

Türker
AKKOYUNLU

Yüksek Lisans
Tezi

KÜ 2018

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADSORPSİYONLU BİR SOĞUTMA SİSTEMİNİN
TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

TÜRKER AKKOYUNLU

AĞUSTOS 2018

Makine Anabilim Dalında Türker AKKOYUNLU tarafından hazırlanan Adsorpsiyonlu Bir Soğutma Sisteminin Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr.İbrahim UZUN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan(Danışman): Prof. Dr. İbrahim UZUN

Üye : Dr.Öğr.Üy. Zühtü Onur PEHLİVANLI

Üye : Dr.Öğr.Üy. Murat Kadir YEŞİLYURT

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

ADSORPSİYONLU BİR SOĞUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

AKKOYUNLU, Türker

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof.Dr.İbrahim UZUN

Ağustos 2018, 75 sayfa

Soğutma sistemleri, buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma sistemleri ve termal enerji tahrikli soğutma sistemleri olarak iki ana başlıkta tanımlanmaktadır. Bilindiği üzere mekanik sıkıştırımlı sistemler elektrik enerjisi kaynaklı çalışmaktadır. Günlük yaşamda ve sanayi sektöründe soğutmanın önemi arttıkça bu alanda yapılan harcamalar ciddi boyutlara ulaşmıştır. Temelde enerjinin daha verimli kullanılması amacıyla atık ısıların değerlendirilmesi ve alternatif termal enerji kaynaklarından faydalanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu koşullarda atık ısı ve termal enerji kaynaklı çalışan soğutma sistemleri üzerine ciddi araştırmalar yapılmaya başlanmıştır.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi var olan soğutma sistemlerine alternatif olarak doğmuş ve gelişmesini sürdürmekte olan bir soğutma sistemidir. Birçok olumlu yönüne rağmen var olan bazı eksiklikleri bulunmaktadır. Mevcut eksiklikler ve farklı enerji kaynaklarına uyumlu olarak çalışabilen sistem tasarımları üzerine önemli ARGE çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Atık ısı enerjisi ve güneş enerjisi kaynaklı adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde verim artırılması üzerine araştırmalar yapılmaktadır.

Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin temel elemanı olan adsorbent malzeme, sistemin performansını ciddi oranda etkilemektedir. Çalışmada adsorbent malzeme olarak zeolit 13X kullanılmıştır. Tasarımı yapılan deney düzeneği üzerinde sistemin ısı

performans değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamaya esas alınan basınç, nem ve sıcaklık değerleri deney düzeneği üzerinde zamana bağlı olarak ölçölmüştür. Deney düzeneğinde absorban olarak su kullanılmış olup 1×10^{-4} bar ile 1×10^{-3} basınç aralığında tekrarlanan deneylerde buharlaştırılan su miktarı ve buharlaştırıcı sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki veriler dikkate alınarak tablo ve grafiklerle yorumlanarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyonlu Soğutma, Zeolit, Isı ve Kütle Transferi



ABSTRACT

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN ADSORPTION COOLING SYSTEM

AKKOYUNLU, Türker

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, Thesis

Supervisor: Prof.Dr.İbrahim UZUN

August 2018, 75 pages

Cooling systems, steam compression mechanical cooling systems and thermal energy cooling systems are described in two main sections. As is known, mechanical compression systems are powered by electrical energy. As the importance of cooling in everyday life and industrial sector increases, expenditures made on this area have reached serious dimensions. In order to use energy more efficiently, it is inevitable to evaluate waste heat and utilize alternative sources of thermal energy. In these conditions serious researches have started to be done on the cooling systems working from waste heat and thermal energy.

The adsorption cooling system is an alternative cooling system that has been born and continues to develop. Despite many positive aspects, there are some shortcomings. Significant ARGE studies are being carried out on system design that can work in accordance with the existing deficiencies and different energy sources. Research is being carried out on increasing efficiency in waste heat energy and solar energy adsorption cooling systems.

The adsorbent material, which is the main element of the adsorption cooling system, seriously affects the performance of the system. Zeolite 13X was used as the adsorbent material in the study. The thermal performance values of the system are calculated on the designed test setup. The pressure, humidity and temperature values, which are

based on the calculation, are measured on the test setup depending on the time. Water was used as the absorbent in the test apparatus and the amount of evaporated water and the evaporator temperatures were recorded in repeated experiments at 1×10^{-4} bar and 1×10^{-3} pressure range. The results obtained are interpreted with tables and graphs considering the data in the literature.

Key Words: Adsorption Cooling, Zeolite, Heat and Mass Transfer



TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile önümü açan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN'a, deneylerin yapılması konusunda yardımları için Arş. Gör. Hüsamettin TAN ve Arş.Gör.Bahadır GEMİCİOĞLU'na, büyük fedakarlıklarla her zaman yanımda olan aileme ve eşim Esin AKKOYUNLU'ya, teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. SOĞUTMA SİSTEMELERİ	7
2.1. Buhar Sıkıştırılmalı Mekanik Tahrikli Soğutma Sistemleri.....	7
2.2. Termal Enerji Tahrikli Soğutma Sistemleri	8
2.2.1. Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri.....	9
2.2.1.1. Tek Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi	9
2.2.1.2. Çift Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi	10
2.2.1.3. Absorpsiyonlu Isı Yükselticisi	11
2.2.2. Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi	12
2.2.2.1. Temel Adsorpsiyon Çevrimi	13
2.2.2.2. Çalışma mekanizması.....	13
2.2.2.3. Tek Kademeli Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi	14
2.2.2.4. Çift kademeli Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi	15
2.3. Termal Dalga Adsorpsiyon Soğutma Çevrimi.....	18
2.4. Adsorpsiyon Olayı	19
2.4.1. Fiziksel Adsorpsiyon.....	20
2.4.2. Kimyasal Adsorpsiyon	20
2.4.3. İyonik Adsorpsiyon	20
2.5. Adsorbent ve Adsorbat Çiftinin Seçimi	21
2.6. Adsorbent	22
2.6.1. İyon Değiştirici Reçineler	22
2.6.2. Doğal Adsorbentler	23
2.6.3. Sentetik Adsorbentler.....	23

