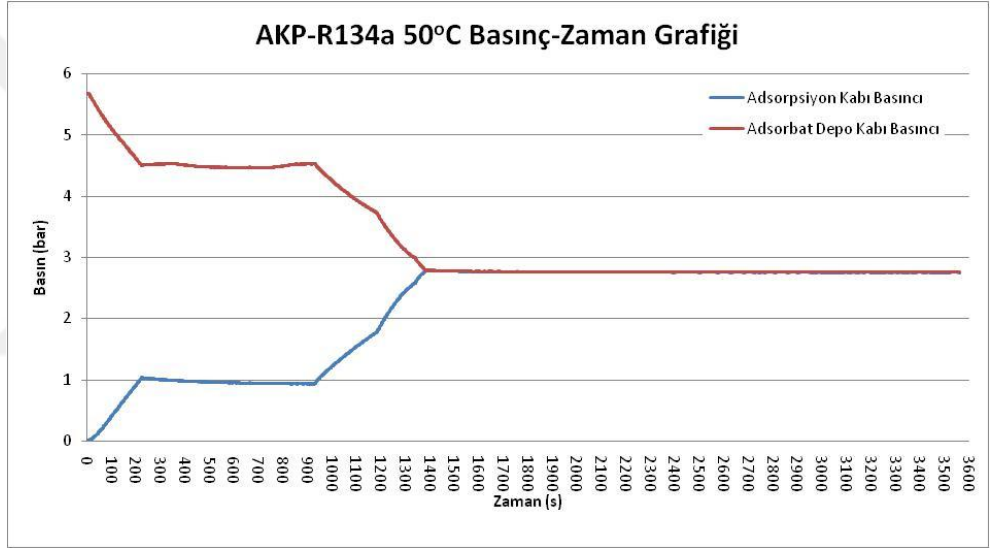
(b)



(c)

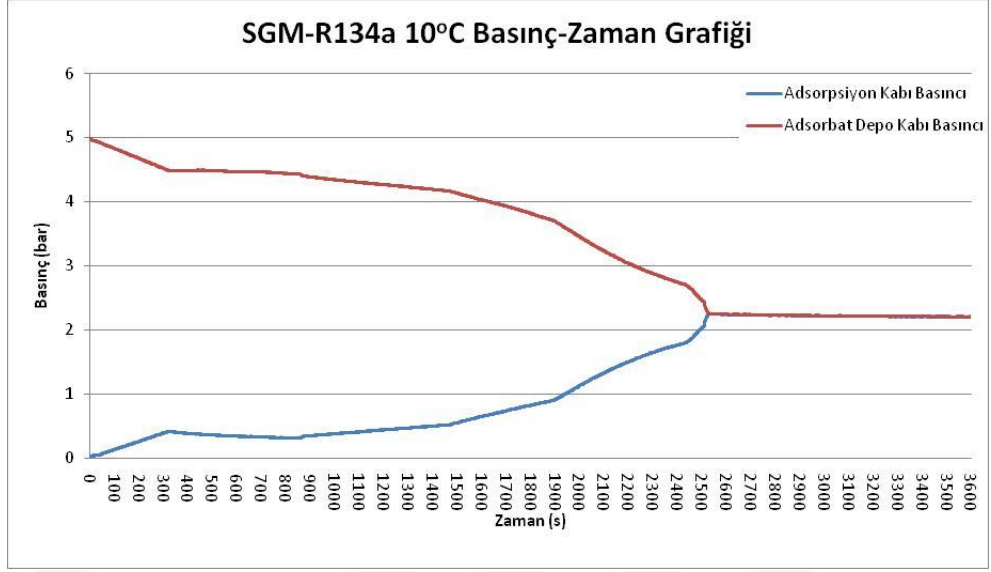


(d)

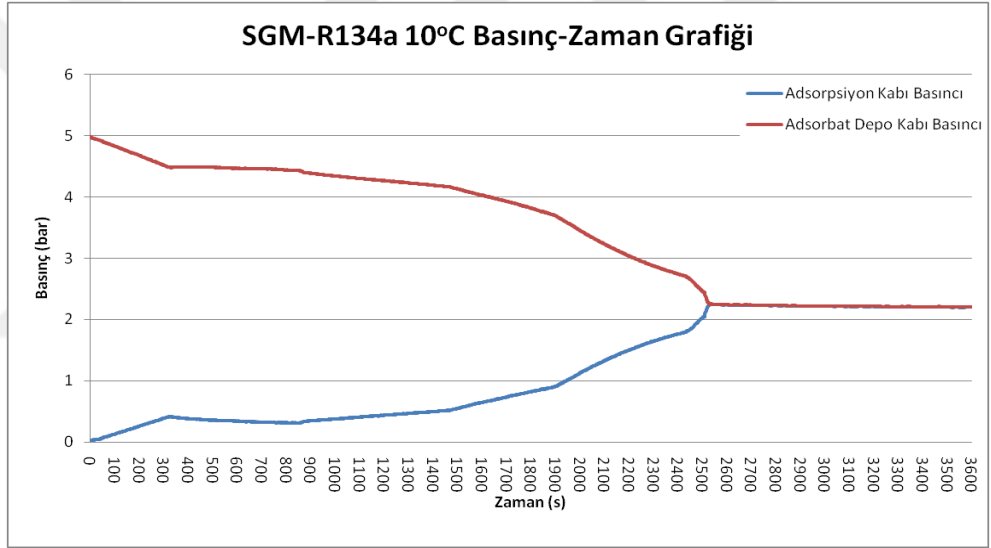


(e)

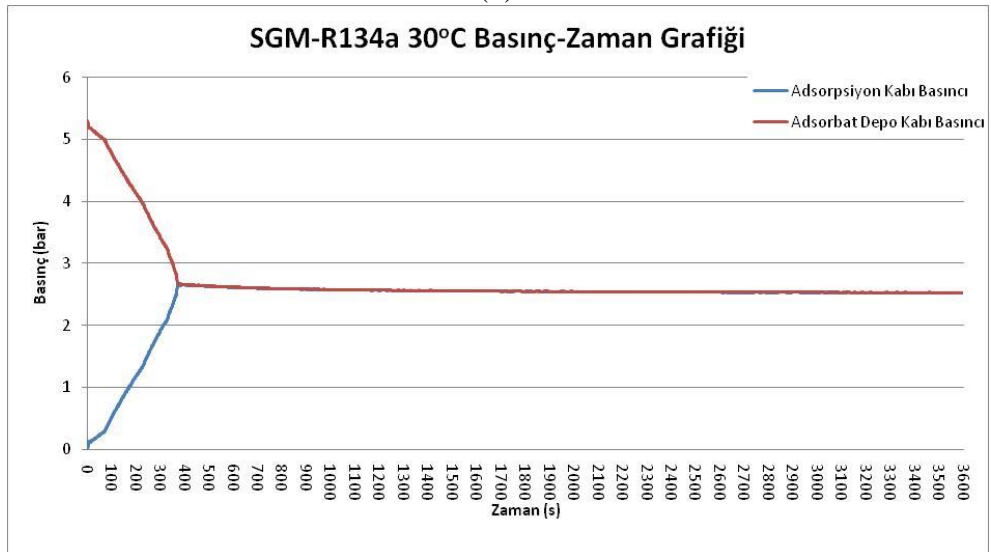
Şekil 4.3. Sabit sıcaklıkta pellet aktif karbon-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C



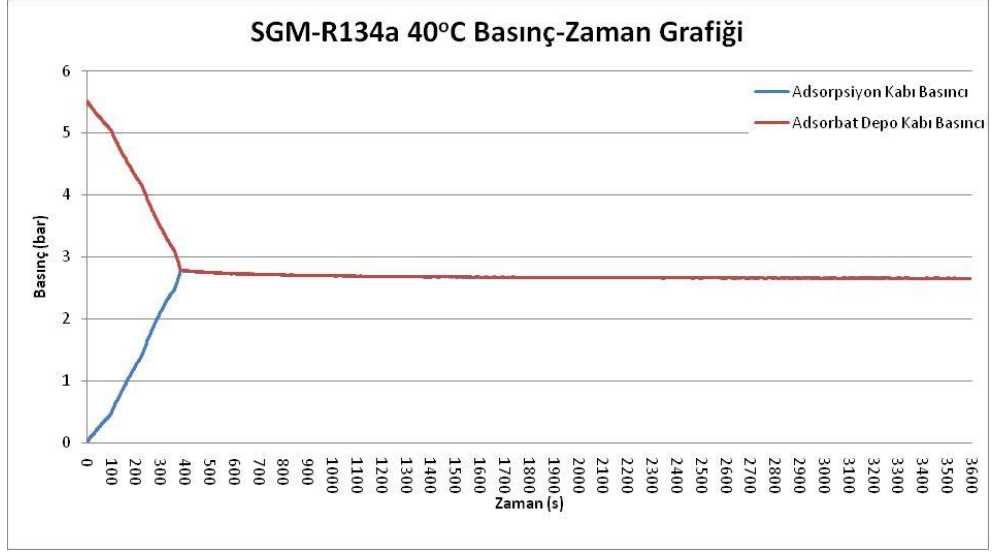
(a)



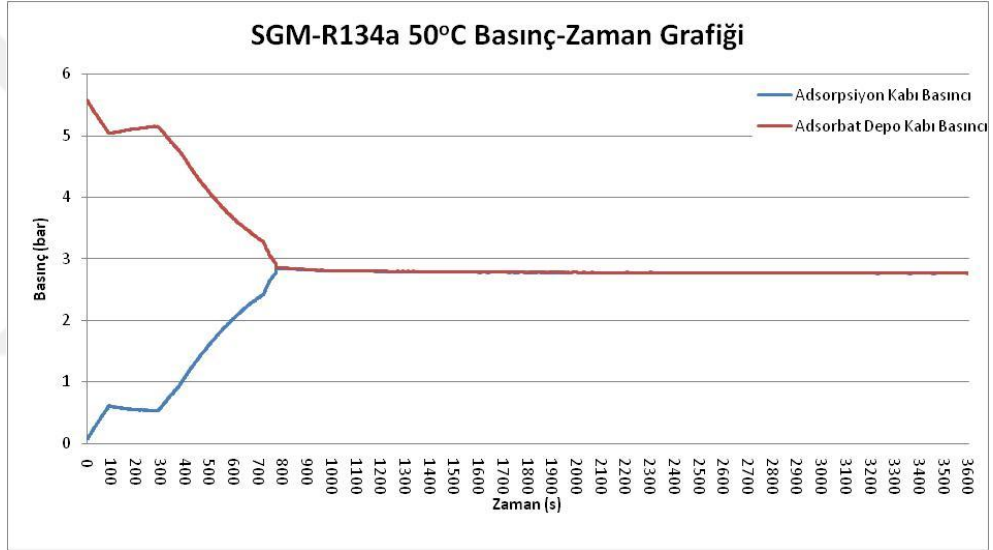
(b)



(c)

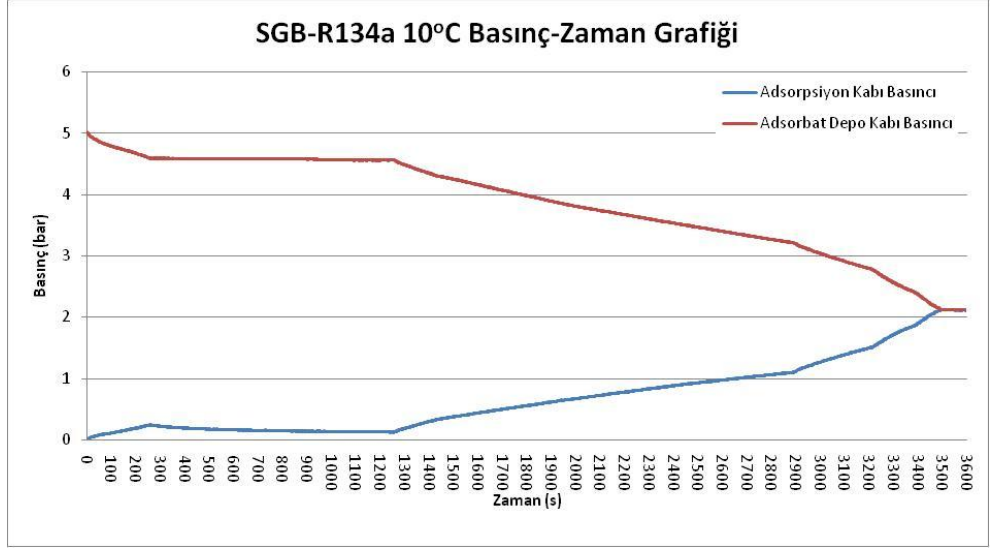


(d)

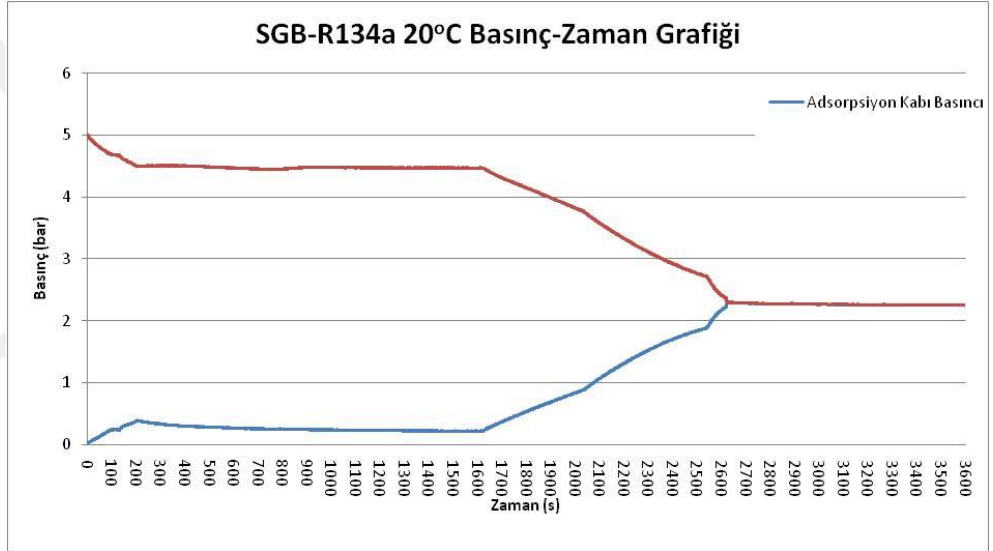


(e)

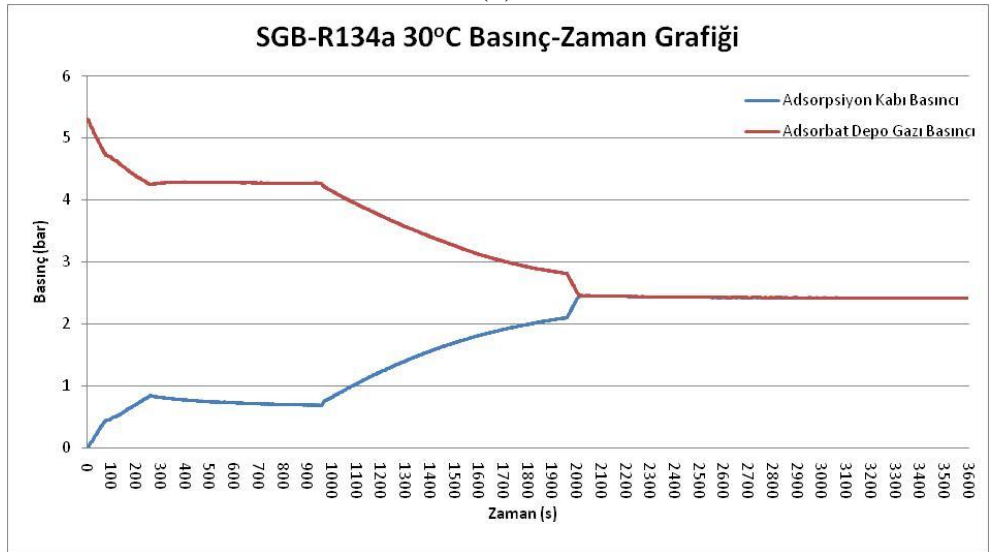
Şekil 4.4. Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C, (c) 30 °C, (d) 40 °C ve (e) 50 °C



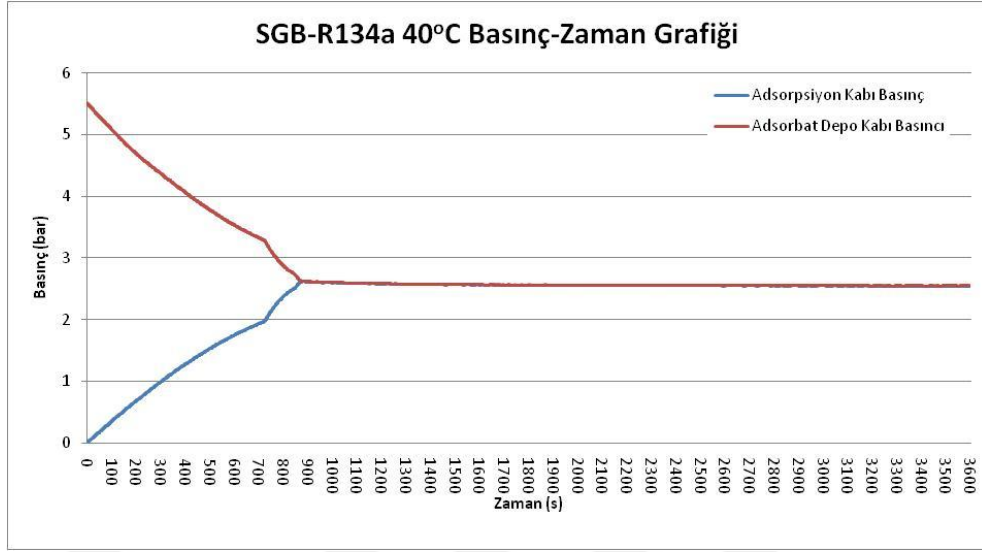
(a)



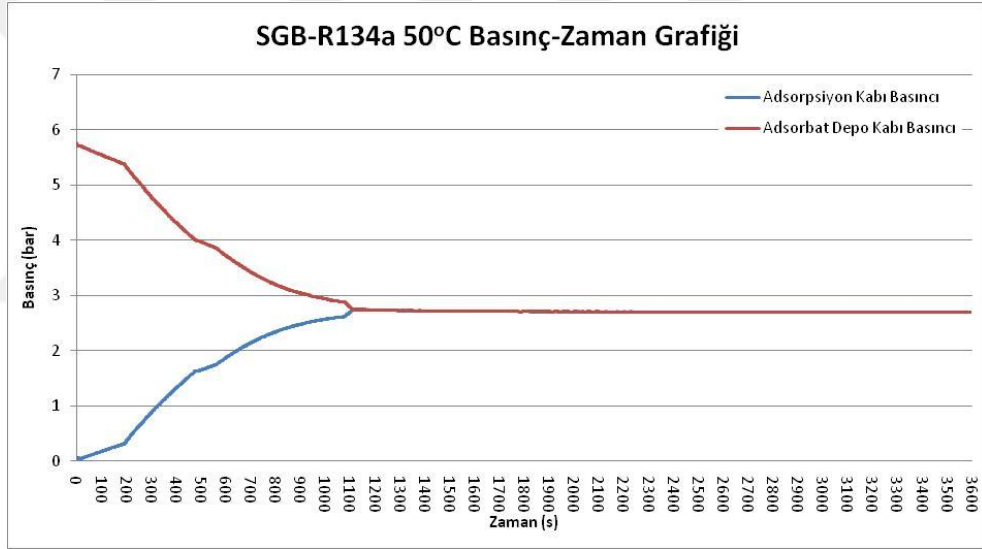
(b)



(c)

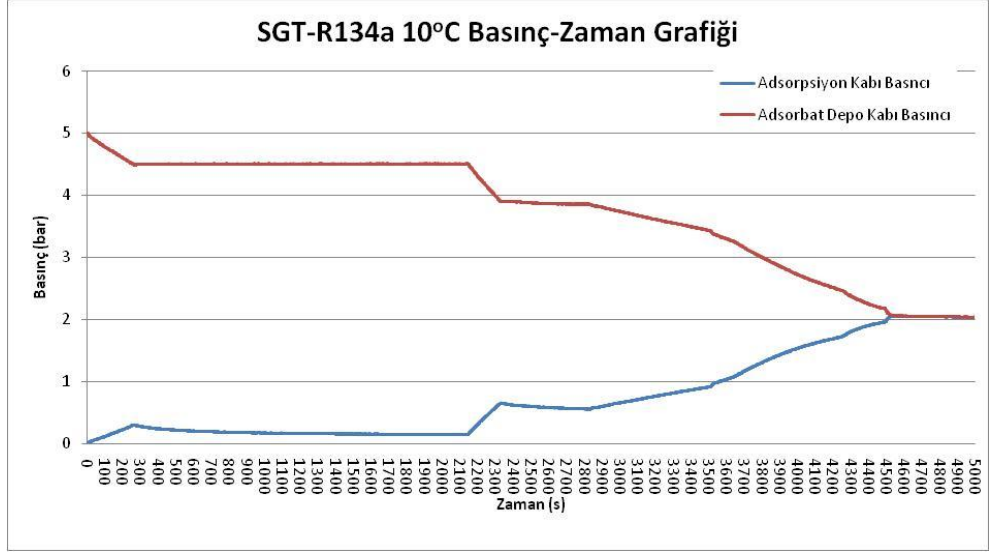


(d)

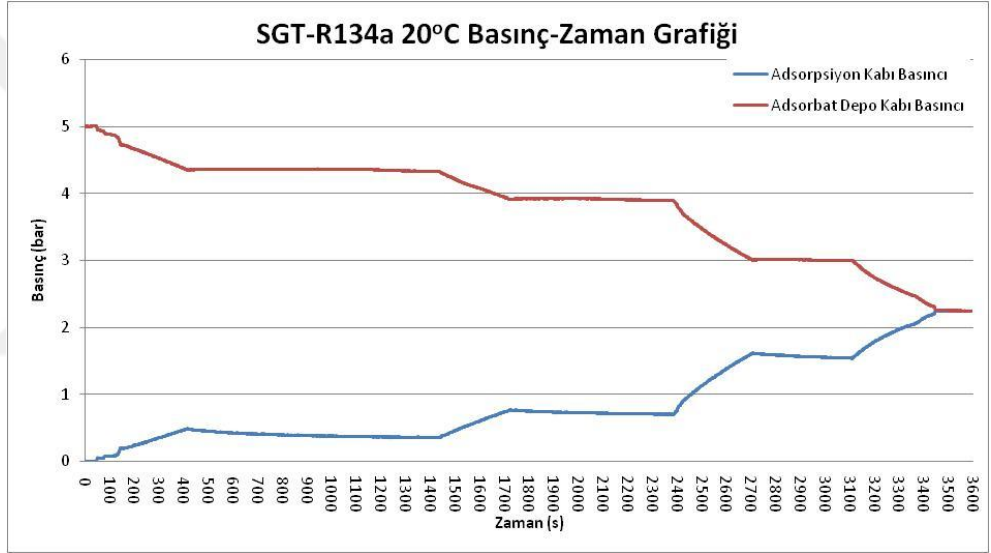


(e)

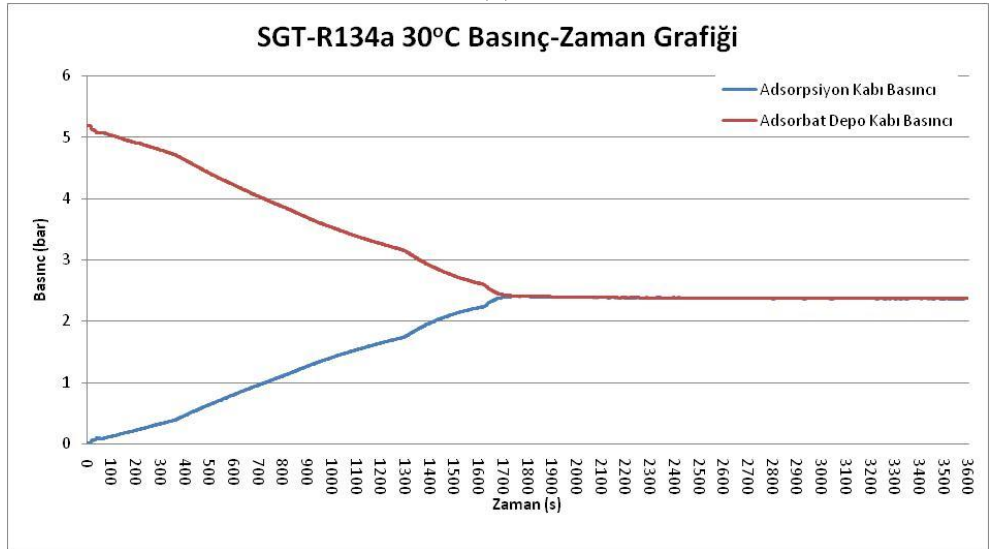
Şekil 4.5. Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C , (c) 30 °C , (d) 40 °C ve (e) 50 °C



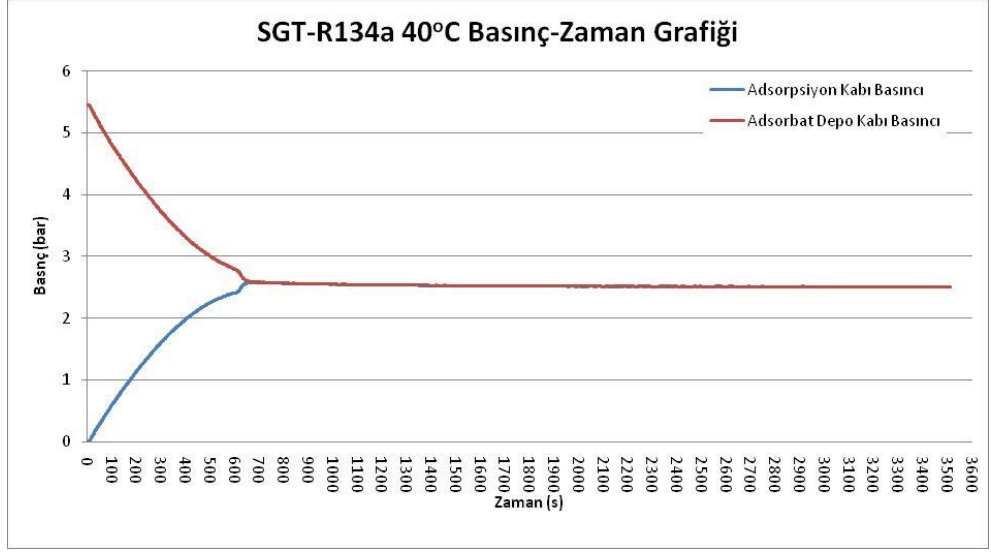
(a)



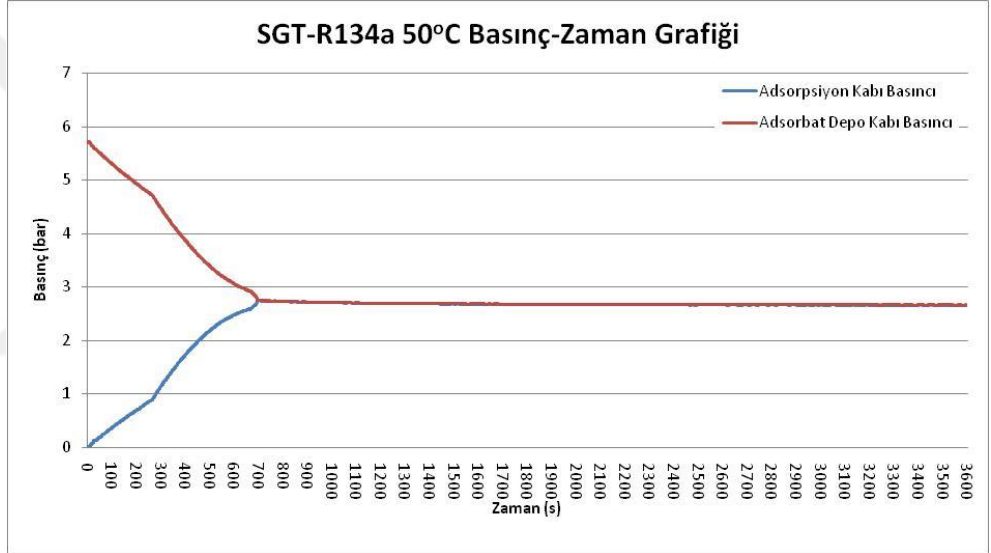
(b)



(c)

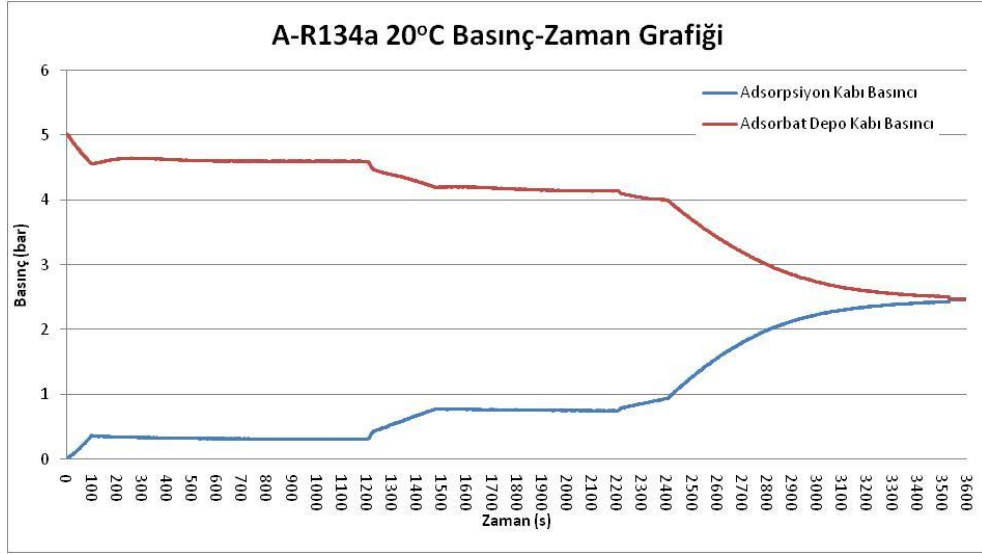


(d)

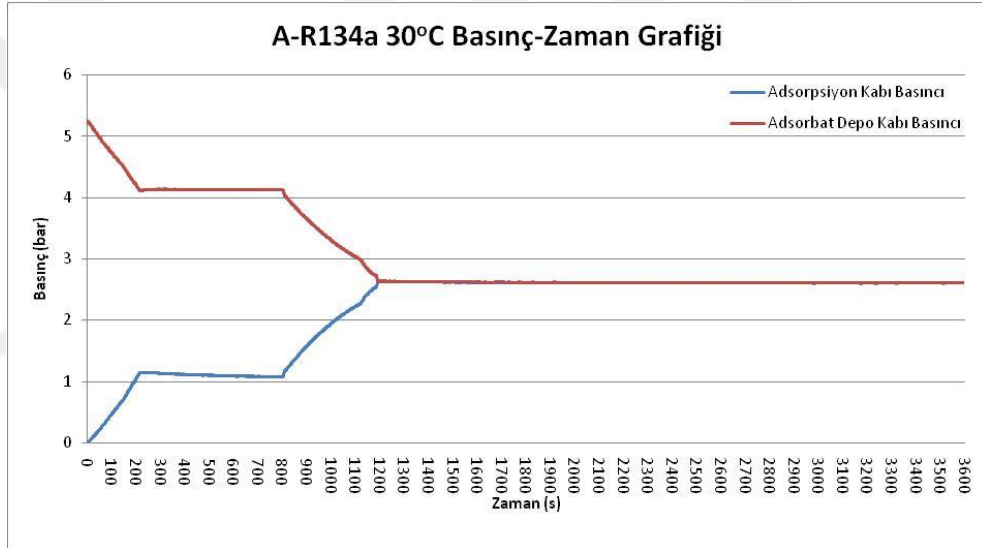


(e)