2.7.	Soğutucu Akışkanlar	28
2.8.	Adsorbent Yatak Tasarımı	29
3.	MATERYAL VE METOT	31
3.1.	Adsorbent Madde Seçimi	31
3.2.	Deney Düzeneği Tasarımı	32
3.2.1.	Adsorbent Yatak Tasarımı	32
3.2.2.	Buharlaştırıcı Hazne Tasarımı	33
3.2.3.	Bağlantı Elemanı Tasarımları	34
3.2.4.	Basınç Sensörü Bağlantısı	35
3.2.5.	Nem ve Sıcaklık Sensörü Bağlantısı	36
3.2.6.	Yoğuşturucu Soğutma Hattı	37
3.3.	Deney Düzeneği Bileşenleri	38
3.3.1.	Buharlaştırıcı	38
3.3.2.	Yoğuşturucu	40
3.3.3.	Adsorbent Yatak	41
3.3.4.	Isıtıcılar	41
3.3.5.	Sensörler ve Veri Aktarma	42
3.3.5.1.	Veri Toplama Cihazı	42
3.3.5.2.	Nem ve Sıcaklık Sensörü	45
3.3.5.3.	Sıcaklık Sensörü	48
3.3.5.4.	Basınç Sensörü	48
3.3.5.5.	Vakum Pompası ve Sensörü	50
3.3.5.6.	Ağırlık Sensörü	51
3.4.	Çalışma Sistemi	52
3.5.	Sistemin Termodinamik Olarak İncelenmesi	57
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	60
4.1.	DeneySEL Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	60
5.	SONUÇ ve TARTIŞMA	67
KAYNAKLAR.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. 2006 – 2015 Yılları Türkiye elektrik sistemi gerçekleşen puant güç ve enerji tüketimi[1].....	2
2.1. Mekanik sıkıştırımlı soğutma sistemi.....	8
2.2. Tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi[2].....	10
2.3. Çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi[2].....	11
2.4. Absorpsiyonlu ısı yükselticisi[2].....	12
2.5. Adsorpsiyonlu soğutma sistemindeki enerji hareketleri.....	13
2.6. Güneş enerjisi destekli tek kademeli adsorpsiyonlu soğutma sistemi[3].....	15
2.7. Çift kademeli adsorpsiyonlu soğutma sistemi[4].....	16
2.8. İki kademeli dört yataklı sistem şeması[5].....	17
2.9. Adsorpsiyonlu soğutma sisteminde termal ısı geri kazanımı[6].....	18
2.10. Adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçleri[7].....	19
2.11. TO4 tetrahedrallerinin farklı gösterimleri.....	25
2.12. Zeolitin yapısı.....	25
3.1. Adsorbent yatak imalat çizimi.....	33
3.2. a) Kelepçe aparatı ile nem sensörü bağlantısı, b) Altı yollu ara bağlantı Elemanı.....	34
3.3. KF25 Spiral boru flanş bağlantısı.....	36
3.4. Basınç sensörü flanş bağlantısı.....	36
3.5. Nem ve sıcaklık ölçer flanş bağlantısı.....	37
3.6. Soğutucu düzenek.....	37
3.7. Buharlaştırıcı haznesi.....	39
3.8. Buharlaştırıcı üst kapak (sıcaklık ölçüm bölgesi).....	39
3.9. Yoğuşturucu hattı.....	40
3.10. Adsorbent yatak üst kapak (sıcaklık- basınç ölçüm).....	41
3.11. Adsorbent yatak ve ısıtıcılar.....	42
3.12. Veri toplama cihazı bağlantı kartı.....	43
3.13. IO Libraries bağlantı penceresi.....	43

3.14. Sensörlerin tanımlanması.....	44
3.15. Veri okuma ekranı.....	45
3.16. Nem ve sıcaklık ölçer.....	46
3.17. Nem ve sıcaklık sensörü montajı.....	47
3.18. Basınç sensörü ve bağlantı elemanı.....	48
3.19. Basınç sensörü montajı.....	49
3.20. Vakum sensörü.....	50
3.21. Vakum pompası.....	51
3.22. Ağırlık sensörü ve gösterge ekranı.....	52
3.23. Soğutma ve adsorpsiyon süreci.....	53
3.24. İzobarik adsorpsiyon şeması.....	53
3.25. İzosterik ısıtma şeması.....	54
3.26. Adsorbent yatakta desorpsiyon süreci.....	55
3.27. İzobarik desorpsiyon şeması.....	55
3.28. İzosterik soğutma şeması.....	56
3.29. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	56
3.30. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi deney düzeneği.....	57
3.31. Clapeyron diyagramı.....	57
4.1. Adsorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi (26-06).....	62
4.2. Desorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi (27-06).....	63
4.3. Adosrpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi.....	66
4.4. Desorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çift kademeli sistem için optimum zaman tablosu[8].....	17
2.2. Çok kademeli sistem için genel optimum zaman tablosu [30].....	17
2.3. Doğal zeolitin termo-fiziksel özellikleri.....	27
2.4. Adsorbent- adsorbat çiftlerinin karşılaştırılması [38].....	27
2.5. Adsorpsiyon teknolojisinde yaygın olarak kullanılan soğutucu akışkanların fiziksel özellikleri.....	28
3.1. Nem ve sıcaklık ölçer bağlantı şeması.....	47
3.2. Nem ve sıcaklık ölçer dönüşümü.....	47
3.3. Basınç sensörü bağlantı şeması.....	49
4.1. Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem verileri (26-06).....	60
4.2. Desorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değişimi (27-06).....	61
4.3. Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değerleri (28-06/29-06).....	63
4.4. Desorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değerleri (29-06/02-07).....	65

SİMGELER DİZİNİ

T	Sıcaklık (°C)
P	Basınç (Pa)
Q	Isı (kJ/kg)
m	Kütle (kg)
w	Adsorplanma Miktarı (kg/kg)
c_p	Özısı (kJ/kgK)
ΔH_{ads}	Ortalama Adsorpsiyon Isısı (kJ)
Δh_{fg}	Buharlaşma Entalpisi (kJ/kg)
rh	Nem
z	Adsorbent

KISALTMALAR DİZİNİ

kond	Kondenser
evp	Evaporatör
ref	soğutma
ads	adsorpsiyon
des	desorpsiyon
COP	Performans Katsayısı
SCP	Özgül Soğutma Gücü
DC	Doğru Akım

1. GİRİŞ

Son yıllarda enerji tüketimi ülkeler ve araştırmacılar tarafından dikkat çekici bir konu haline gelmiştir. İnsanoğlunun artan konfor talebinin yanında gelişen endüstrinin tükettiği enerji miktarı ciddi boyutlara ulaşmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Dış İşleri Bakanlığının Türkiye'nin enerji stratejisi başlıklı araştırmasına göre Türkiye OECD ülkeleri içerisinde geçtiğimiz on beş yıllık dönemde enerji talep artışının en hızlı gerçekteği ülkedir.

Resmi makamlarca verilen bilgilere göre Türkiye'nin elektriğe olan ihtiyacı her yıl artmaya devam etmektedir. 2015 yılında verilen son bilgiye göre de elektrik enerjisi tüketimi günde puant talep 43289 MW olarak gerçekteği[1]. Genel olarak talep edilen enerji ihtiyacının çok büyük bir bölümü elektrik, kömür ve fosil yakıtlardan sağlanmaktadır.

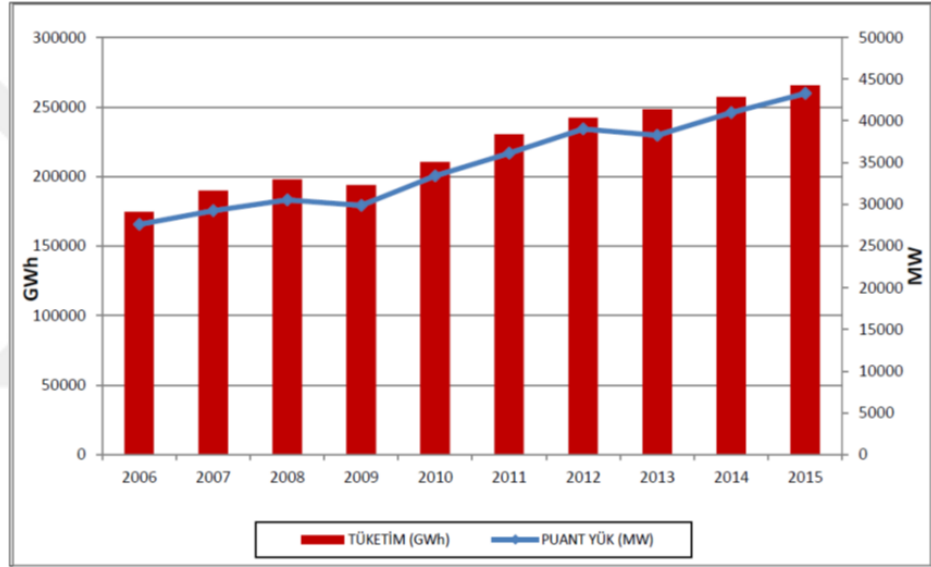
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre, Türkiye'nin günlük ortalama 601 bin varil (82 bin ton) petrol ve petrol ürünleri tüketimi bulunuyor. Bu tüketimin 47 bin varili (6,4 bin ton) Türkiye'de üretilirken, 554 bin varili (75,6 bin ton) ithal ediliyor[1]. Fosil yakıtlardan elde ettiğimiz bu kazancın yanında çevreye verilen ciddi zararlar sonucunda uzun vadede insanoğlunu etkileyecek çevresel sorunların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu nedenle enerji üretimi ve çevresel etkileri üzerine çalışan araştırmacılar maliyetleri ve aynı zamanda çevresel etkileri en aza indirecek alternatif sistemler üzerinde çalışmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan enerji ve çevre dostu sistemlerin üretilmesi üzerine ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Enerji tasarrufu ve verimlilik artışı söz konusu olduktan sonra güneş enerjisinden ve çalışan sistemlerden atılan atık ısıların değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Söz konusu durumlarda adsorpsiyonlu soğutma sistemleri ön plana çıkmıştır.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarından bahsedebilmek için mevcut çoğunlukta kullanılan mekanik sıkıştırmalı iklimlendirme sistemleri

referans alınarak kıyaslamalar yapılması mümkündür. Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri dışarıdan fazla miktarda enerji gerektiren kompresör yerine bu ihtiyacı doğal bir malzeme olan zeolit ve kısa sürelerde devreye giren vakum pompası vasıtasıyla gerçekleştirmektedir. Hem kompresörün sahip olduğu maliyet ve bakım masrafları ortadan kalkarken hem de buharı sıkıştırmanın yüksek enerji maliyeti adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde ortadan kalmış bulunmaktadır.

Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri, gerekli revizyonlar yapıldıktan sonra atık ısı, güneş enerjisi ve jeotermal enerjilerin kullanılmasına imkân sağlayabilmektedir.



Şekil 1.1. 2006 – 2015 Yılları Türkiye elektrik sistemi gerçekleşen puant güç ve enerji tüketimi[1]

Günümüzde Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin önemi anlaşılmış ve üzerine ciddi ARGE çalışmaları yapılmaktadır. Yapılan araştırmalarda adsorpsiyonlu soğutma sisteminin verimli enerji kullanımı ve CO₂ emilimini azaltması ile sağladığı iklim koruması bu sistemler için umut verici özelliklerin başında geldiği bildirilmiştir[9, 10]. Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri aslında çalışma prensibi olarak buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma sistemleri ile benzerlik göstermektedir. Buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma çevrimindeki mekanik işlemin yerini adsorpsiyonlu soğutma sisteminde

fiziko-kimyasal işlemler almıştır. Adsorban malzemenin sistem içerisindeki dolaşımını vakum altındaki basınç farkları ve su buharı emme eğilimi yüksek olan zeolit malzemesi sayesinde olmaktadır. Adsorbent haznesinde fiziksel adsorpsiyon olarak adlandırılan kimyasal olaylar sayesinde sistem çalışmaktadır.

Bu sistemlerin çalışma prensipleri klasik sistemlere göre biraz daha kompleks olabilmektedir. Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri ile ilgili teknik bilgilere yer veren sistemin çalışma prensibi ve termodinamik analizi üzerine yoğunlaşmış çok sayıda akademik çalışmaya ulaşmak artık mümkün hale gelmiştir[11, 12].

Buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma sistemlerine alternatif olarak ortaya çıkan tek sistem adsorpsiyonlu soğutma sistemi değildir. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi için bahsettiğimiz özelliklerin büyük bir çoğunluğunu içinde barındıran bir sistem olan Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinden bahsetmek mümkündür. Çalışma prensipleri birbirinden farklı olan bu sistemler temelde aynı mantıkla yani soğutucu akışkan hareketinin bir kompresör tarafından değil de belli fiziko- kimyasal olaylar ile bu işlemi yapmaktır. Ayrıca bu sistemler dışa olan enerji bağımlılığını ortadan kaldırmaktadır. Absorpsiyonlu ve adsorpsiyonlu soğutma sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda sistemlerin birbirleriyle olan benzerlikleri ve farklılıkları üzerinde durularak çalışma prensipleri üzerine önemli araştırmalar yapılmıştır. Her iki sistem içinde hayati önem arz eden absorpsiyon ve adsorpsiyon haznelerinin tasarımı, ısı verimi ve basınç dayanımlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur[12, 13].

Çözünmüş madde ve sıvı moleküllerin, gaz ve buharın bir katı maddenin yüzeyine tutunması olayına adsorpsiyon, yüzeyden emilmesine absorpsiyon denilir. Burada katı maddenin yüzeyine tutunan maddeye adsorban, maddenin tutunduğu yüzey adsorbent olarak adlandırılır. Yine adsorbente tutunmuş haldeki maddenin de yüzeyden ayrılmasına da desorpsiyon olayı denilmektedir[7].

Adsorbent haznesi içerisinde zeolit ile su buharının çok kısa sürede temas etmesi istenmektedir. Hazne içerisinde aynı anda bunu gerçekleştirmenin zorlukları mevcut. İstenilen buharın zeolite temasının artırılması amacıyla hazne içerisinde farklı

tasarımlar yapılmıştır. Kılcal borular ve tel kafesler ile buharın hazne içerisinde homojen dağılımını hedefleyen çalışmalar mevcuttur[14].