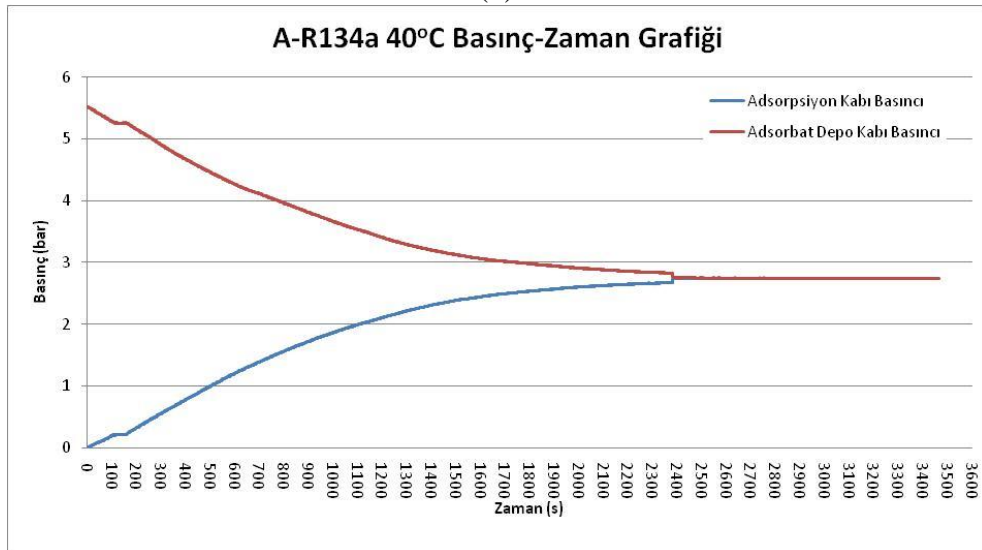
Şekil 4.6. Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 10 °C , (b) 20 °C , (c) 30 °C , (d) 40 °C ve (e) 50 °C



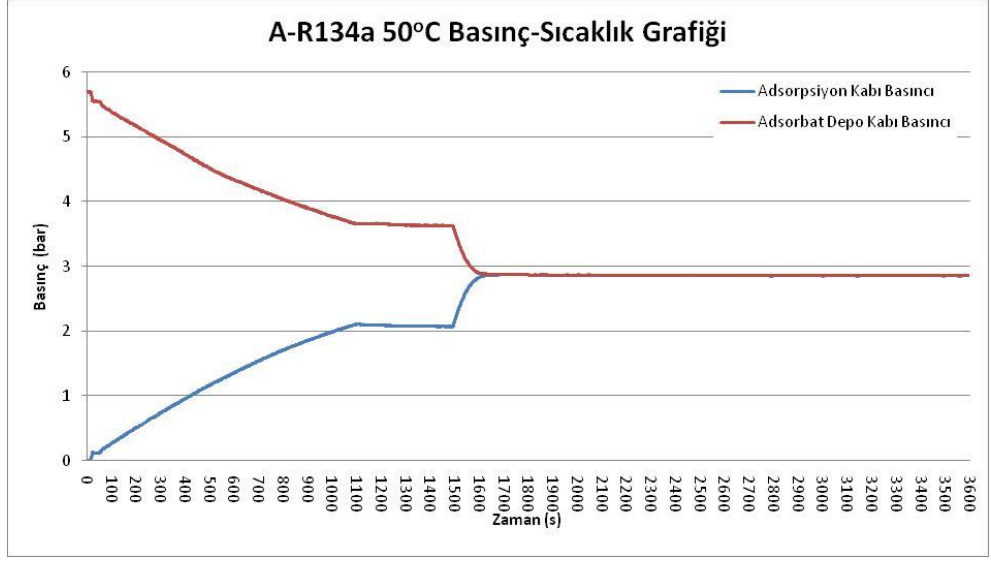
(a)



(b)

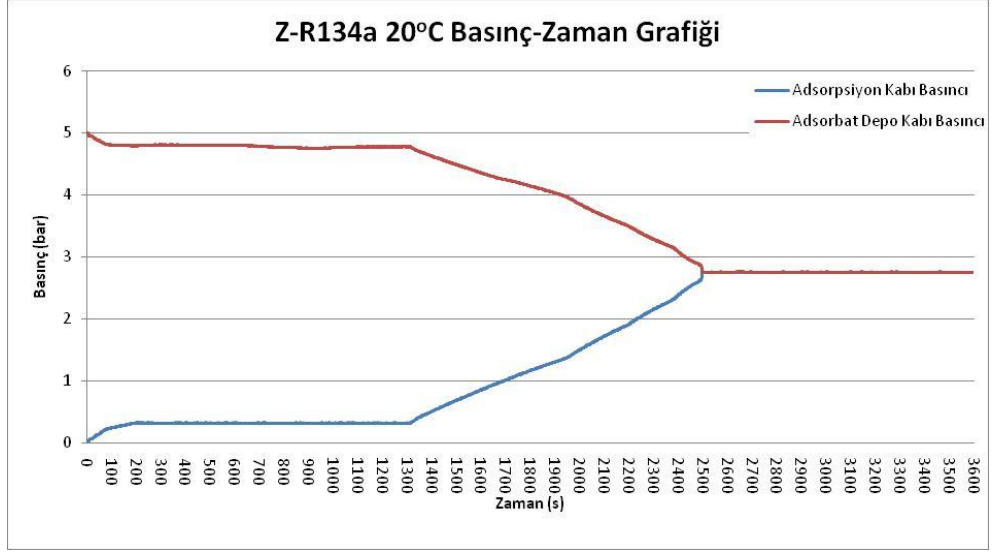


(c)

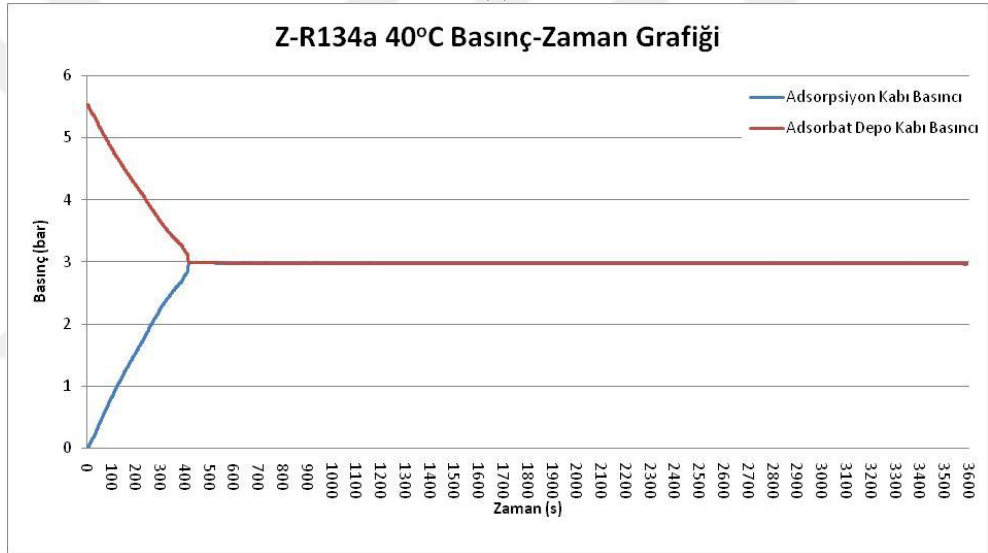


(d)

Şekil 4.7. Sabit sıcaklıkta Aktif Alümina-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C, (b) 30 °C, (c) 40 °C ve (d) 50 °C

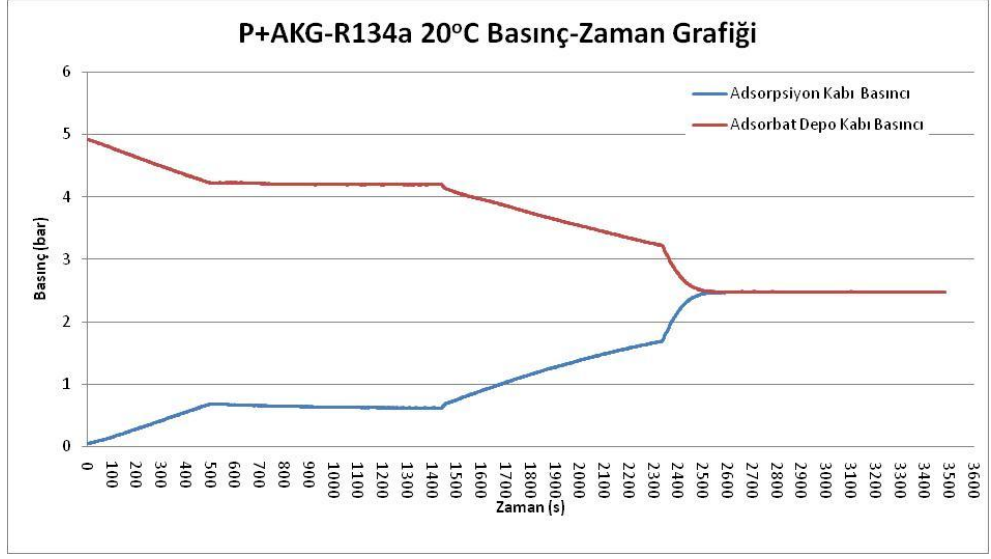


(a)

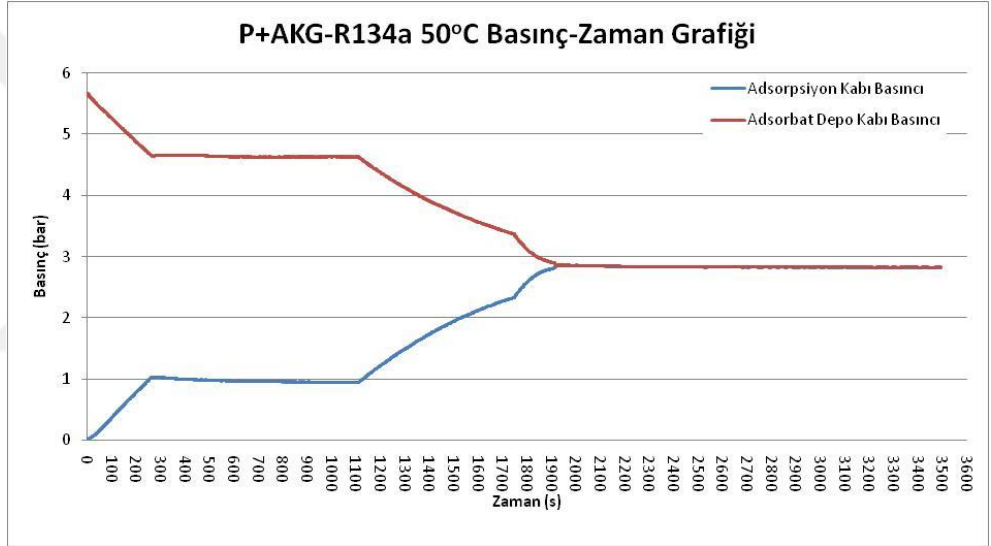


(b)

Şekil 4.8. Sabit sıcaklıkta Zeolit-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a) 20 °C ve (b) 40 °C



(a)



(b)

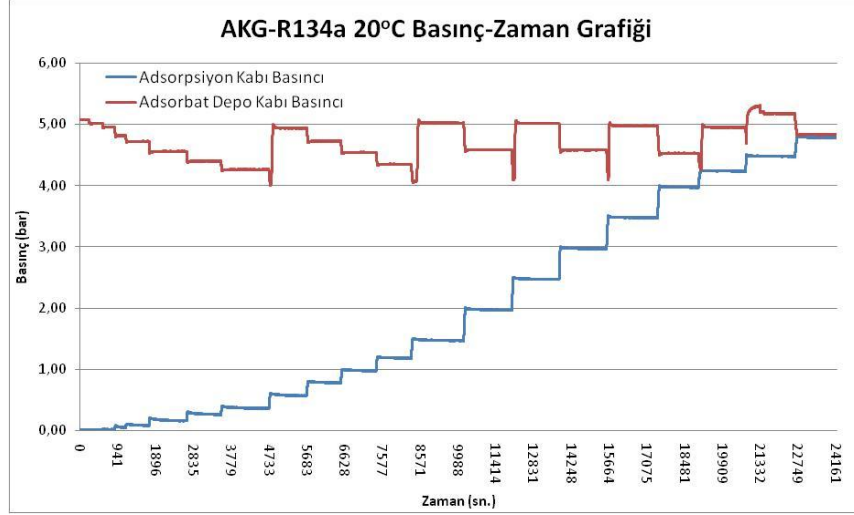
Şekil 4.9. Sabit sıcaklıkta Polimer+Granül Aktif Karbon Karışımı-R134a çiftinin adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20°C ve (b)50°C

4.2. İkinci Prosedür Deneylerinin Basınç ve Zaman Grafikleri

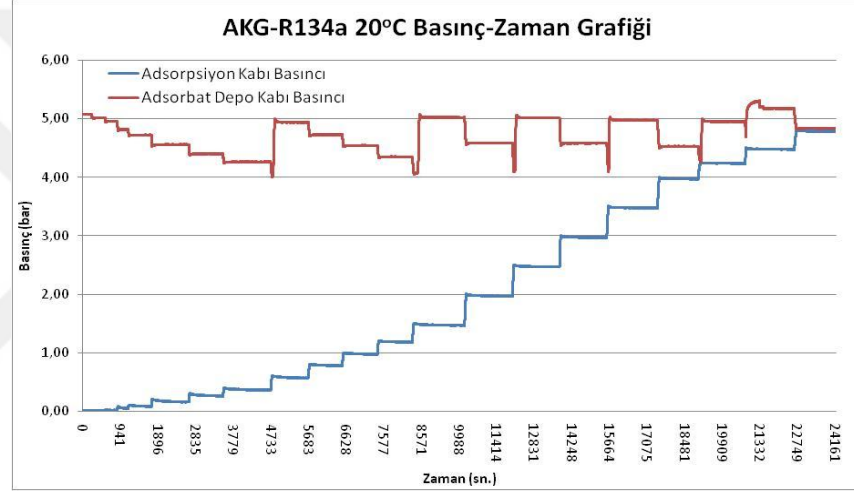
Yapılan deneysel çalışmalarda, ikinci prosedür deneyi uygulamalarında R134a ve R404a soğutucu akışkanlar adsorbat olarak kullanılmıştır. Granül aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel malzemeleri ise adsorbent olarak kullanılmıştır. Deneyler 20 °C, 30 °C ve 50 °C sıcaklıklar için gerçekleştirilmiştir.

Bu deney prosedüründe ise adsorblama hızının yüksek olduğu başlangıç sürecinde (0,01 bar-1,5 bar aralığı) basınç ve sıcaklık değerleri 1 saniye aralıklarla kaydedilmiş, sonraki süreçte kayıt süresi 2 ila 10 saniye arasına çekilerek ölçümler aktarım tamamlanıncaya kadar kaydedilmiştir.

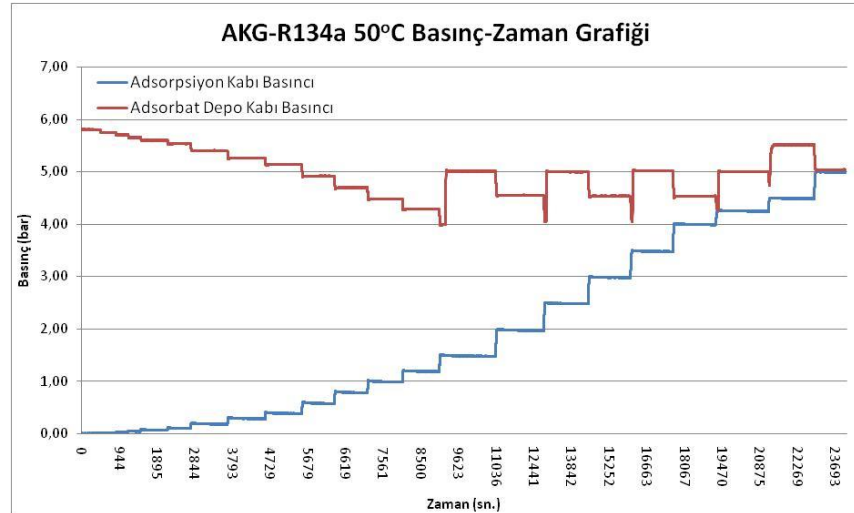
Şekil 4.10. – 4.13. arasında R134a ve farklı adsorbent maddelerinin farklı sabit sıcaklıklıklarda adsorbsiyon prosesi esnasında oluşan basınç değişimleri görülmektedir. Şekil 4.14. – 4.17. arasında ise R404a ve farklı adsorbent maddelerinin farklı sabit sıcaklıklıklarda adsorbsiyon prosesi esnasında oluşan basınç değişimleri görülmektedir. Ayrıca şekil 4.10. – 4.17. arasında verilen grafikler adsorblama sürecinin kinetiği hakkında da bilgi vermektedir.



(a)

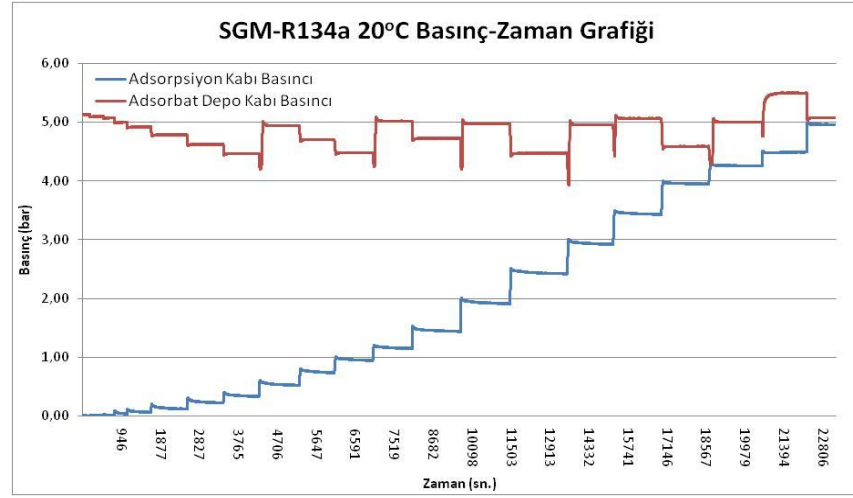


(b)

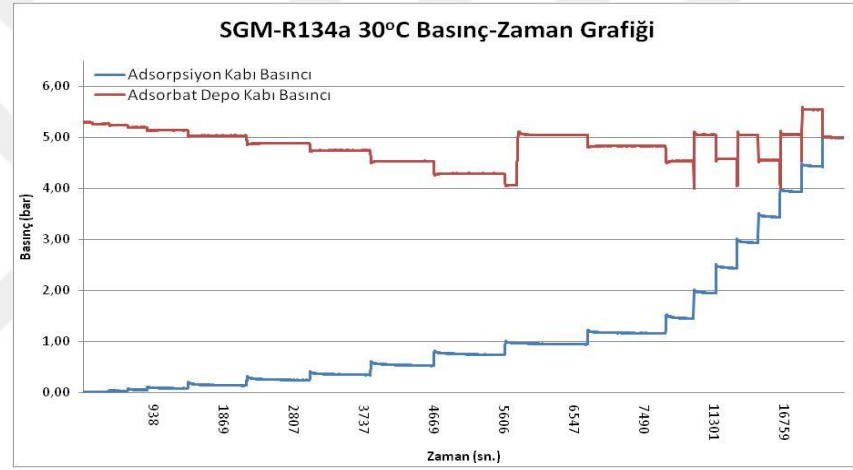


(c)

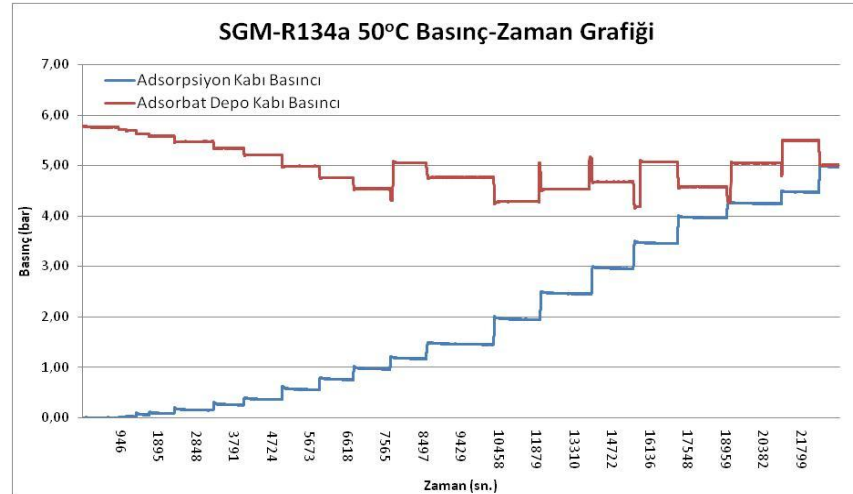
Şekil 4.10. Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

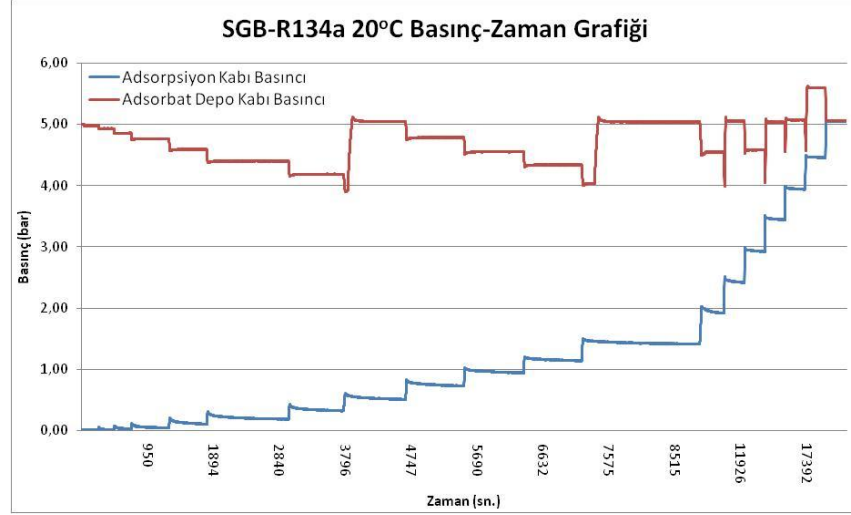


(b)

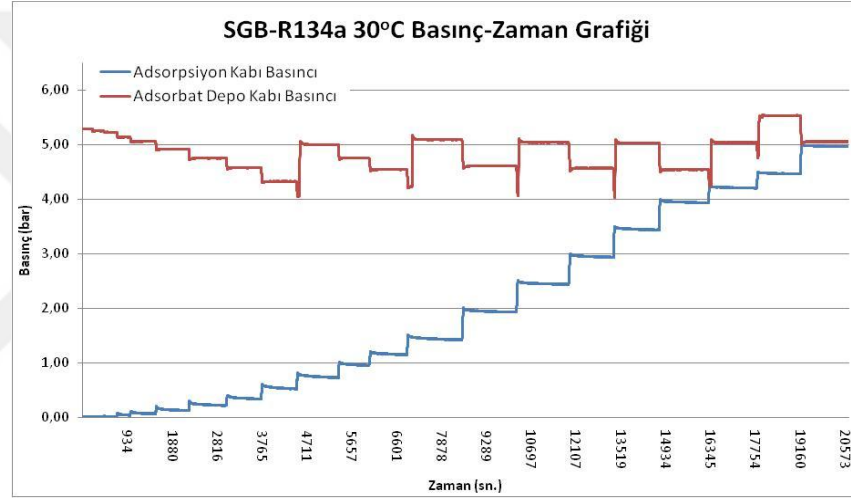


(c)

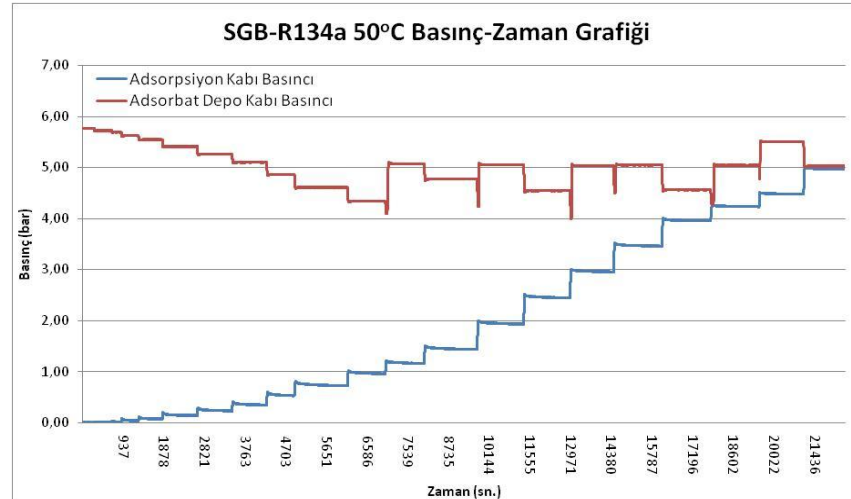
Şekil 4.11. Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

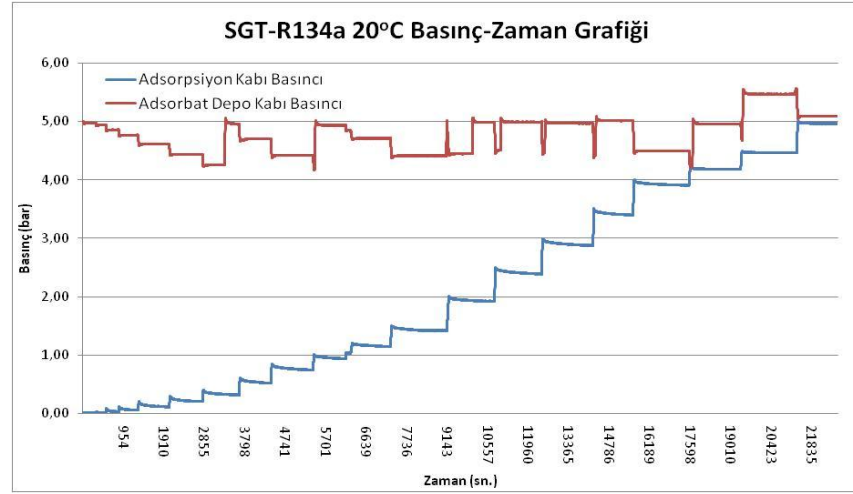


(b)

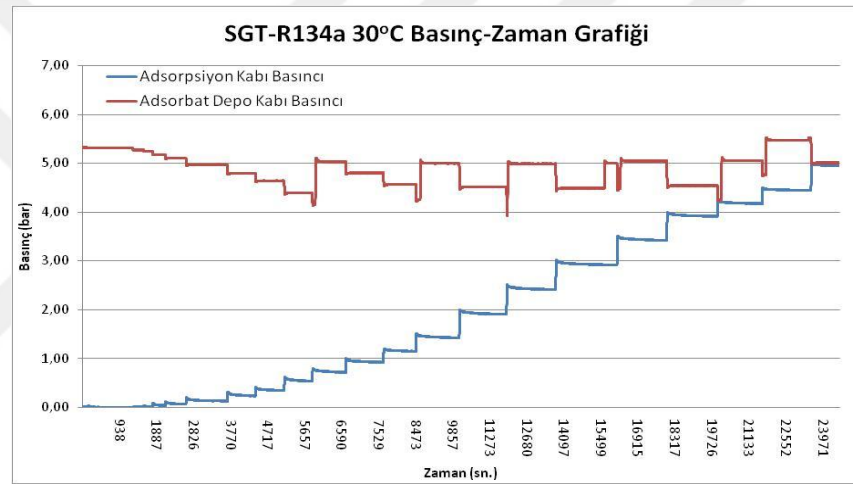


(c)

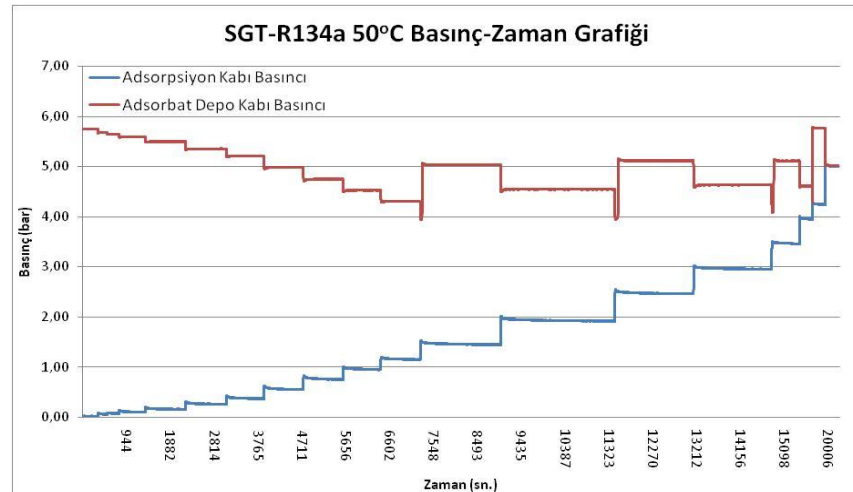
Şekil 4.12. Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

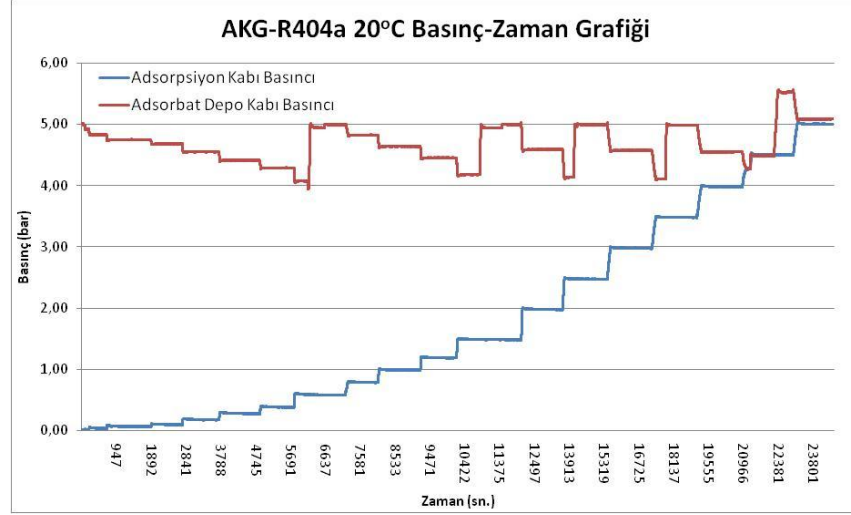


(b)

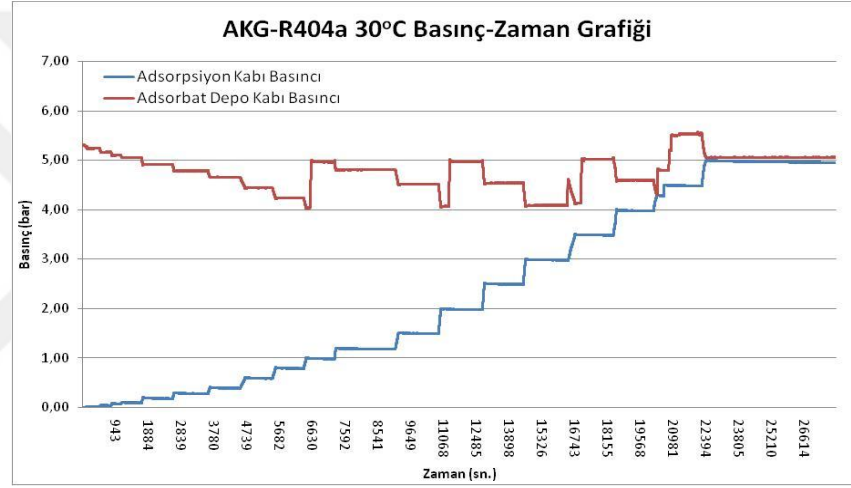


(c)

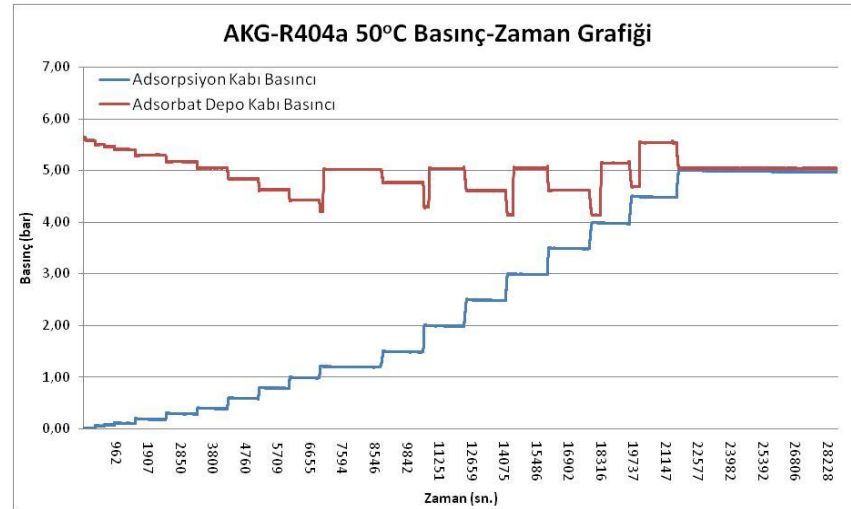
Şekil 4.13. Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R134a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