Adsorbent malzeme seçiminde öncelik malzemenin su emme kapasitesi ve desorpsiyon sıcaklığıdır çünkü bunlar tüm sistemin performansına etki eder. Zeolit, silika jel, aktif karbon vb. adsorbent malzemelerin ısı performansları üzerine çalışmalar mevcuttur[9, 15]. Yapılan bazı çalışmalarda adsorbent malzeme içerisine metal katkıları eklenerek verimde iyileşme sağlanmıştır.

Farklı adsorbent/ adsorbat çiftleri üzerine de araştırmalar mevcuttur. Aktif karbon/ metanol ve silika jel/su gibi birçok çift üzerine fazlaca çalışmalar yapılmıştır. Bu çiftlere ait adsorbent miktarına göre elde edilen soğutma miktarları ve sistemin soğutma tesir katsayısına ait hesaplamalar mevcuttur[15, 16].

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi üzerine farklı tasarımlarda mevcuttur. Örneğin çift adsorbent hazneli olarak tasarlanan sistemlerde bir hazne adsorbata doyduktan sonra izosterik ısıtma aşamasındayken diğer hazne adsorbat emme aşamasına geçer ve böylece sistem soğutma devamlılığı sağlanmaya çalışılmıştır. Buna benzer üç veya daha fazla hazneli olarak tasarlanmış sistemler ve çalışma prensiplerine ait çalışmalar bulunmaktadır[17].

Çift kademeli adsorpsiyonlu soğutma sistemi için ısı ve kütle geçişi için sistemin kombinasyonu ve performansının simule edildiği ayrıca zeolit 13X/CaCl₂ kompozit adsorbent malzemesiyle prototip bir sistemde gerçek değerler elde edilmeye çalışılmıştır[18].

Bu sistemlerde bahsedilen adsorbentler kullanıldığı gibi zeolitten türetilen sentetik malzemelerde mevcuttur. Bu malzemeler üzerine prototip deney düzeneklerinde birçok çalışma yapılmış ve nem tutma, performans katsayısı ve desorpsiyon sıcaklığı gibi özelliklerine göre sınıflandırılmıştır[19].

Zeolit nem alma kapasitesini arttırmak amacıyla metalik malzeme katkılı zeolit kullanılarak sistem performansının yükseldiği görülmüştür. Bu hazne içerisindeki

sıcaklık dağılımını sabit hale getirerek buhar difüzyonunu ve desorpsiyonunu hızlandırmıştır[20, 21].

Absorpsiyonlu soğutma sistemindeki çevrim hesabı, ısıl verim ve soğutma tesir katsayısı hesaplarının ayrıntılı olarak yapıldığı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda ayrıca sistem üzerinde performans değerlerine etki eden parametreler üzerinde durulmuştur. Yatak tasarımı ve optimum buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklık ve basınç değerleri ile ilgili bilgiler verilmiştir[2, 13].

Çevre dostu çalışma sistemi, ekonomik faydası ve atık ısı veya güneş enerjisi gibi ısı kaynaklarına entegre edilebilmesi gibi özellikleri sebebiyle adsorpsiyonlu soğutma sistemlerine olan rağbet gün geçtikçe artmaya devam etmektedir. Çok farklı alanlarda bu sistemlere ait uygulamaları görmek mümkündür[22, 23].

Bir lokomotifteki operatör kabinini soğutulması için özel bir adsorpsiyonlu soğutma sistemi geliştirilmiştir. Normal çift yataklı adsorpsiyonlu soğutma sisteminden farklı olarak bu sistemde çift adsorpsiyon/desorpsiyon sistemi bulunmaktadır. Lokomotif motorundan elde edilen atık enerji sistemin ısı enerjisi ihtiyacını gidermek amacıyla kullanılmıştır. Kurulmuş olan bu sisteme ait elde edilen sonuçlar yapılan çalışmada sunulmuştur. COP ve ısıl değer verileri elde edilmiştir[24].

Yine yapılan çalışmalardan birinde bir tır kabinine çift yataklı mobil adsorpsiyonlu soğutma test düzeneği yerleştirilmiştir. Kabin içinde istenilen ideal ortam sıcaklıklarının sağlanabildiği gösterilmiştir. Sisteme ait performans katsayısı değeri, adsorpsiyon ve desorpsiyon sıcaklıkları ile akışkanın sistem elemanlarına giriş ve çıkış sıcaklıkları ile ilgili deneysel verilerde elde edilmiştir[25].

Bu çalışmada tek kademeli adsorpsiyonlu bir soğutma sistemi kurulması ve teknolojisinin öğrenilmesi amaçlanmıştır. Adsorbent malzeme olarak zeolit 13X kullanılmıştır. Tasarımı yapılan deney düzeneği üzerinde farklı vakum değerlerinde sistemin ısıl performansları hesaplanmıştır. Hesaplamaya esas alınan basınç, nem ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Absorban olarak su kullanılmış olup, 1×10^{-4} ile 1×10^{-3} bar basınç aralığında vakum teknolojisiyle çalışan bir deney düzeneği kurulmuştur.

Adsorpsiyon sürecinde buharlaştırılan su kütlesi ve buharlaştırıcı sıcaklıkları kayıt altına alınmıştır. Desorpsiyon sürecinde adsorbent yatakta sıcaklık, basınç ve nem verileri anlık olarak kayıt edilmiştir. Her bir çevrimde desorpsiyon sürecinde adsorbent yatak 250°C sıcaklığa kadar ısıtılarak adsorbe edilen su buharının desorpsiyon yapılması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki veriler dikkate alınarak tablo ve grafiklerle yorumlanarak verilmiştir.



2. SOĞUTMA SİSTEMELERİ

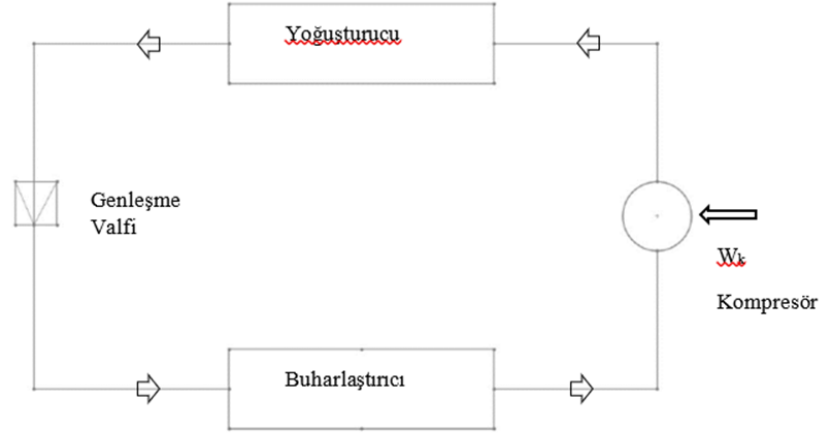
Isı pompası sistemleri düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağından, daha yüksek sıcaklıktaki bir ısı kaynağına ısı geçişinin gerçekleştirilebildiği sistemlerdir. Isı pompası sistemleri yoğuşturucudan atılan ısı ile bir ortamın ısınmasını sağlar. Soğutma çevriminde ise amaç değişir. Isı pompalarında bir ortam ısıtılırken, soğutma çevriminde bulaştırıcının bulunduğu ortamdan çektiği ısı sayesinde soğutma sağlanır. Bu sistemler çalışma prensiplerine göre mekanik ve termal enerji ile çalışan sistemler olarak ikiye ayrılabilir. Termal enerji tahrikli soğutma sistemleri ise absorpsiyonlu ve adsorpsiyonlu soğutma sistemleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.1. Buhar Sıkıştırımlı Mekanik Tahrikli Soğutma Sistemleri