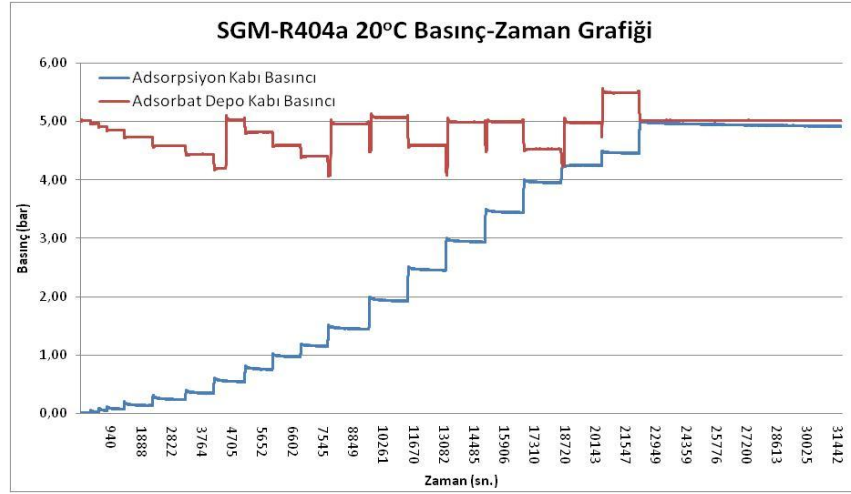


(b)

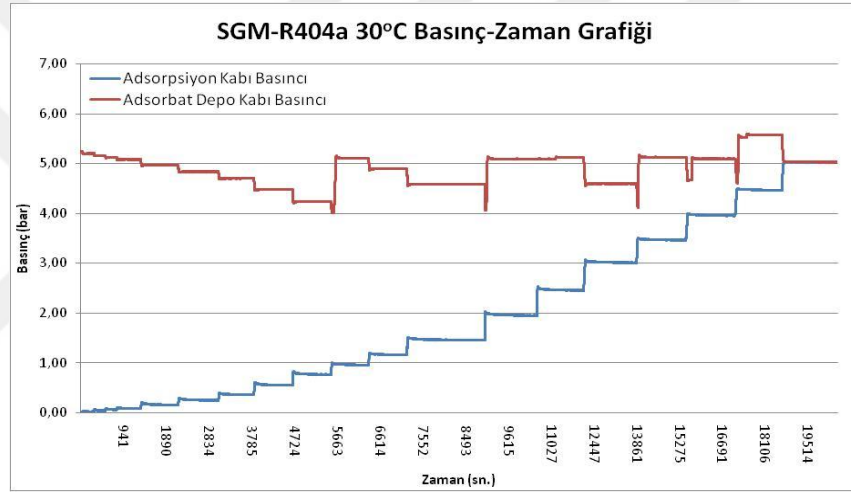


(c)

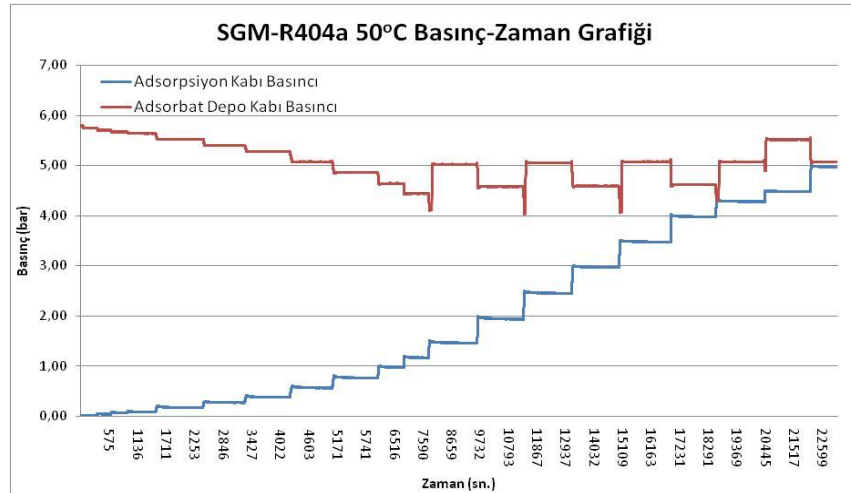
Şekil 4.14. Sabit sıcaklıkta Granül aktif karbon-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

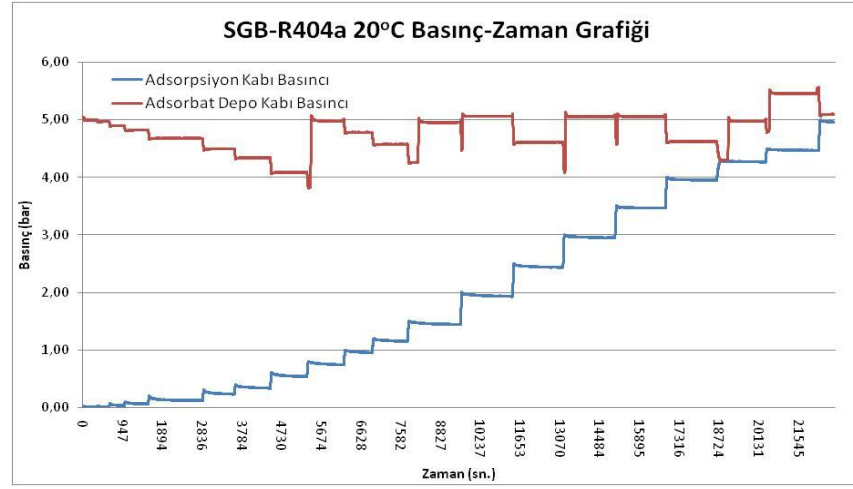


(b)

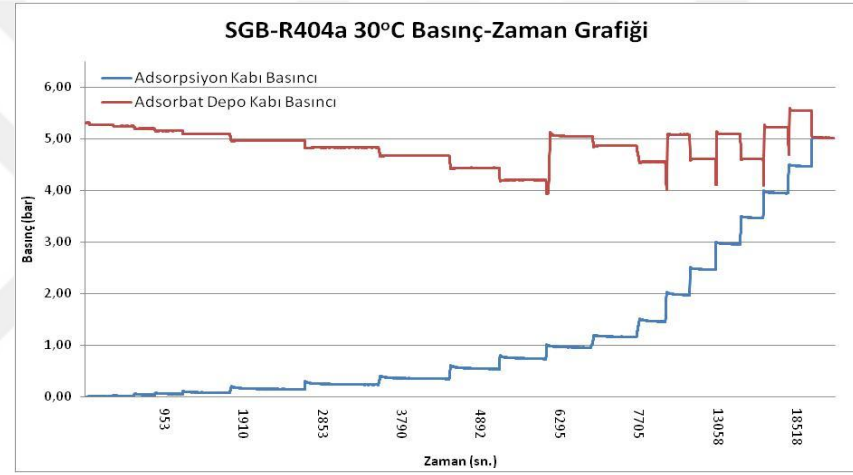


(c)

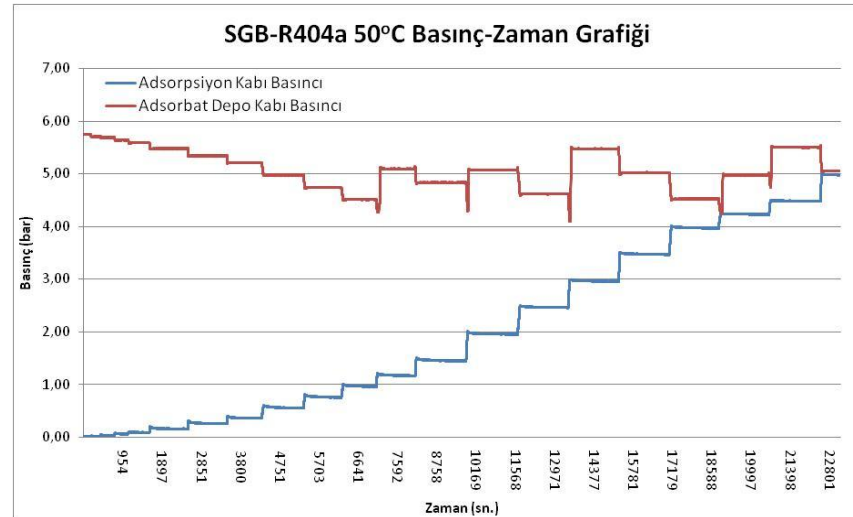
Şekil 4.15. Sabit sıcaklıkta Mavi Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)

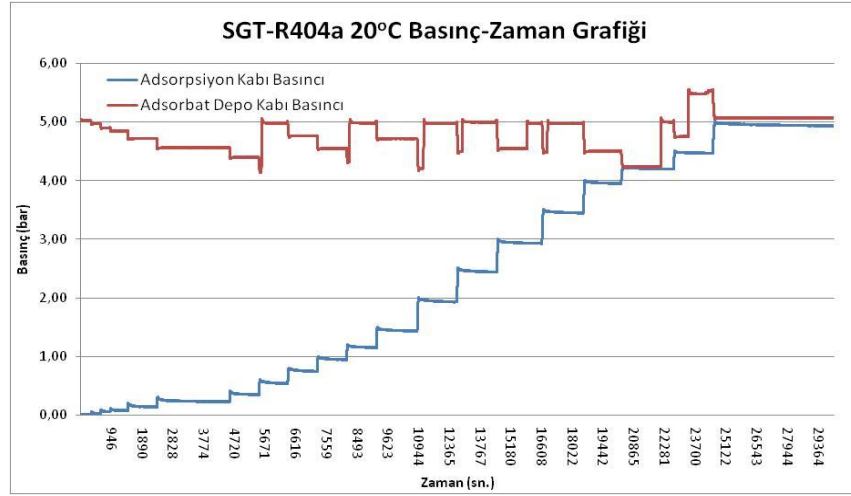


(b)

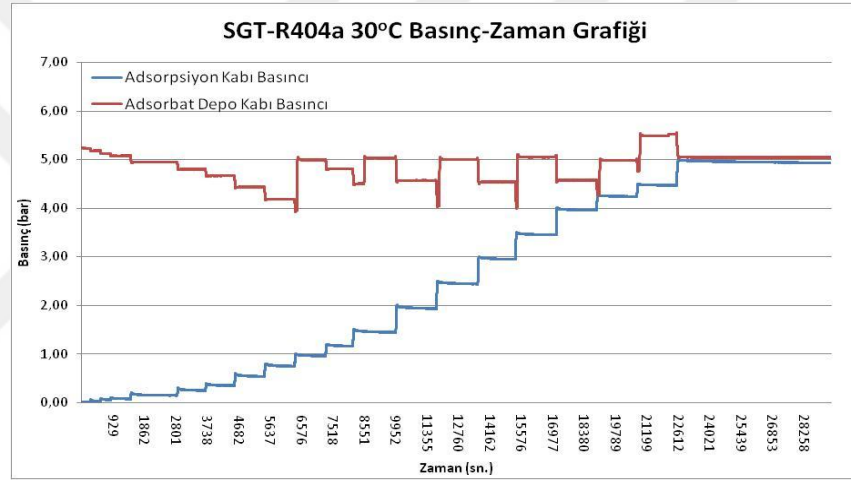


(c)

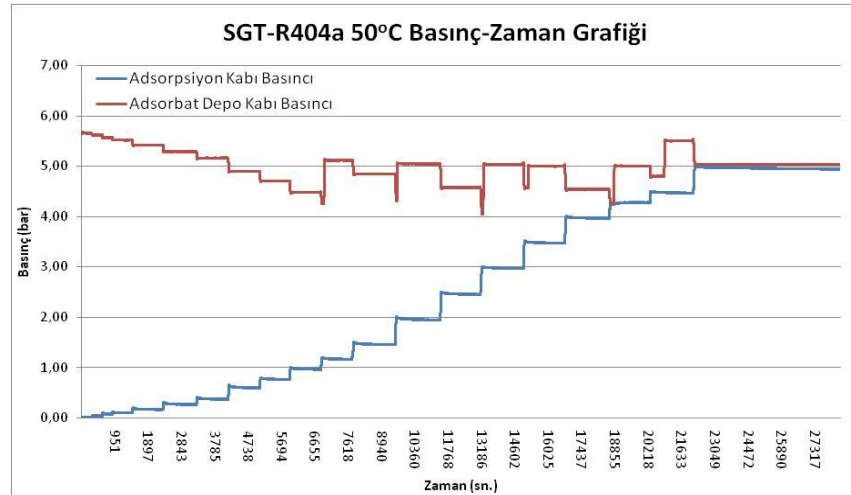
Şekil 4.16. Sabit sıcaklıkta Beyaz Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C



(a)



(b)



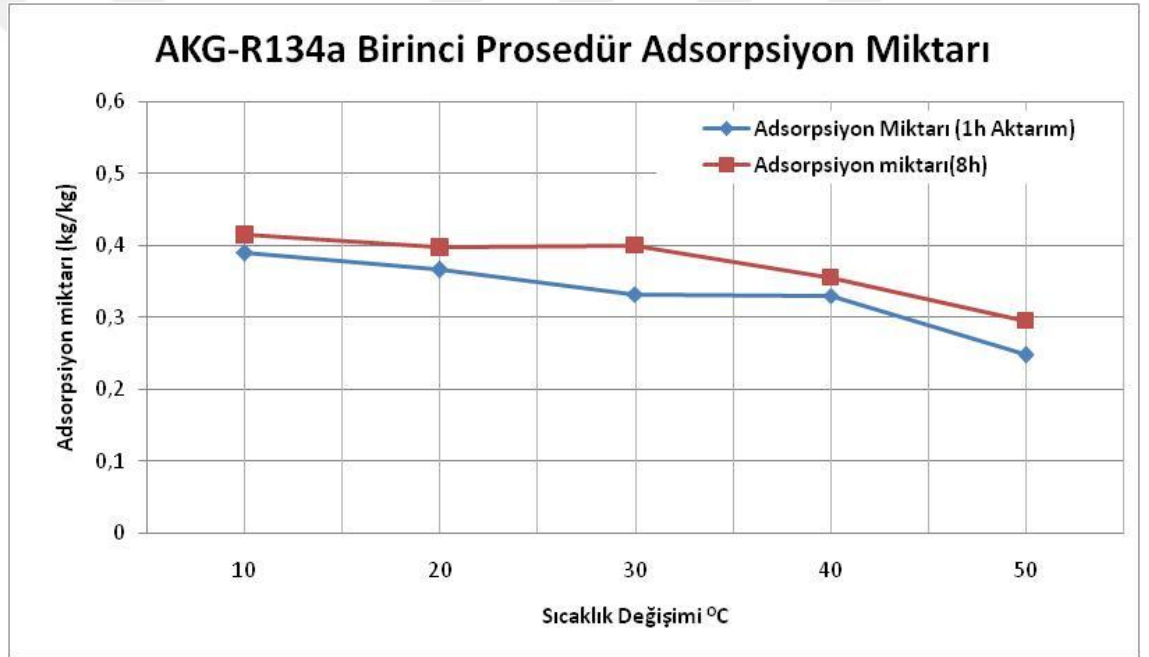
(c)

Şekil 4.17. Sabit sıcaklıkta Turuncu Silikajel-R404a çiftinin ikinci prosese göre adsorblama prosesinde malzeme ve gaz tanklarında basınç değişimi: (a)20 °C, (b)30 °C ve (c)50 °C

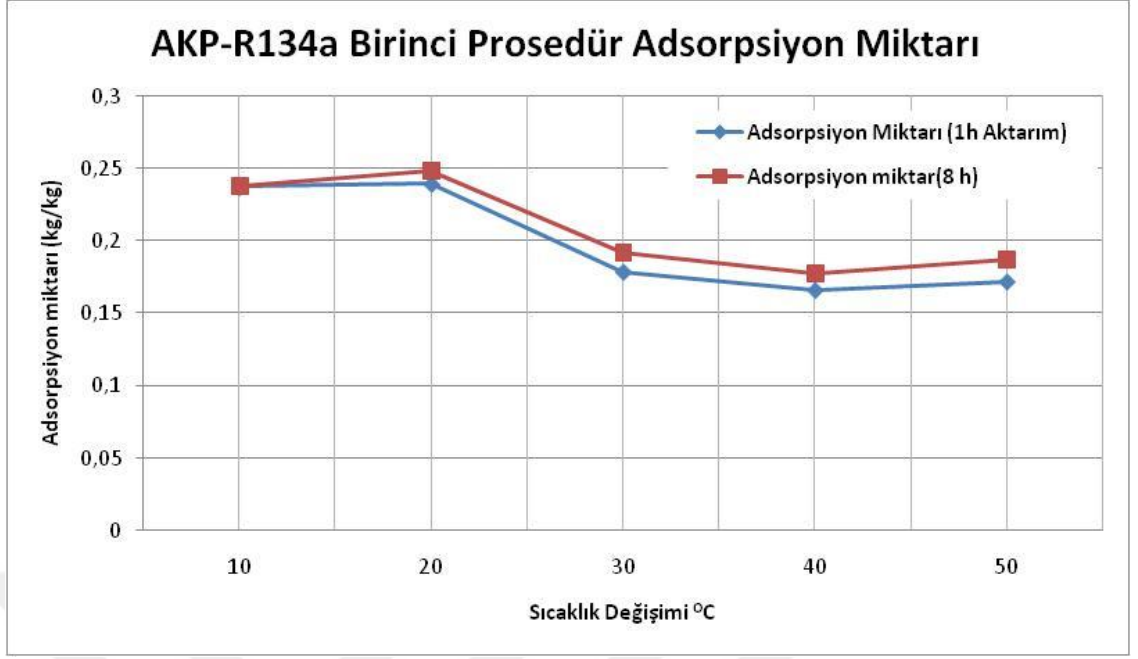
4.3. Birinci Prosedürün Kullanıldığı Deneylerde Adsorplama Miktarları

Şekil 4.18. – 4.25. arasında R134a ve farklı adsorbent maddelerinin farklı sıcaklıklarda adsorpsiyon prosesi sonucunda adsorblama miktarının deneyde kullanılan adsorbent numunenin kütlesine oranının değişimleri görülmektedir. Grafiklerde adsorblama oranının yaklaşık bir saatlik süre sonunda ve sekiz saatlik süre sonundaki miktarları birlikte görülmektedir.

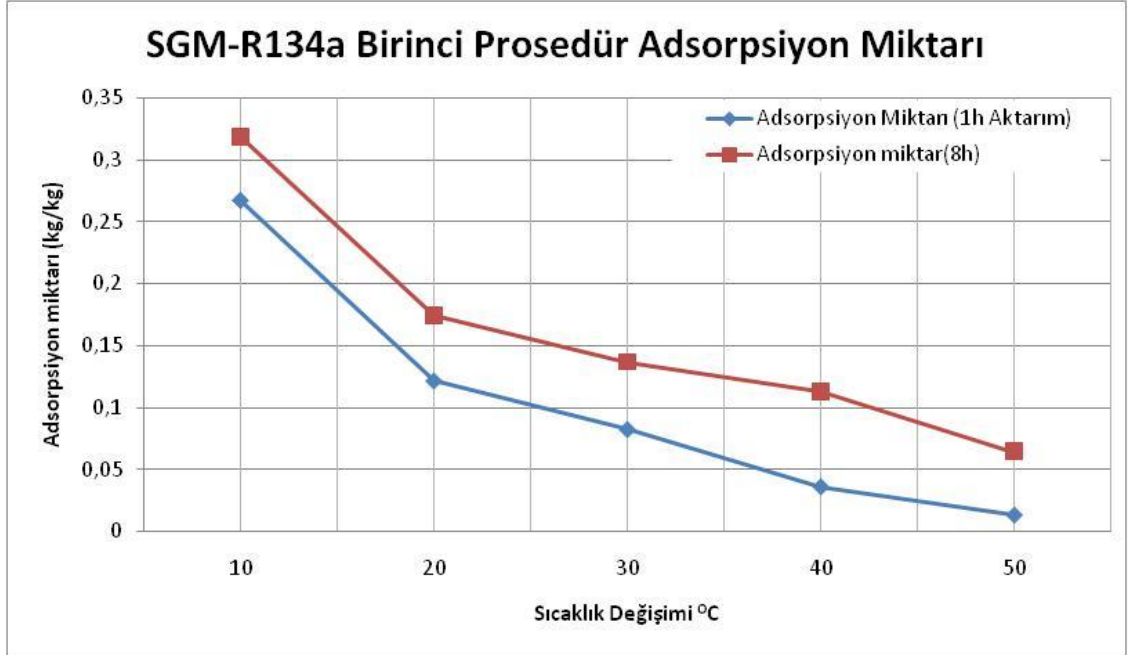
Görüldüğü gibi adsorblama prosesi büyük oranda ilk bir saatlik sürede tamamlanmakta bundan sonraki değişimler daha yavaş olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü üzere artan sıcaklık ile adsorbentin adsorblama oranı düşmektedir.



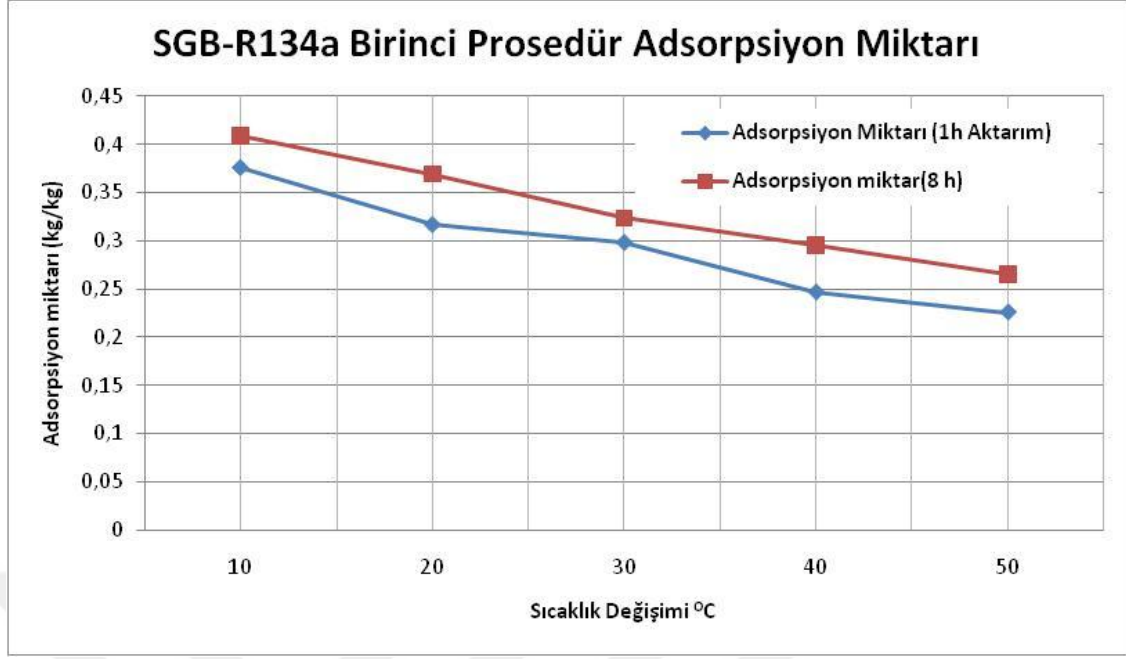
Şekil 4.18. Granül Aktif Karbon-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentin soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



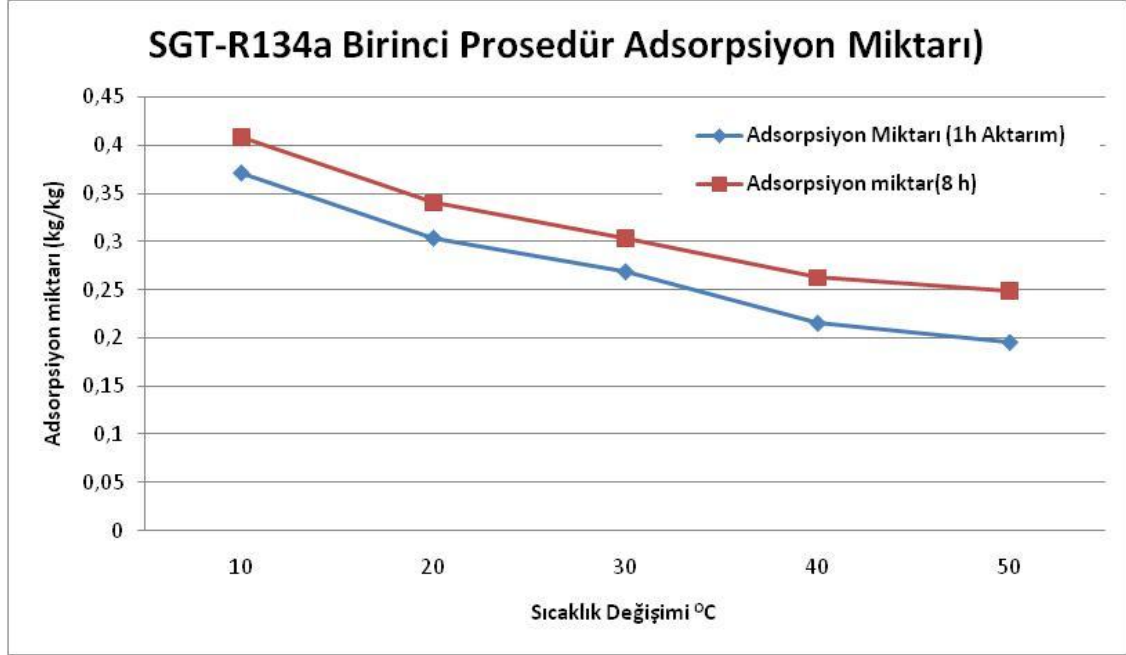
Şekil 4.19. Pelet Aktif Karbon-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



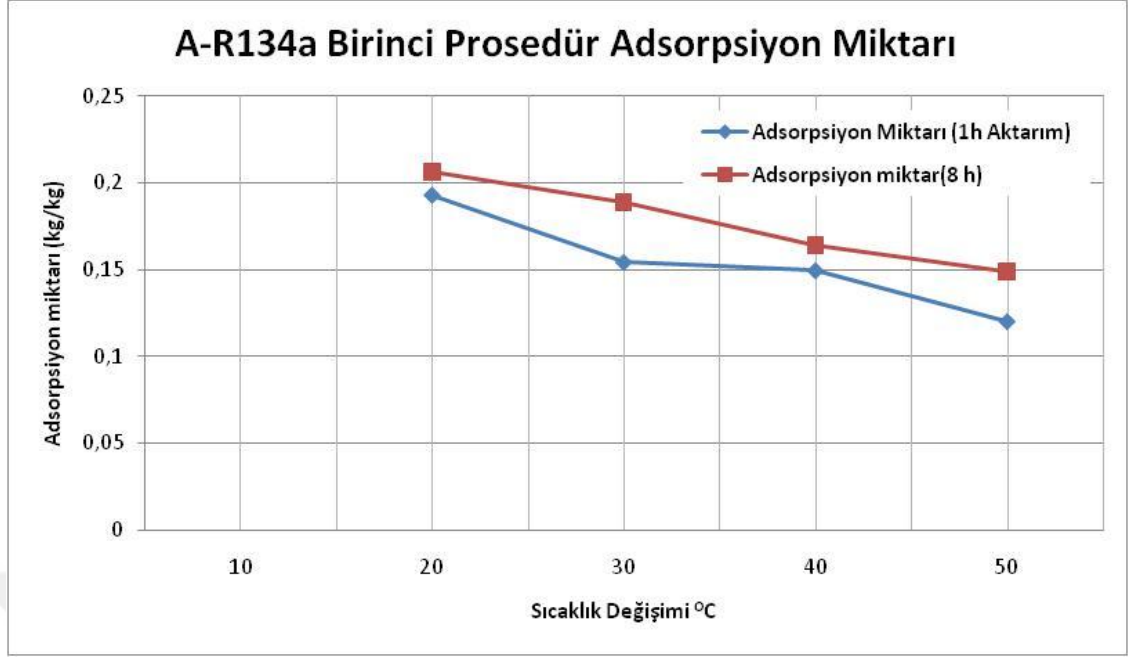
Şekil 4.20. Mavi Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



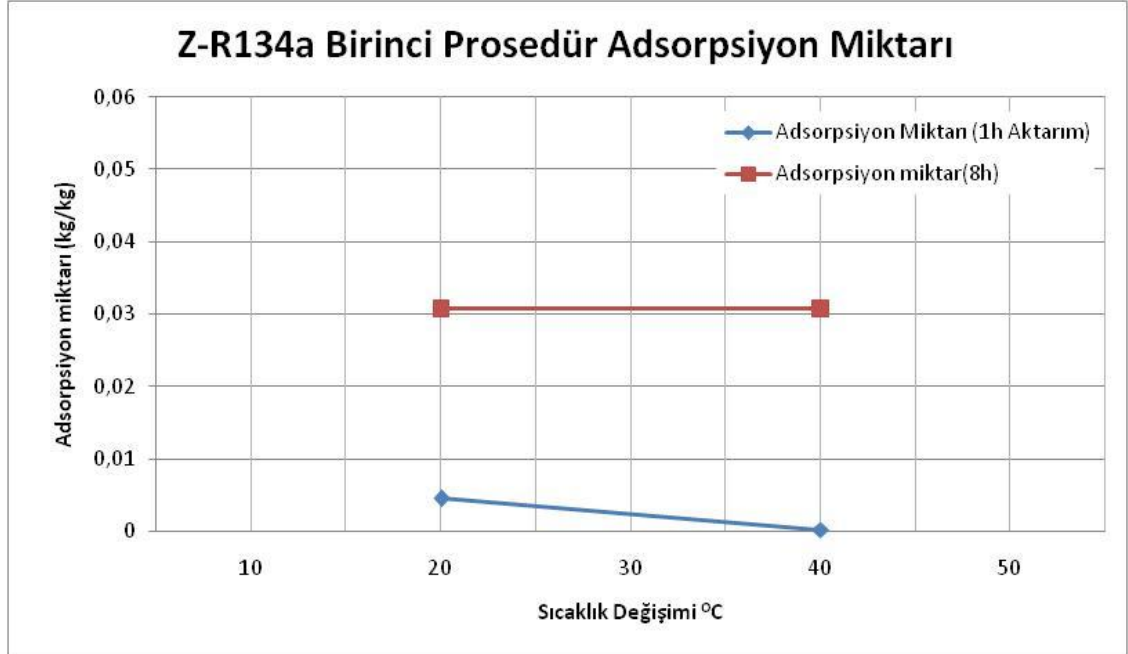
Şekil 4.21. Beyaz Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



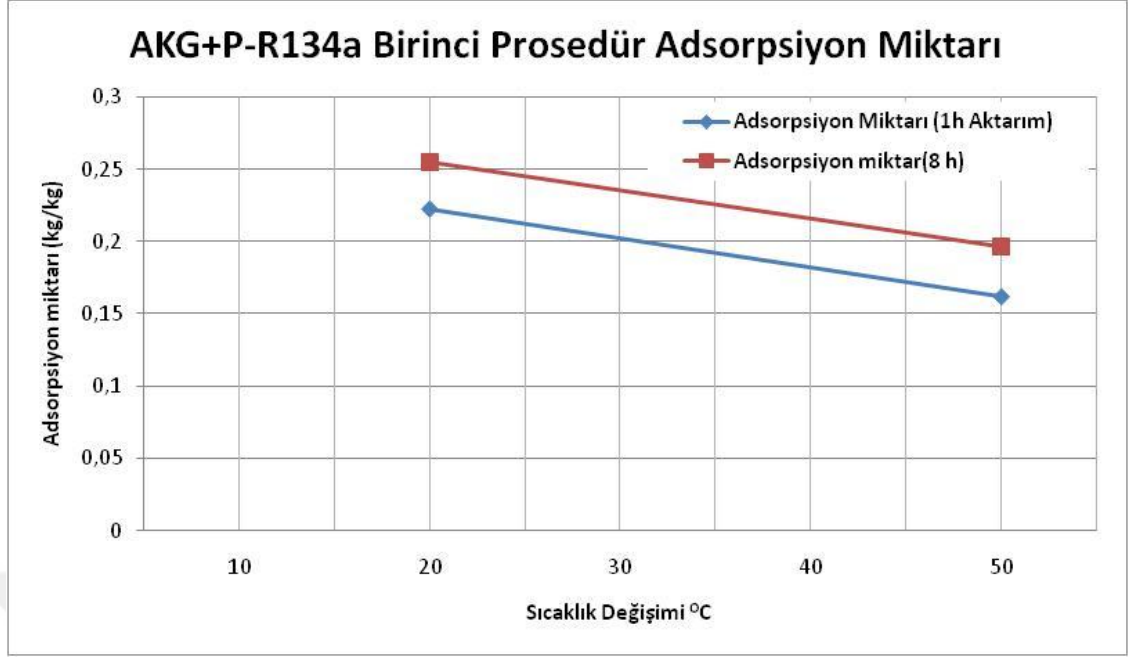
Şekil 4.22. Turuncu Silikajel-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



Şekil 4.23. Aktif Alümina-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



Şekil 4.24. Zeolit-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)



Şekil 4.25. Granül Aktif Karbon ve Polimer Karışımı-R134a çiftinin sabit sıcaklıktaki adsorblama prosesinde adsorbentın soğutucu akışkanı adsorblama oranı (adsorplanan adsorbat_kg/adsorbent_kg)

Şekil 4.18, 4.21 ve 4.22 birlikte değerlendirildiğinde R134a'nın en fazla adsorblanması granül aktif karbon, beyaz silikajel ve turuncu silikajel numelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Literatürde aktif karbon ile R134a çiftinin kullanıldığı bilinmektedir, ancak adsorbent olarak silikajelin aktif karbon kadar iyi adsorblama yapıldığına dair çalışmalar çok azdır.

Çalışmalar kapsamında laboratuarda ürettiğimiz mikro küre yapıdaki polimerler beklenen sonucu vermemiştir. Çalışmada kullanılan polimerin R134a ile adsorblama kapasitesinin istenilen düzeyde olmadığı Şekil 4.25'te de görülmektedir. Çalışmada deney sisteminde kullanılacak miktarda polimer üretiminin maliyeti çok yüksek olduğu için ve kullanılan polimerden de olumlu sonuç alınamayınca deneylere alternatif adsorbentlar ile devam edilmesi uygun bulunmuştur.

Diğer adsorbent maddeler zeolit ve alümina da R134a ile birlikte deneylerde test edilmiştir. Şekil 4.24'de görüleceği üzere zeolitin R134a adsorblama kapasitesi oldukça zayıftır. Şekil 4.23'de görüleceği üzere alümina her ne kadar silikajel ve aktif karbon kadar iyi olmasa da orta seviyelerde adsorblama oranına sahiptir.

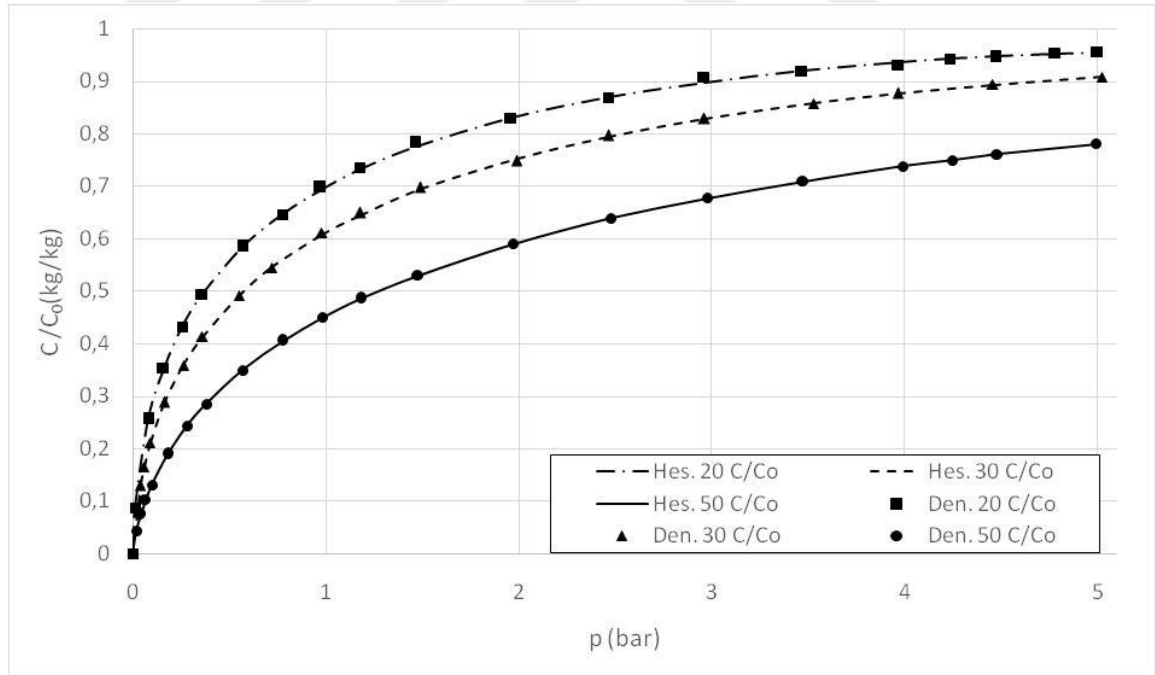
4.4. İkinci prosedüre göre yapılan deneylerin adsorpsiyon izotermelerindeki, izosterlerindeki ve ısılarındaki değişimler

Şekil 4.26, 4.29, 4.32, 4.35, 4.38, 4.41, 4.44 ve 4.47 adsorpsiyon çiftlerinin 20 °C, 30 °C ve 50 °C'deki, sabit sıcaklıkta ve 0-5 bar aralığındaki adsorpsiyon miktarları hakkında bilgi vermektedir. Ayrıca aynı şekillerde, hesaplanan adsorpsiyon çiftlerinin parametreleri ile oluşturulan veriler ve deneysel verilerin uygunluğu karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen adsorpsiyon parametreleri ile oluşturulan grafikler ve deneysel veriler ile oluşturulan veriler uyum göstermektedir.

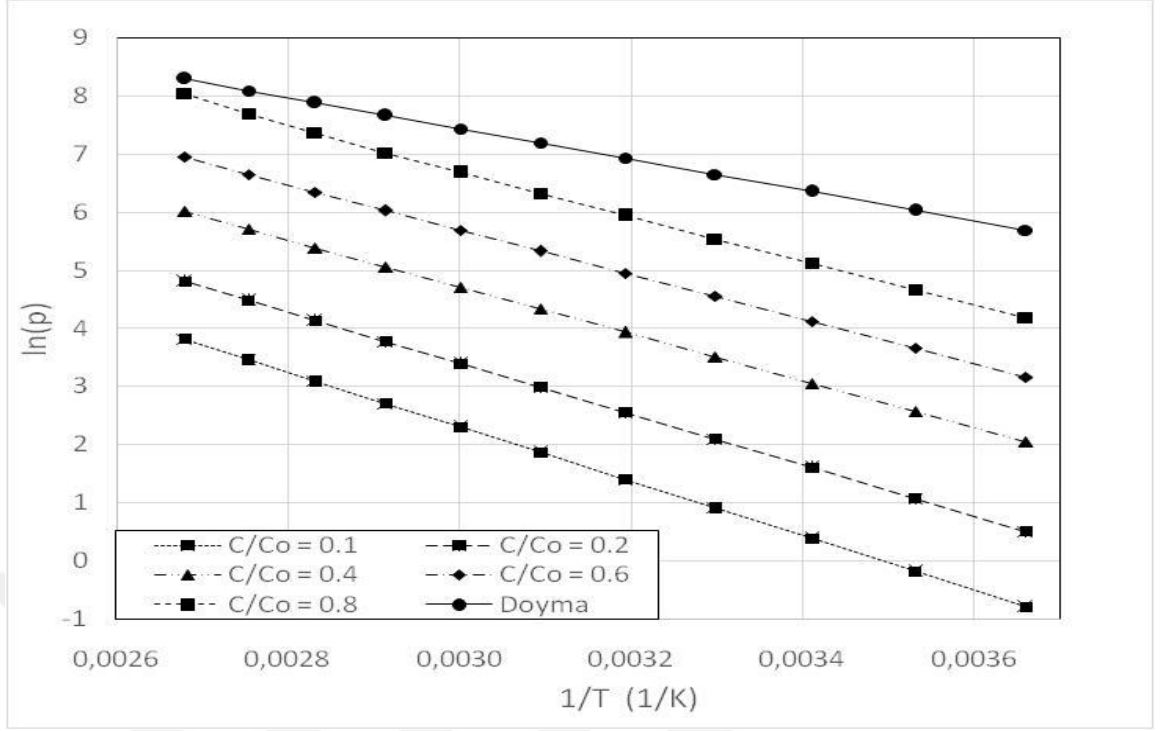
Şekil 4.27, 4.30, 4.33, 4.36, 4.39, 4.42, 4.45 ve 4.48 ise adsorpsiyon çiftlerinde $C/C_0=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ için $\ln(p)$ değişimine göre adsorpsiyon izosterlerini göstermektedir.

Şekil 4.28, 4.31, 4.34, 4.37, 4.40, 4.43, 4.46 ve 4.49 ise adsorpsiyon çiftlerinde $C/C_0=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir.

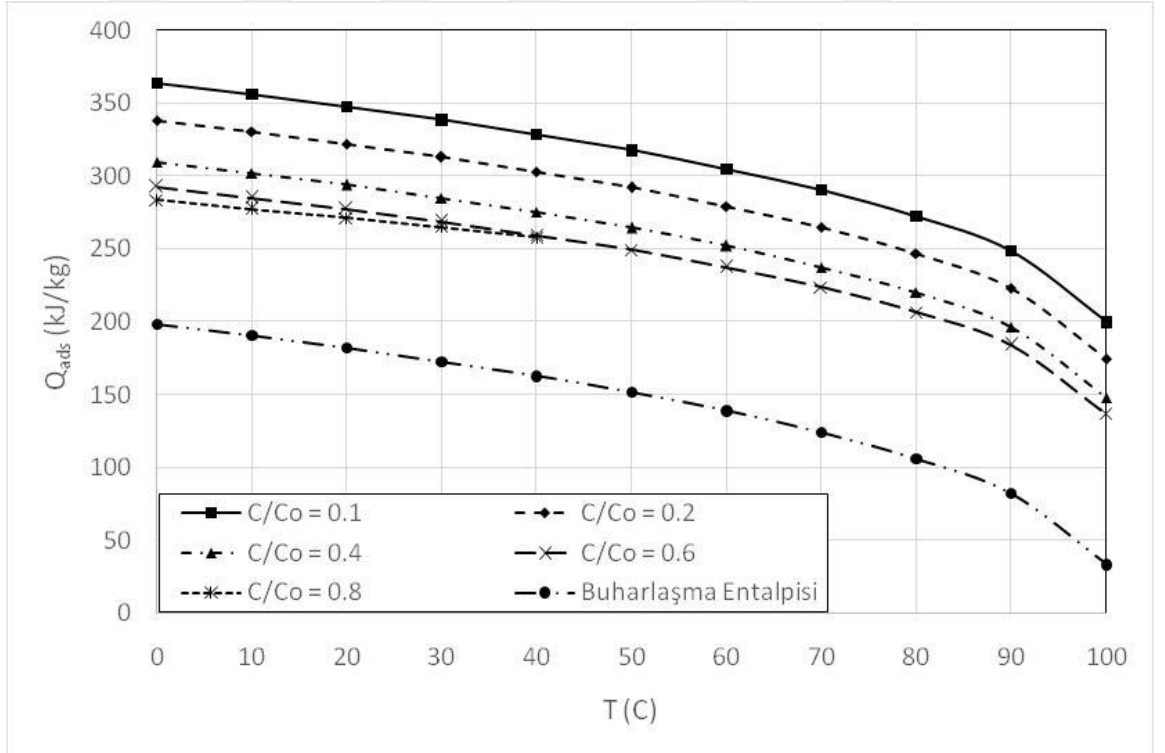
İkinci Deney Prosedürü için Aktif Karbon- R134a İzotermeleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.26. Granül Aktif Karbon-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermeler

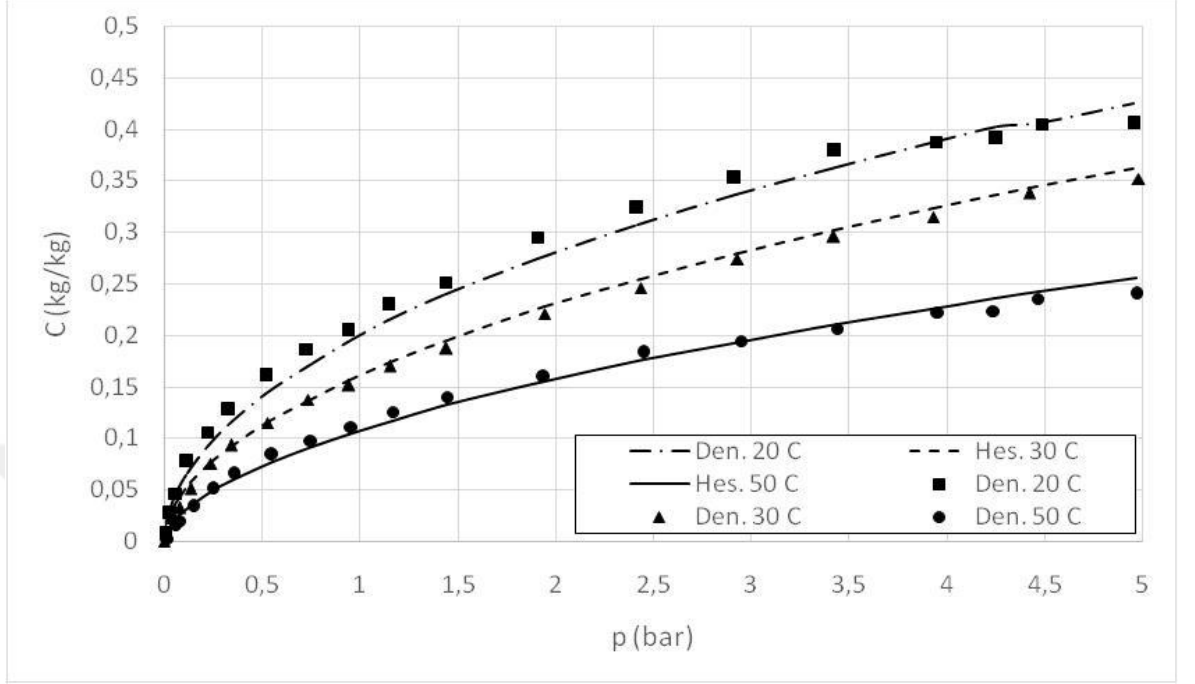


Şekil 4.27. Granül Aktif Karbon ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

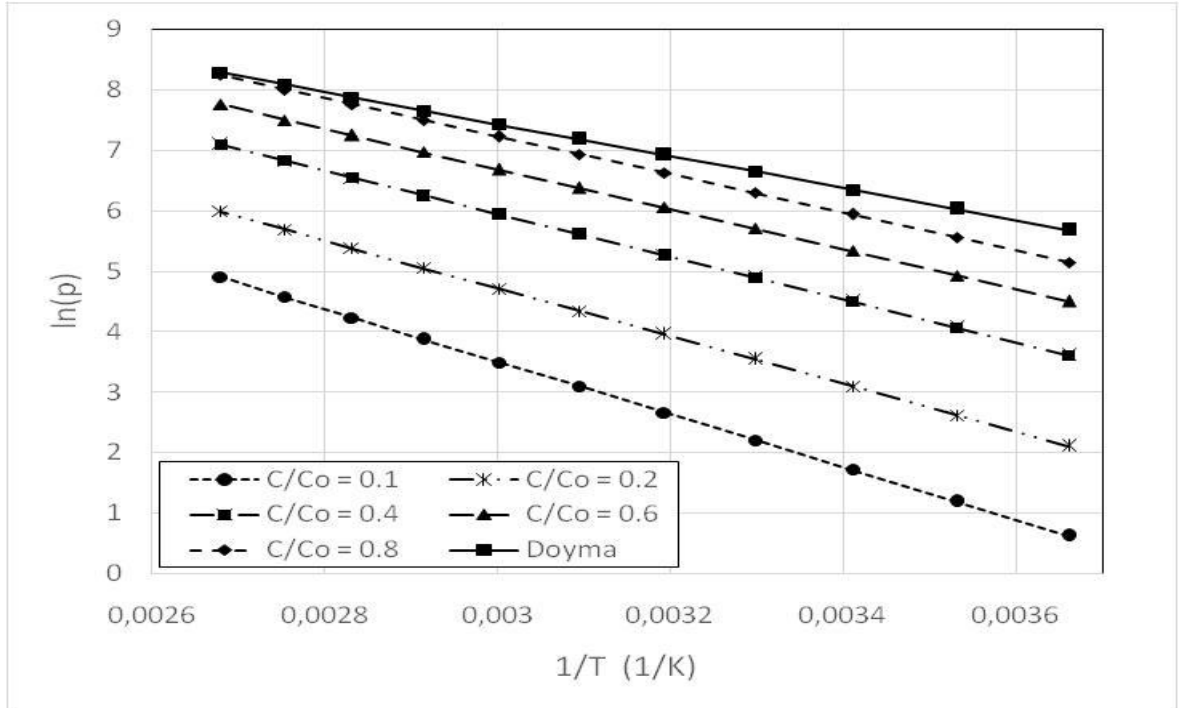


Şekil 4.28. Granül Aktif Karbon-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

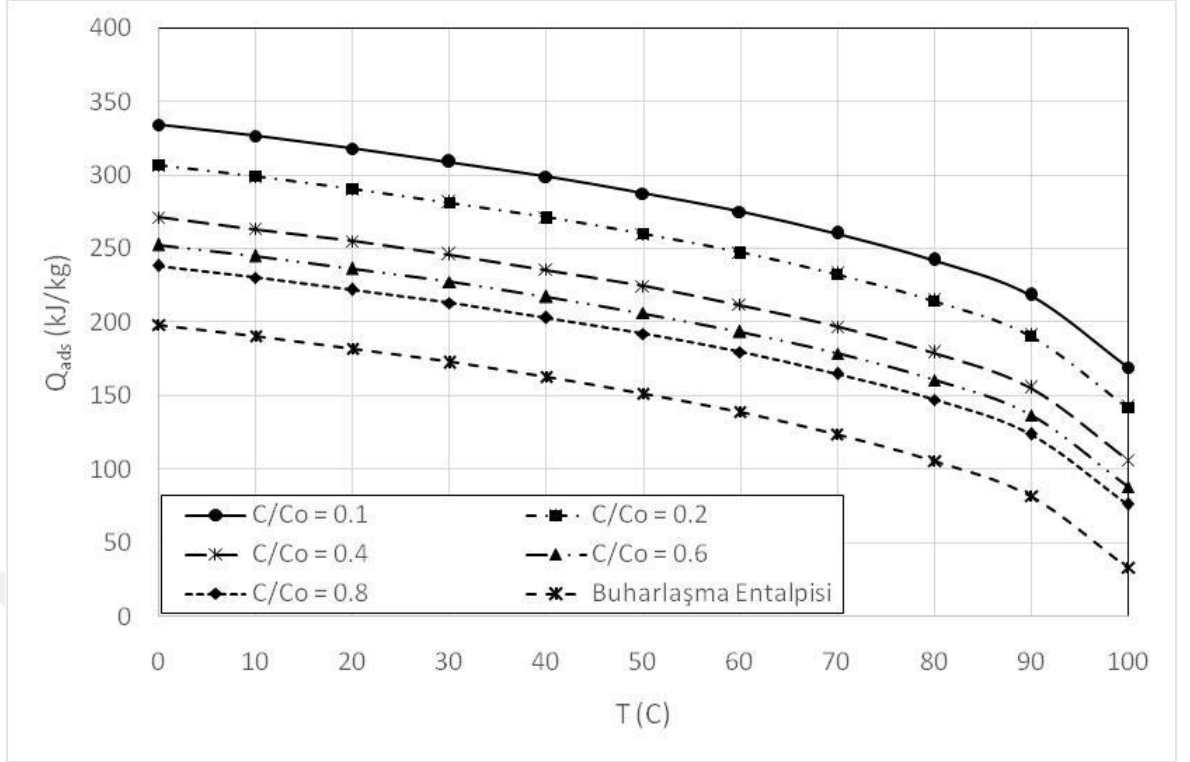
İkinci Deney Prosedürü için Mavi Silikajel- R134a İzotermleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.29. Mavi Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler

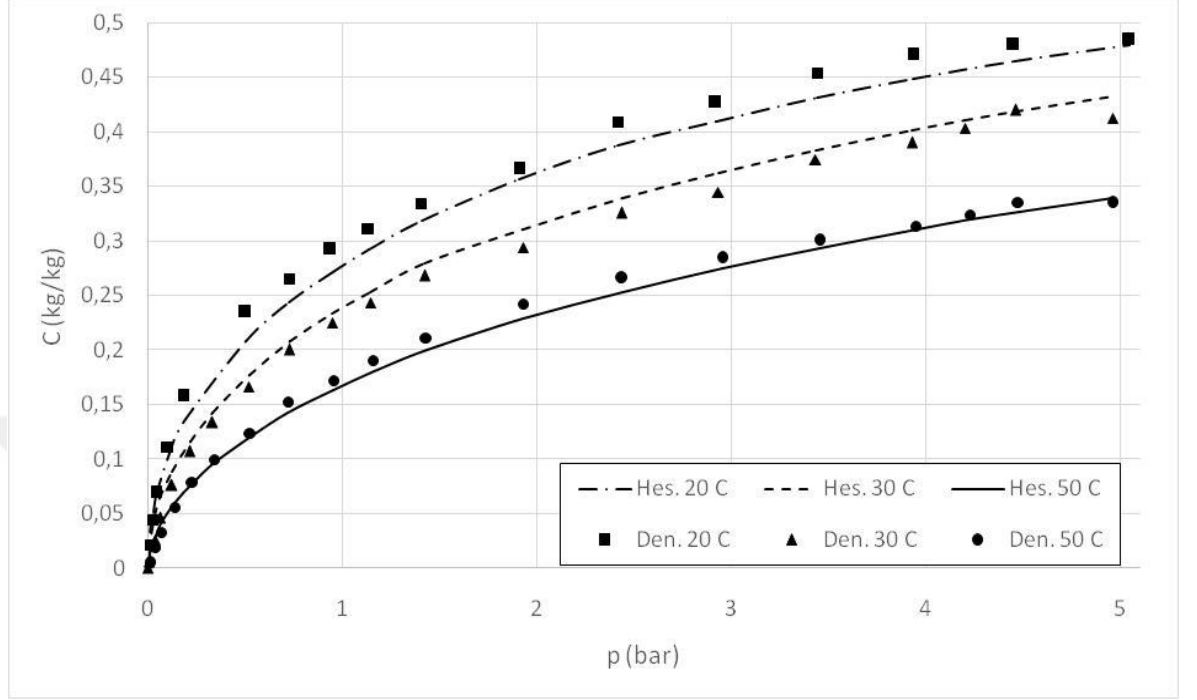


Şekil 4.30. Mavi Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

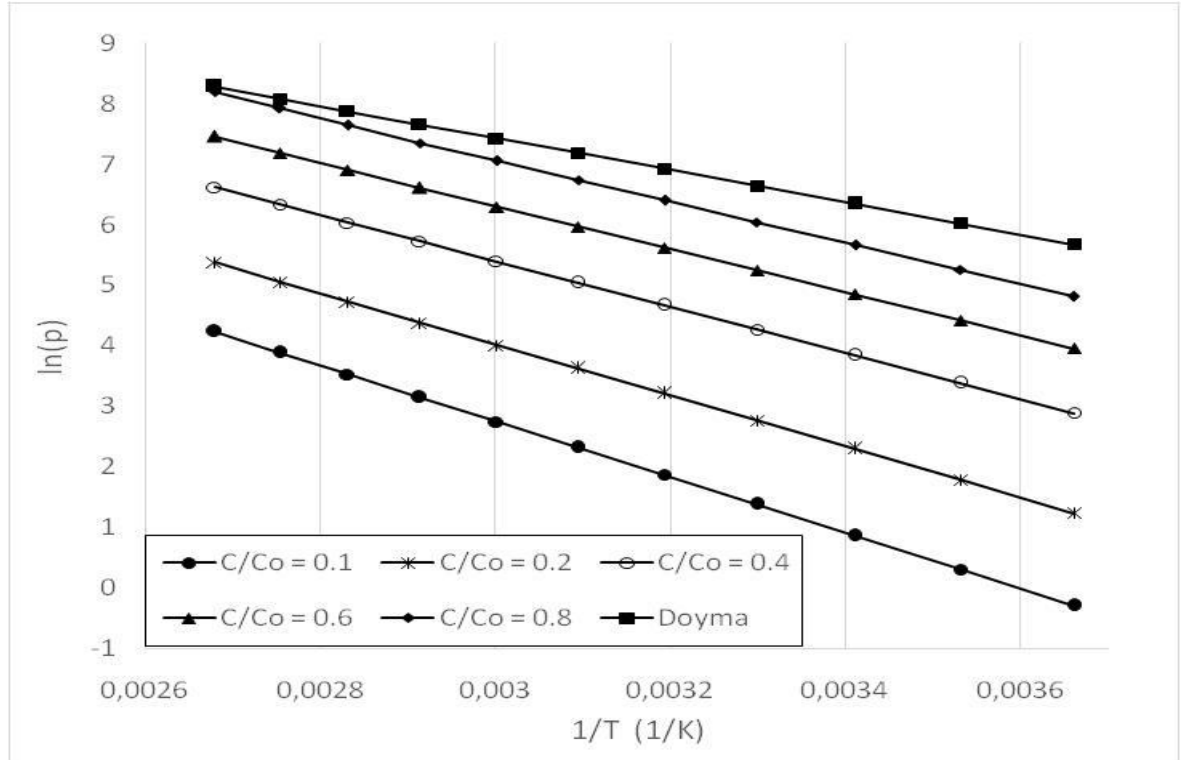


şekil 4.31. Mavi Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

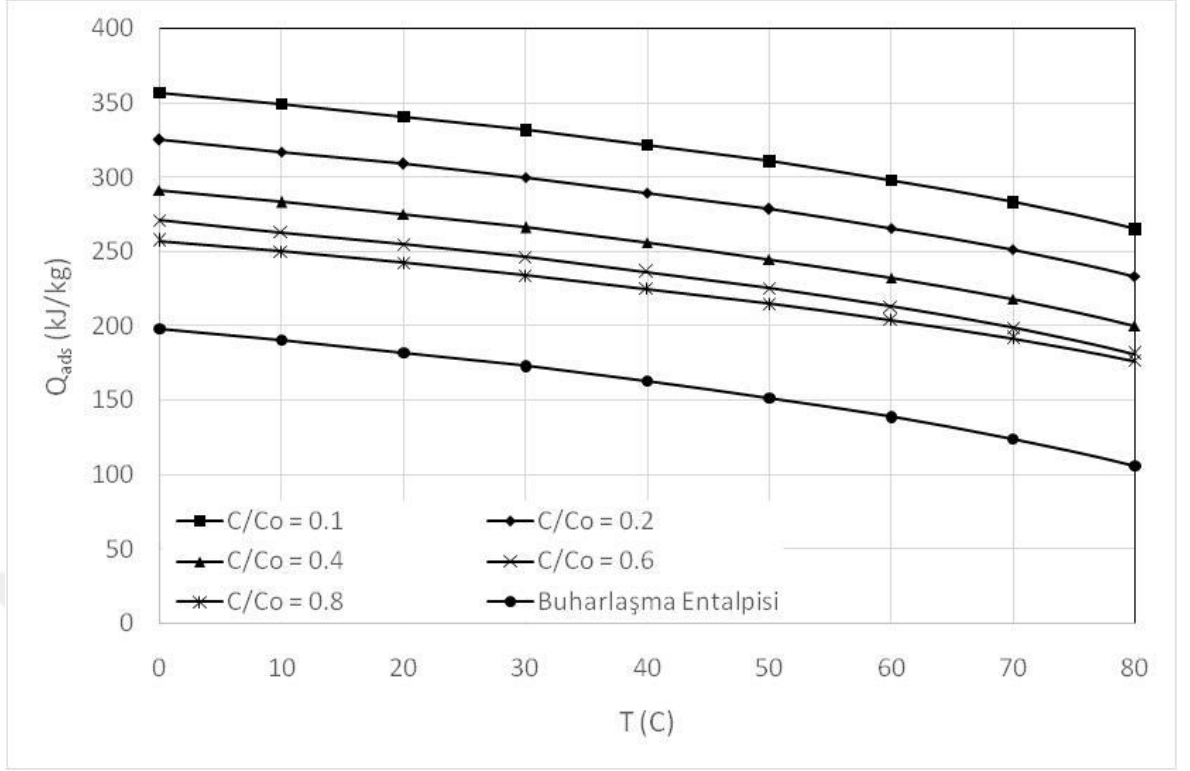
İkinci Deney Prosedürü için Beyaz Silikajel- R134a İzotermeleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.32. Beyaz Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermeler

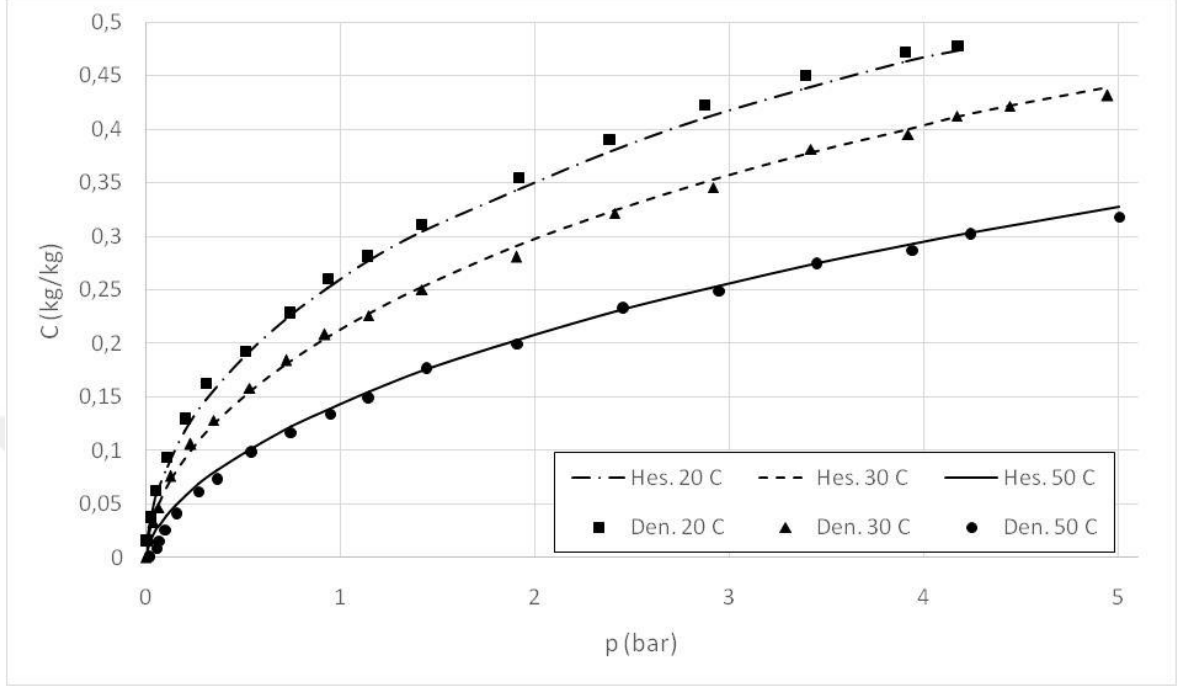


Şekil 4.33. Beyaz Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

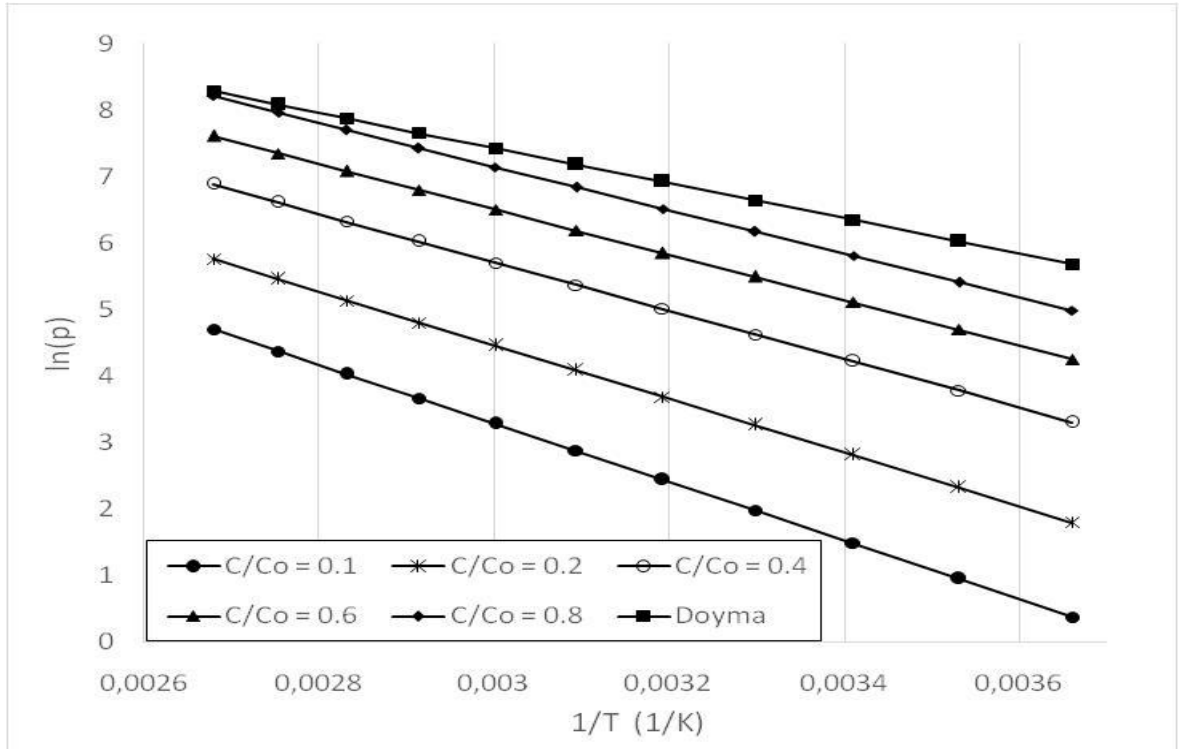


Şekil 4.34. Beyaz Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

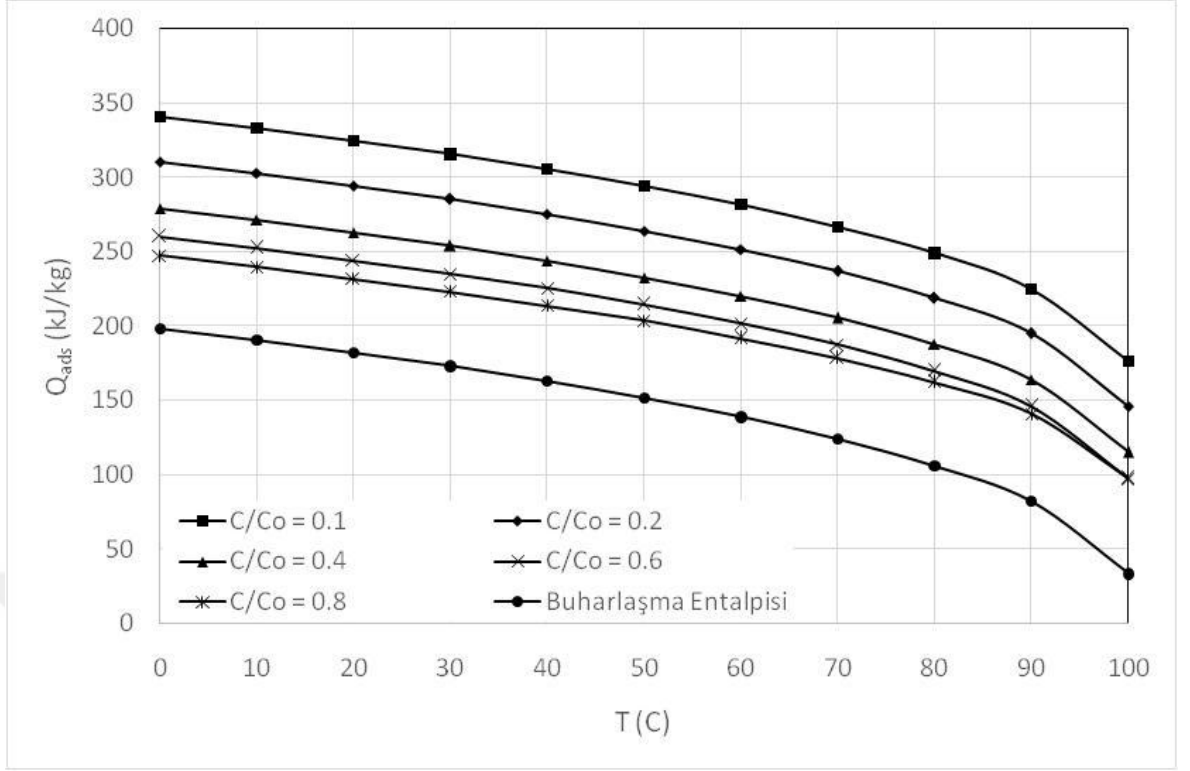
İkinci Deney Prosedürü için Turuncu Silikajel- R134a İzotermleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.35. Turuncu Silikajel-R134a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler

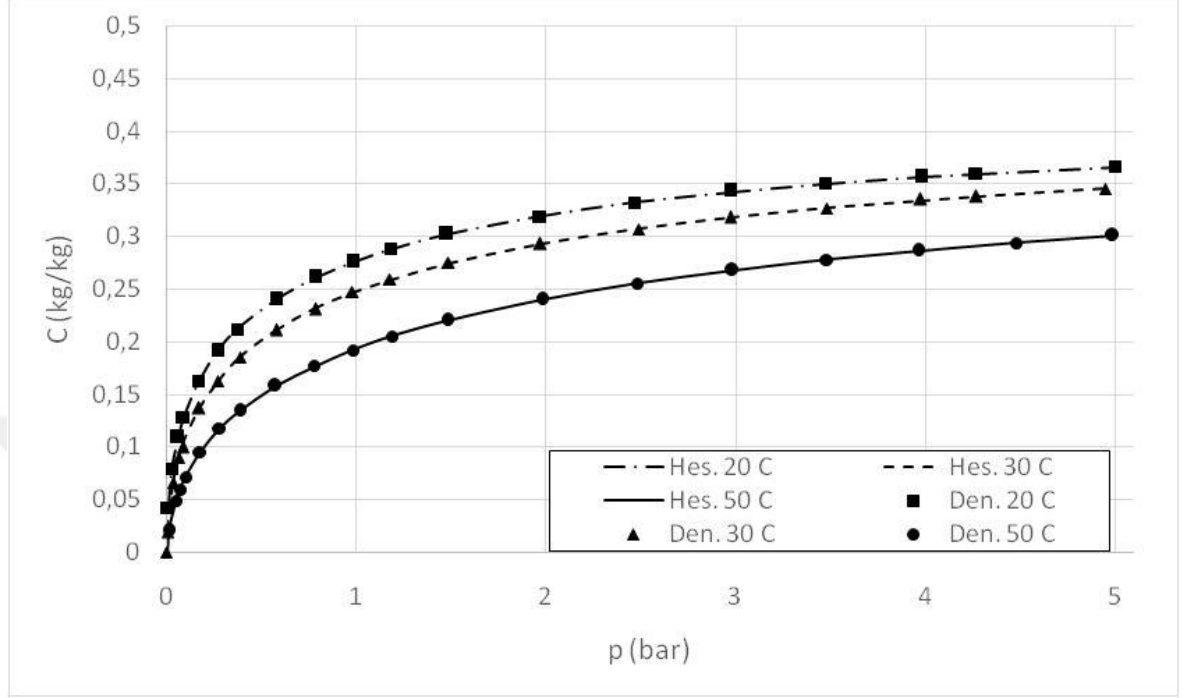


Şekil 4.36. Turuncu Silikajel ve R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

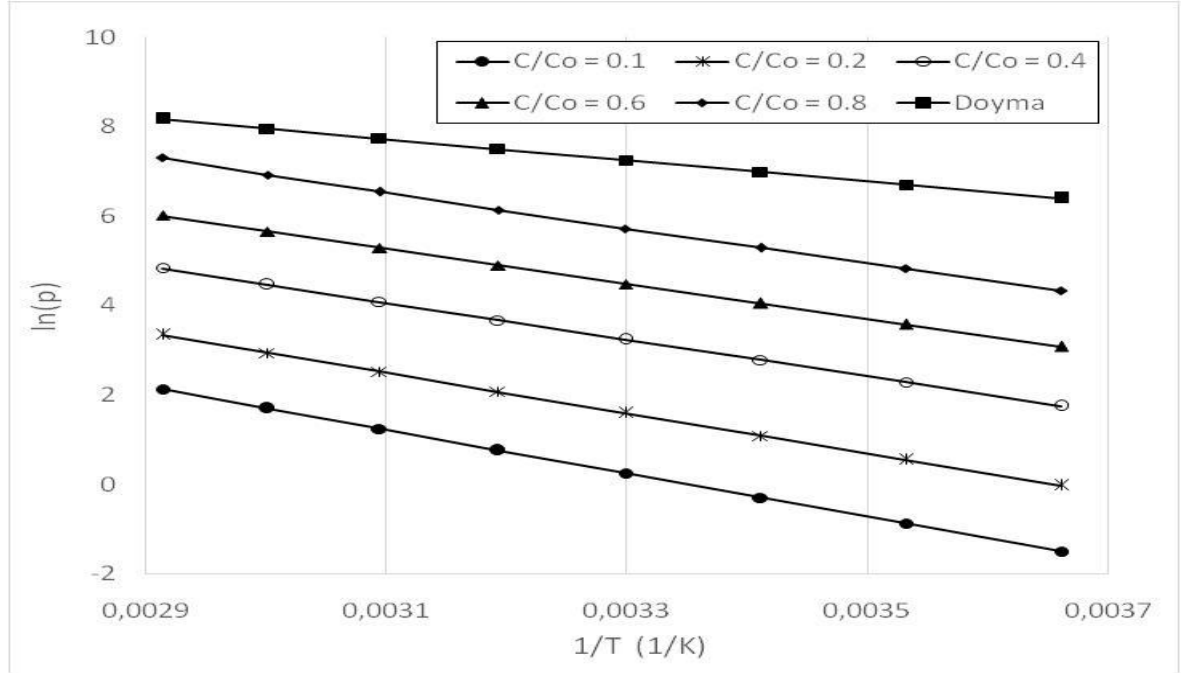


şekil 4.37. Turuncu Silikajel-R134a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

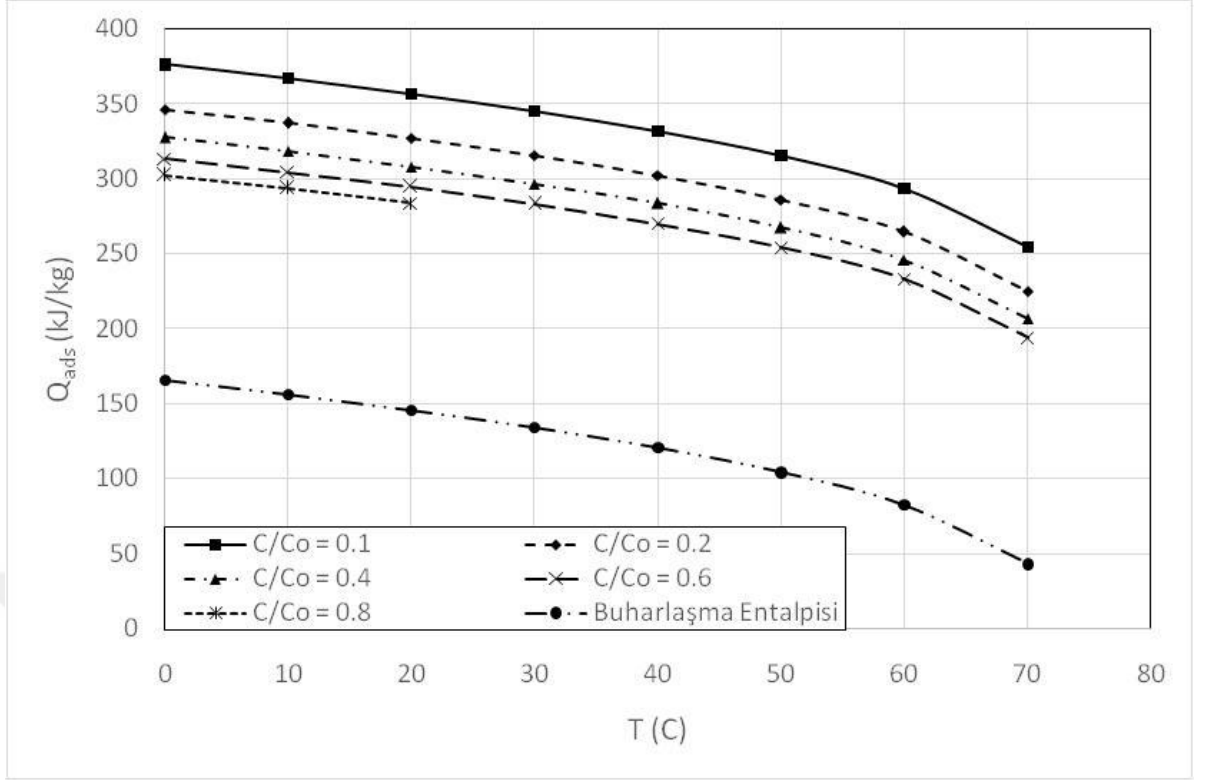
İkinci Deney Prosedürü için Granül Aktif Karbon- R404a İzotermeleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.38. Granül Aktif Karbon-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermeler

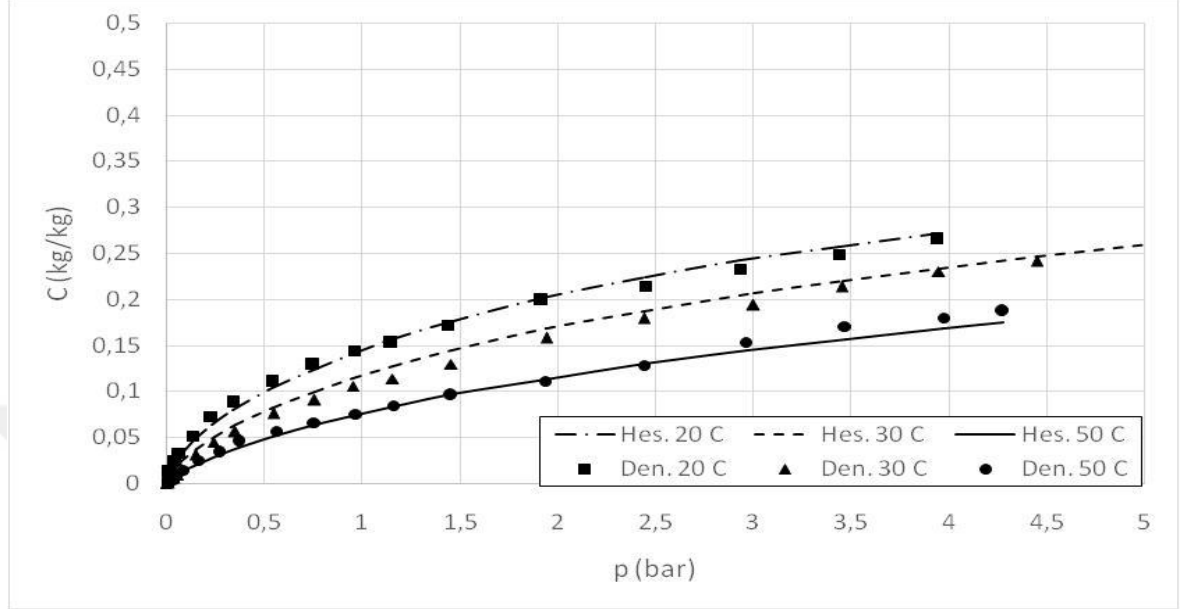


Şekil 4.39. Granül Aktif Karbon ve R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

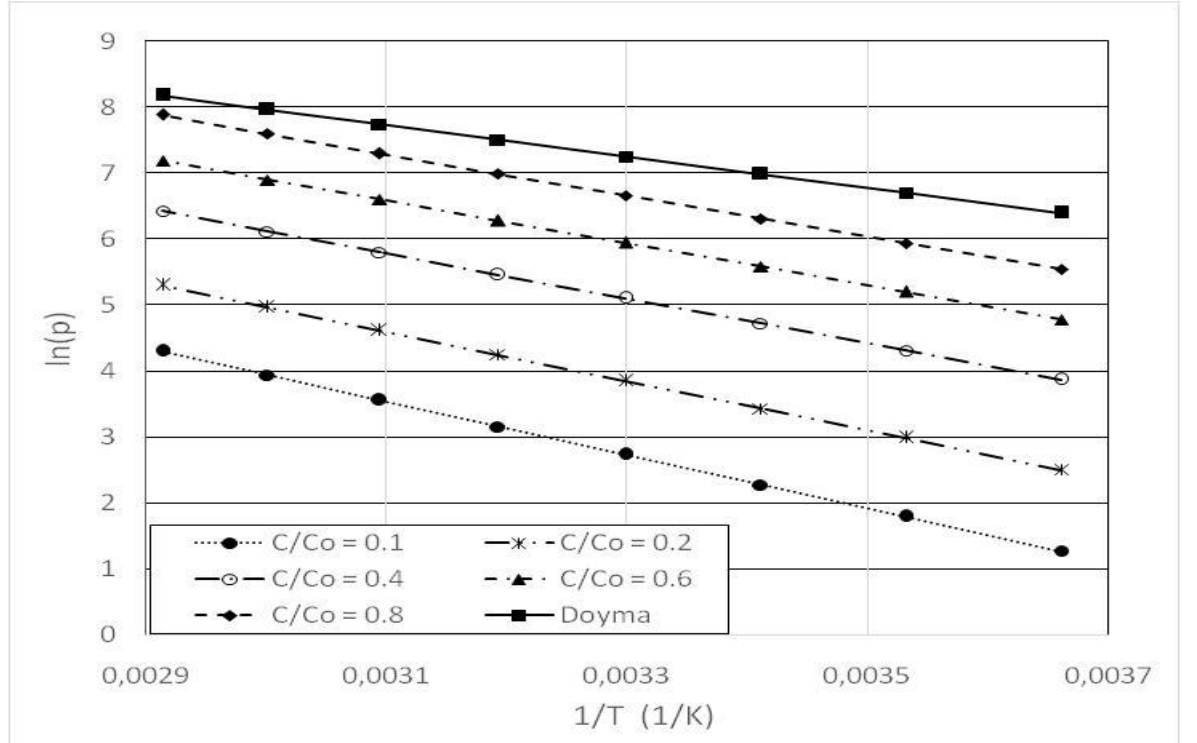


Şekil 4.40. Granül Aktif Karbon-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

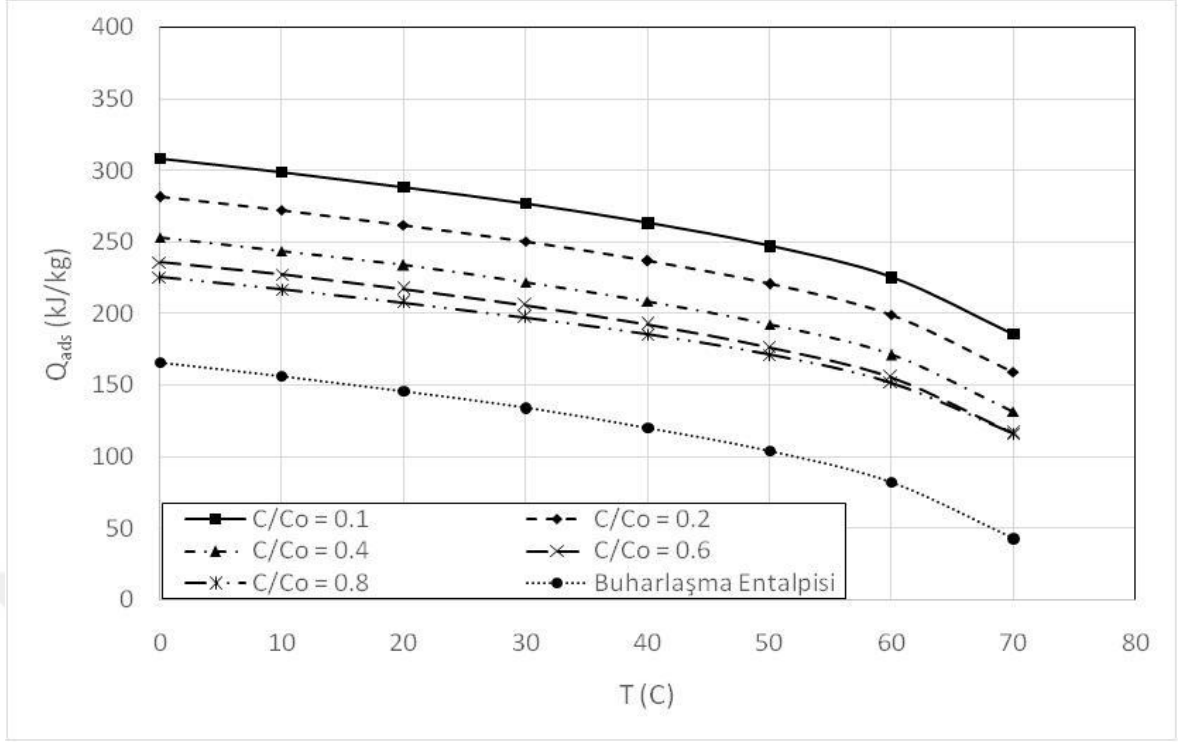
İkinci Deney Prosedürü için Mavi Silikajel- R404a İzotermleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.41. Mavi Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler

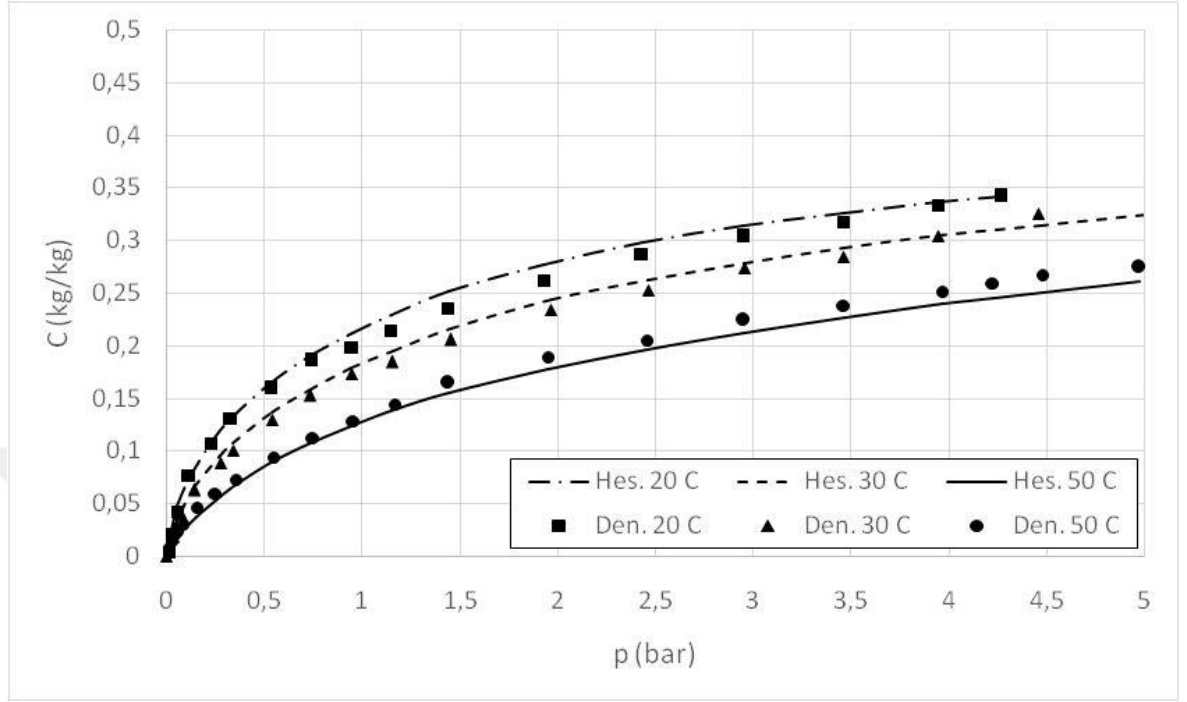


Şekil 4.42. Mavi Silikajel-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

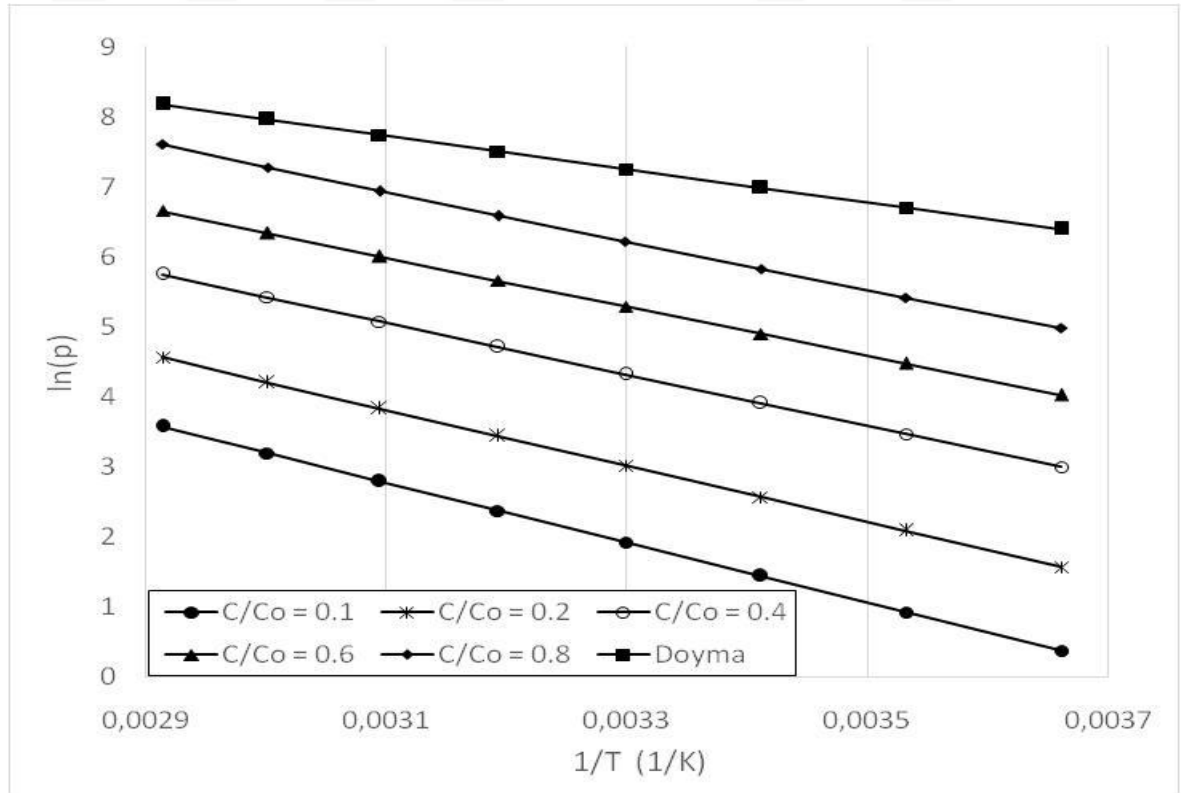


Şekil 4.43. Mavi Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

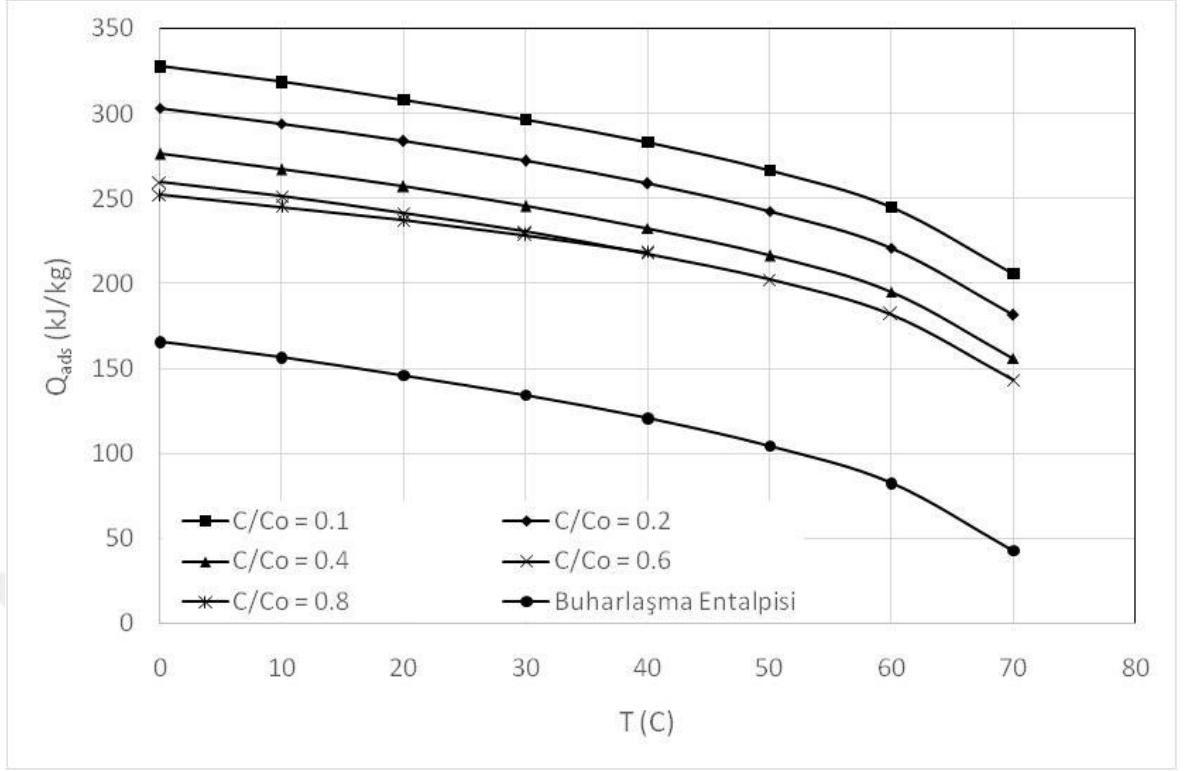
İkinci Deney Prosedürü için Beyaz Silikajel - R404a İzotermleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.44. Beyaz Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler

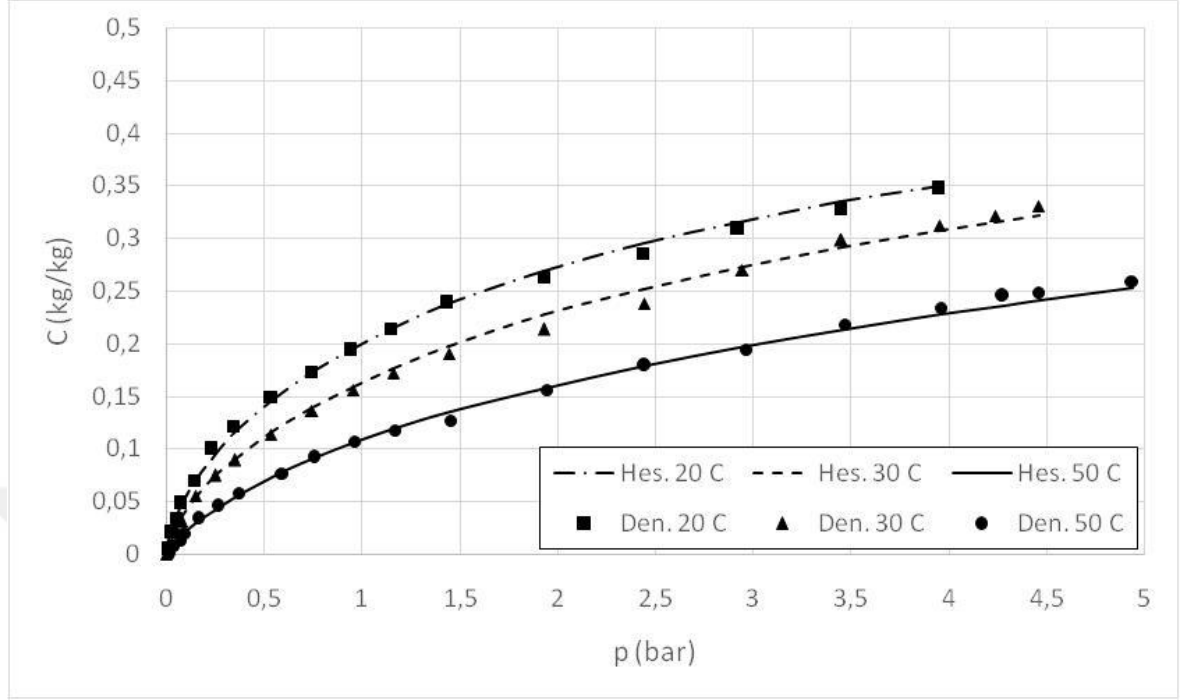


Şekil 4.45. Beyaz Silikajel-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon izosterleri