Temel elemanları kompresör, buharlaştırıcı, yoğuşturucu ve genişleme valfinden oluşmaktadır. Yüksek COP değerlerinden dolayı bu sistemler en yaygın kullanılan ısıtma ve soğutma sistemleridir. Mekanik ısı pompalarının var olan faydalarının yanında sahip olduğu dezavantajlar tüm dünya tarafından dikkate alınmaya başlanmıştır. Özellikle sistemde kullanılan soğutucu akışkanlarının doğaya zararları kanıtlandıkça alternatif sistem arayışları hız kazanmıştır[11].

Mekanik sıkıştırımlı soğutma sisteminde kullanılan soğutucu akışkanların çevre üzerine bazı olumsuz etkileri tespit edilmiştir. Bu konuda son yıllarda hem zararsız hem de faydalı soğutucu akışkan modelleri üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Sistemin çalışma prensibine gelecek olursak, soğutucu akışkan kompresöre doymuş buhar olarak gelmektedir. Kompresörde izentropik olarak yoğuşturucu basıncına sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi sonrasında soğutucu akışkan sıcaklığı ortam sıcaklığının üzerine çıkar. Kızgın buhar olarak girdiği yoğuşturucudan çevreye atılan ısı sayesinde doymuş sıvı olarak çıkar. Soğutucu akışkan yoğuşturucudan çıktığı esnada yine çevre sıcaklığı üzerindedir. Daha sonra genişleme vanasına girer ve burada buharlaştırıcı basıncına düşürülür. Burada genişleme vanasının yaptığı işlemi, kılcal borular kullanılarak da yapıldığı sistemler mevcuttur. Buharlaştırıcıya kuruluk derecesi düşük

bir halde doymuş sıvı- buhar olarak giren akışkan ortamdan çektiği ısı sayesinde buharlaştırıcıdan doymuş buhar olarak ayrılır. Akışkan kompresöre ulaştığında çevrim tamamlanır ve bu şekilde çalışmaya devam eder.



Şekil 2.1. Mekanik sıkıştırırmalı soğutma sistemi

2.2. Termal Enerji Tahrikli Soğutma Sistemleri

Buhar sıkıştırırmalı mekanik soğutma makinelerinin yüksek soğutma tesir katsayılarından söz ederken çevreye verdikleri etkilerde göz ardı edilmemiştir. Bu sistemlerde kullanılan soğutucu akışkanların atmosferde bıraktığı etkiler göz önüne alındığında ve küresel bir sorun haline gelen elektrik enerjisi maliyetlerinden dolayı termal enerji tahrikli sistemlere olan ilgi artmıştır. Çalışma sistemine etki eden aynı zamanda ısı ve kütle transferini iyileştiren bazı değişikliklerle bu sistemlerden alınan performansın artırılmasına çalışılmıştır. Örnek olarak absorpsiyonlu ve adsorpsiyonlu ısı pompaları verilebilir. Kendi içlerinde çok farklı sistem tasarımları geliştirilmiştir. Bu sistemlerin en önemli avantajı çevre için zararlı herhangi bir akışkan veya madde ile çalışmamalarıdır. Bu iki sistemde ihtiyaç duydukları enerjiyi mevcut sistemin durumuna göre atık ısı, güneş vb. kaynaklardan temin edebilmektedir.

2.2.1. Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri

Absorpsiyonlu soğutma sistemleri temelde buhar sıkıştırırmalı sistemlere benzerdir. Buhar sıkıştırırmalı mekanik soğutma sistemindeki sıkıştırma işleminin yerini Absorpsiyonlu soğutma sisteminde fiziko-kimyasal işlemler almıştır. Absorpsiyonlu soğutma sisteminde gerekli olan enerji atık ısı, güneş ve jeotermal gibi ısı kaynaklarından sağlanabilir.

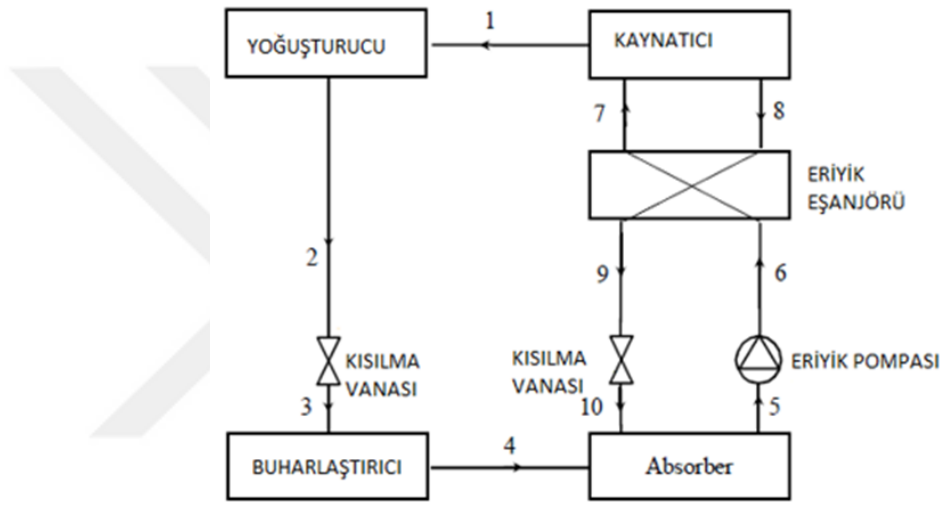
Absorpsiyonlu soğutma sisteminde iki farklı akışkan dolaşmaktadır. Soğutucu akışkan buharlaştırıcıda buharlaşarak ortamdan ısı çekme görevini yerine getirir. Diğer akışkan ise eriyik olarak adlandırılır ve sistemin adsorber hazne ile kaynatıcı arasında soğutucu akışkanın hareketini(taşınmasını) gerçekleştirir. Çok farklı akışkan çiftleri mevcuttur. Lityum bromür-su, amonyak-su gibi çiftler üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Her bir çiftin kendi içinde avantaj ve dezavantajları da mevcuttur[26].