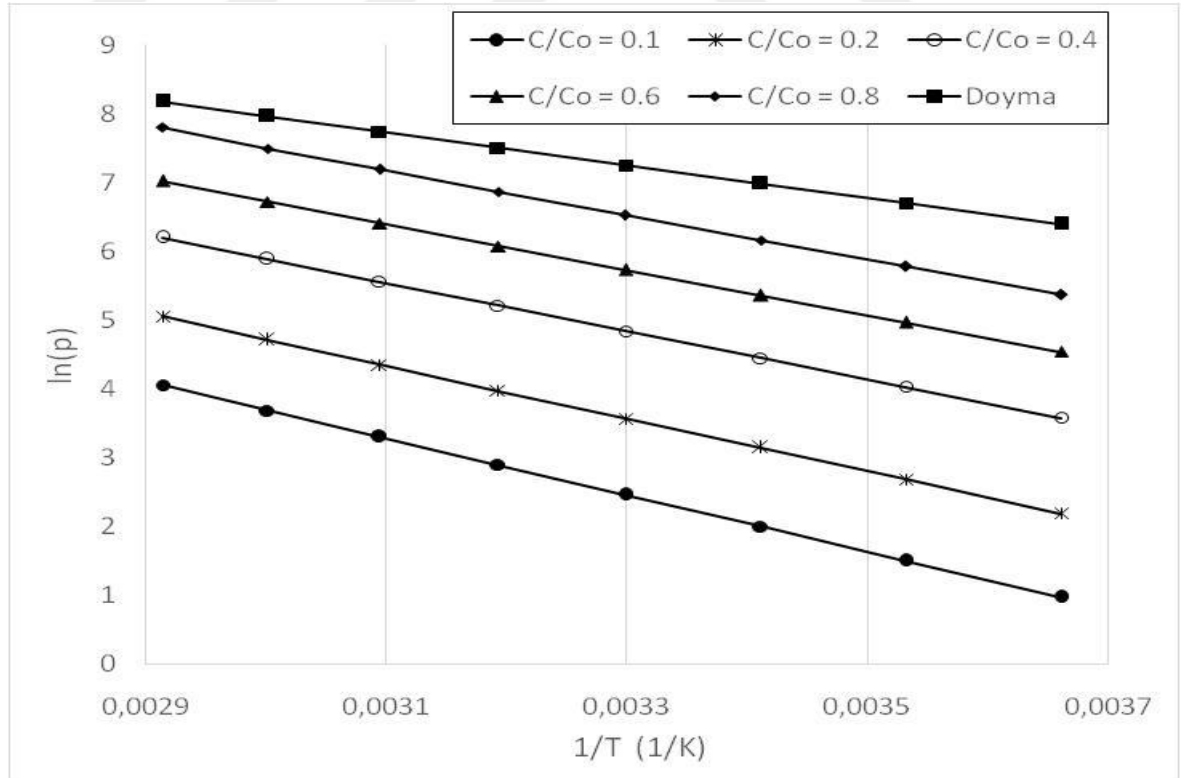


Şekil 4.46. Beyaz Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

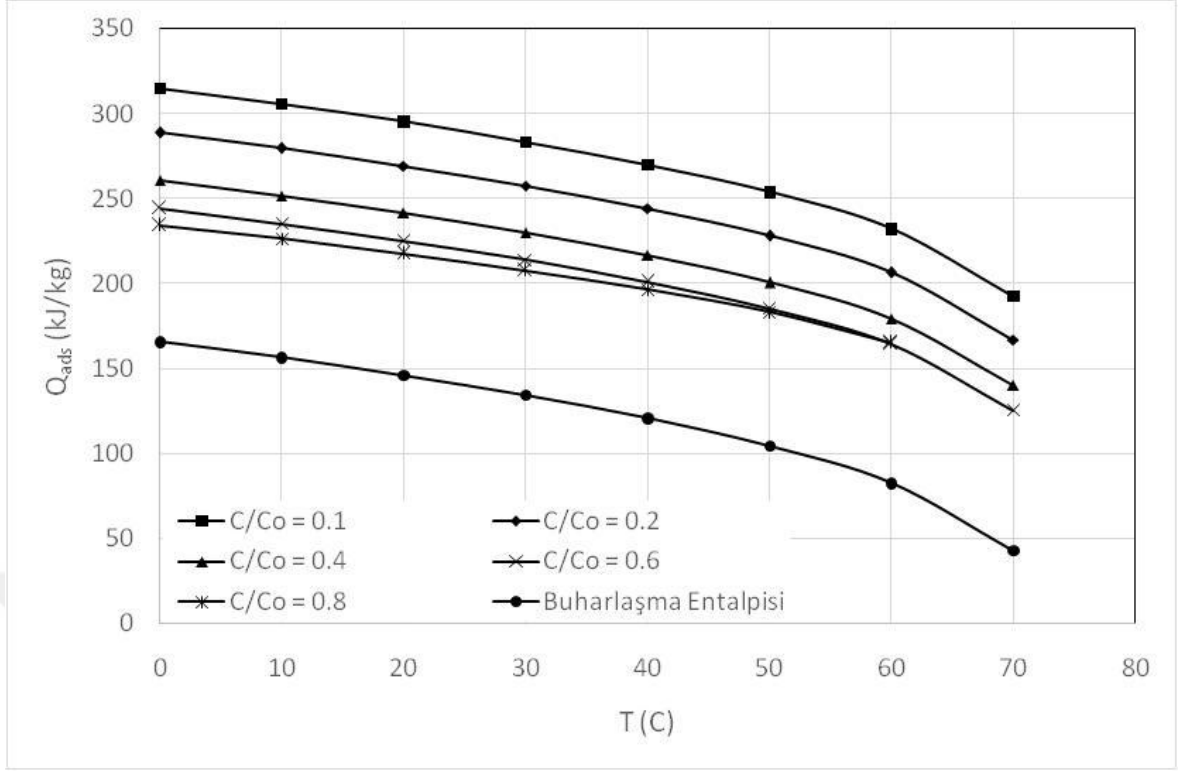
İkinci Deney Prosedürü için Turuncu Silikajel- R404a İzotermleri, İzosterleri ve Adsorpsiyon Isıları:



Şekil 4.47. Turuncu Silikajel-R404a adsorpsiyon çifti için hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilmiş izotermler



Şekil 4.48. Turuncu Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi



şekil 4.49. Turuncu Silikajel-R404a çifti için izosterik adsorpsiyon ısısının sıcaklığa bağılı olarak değişimi

Yapılan deneyler sonucunda, grafikler incelendiğinde tüm adsorpsiyon çiftlerinde artan sıcaklıkla birlikte adsorbent malzemelerde adsorpsiyon kapasitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca artan basınç ile birlikte adsorpsiyon çiftlerinde kullanılan adsorbentlerin adsorplama kapasitelerinde artış görülmüştür.

İzosterik adsorpsiyon ısısı incelendiğinde, artan sıcaklıkla birlikte, tüm adsorpsiyon çiftlerinde izosterik adsorpsiyon ısısının düştüğü gözlemlenmiştir.

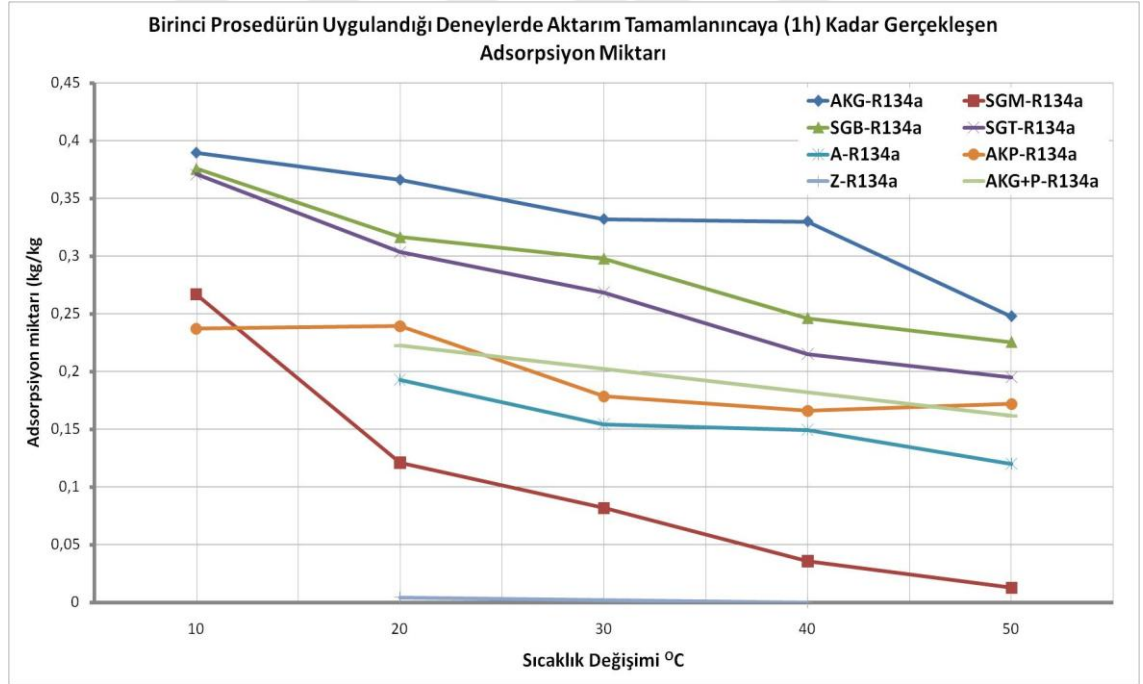
Bununla birlikte, adsorpsiyon sıcaklığının büyüklüğü, gerçekteşirilen deneysel çalışmaların tümünde R134a ve R404a'nın buharlaşma entalpilerinden daha büyük olduğu görülmektedir.

4.5. Birinci Prosedüre Göre Yapılan Deneilerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde birinci prosedür kullanılarak yapılan deneylerin sonuçlarının karşılaştırmasına yer verilmiştir. Deneilerde;

- Granül Aktif Karbon-R134a
- Pelet Aktif Karbon-R134a
- Mavi Silikajel-R134a
- Beyaz Silikajel-R134a
- Turuncu Silikajel-R134a
- Alümina-R134a
- Zeolit-R134a
- Granül Aktif Karbon ve Polimer Karışımı-R134a

adsorpsiyon çiftleri kullanılmıştır. Her bir adsorpsiyon çifti için bir saatlik ve 8 saatlik deneysel süreçlerin verileri tutulmuş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

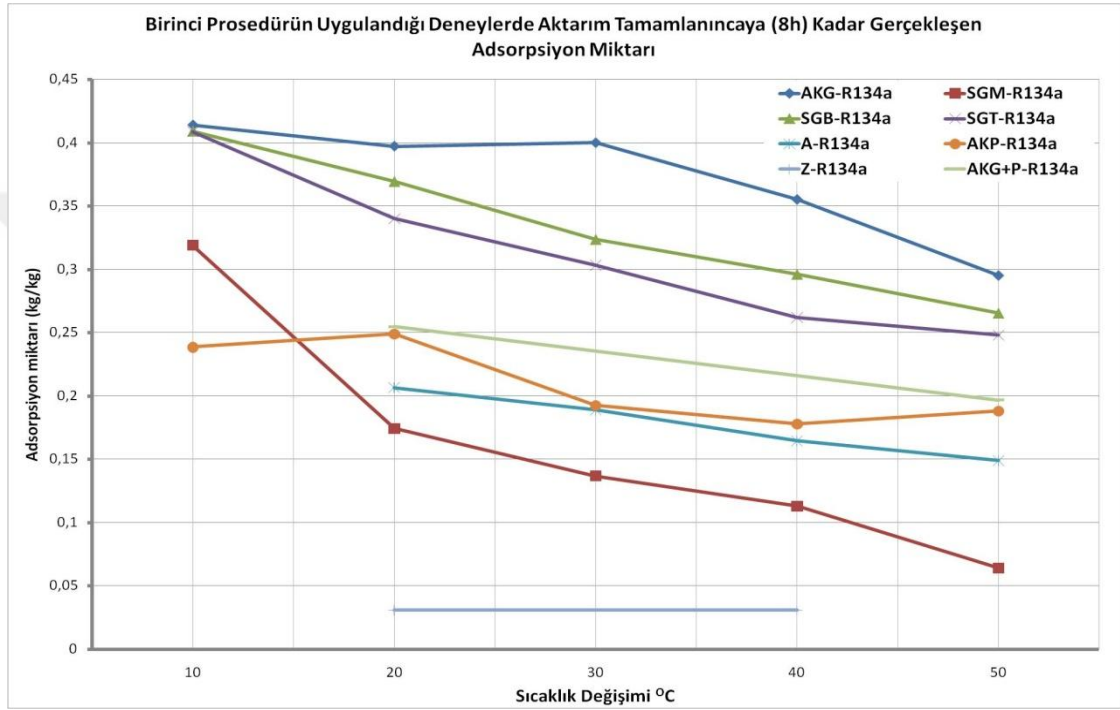


Şekil 4.50. Birinci deney prosedürüne göre bir saat süre sonunda, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C deney sıcaklıklarında adsorpsiyon çiftlerinin performanslarının karşılaştırması

Şekil 4.50, bir saatlik deney süresi sonunda, adsorbentlerin adsorpladığı miktarlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Grafikten görülebileceği gibi 1 saatlik süre sonunda

en iyi performansı Granül Aktif Karbon-R134a çifti gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte beyaz silikajel-R134a ve turuncu silikajel-R134a çiftlerinin iyi performans sergiledikleri görülmüştür. Yapılan deneylerde en kötü performansın ise Zeolit-R134a çiftinde olduğu görülmüştür.

Laboratuar ortamında üretilen mikro küre polimer ise granül aktif karbonla birlikte karıştırılarak deneye tabi tutulmuştur fakat istenilen performansı gösterememiştir.



Şekil 4.51. Birinci deney prosedürüne göre sekiz saat süre sonunda, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C deney sıcaklıklarında adsorpsiyon çiftlerinin performanslarının karşılaştırması

Şekil 4.51 ise sekiz saatlik deney süresi sonunda, adsorbentlerin adsorpladığı miktarlar grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Çiftler için, bir saatlik deneyler sonunda elde edilen sonuçlarla aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber bekleme süresinin artması ile birlikte, kullanılan adsorbentlerin adsorplama miktarlarının da arttığı görülmüştür. Tüm adsorpsiyon çiftlerinin yapılan deneylerinde, sıcaklığın artması ile birlikte adsorpsiyon miktarlarının da düştüğü gözlemlenmiştir.

4.6. İkinci Prosedüre Göre Elde Edilen Adsorpsiyon Parametreleri ve Yapılan Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.6.1. Adsorpsiyon Parametrelerin Bulunması ve Elde Edilebilecek Grafik Örnekleri

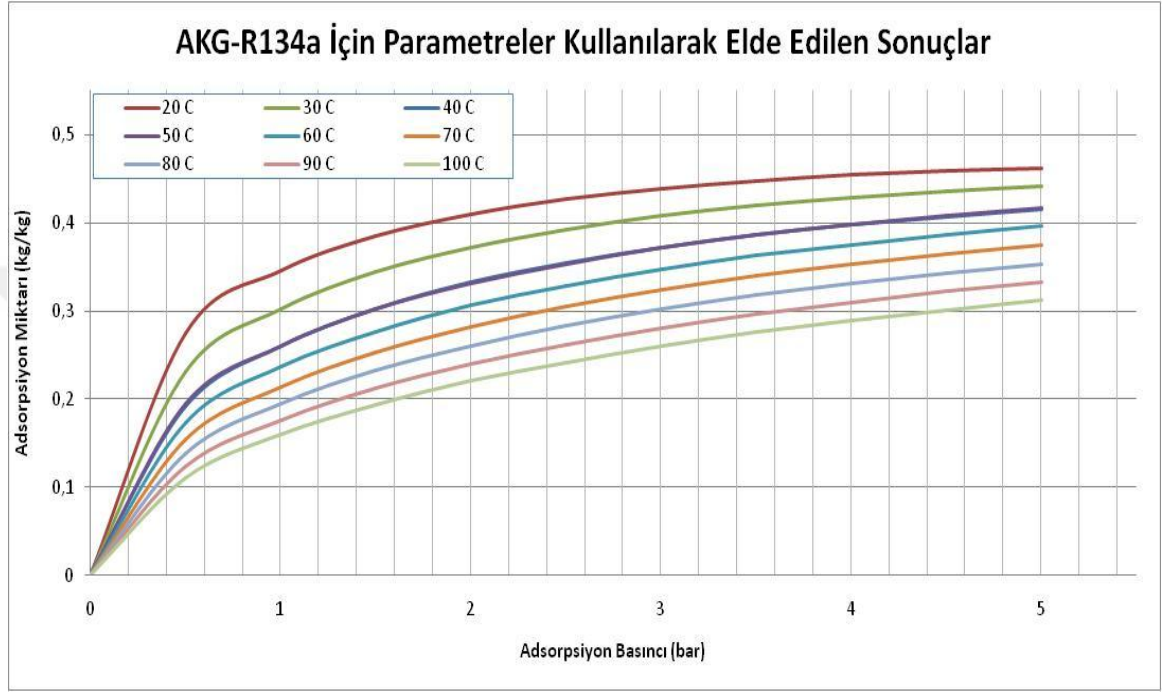
İkinci Prosedürde elde edilen deneysel veriler, aktif karbon (AKG)-R134a, mavi silikajel (SGM)-R134a, beyaz silikajel (SGB)-R134a, turuncu silikajel (SGT)-R134a, aktif karbon (AKG)-R404a, mavi silikajel (SGM)-R404a, beyaz silikajel (SGB)-R404A ve turuncu silikajel (SGT)-R404a adsorpsiyon çiftlerinin parametrelerini elde etmek için kullanılmıştır. Bu parametrelerin elde edilmesi için Dubinin-Astakhov (D-A) denklemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda türetilmiş olan amaç fonksiyonu, genetik bir algoritmaya dayalı kişisel yapım bir kod kullanılarak optimize edilmiştir. Aşağıdaki tablo aktif karbon (AKG)-R134a, mavi silikajel (SGM)-R134a, beyaz silikajel (SGB)-R134a, turuncu silikajel (SGT)-R134a, aktif karbon (AKG)-R404a, mavi silikajel (SGM)-R404a, beyaz silikajel (SGB)-R404a ve turuncu silikajel (SGT)-R404a için hesaplanmış adsorpsiyon parametreleri göstermektedir.

Çizelge 4.1. Farklı adsorpsiyon çiftlerinin hesaplanmış olan adsorpsiyon parametreleri

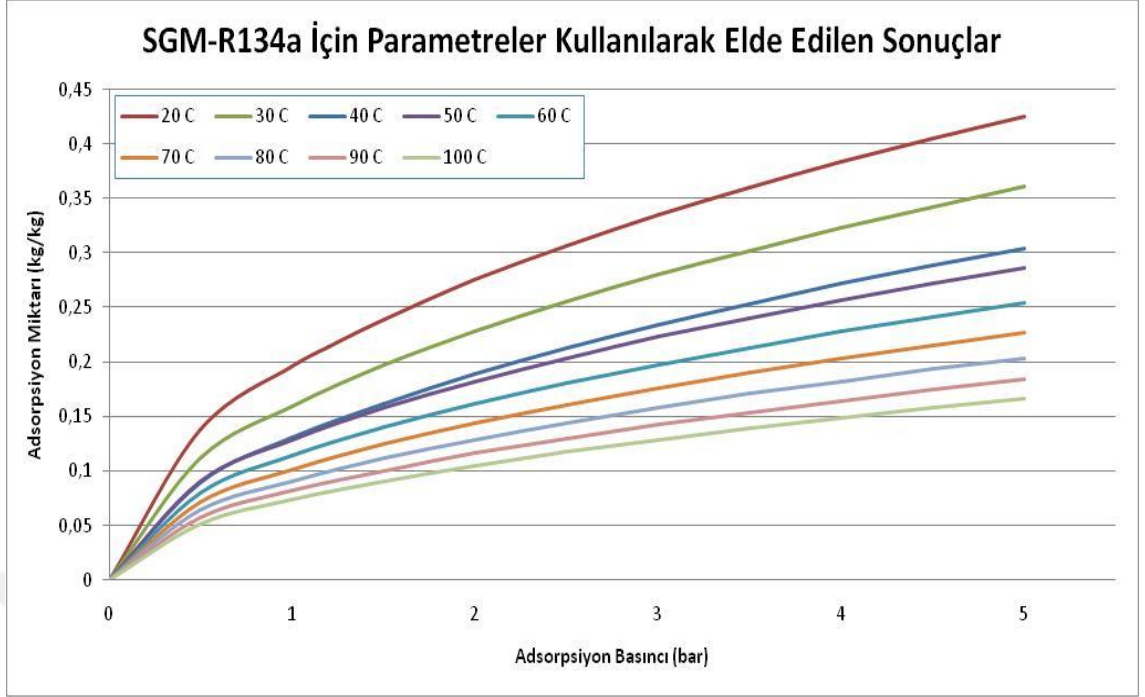
Adsorpsiyon Çiftleri	W_0 (m ³ /kg)	C_0 (kg/kg)	E (kJ/kmol)	N
AKG-R134a	0.372×10^{-3}	0,487	8874,9	1,725
SGM-R134a	0.363×10^{-3}	0,474	5120	1,034
SGB-R134a	0.394×10^{-3}	0,514	6804,9	1,21
SGT-R134a	0.416×10^{-3}	0,543	5820,2	1,148
AKG-R404a	0.337×10^{-3}	0,400	11090	1,734
SGM-R404a	0.327×10^{-3}	0,386	6130,7	1,3
SGB-R404a	0.344×10^{-3}	0,407	8151,4	1,6125
SGT-R404a	0.394×10^{-3}	0,466	6803,1	1,404

Elde edilen parametreler ile aynı deney prosedürü için farklı basınçlarında ve farklı sıcaklıklarında, aynı adsorpsiyon çiftlerinin kullanılması durumunda, adsorpsiyon miktarları hesaplanabilecektir. Böylelikle, deneylere ihtiyaç kalmadan adsorpsiyon miktarları, basınca ve sıcaklığa bağlı olarak (sabit sıcaklıkta) elde edilebilecektir. Şekil

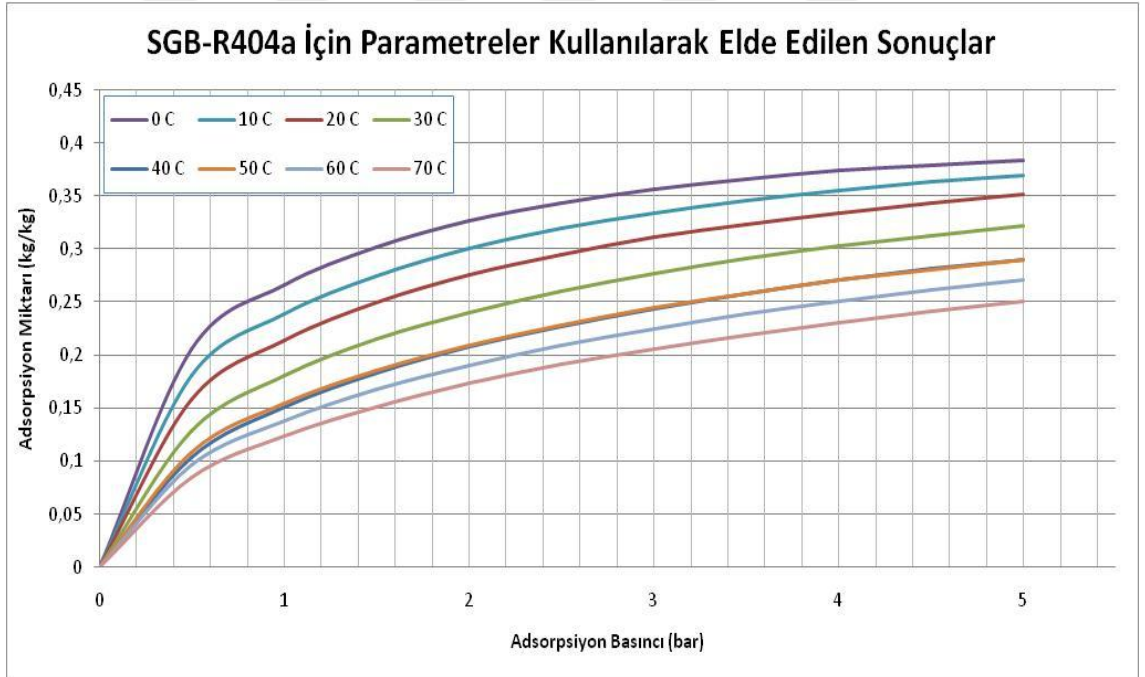
4.52, Şekil 4.53, Şekil 4.54 ve Şekil 4.55, çizelge 4.1'deki parametreler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda R134a'nın kullanıldığı çiftler için 20°C, 30°C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100°C sıcaklarda, R404a'nın kullanıldığı çiftler için 0°C, 10°C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıklarda oluşturulan basınca göre adsorpsiyon kapasitelerini göstermektedir.



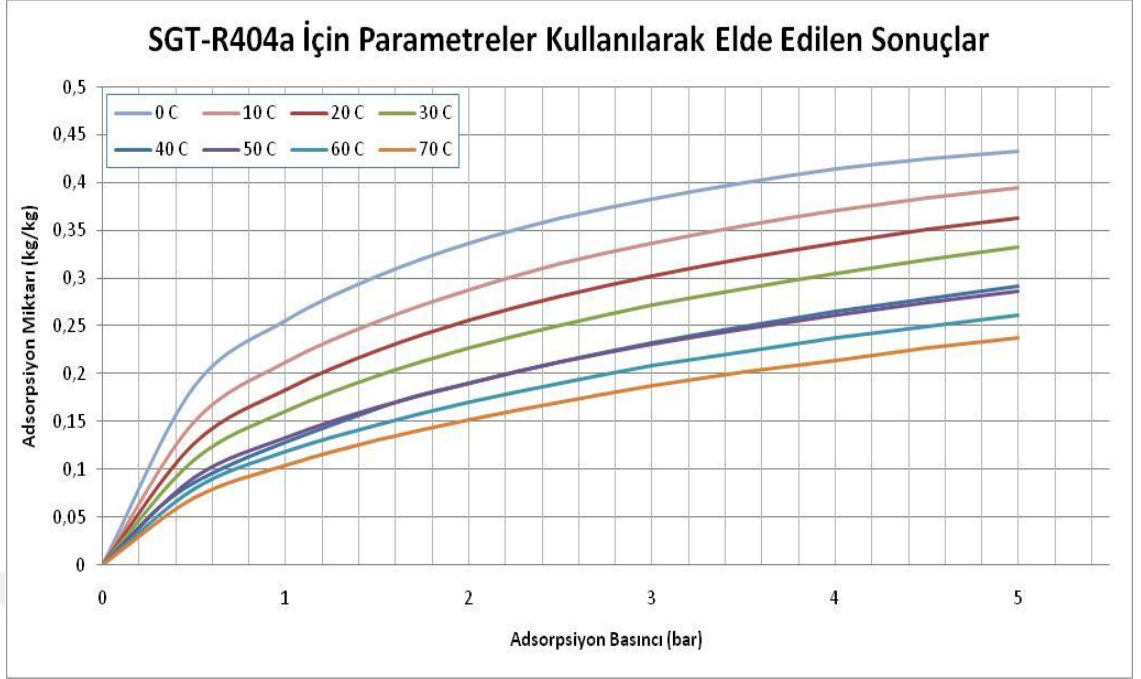
Şekil 4.52. AKG-R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 20°C, 30°C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100°C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler



Şekil 4.53. SGM-R134a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C ve 100°C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler



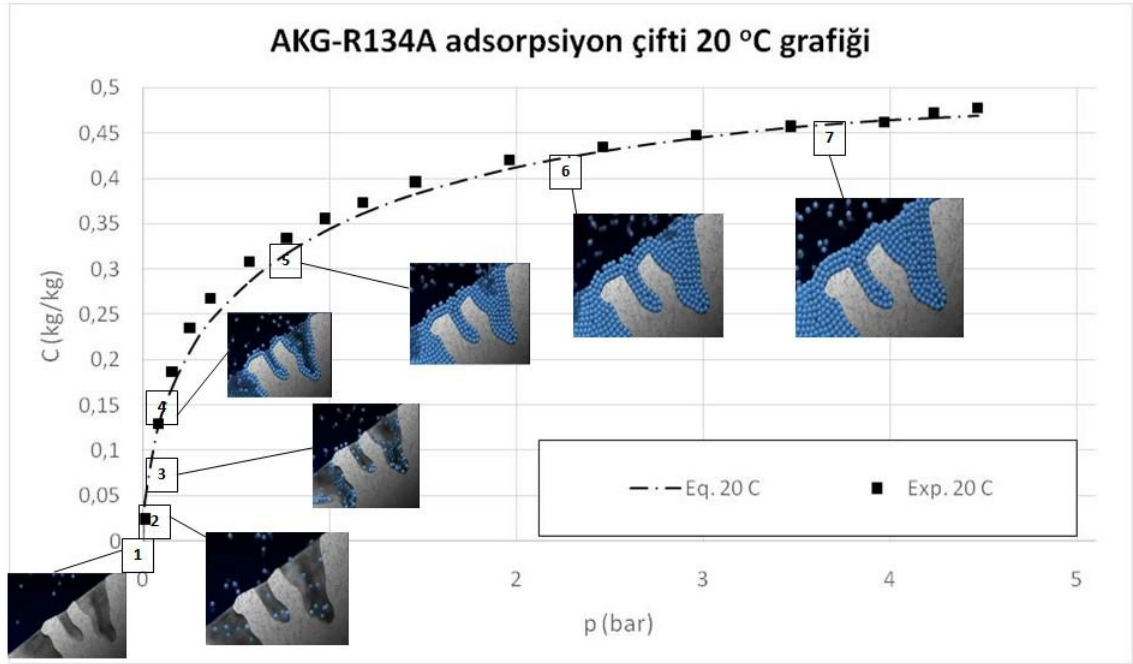
Şekil 4.54. SGB-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 0°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C ve 70°C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler



Şekil 4.55. SGT-R404a çifti için elde edilen adsorpsiyon parametreleri kullanılarak 0°C, 10°C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklar için basınca göre adsorpsiyon miktarlarını gösteren grafikler

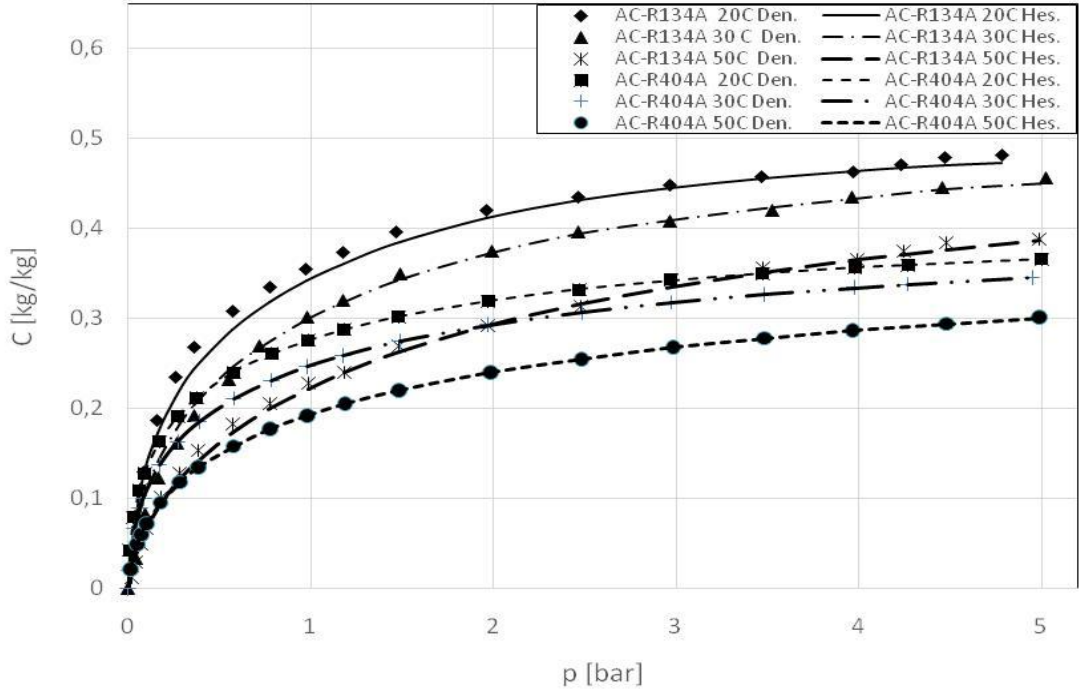
4.6.2. İkinci Prosedüre Göre Yapılan Deneylerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yapılan deneyler sonucunda adsorbent malzemelerde sıcaklık artışıyla birlikte adsorpsiyon kapasitesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı adsorpsiyon işleminin düşük sıcaklıklarda yapılması, adsorpsiyon kapasitesinin artmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte adsorbat malzemenin basınç- yoğunlaşma sıcaklıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca çalışılan tüm adsorpsiyon çiftleri için yapılan deneylerde, adsorpsiyon işleminin başından itibaren artan basınç ile adsorplanan adsorbat miktarı artmaktadır.

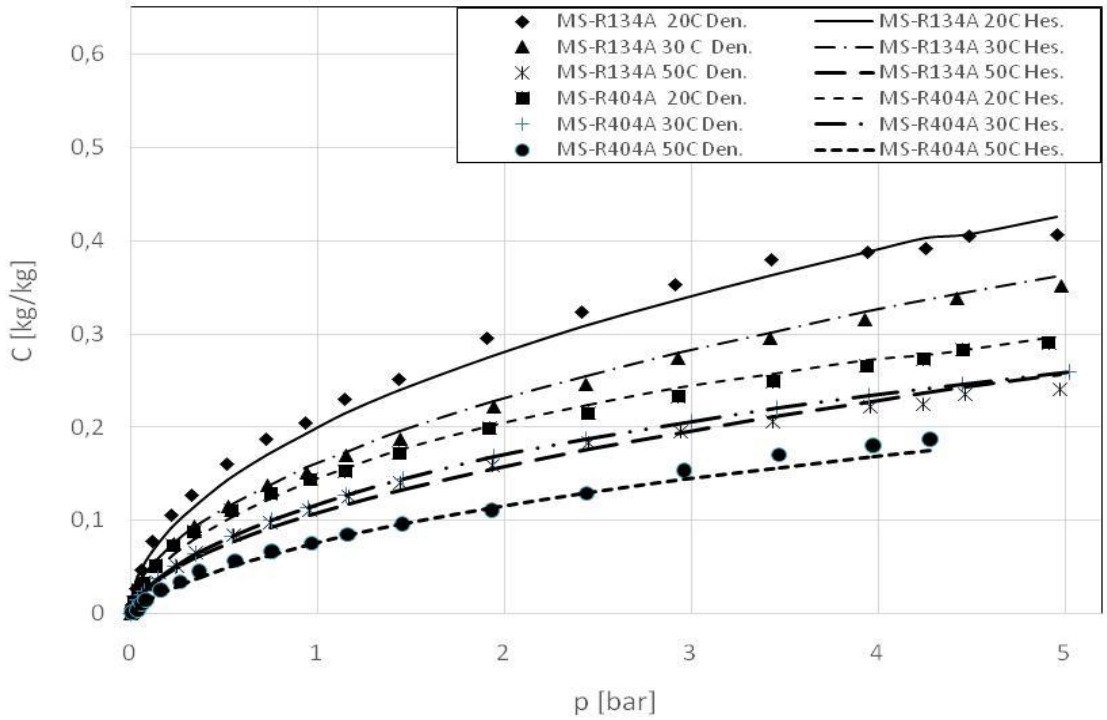


Şekil 4.56. Adsorpsiyonun grafiksel gösterimi

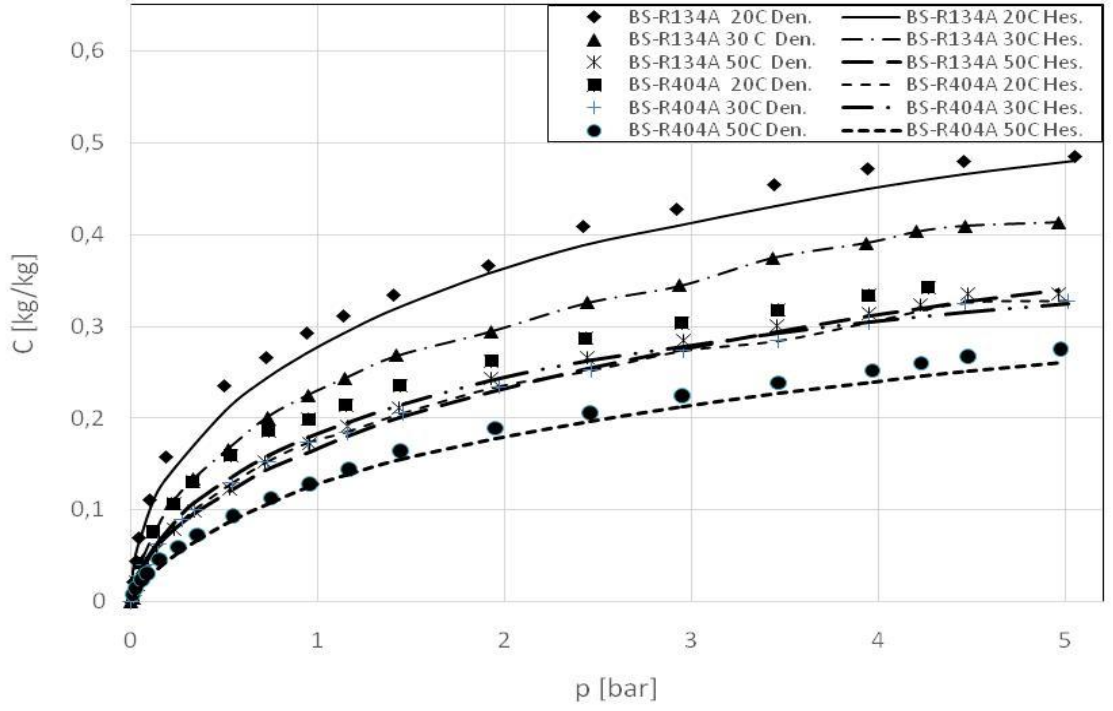
Deneylerde kullanılan adsorbentlerin deneylerde kullanılan adsorbatlar olan R134a/ R404a gazları ile oluşturduğu adsorpsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması şekil 4.57, şekil 4.58, şekil 4.59 ve şekil 4.60'de verilmiştir. Buna göre grafikler incelendiğinde, deneysel veriler ile çizelge 4.1'de veriler parametreler kullanılarak D-A denkleminde elde edilen veriler uyuma göstermektedir. Ayrıca deneysel verilerden elde edilen izotermelerin şekilleri her durumda benzer olup ve piyasada bulunan farklı ticari olarak bulunabilen adsorbentler için literatürde rapor edilenlerle karşılaştırılabilir durumdadır.



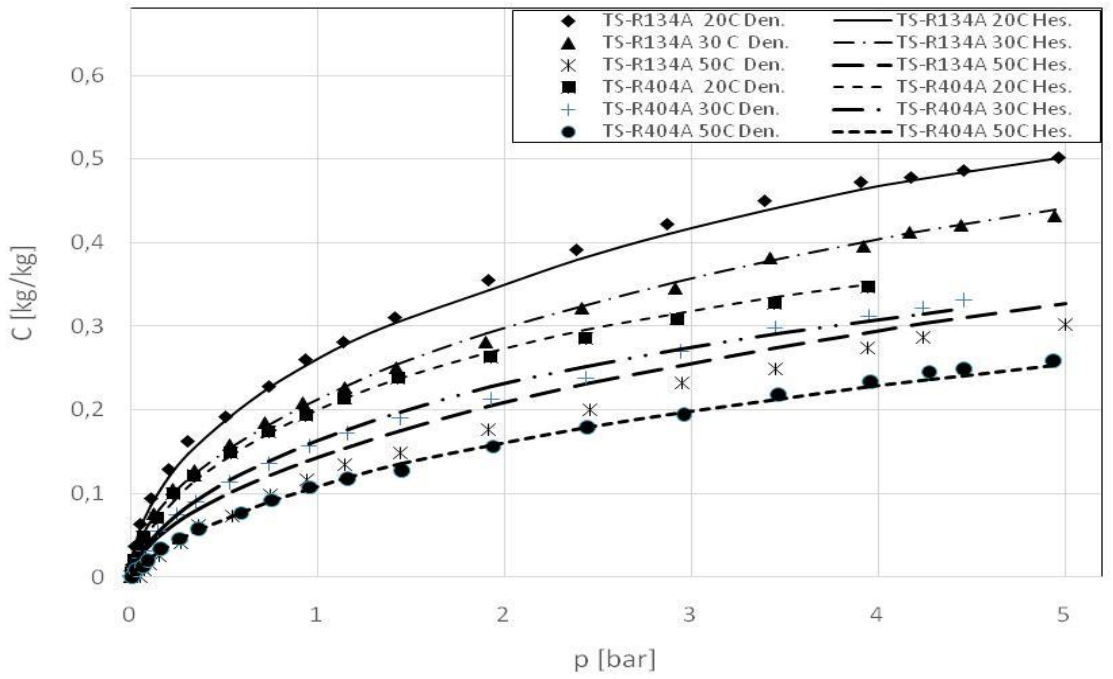
Şekil 4.57. Aktif karbon ve R134A/ R404A adsorbsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması



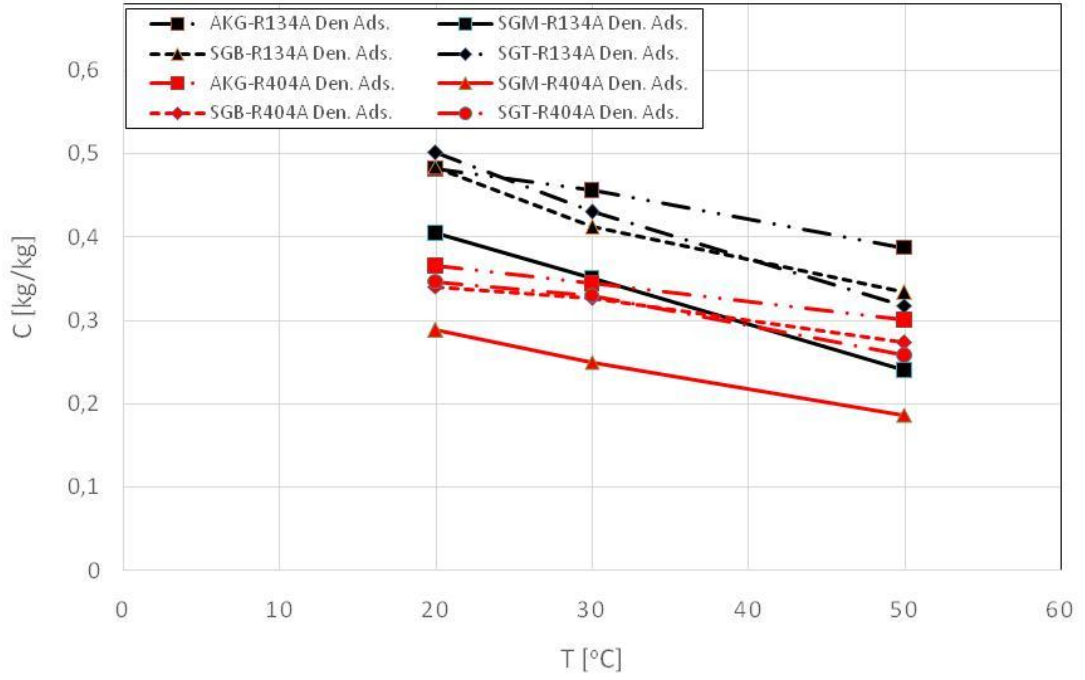
Şekil 4.58. Mavi silikajel ve R134A/ R404A adsorbsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması



Şekil 4.59. Beyaz silikajel ve R134A/ R404A adsorbsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıklarda hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması



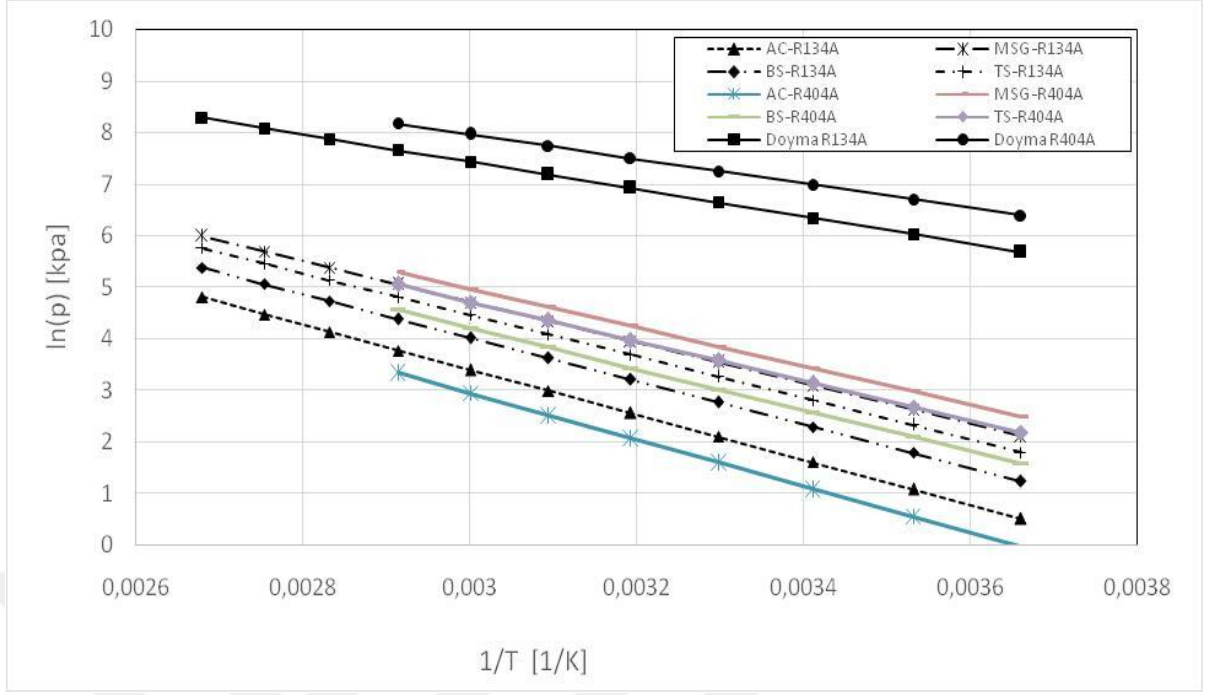
Şekil 4.60. Turuncu silikajel ve R134A/ R404A adsorbsiyon çiftlerinin farklı sıcaklıkla hesaplanmış verilerle ve deneysel verilerle oluşturulan izotermelerinin karşılaştırması



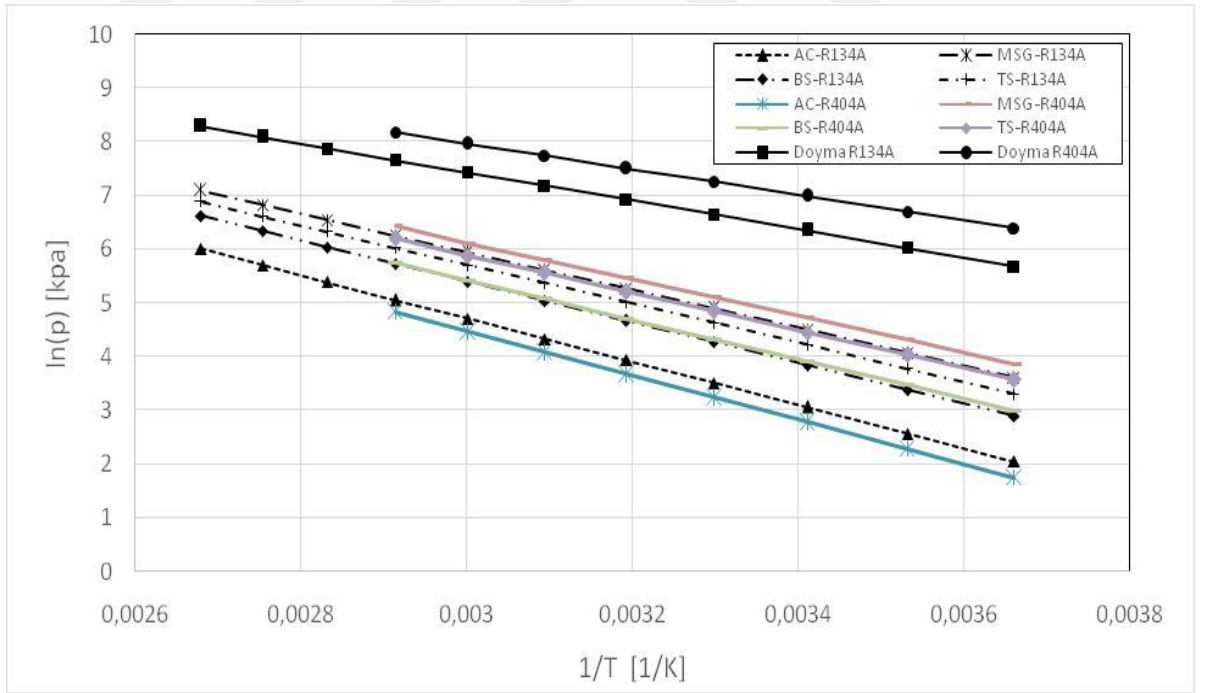
Şekil 4.61. Granül Aktif Karbon-R134a, Mavi Silikajel-R134a, Beyaz Silikajel-R134, Turuncu Silikajel- R134a, Granül Aktif Karbon-R404a, Mavi Silikajel-R404a, Beyaz Silikajel-R404a ve Turuncu Silikajel- R404a için ikinci prosedüre göre yapılan deney sonuçlarının sıcaklık-adsorpsiyon miktarı grafiği

Çizelge 4.1 sabitleri kullanılarak 3.6 ve 3.9 denklemleri yardımıyla adsorbent-adsorbat çiftlerinin izosterleri ve izosterik adsorpsiyon ısıları bulunmuştur.

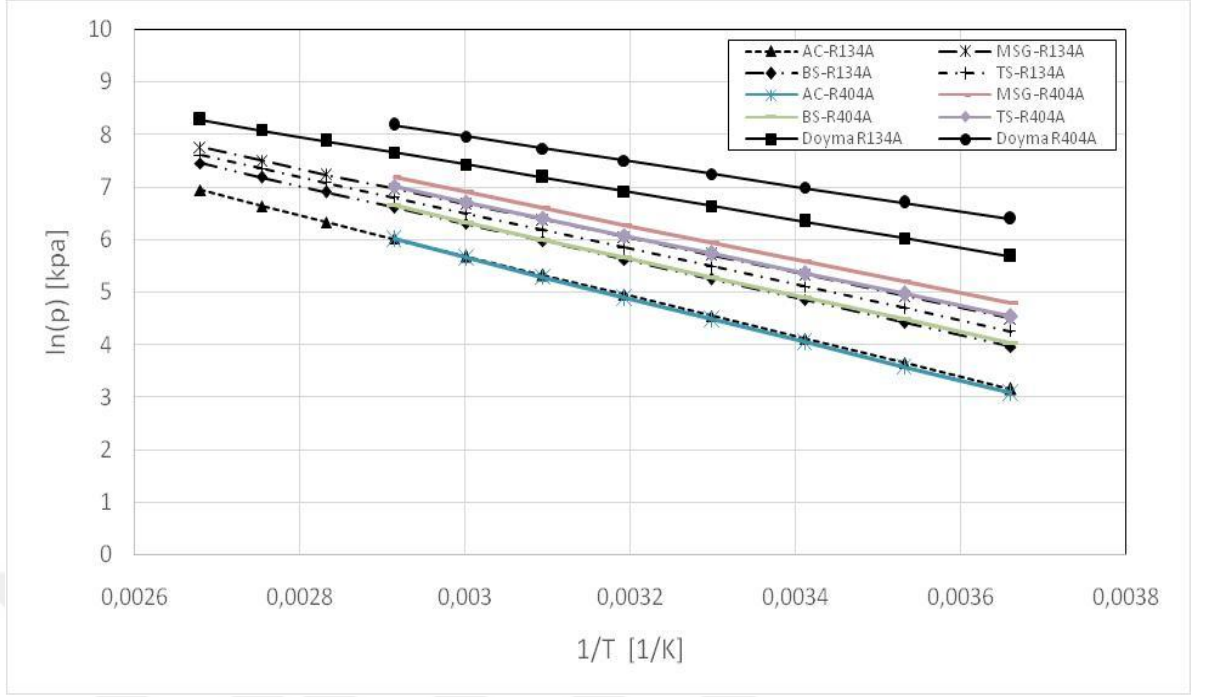
Şekil 4.62, şekil 4.63, şekil 4.64 ve şekil 4.65, R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.2, 0.4, 0.6$ ve 0.8 olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterlerini grafiksel olarak göstermektedir. Grafiklerden görülebileceği gibi $\ln(p)$ 'nin $1/T$ ile değişimi, her adsorbent-adsorbat çiftleri için lineer bir varyasyondur. Grafikler incelendiğinde, $C/C_0=0,6$ durumu için R134a ve R404a'nın aktif karbon ve beyaz silikajel ile adsorpsiyonunda ve $C/C_0=0,4$ durumu için R134a ve R404a'nın beyaz silikajel ile adsorpsiyonunda izosterlerin birbirleri ile çakıştığı gözlemlenmiştir. Bu durum diğer adsorpsiyon çiftlerinde gözlemlenmemiştir.



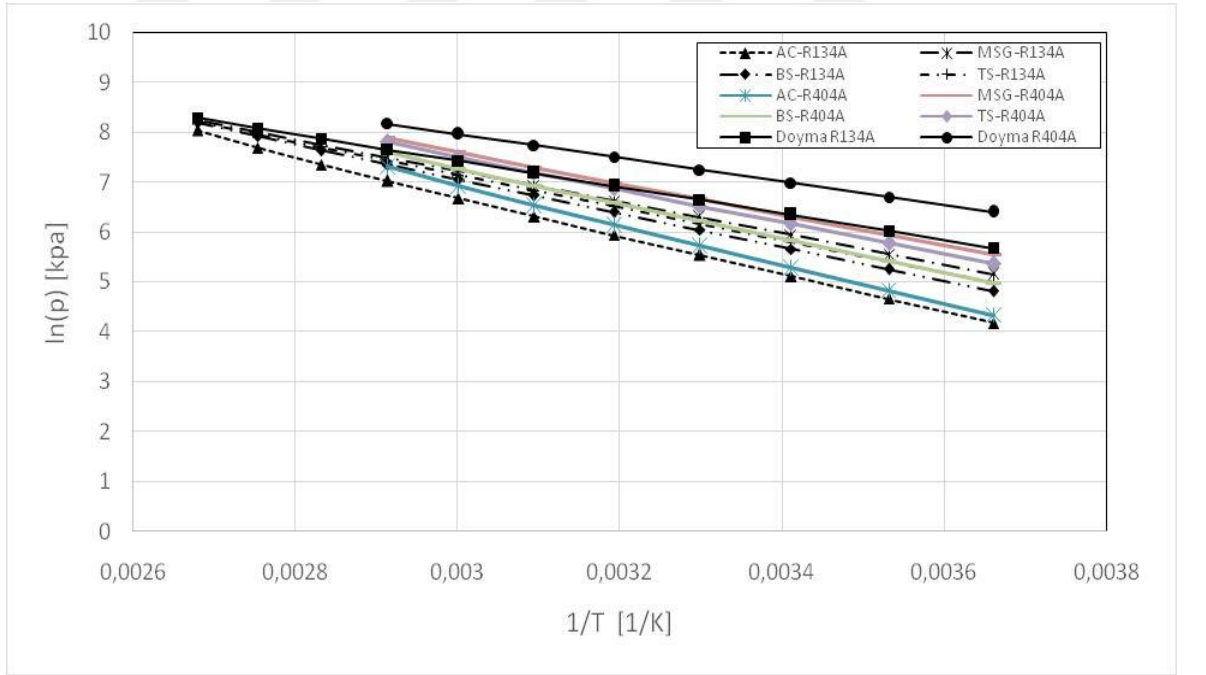
Şekil 4.62. R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.2$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri



Şekil 4.63. R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.4$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri



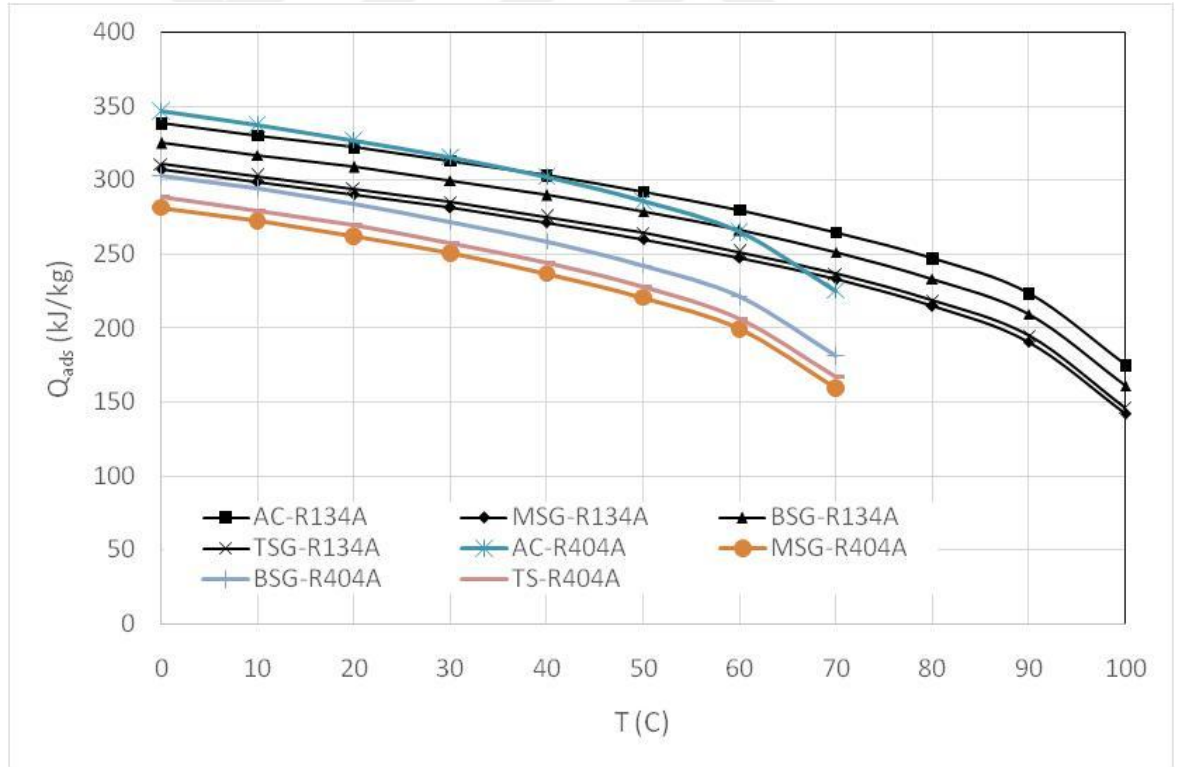
Şekil 4.64. R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.6$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri



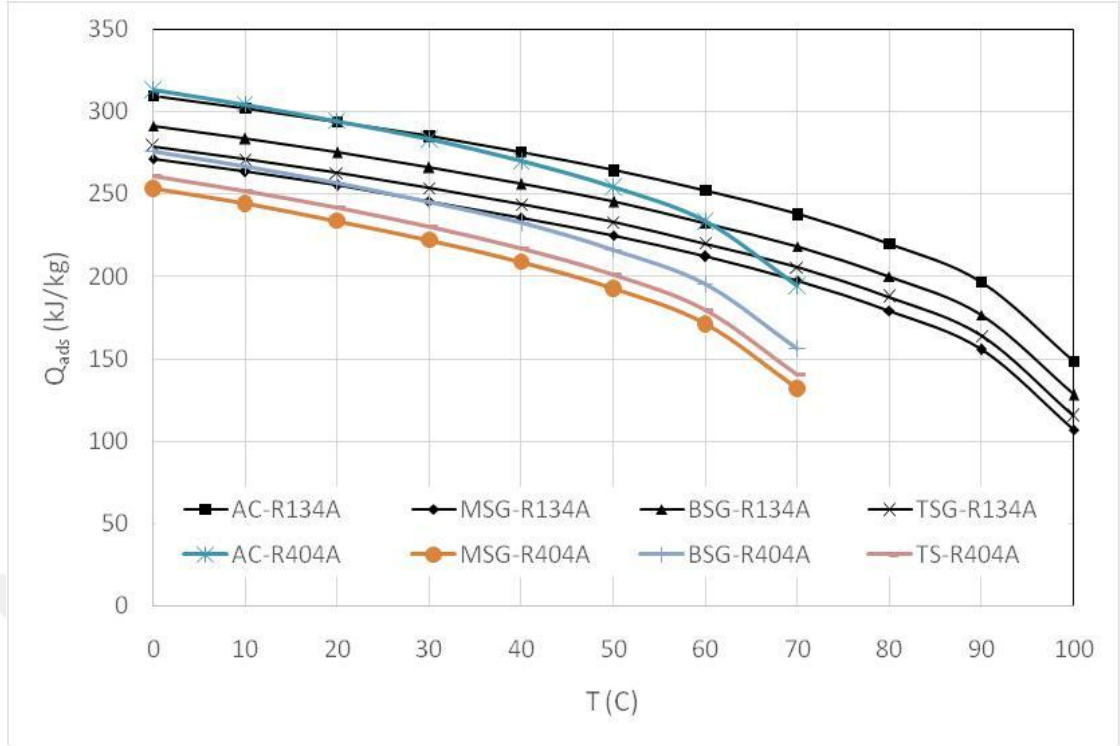
Şekil 4.65. R134a ve R404a'nın aktif karbon, mavi silikajel, beyaz silikajel ve turuncu silikajel kullanılarak oluşturulan adsorpsiyon çiftlerinin $C/C_0=0.8$ olduğunda elde edilen adsorpsiyon izosterleri

Şekil 4.66, şekil 4.67, şekil 4.68 ve şekil 4.69 izosterik adsorpsiyon ısılarını sıcaklığa göre gösteren grafiklerdir. Bu grafikler dikkatli olarak incelendiğinde izosterik adsorpsiyon ısısı adsorpsiyon miktarının artması ile birlikte düşmektedir. Ayrıca, Sıcaklık, 0°C'de düşük sıcaklık ile elde edilen izosterik ısının maksimum değerinin bulunduğu izosterik ısı üzerinde daha fazla etkiye sahiptir.