Absorpsiyonlu soğutma sistemi üzerine yapılan çalışmalar esnasında birçok model geliştirilmiştir. Bunlar genel olarak tek kademeli veya çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemleri olarak adlandırılır. Çift kademeli soğutma sisteminde eriyiğin akış yönüne göre paralel ve seri akışlı olarak tasarımılanan modelleri mevcuttur.

2.2.1.1. Tek Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi

Sistem ana elemanları Şekil 2.2 'de görüldüğü gibi buharlaştırıcı, absorber, kaynatıcı ve yoğuşturucudan oluşmaktadır. Lityum bromür- su çiftinin bu sistemdeki çalışma prensibine inceleyecek olursak, lityum bromür absorberden çıkar ve eriyik pompası denen mekanizmadan geçtikten sonra ısı eşanjöründe ısınarak kaynatıcıya gelir. Gelen bu eriyik lityum bromür bakımından fakir eriyik olarak adlandırılır. Dış kaynaklardan elde edilen ısı ile kaynatıcıda, fakir eriyik kaynatılır. Artan sıcaklıkla birlikte soğutucu akışkan eriyikten ayrılarak buharlaşp kaynatıcıdan yoğuşturucuya doğru hareket eder.

Kaynatıcı içerisinde soğutucu miktarı azaldığından artık zengin eriyik haline gelen akışkan tekrar ısı eşanjörüne gelir ve burada fakir eriyiğe ısı vererek absorbere geri döner. Yoğuşturucuya gelen soğutucu akışkan ise burada yoğuşarak çevreye ısı atar. Yoğuşturucudan çıktıktan sonra kısılma vanasından geçer ve buharlaştırıcı basıncına düştükten sonra buharlaştırıcıya gelir. Burada buharlaşarak çevreden gerekli ısıyı çektikten sonra doymuş buhar veya kızgın buhar fazında absorbere girer. Buhar burada bulunan zengin eriyik tarafından absorbe edilir ve çevrim bu şekilde devamlı hale gelmiş olur.

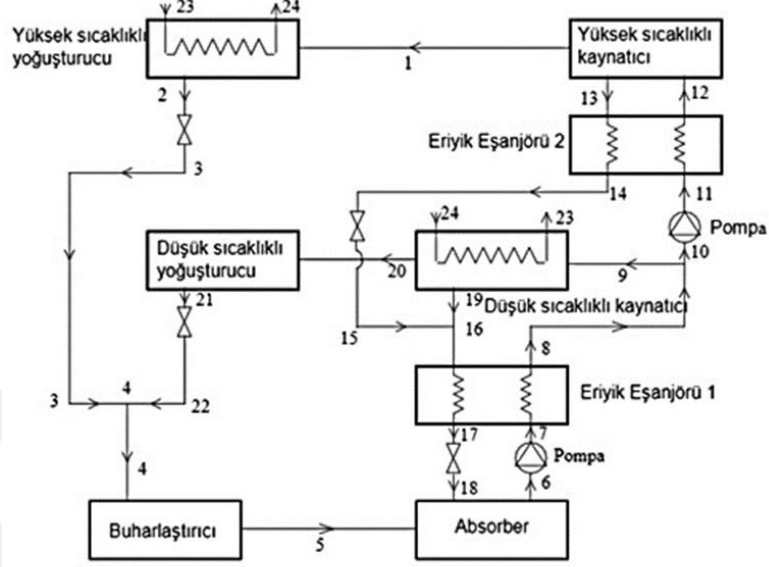


Şekil 2.2. Tek kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi[2]

2.2.1.2. Çift Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi

Bu sistemde tek kademeliden farklı olarak iki kaynatıcı ve iki yoğuşturucu bulunmaktadır. Absorberden çıkan zengin eriyik ısı eşanjöründen çıkar ve iki hatta ayrılır birisi düşük sıcaklıklı kaynatıcıya diğeri ise yüksek sıcaklıklı kaynatıcıya gider. Düşük sıcaklıklı kaynatıcı için gerekli olan ısı ise yüksek sıcaklıklı kaynatıcıya bağlı olan yüksek sıcaklıklı yoğuşturucuya gelir. Bu sayede ikinci kaynatıcı için herhangi

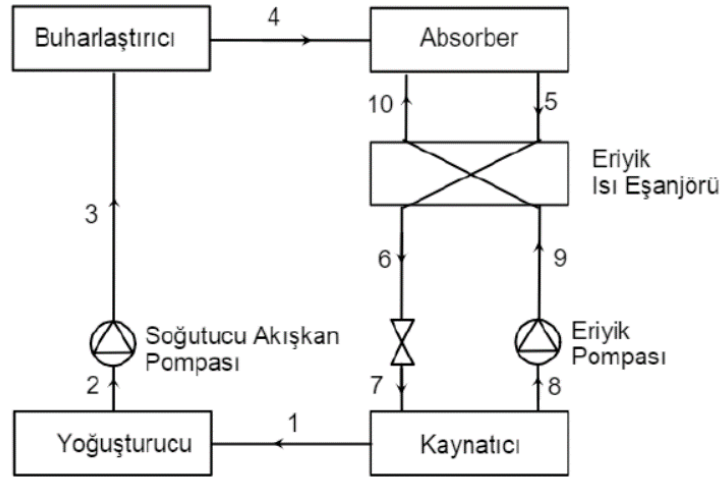
bir enerjiye gereksinim kalmaz ve hatta dolaşan soğutucu akışkan miktarı neredeyse iki katına ulaşır.



Şekil 2.3. Çift kademeli absorpsiyonlu soğutma sistemi[2]

2.2.1.3. Absorpsiyonlu Isı Yükselticisi

Bu sistem düşük ısı kaynaklarında absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin kullanılması için ortaya çıkartılmıştır. Yüksek kaynatici sıcaklığının sistemin COP değeri üzerinde katkısı olduğu bilinmektedir. Bu sebeple tek kademeli sistemden farklı olarak yüksek basınçta çalışan kaynatici ve yoğuşturucu alçak basınçta, alçak basınçta çalışan absorber ve buharlaştırıcı yüksek basınçta çalıştırılır. Buradaki maksat absorberde oluşan ısıyı uzaklaştırmak için kullanılan soğutma suyu sıcaklığının, sistemi tahrik eden yani kaynaticiyi besleyen ısı kaynağından daha yüksek bir sıcaklığa çıkarmaktır. Böylece düşük proses suyu sıcaklığına sahip olan uygulama alanlarında bile bu sistemlerin çalıştırılabilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2.4. Adsorpsiyonlu ısı yükselticisi[2].

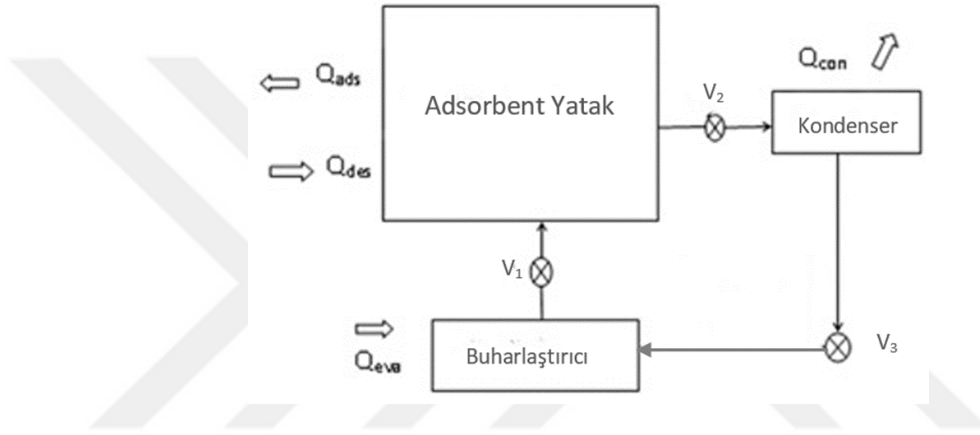
2.2.2. Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi

Adsorpsiyonlu ısı pompalarını anlayabilmek için öncelikle adsorpsiyon olayının anlaşılması gerekmektedir. Bir maddenin diğer bir madde yüzeyinde veya iki faz arasındaki ara yüzeyde moleküllerin temas halinde oldukları yüzeydeki çekme kuvvetlerine bağlı olarak o yüzeyle birleşmesidir.

Adsorpsiyonlu ve absorpsiyonlu soğutma sistemleri de kendi aralarında benzerlikler göstermektedir, fakat sistemlerin çalışma prensibi farklıdır. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi tek akışkan(adsorbat) ve katı malzeme(adsorbent) den oluşmaktadır. Sistemde bir buharlaştırıcı, bir kaynatici ve en az bir adsorbent yatak ile çalışmaktadır. Adsorbent malzeme, buhar sıkıştırırmalı mekanik tahrikli soğutma çevriminde kompresörün yapmış olduğu işleme benzer bir görevi bulunmaktadır. Yüksek miktarda nem tutma özelliği ile soğutucu akışkan hareketine katkıda bulunur. Ayrıca diğer sistemlerden farklı olarak adsorpsiyonlu ısı pompaları vakum altında çalışan sistemlerdir.

2.2.2.1. Temel Adsorpsiyon Çevrimi

Temel adsorpsiyonlu soğutma sistemi 4 ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar buharlaştırıcı, adsorbent yatak ve yoğuşturucudur. Sistemin devamlılığı ve kesintisiz soğutma amacıyla adsorbent hazne sayısı isteğe göre arttırılabilir. Temel sistem ele alınacak olursa çevrim dört farklı süreçten oluşmaktadır. Bunlar izobarik adsorpsiyon, izosterik ısıtma, izobarik desorpsiyon ve izosterik soğutma olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.5’de sisteme ait şematik gösterim ve enerji giriş çıkışları gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Adsorpsiyonlu soğutma sistemindeki enerji hareketleri

Buhar sıkıştırırmalı mekanik tahrikli soğutma sistemlerinden farklı olarak adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde eriyik pompası denilen mekanizmadan faydalanılırken, burada basınç farkı ve adsorbent malzemenin adsorpsiyon kuvvetinden faydalanılır. Her iki sistemde de ana amaç kompresör kullanmaksızın soğutucu akışkanın çevrimi tamamlamasını sağlamaktır.

2.2.2.2. Çalışma mekanizması

Sistem, buharlaştırıcıda bulunan soğutucu akışkanın (adsorbat) buharlaşması ile başlar. Buharlaştırıcı ile adsorbent yatak arasındaki vana açılarak alçak basınçta bulunan adsorbent hazneye buhar akışı sağlanır. Bu sırada adsorbent haznede kuru

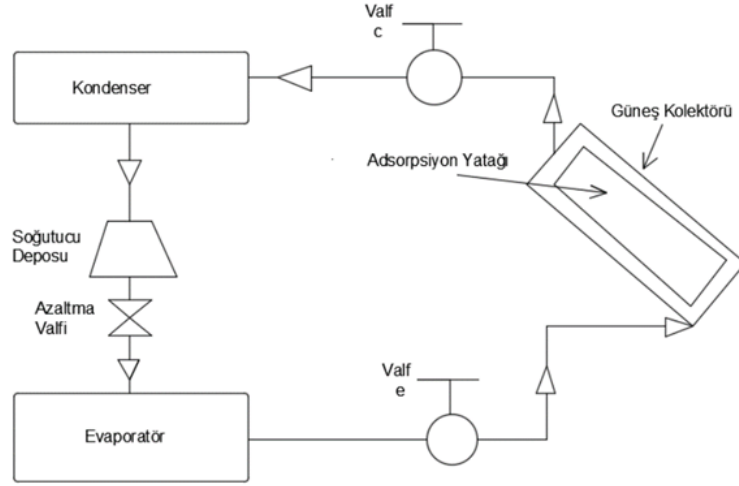
halde bulunan zeolit taneciklerinin adsorpsiyon yönelimi sayesinde de buharlaştırıcıdan hazneye doğru akışkan hareket eder.

Adsorpsiyon süreci tamamlandıktan sonra dış ısı kaynağı ile hazne ısıtılır ve zeolitin adsorbatı desorp etmesi beklenir. Bu aşamada ise yatak ile yoğuşturucu arasındaki vana açılır ve soğutucu akışkanın yoğuşturucuya hareketi sağlanır. Yoğuşturucuya giren soğutucu akışkan burada çevreye ısı vererek yoğuşur ve buharlaştırıcıda toplanır. Böylece birinci çevrim tamamlanmış olur. İkinci çevrimin başlaması için sistemin ilk haline dönmesi gerekmektedir. Bu nedenle adsorpsiyonlu soğutma sistemleri genelde çok kademeli olarak dizayn edilir.

2.2.2.3. Tek Kademeli Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi

Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin en temel halidir. Tek kademeli adsorpsiyonlu soğutma sisteminde bir buharlaştırıcı, bir yoğuşturucu, adsorbent yatak ve ısı ihtiyacı karşılayan bir ısı kaynağı bulunur. Bu tip adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde ancak kesikli soğutma yapılabilmektedir[3].

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin piyasada daha yaygın yer tutan modeli güneş enerjisi tahrikli olan sistemlerdir. Bunun başlıca sebebi ise enerji tasarrufu ve düşük ısı kaynağı ile çalışabilen bir soğutma sistemi tasarımıdır. Bu düzenekte çalışma parametrelerini büyük ölçüde adsorbent ve adsorbat çifti belirlemektedir. Düşük ısı kaynaklı, örneğin güneş enerjisi tahrikli ve yüksek ısı kaynaklı, örneğin egzoz gazı tahrikli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri üzerine hem teorik hem de deneysel çalışmalar mevcuttur[27, 28].