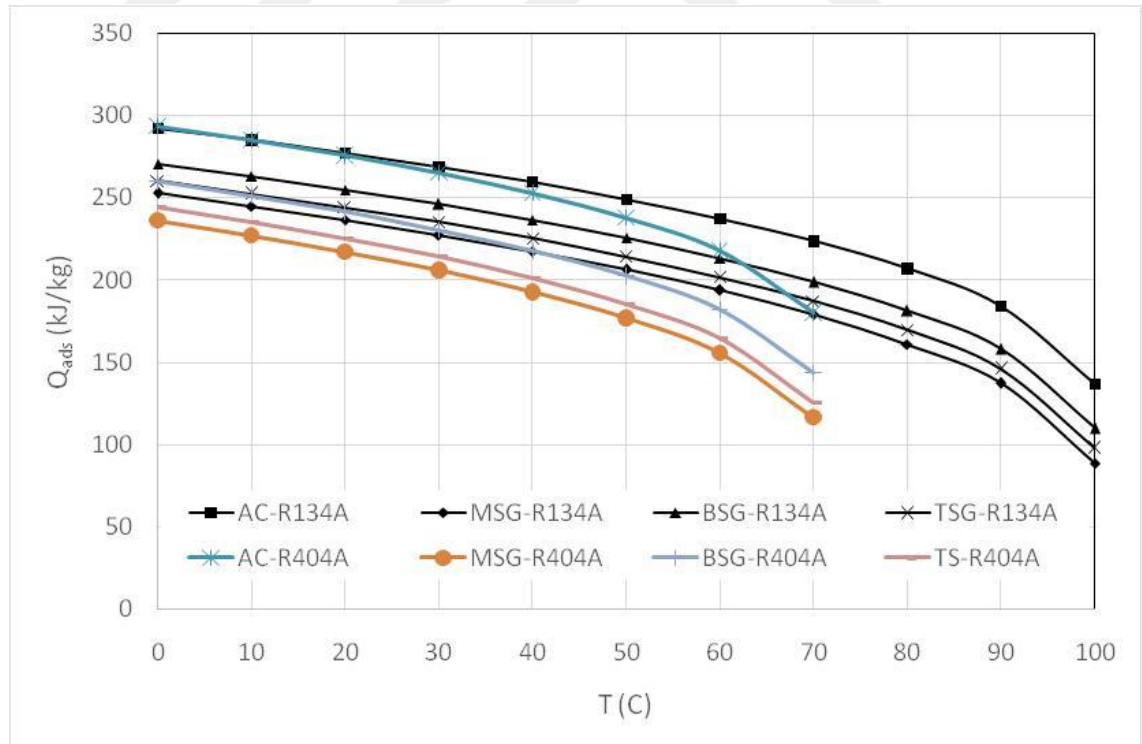
Adsorbat molekülleri ilk önce dar adsorbe gözeneklerine nüfuz ederek adsorbat ile adsorbent arasında daha güçlü bir etkileşime neden olurlar. Bu, düşük yüklemde daha yüksek bir izosterik adsorpsiyon ısısı değeri anlamına gelir. Daha küçük gözenekleri tamamen doldurduktan sonra, adsorbat molekülleri, adsorpsiyon eğiliminin zayıflamasına neden olan daha büyük gözeneklere kademeli olarak yerleşir. Bu nedenle, izosterik adsorpsiyon ısısında adsorbat alımının bir fonksiyonu olarak bir azalma meydana gelir.



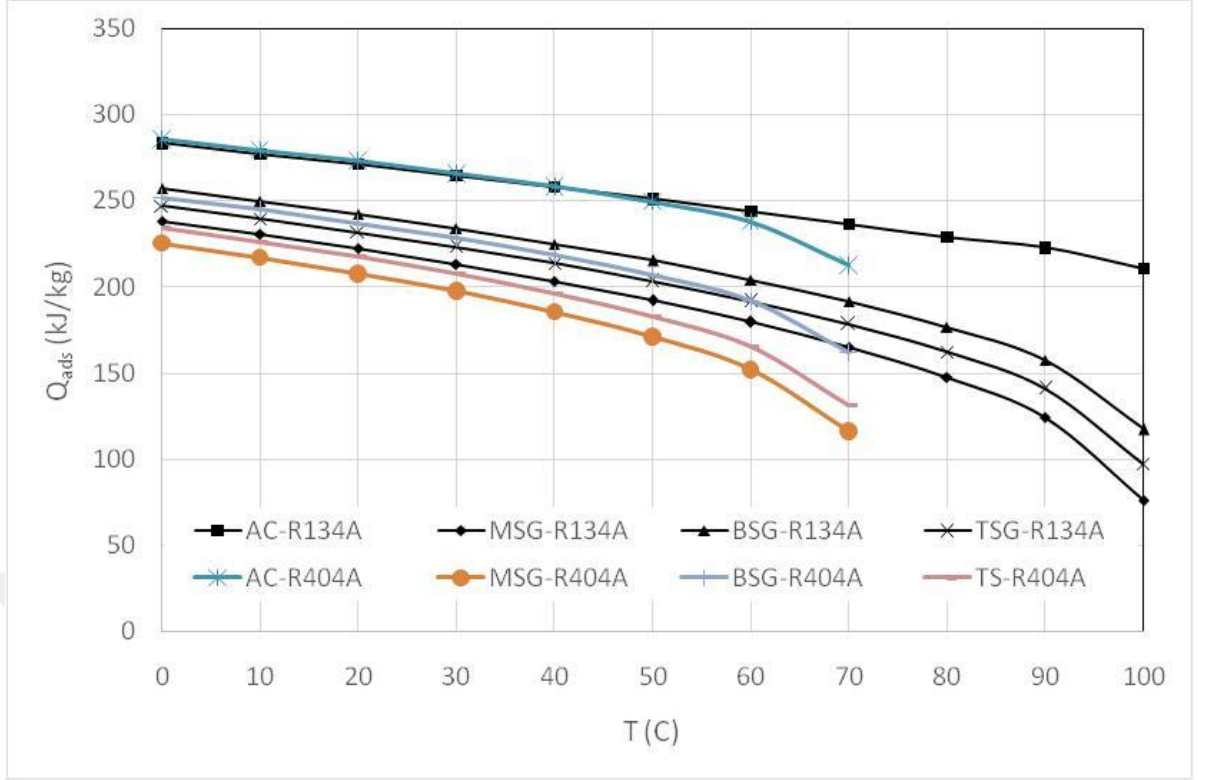
Şekil 4.66. R134a ve R404a'nın ($C/C_0=0,2$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon ısısı



Şekil 4.67. R134a ve R404a'nın ($C/C_0=0,4$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon ısısı



Şekil 4.68. R134a ve R404a'nın ($C/C_0=0,6$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon ısısı



Şekil 4.69. R134a ve R404a'nın ($C/C_0=0,8$) durumunda farklı adsorbentlerin kullanımından elde edilen sıcaklığa göre izosterik adsorpsiyon ısı

Yapılan çalışmalarda, izosterik adsorpsiyon ısısının artan sıcaklıkla birlikte, tüm adsorpsiyon çiftlerinde düştüğü gözlemlenmiştir. İzosterik adsorpsiyon ısısının büyüklüğü karşılaştırıldığında, aktif karbonun kullanıldığı çiftler test edilen diğer çiftler arasında en büyük olanıdır. Ayrıca, aktif karbonun kullanıldığı çiftlerde, R134a'nın R404a ile değiştirilmesi, izosterik adsorpsiyon ısısının büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Diğer taraftan, silikajeller ile R134a'nın kullanıldığı çiftlerde izosterik adsorpsiyon ısısının daha büyük olduğu görülmüştür. Silikajeller içerisinde ise beyaz silikajelin kullanıldığı çiftlerde izosterik adsorpsiyon ısı daha büyüktür. Tümüne ilaveten, adsorpsiyon sıcaklığının büyüklüğü, gerçekleştirilen deneysel çalışmaların tümünde R134a ve R404a'nın buharlaşma entalpilerinden daha büyüktür.

5. SONUÇ

Bu çalışmada adsorpsiyonlu ısı pompalarının tasarımı ve imalatı için sistemde kullanılacak adsorbent-adsorbat çiftine ait adsorpsiyon karakteristiklerin detaylı olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla üzerinde çalışmalar yapılabilecek farklı adsorpsiyon çiftlerinin denenebileceği ve adsorpsiyon karakteristiklerinin analiz edilebileceği bir deney sistemi kullanılmıştır. Kullanılan deney sistemi sabit hacim ve değişen basınç prensibi ile çalışmaktadır.

Deneyler, iki farklı deney prosedürü ile gerçekleştirilmiştir. Projede, adsorbat olarak ticari ve deneysel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, ozon tabakasına zarar vermeyen ve pozitif basınçta çalışabilen R134a ve R404a akışkanları belirlenmiştir. Çalışmada R134a ile yapılan deneylerden sonra R404a'nın kullanılmasının sebebi, R404a kullanımında aynı basınçlarda daha düşük sıcaklıklara inilebilmesidir. (R134a kullanımında 5 bar için $T_{\text{doy}} = 15,71^{\circ}\text{C}$, 2,5 bar için $T_{\text{doy}} = -3,75^{\circ}\text{C}$ ve R404a kullanımında 5 bar için $T_{\text{doy}} = -5,68^{\circ}\text{C}$, 2,5 bar için $T_{\text{doy}} = -24,82^{\circ}\text{C}$). Adsorbentler için ticari olarak elde edilebilecek farklı numune kullanılmış ve adsorpsiyon prosesleri incelenmiştir. Böylelikle tarafımızdan yapılan çalışmalarla, literatür bilgimiz dâhilinde çok fazla çalışılmamış adsorpsiyon çiftleri (örneğin R134a-silikajel, R134a-zeolit, R134a-alümina gibi) kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada farklı adsorbentlerin farklı sıcaklıklarda R134a ve R404a ile olan adsorpsiyon miktarları üzerinde durulmuştur. Birinci deney prosedürünün uygulandığı deneylerde adsorbent olarak granül aktif karbon, pelet aktif karbon, beyaz silikajel, mavi silikajel, turuncu silikajel, alümina, zeolit ve polimer kullanılmıştır. Ayrıca deneyler 10°C , 20°C , 30°C , 40°C ve 50°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Aktarım tamamlandıktan sonra sistem yaklaşık 8 saat süre ile gözlemlenmiştir.

İkinci deney prosedürünün uygulandığı deneylerde ise adsorbent olarak granül aktif karbon, beyaz silikajel, mavi silikajel ve turuncu silikajel kullanılmıştır. Deneyler 20°C , 30°C ve 50°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde basınç 5 bara yükseltilmiştir.

Adsorbat olarak R134a'nın kullanıldığı birinci deney prosedürünün sonuçlarına göre yaklaşık bir saatin sonunda ve 20 °C'de, granül aktif karbon 0,366 kg/kg, mavi silikajel 0,266 kg/kg, beyaz silikajel 0,316 kg/kg, turuncu silikajel, 0,303 kg/kg, pelet aktif karbon 0,237 kg/kg, aktif alümina 0,192 kg/kg, zeolit 0,004 kg/kg ve aktif karbon-polimer karışımının 0,222 kg/kg adsorplama yaptığı görülmüştür. Sekiz saatin sonunda ise aktif karbon için 0,397 kg/kg adsorplama miktarının gerçekleştiği görülmüştür.

Aktif karbon ve R134a çiftinin birinci prosedür deneyi için bir saatin sonunda 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C ve 50 °C sıcaklıklarda sırasıyla adsorplama miktarları 0,389 kg/kg, 0,366 kg/kg, 0,332 kg/kg, 0,33 kg/kg ve 0,247 kg/kg'dır.

Adsorbat olarak R134a'nın kullanıldığı ikinci deney prosedürünün sonuçlarına göre 20 °C'de, granül aktif karbon 0,472 kg/kg, mavi silikajel 0,405 kg/kg, beyaz silikajel 0,484 kg/kg ve turuncu silikajelin 0,501 kg/kg adsorplama yaptığı görülmüştür. Granül aktif karbon ve R134a çiftinin ikinci prosedür deneyi için 20 °C, 30 °C ve 50 °C sıcaklıklarda sırasıyla adsorplama miktarları 0,472 kg/kg, 0,450 kg/kg ve 0,386 kg/kg'dır.

Yine adsorbat olarak R134a'nın kullanıldığı ikinci deney prosedürü için adsorpsiyon çiftlerinin katsayıları belirlenerek, $C/C_0 = 0,2$ ve 20 °C'de, granül aktif karbon –R134a için 322 kJ/kg, mavi silikajel-R134a için 290 kJ/kg, beyaz silikajel-R134a için 308 kJ/kg ve turuncu silikajel- R134a için 294 kJ/kg adsorpsiyon ısı hesaplanmıştır.

Adsorbat olarak R404a'nın kullanıldığı ikinci deney prosedürünün sonuçlarına göre 20 °C'de, granül aktif karbon 0,366 kg/kg, mavi silikajel 0,289 kg/kg, beyaz silikajel 0,341 kg/kg ve turuncu silikajelin 0,347 kg/kg adsorplama yaptığı görülmüştür. Aktif karbon ve R404a çiftinin ikinci prosedür deneyi için 20 °C, 30 °C ve 50 °C sıcaklıklarda sırasıyla adsorplama miktarları 0,366 kg/kg, 0,345 kg/kg ve 0,301 kg/kg'dır.

Yine adsorbat olarak R404a'nın kullanıldığı ikinci deney prosedürü için adsorpsiyon çiftlerinin katsayıları belirlenerek, $C/C_0 = 0,2$ ve 20 °C'de, granül aktif karbon –R134a için 327 kJ/kg, mavi silikajel-R134a için 262 kJ/kg, beyaz silikajel-R134a için 283kJ/kg ve turuncu silikajel- R134a için 269 kJ/kg adsorpsiyon ısı hesaplanmıştır.

Uygulanan iki deney prosedüründe de deneysel verilere göre sıcaklığın yükselmesi ile adsorpsiyon miktarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca basıncın artmasıyla da adsorpsiyon miktarının arttığı görülmüştür. Yine deneysel sonuçlardan elde edilen grafiklere göre aktif karbonun, beyaz silikajelin ve turuncu silikajelin R134a ve R404a ile yapılan deneylerinde, R134a'nın adsorbat olarak kullanıldığı deneylerde diğer adsorbentlere göre adsorpsiyon miktarının daha iyi oldukları görülmüştür. Ayrıca yapılan deneylerde seçilen adsorbentler için R134a'nın R404a'ya göre daha iyi adsorblandığı görülmüştür.

İlgili adsorpsiyon işlemi için verilerin korelasyonunda Dubinin-Astakhov (D-A) denklemi kullanılmıştır. Adsorpsiyon parametreler, izotermlerden oluşturulan D-A denklemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca izosterik adsorpsiyon ısısı elde edilmiş olup araştırılan numuneler için korelasyon parametreleri sağlanmıştır. Oluşturulan program ile elde edilen sonuçlar ve deneysel veriler arasındaki karşılaştırma sonucunda, bu verilerin çok iyi bir uyuma gösterdiği görülmüştür. Adsorpsiyonun kilogram başına adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon işleminin başlangıcında, basınç arttıkça hızla arttığı gözlemlenmiştir. Adsorpsiyon kapasitesinin maksimum değeri, adsorbent sıcaklığının artması ile azalmaktadır. İzosterik adsorpsiyon ısısı, en düşük sıcaklıkta elde edilen izosterik ısının maksimum değeri ve sıcaklığı ile değişir. İlâveten, adsorpsiyon ısısının büyüklüğünün incelenen deneysel şartlar aralığında R134a ve R404a'nın buharlaşma entalpisinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu özellik, adsorpsiyon entalpisini gidermek için soğutma sıvısı gereksinimlerinin değerlendirilmesi gereken termal kompresörlerin tasarımında önem arz etmektedir.

Ayrıca çalışma konusu kapsamı gereği, termodinamik, kimya, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, mekanik, elektrik, elektronik, otomatik kontrol, enerji dönüşümleri, programlama ve otomasyon sistemleri gibi birçok disiplin ile ilgili araştırmalar yapılmış olup uzmanlık alanlarımız dışında da önemli deneyim ve kazanımlar elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar, adsorpsiyon işleminde kullanılacak adsorpsiyon çiftlerinin önemli olduğunu göstermiş olup bununla birlikte sıcaklık ve basınç parametrelerinin önemini ortaya çıkarmıştır. Uluslararası literatürde, son yıllarda özellikle aktif karbon/R134a çifti üzerine çeşitli çalışmaların yapıldığı görülmüş olup sistem iyileştirme ve performans artırımı konusunda araştırmalar devam etmektedir. Dolayısı ile çalışma

kapsamında elde edilen sonuçlardan yola çıkarak bu konu üzerinde önemle durulması gerekmektedir. Özellikle adsorpsiyon işleminin verimliliği hakkında çalışmaların yapılması ve adsorbent-adsorbat çiftleri ile ilgili performans bilgilerinin elde edilmesi ile adsorpsiyonlu ısı pompalarının gelişimi ve ticari olarak uygulamalarının yaygınlaşması hız kazandıracaktır.

Bundan sonraki çalışmalar için öneriler şunlardır;

Bu çalışma sonucunda elde edilen deneysel tecrübe ve sonuçlar, adsorbsiyonlu ısıtma-soğutma sistemleri ile ilgili yapılacak çalışmalar için yol göstericidir. Aşağıda, yapılan çalışma doğrultusunda öneriler yer almaktadır;

- Proje kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında üzerinde çalışılan birçok adsorbent-adsorbat çiftine göre oldukça iyi adsorblama oranlarına sahip çiftler belirlenmiştir. Bu çiftleri kullanıldığı farklı adsorpsiyon çevrimlerinin çalışabilirliği ve ısı pompası tasarımları üzerine çalışmalar geliştirilebilir. Kademeli ve hibrit adsorbsiyonlu ısı pompaları üzerinde çalışılabilir.
- R134a ve R404a'nın ozon tabakasına zararı bulunmamaktadır. Ama küresel ısınmaya etkisi vardır. Yeni çıkan ve hem ozon tabakasına hem de küresel ısınmaya etkisi olmayan adsorbatlar araştırılabilir.
- Kullanılan adsorpsiyon sisteminde, adsorbentlerin deney sistemine farklı yükleme durumları ile deneyleri gerçekleştirilebilir. Adsorbent yatakları, farklı kalınlıklarda ve/veya adsorpsiyon kabına farklı diziliş durumları ile tekrar deneye alınabilir.
- Kullanılan deney sistemi ile farklı adsorpsiyon çiftlerinin, farklı deney koşullarında deneyleri gerçekleştirilerek performansları araştırılabilir.
- Deneysel sonuçların verileri ile elde edilen adsorpsiyon çiftlerinin sabitleri kullanılarak, aynı çiftlerin kullanıldığı adsorbsiyonlu ısı pompalarının çevrimlerini ve verimlerini hesaplayan ticari olarak kullanılacak programlar yazılabilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2014a.** Zeolit (klinoptilolit). <http://www.gordeszeolite.com/zeoli%CC%87t-kli%CC%87nopti%CC%87loli%CC%87t>. (Erişim Tarihi: 2016).
- Anonim, 2016a.** Heat Pumps. <http://www.delta-tech.co.uk/heatpumps.html>. (Erişim Tarihi: 2016).
- Anonim, 2010.** Wykresy adsorpcji par i gazów. http://www.wikiwand.com/pl/Wykresy_adsorpcji_par_i_gaz%C3%B3w. (Eriřim Tarihi: 2016)
- Anonim, 2013.** Silikajel nedir. <http://elektrikteknikeri01.blogspot.com.tr/2013/12/silika-jel-nedir.html>. (Erişim Tarihi:2016).
- Anonim, 2016b.** Aktif karbon. <http://www.teknyks.com/aktif-karbon>. (Erişim Tarihi:2016).
- Anonim, 2014b.** Silikajel turuncu. <http://www.damlakimya.com/urunler/detay/S%C4%B0L%C4%B0KAJEL/Silikajel%20Turuncu/tr>. (Erişim Tarihi:2016).
- Abak, H. 2008.** Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Fındık Kabuğu Yüzeyine Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kinetiği. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Balıkesir.
- Akkimaradi, B. S., Prasad, M., Dutta, P., Srinivasan, K. 2001.** Adsorption of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane on Activated Charcoal. *J. Chem. Eng. Data*, 46:417-422.
- Al Mers, A., Azzabakh, A., Mimet A., El Kalkha, H. 2006.** Optimal design study of cylindrical finned reactor for solar adsorption cooling machine working with activated carbon–ammonia pair. *Applied Thermal Engineering*, 26:1866–1875.
- Allouache N. 2013.** Numerical modelling of an adsorption solar cooling system. Proceedings of The World Congress on Engineering 2013. WCE 2013, July 3-5, London, UK.
- Attalla, M., Sadek, S. 2014.** Experimental Investigation of Granular Activated Carbon/R-134a Pair for Adsorption Cooling System Applications. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2:11-20.
- Banker, N.D., Srinivasan, K., Prasad, M. 2004.** Performance analysis of activated carbon + HFC-134a adsorption coolers. *Carbon*, 42:117–127.
- Banker, N.D., Dutta, P., Prasad, M., Srinivasan, K. 2008.** Performance studies on mechanical + adsorption hybrid compression refrigeration cycles with HFC 134a. *International Journal of Refrigeration*, 31:1398 – 1406.
- Banker, N.D., Prasad, M., Dutta, P., Srinivasan, K. 2009.** Activated carbon + HFC 134a based two stage thermal compression adsorption refrigeration using low grade thermal energy sources. *Applied Thermal Engineering*, 29:2257–2264.
- Basibuyuk, M., Forster, C.F. 2003.** An examination of the adsorption characteristics of a basic dye (Maxilon Red BL-N) on to live activated sludge system. *Process Biochemistry*, 38(9): 1311-1316.
- Berkem, A.R., Baykut, S., Berkem, M.L. 1994.** Fizikokimya 1-2.Cilt. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 555s.
- Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Palombo, A. 2010.** Transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations. *Solar Energy*, 84:432–449.

- Çengel Y.A., Boles A.M. 2006.** Thermodynamics, An Engineering Approach 5th edition. McGraw-Hill College, Boston, MA, 988s.
- Demir, H., Mobedi, M., Ulku, S. 2008.** A review on adsorption heat pump - problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2381–2403.
- Dubin, M. M., 1975.** Progress in Membrane and Surface Science. Cadenhead, D. A., Ed. Academic Press: New York, 9:1-70.
- El-Sharkawy, I. I., Saha, B. B., Koyama, S., Srinivasan, K. 2007.** Isosteric heats of adsorption extracted from experiments of ethanol and HFC 134a on carbon based adsorbents. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50: 902–907.
- El-Sharkawy, I.I., Saha, B.B., Koyama, S., He, J., Ng, K.C., Yap, C. 2008.** Experimental investigation on activated carbon–ethanol pair for solar powered adsorption cooling applications. *International Journal of Refrigeration*, 31:1407–1413.
- Esen, D.Ö. 2007.** Adsorbsiyonlu soğutma sistemlerinin motorlu taşıtlarda kullanılabilirliği. *Mühendis ve Makine*, Cilt : 49, Sayı: 577.
- Ghazy, M., Harby, K., Askalany, A., Saha, B., B. 2016.** Adsorption isotherms and kinetics of activated carbon/Difluoroethane adsorption pair: Theory and experiments. *International Journal of Refrigeration*, 70: 196–205.
- Gülen, J., Boztepe, A. 2014.** Aktif alümina. *İnovatif Kimya Dergisi*, Sayı 18, Sayfa 7
- Gürten, İ.I. 2008.** Çay Atığından Adsorbent Üretimi ve Üretilen Adsorbentin Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Habib, K., Saha, B.B., Rahman, K.A., Chakraborty, A., Koyama, S., Choon, N.K. 2010.** Experimental study on adsorption kinetics of activated carbon/R134a and activated carbon/R507A pairs. *International Journal of Refrigeration*, January.
- Hamamoto, Y., Alam, K.C.A., Saha, B.B., Koyamac, S., Akisawa, A., Kashiwagi, T. 2006.** Study on adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers, Part 1 Adsorption characteristics. *International Journal of Refrigeration*, 29:305–314.
- Hassan, H.Z., Mohamad, A.A., Bennacer, R. 2011.** Simulation of an adsorption solar cooling system. *Energy*, 36:530-537.
- Hauer, A. 2002.** Thermal Energy Storage With Zeolite For Heating And Cooling Applications. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions - feasibility studies and demonstration projects. 3rd Workshop, Tokyo, Japan.
- Królicki, Z., Wilk, T., Zajączkowski, B. 2006.** Study on the efficiency of solar adsorption refrigeration and heat pump systems. 61. ATI National Congress – International Session “Solar Heating and Cooling”.
- Koley, S., Ghosh, I. 2014.** Generating continuous solid sorption cooling in a single adsorbent tube – Experiment and generalised transient analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72: 470–478.
- Lambert, M.A. 2007.** Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage. *Applied Thermal Engineering*, 27:1612–1628.
- Lu, Z.S., Wang, R.Z., Wang, L.W., Chen, C.J. 2006.** Performance analysis of an adsorption refrigerator using activated carbon in a compound adsorbent. *Carbon*, 44:747–752.
- Mayers, D. 1999.** Surfaces, Interfaces and Colloids- Principles and Applications. Wiley-VCH, New York, 433s.

- Mckay, G., Al Duri, B. 1989.** Prediction Of Multicomponent Adsorption Equilibrium Data Using Empirical Correlations. *Chemical Engineering Journal* ,41: 9–23.
- Ng, K.C., Chua, H.T., Chung, C.Y., Loke, C.H., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Saha, B.B. 2001.** Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics. *Applied Thermal Engineering*, 21:1631-1642.
- Pal, S., Hajj, M.R., Wong, W.P., Puri, I.K. 2014.** Thermal energy storage in porous materials with adsorption and desorption of moisture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69:285–292.
- Qasem, N.A.A., El-Shaarawi, M.A.I. 2013.** Improving ice productivity and performance for an activated carbon/methanol solar adsorption ice-maker. *Solar Energy*, 98:523-542.
- Sah, R., P., Choudhury, B., Das, R., K. 2015.** A review on adsorption cooling systems with silica gel and carbon as adsorbents. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45:123–134.
- Saha, B. B., Chakraborty, A., Koyama, S., Yoon, S., Mochida, I., Kumja, M., Yap, C., Ng K.C. 2008.** Isotherms and thermodynamics for the adsorption of n-butane on pitch based activated carbon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51:1582–1589.
- Saha, B.B., Habib, K., El-Sharkawy, I.I., Koyama, S. 2009.** Adsorption characteristics and heat of adsorption measurements of R-134a on activated carbon. *International Journal of Refrigeration*, 32:1563 – 1569.
- Sevinç, K., Güngör, A. 2012.** Güneş Enerjisi Kaynaklı Soğutma Sistemleri ve Bu Alandaki Yeni Uygulamalar. *Mühendis ve Makina*, 53, 635:59-70.
- Shaw, D.J. 1992.** Introduction to Colloid Surface Chemistry. 4thed, Oxford: Butterworth-Heinemann, 306s.
- Shmroukh, A.N., Ali, A.H.H., Rahman, A.K.A. 2013.** Experimental study on adsorption capacity of activated carbon pairs with different refrigerants. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 7(11):25-31.
- Solmuş, İ., Yıldırım, C. 2014.** Adsorpsiyonlu Bir Soğutma Sisteminin Performansının Farklı Çalışma Çiftleri İçin Teorik Analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 34(2):29-37.
- Solmuş, İ., Yıldırım, C., Bilen, K. 2013.** Silika jel-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performans analizi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 17, İzmir.
- Solomon, I., Ribeiro, A.M., Santos, C.J., Loureiro J., Rodrigues, A.E., Sandu, I., Mamaliga, I. 2013.** Adsorption equilibrium of water vapor on activated carbon and alumina and carbon and alumina impregnated with hygroscopic salt. *Turkish Journal Chemistry*, 37:358-365.
- Sözüğeçer, S. 2013.** Manyetik - Poli (Etilenglikoldimetakrilat-N-vinil-2-pirolidon) Sentezi, Karakterizasyonu ve Sulu Çözeltilerde Ağır Metal İyonları Adsorpsiyon Parametrelerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Bursa.
- Sumathy, K., Yeung, K.H., Yong, L. 2003.** Technology development in the solar adsorption refrigeration systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29:301–327.
- Tatler, M., Senatalar, A.E. 2000.** Effects of metal mass on the performance of adsorption heat pumps utilizing zeolite 4A coatings synthesized on heat exchanger tubes. *International Journal of Refrigeration*, 23:260 – 268.

- Tso, C. Y., Christopher, Y.H., Chao, C.Y.H. 2012.** Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems. *International Journal of Refrigeration*, 35:1626-1638.
- Topaloğlu, D. 2000.** Moleküler Eleklerde Adsorpsiyon Termodinamiğinin Gaz Kromatografik Yöntemle İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*. Osmangazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Ugale V., D., Pitale A., D. 2015.** A Review on Working Pair Used in Adsorption Cooling System. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 23(02).
- Wang, L.W., Wang, R.Z., Oliveira, R.G. 2009.** A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:518–534.
- Wang, R.Z., Oliveira, R.G. 2005.** Adsorption refrigeration- An efficient way to make good use of waste heat and solar energy. International Sorption Heat Pump Conference, June 22-24, Denver, CO, USA.
- Wang, L.W., Wang, R.Z., Lu, Z.S., Chen, C.J., Wang, K., Wu, J.Y. 2006.** The performance of two adsorption ice making test units using activated carbon and a carbon composite as adsorbents. *Carbon*, 44:2671–2680.
- Wang, L.W., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Xu, Y.X., Wang, S.G., Li, X.R. 2003.** Study of the performance of activated carbon–methanol adsorption systems concerning heat and mass transfer: *Applied Thermal Engineering*, 23:1605–1617.
- Wang, R.Z., Oliveira, R.G. 2006.** Adsorption refrigeration—An efficient way to make good use of waste heat and solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science* 32:424–458.
- Wang, R.Z., Xu, Y.X., Wu, J.Y., Wang, W. 1998.** Experiments on heat-regenerative adsorption refrigerator and heat pump. *International Journal of Energy Research*, 22:935-941.
- Wang, R.Z.. 2001.** Performance improvement of adsorption cooling by heat and mass recovery operation. *International Journal of Refrigeration*, 24:602-611.
- Weber, W. J. 1972.** Physicochemical Processes: For Water Quality Control. Wiley Interscience, NY. 199-255s.
- Yıldız, N. 2004.** Süperkritik akışkan ortamında adsorbantların rejenerasyonu, A.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri, 20020745011 nolu Proje Kesin Raporu, Ankara.
- Yörükoğulları, E. 1997.** Doğal Zeolitlerde Fiziksel Adsorpsiyon Uygulamaları. Anadolu Üniversitesi Yayınları, No 988, Fen Fakültesi Yayınları: No:7, Eskişehir.
- Zhai, X.Q., Wang, R.Z. 2009.** Experimental investigation and theoretical analysis of the solar adsorption cooling system in a green building. *Applied Thermal Engineering*, 29:17–27.
- Zhai, X.Q., Wang, R.Z. 2010.** Experimental investigation and performance analysis on a solar adsorption cooling system with/without heat storage. *Applied Energy*, 87:824–835.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Ersan GÖNÜL

Doğum Yeri ve Tarihi :Bursa-23.09.1985

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Milli Piyango Anadolu Lisesi Bursa / 2000 - 2004

Lisans :Uludağ Üniversitesi Makine Müh. Böl. / 2004 - 2009

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Müh. Böl. Anabilim Dalı / 2010 - 2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bursa
Şubesi / 2009-Halen Devam Ediyor

İletişim (e-posta) :ersangonul@hotmail.com

Yayınları :

Gönül, E., Bayraktaroğlu, B. 2011, Kaldırma makinalarında yorulma test ve analizleri. TMMOB MMO Yayınları, 2011

Gönül, E., Bayraktaroğlu, B. 2010, Metal konstrüksiyonların ve makine parçalarının yorulma dayanımı ve örnek bir analiz çalışması. TMMOB MMO Bursa Şube Bülteni, 15-18.

Kılıç, M., Gönül, E. 2011, Bir düzlemsel güneş kolektörünün 3- boyutlu sayısal analizi. Anadolu Enerji Sempozyumu Bildiriler Kitabı.

Gönül, E., Kılıç, M., Karpaz, F. 2014. A Study on Design and Manufacturing for the Side Wall of Large CNC Portal Milling Machine. 2nd International Conference on Research in Science, Engineering and Technology (ICRSET'2014), Dubai (UAE)

Kara A., Kılıç M., Dinibütün N., Gönül E. 2015. Adsorpsiyonlu Isı Pompaları İçin Farklı Adsorban Malzemelerin Geliştirilmesi ve Fizikokimyasal Uygulamaları. 14. Ulusal Kromatografi Kongresi, Poster Sunum, *Uşak-Türkiye*.

Gönül, E., Bayraktaroğlu, B. 2016. İş Güvenliğinde Tahribatsız Muayenenin Önemi. Kaynak Teknolojisi X. Ulusal Kongre Ve Sergisi, E/MMO/649.

Kılıç, M., Gönül, E. 2016. A study on adsorption characteristics of activated Carbon - R134a and activated Carbon - R404a pairs. 8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES - 8) ,Antalya, TURKEY

Kılıç, M., Gönül, E. 2016. Adsorption properties of silica gel-R134A pair for use in cooling systems. 8th Ege Energy Symposium And Exhibition, Afyon, TURKEY.

Kılıç, M., Gönül, E. 2016. Adsorption characteristics evaluation of R134a and R404a on different adsorbents. XV International Scientific Conference-RE & IT 2016, Smolyan- Bulgaristan.

Kılıç, M., Gönül, E. 2016. Adsorption characteristics evaluation of R134A and R404A on different adsorbents. *Bulgarian Chemical Communications*, 48(SI):306 - 311.

Kılıç, M., Gönül, E. 2016. Experimental investigation of R134a adsorption on silica gel for cooling system applications. *Research on Engineering Structures & Materials (Online First)*.