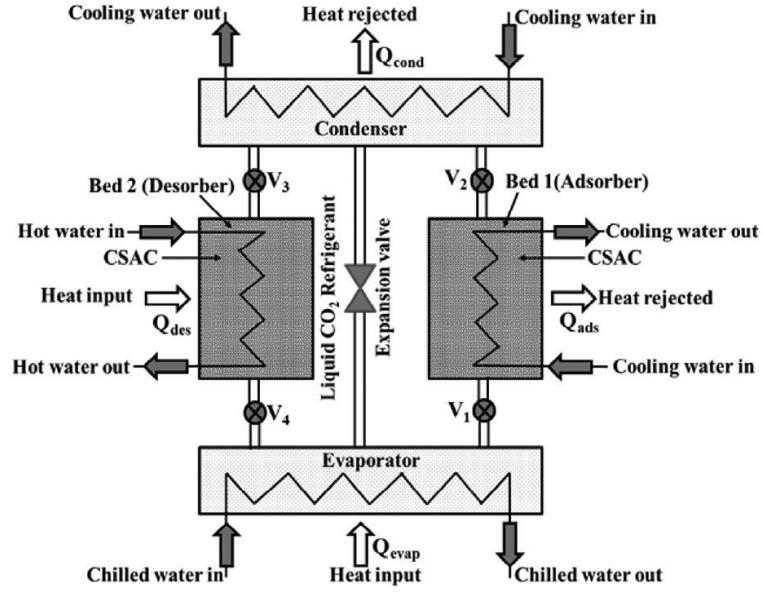


Şekil 2.6. Güneş enerjisi destekli tek kademeli adsorpsiyonlu soğutma sistemi[3]

2.2.2.4. Çift kademeli Adsorpsiyonlu Soğutma Sistemi

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi çalışma prensibinden dolayı bir sefer buharlaştırıcıdan ısı çekildikten sonra tekrar ısı çekilebilmesi için sistemin değişen yoğunluk, sıcaklık ve basınçlarının ilk duruma gelmesi gerekmektedir. Bu da sistem için her bir soğutmadan sonra belli bir süre bekleme anlamına gelmektedir. Bu nedenle adsorpsiyonlu soğutma sistemleri tek kademe olarak değil, çift veya daha fazla kademeli olarak yapılır.

İki kademeli iki yataklı ve iki kademeli dört yataklı adsorpsiyonlu soğutma sistemi deney düzenekleri literatürde mevcuttur. Tüm bu farklı tasarımlar mevcut enerjiyi en verimli şekilde kullanmak, adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerini kısaltmak, adsorpsiyon miktarını arttırmak ve sonuç olarak sistem performans değerini yükseltmek için dizayn edilmiştir[4, 29].



Şekil 2.7. Çift kademeli adsorpsiyonlu soğutma sistemi[4]

Çift kademeli bir sistemi ele alacak olursak sistem işleyişi içerisinde adsorpsiyon ve desorpsiyon süreleri arasında optimum bir süre belirlenmelidir. Bu optimum süreden kastedilen şudur, birinci yatak adsorpsiyon olayını gerçekleştirip desorpsiyon sürecine geçtiği anda ikinci yatak adsorpsiyon sürecine girer. Birinci yatak tekrar adsorpsiyon sürecine hazır olana dek geçen süreler optimum zaman tanımına girmektedir. Burada kullandığınız soğutma sisteminde sistem performansına etkisi görülmektedir. Eğer sahip olduğunuz deney düzeneği iki yataklı olarak optimum süreleri denk getiremiyorsa bu durumda sistemin daha fazla yataklı olarak tasarlanması düşünülür. Bu süreler üzerine yapılan çalışmalar sonucu oluşturulan bir tablo ile çevrim aralarında geçen süreler ve optimum zaman tayini daha kolay yapılabilir[30-32].

Çizelge 2.1. Çift kademeli sistem için optimum zaman tablosu[8]

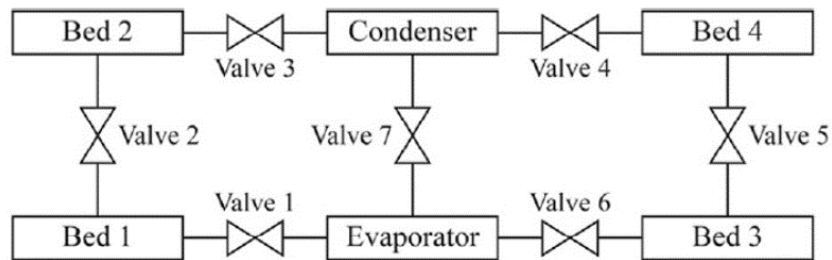
Time (minutes)	Adsorbent bed 1	Adsorbent bed 2
0	SH ^a	–
t	SC ^b	SH
2t	SH	SC
3t	SC	SH
4t	SH	SC

^aSH, switched to be heated.
^bSC, switched to be cooled.

Çizelge 2.2. Çok kademeli sistem için genel optimum zaman tablosu [30]

Time (minutes)	Adsorbent bed 1	Adsorbent bed 2	Adsorbent bed 3	...	Adsorbent bed (n-1)	Adsorbent bed n
0	SH ^a					
t	SC ^b	SH				
2t	SC	SC	SH	...		
...		
(n-1)t	CC ^c	CC	CC	...	SC	SH
nt	SH	CC	CC	...	CC	SC
(n+1)t	SC	SH	CC	...	CC	CC
(n+2)t	CC	SC	SH	...	CC	CC
...		
2nt	SH	CC	CC	...	CC	SC

^aSH, switched to be heated.
^bSC, switched to be cooled.
^cCC, continue to be cooled.

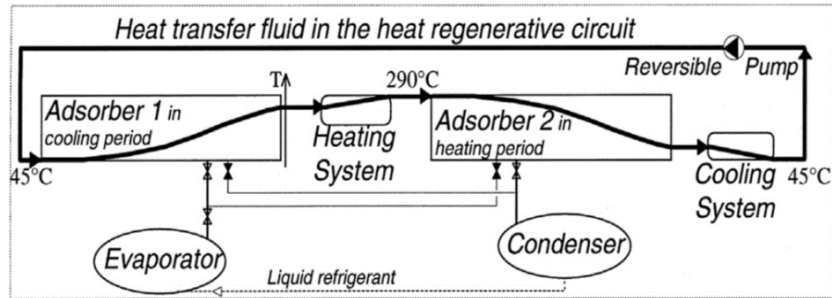


Şekil 2.8. İki kademeli dört yataklı sistem şeması[5]

2.3. Termal Dalga Adsorpsiyon Soğutma Çevrimi

Sistem performansını arttırmak amacıyla ısı geri kazanım verimliliğini yükselten bir termal dalga soğutma döngüsü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım çift veya daha fazla kademeli sistemlerde kullanılabilir. Çift kademeli bir sistem üzerinde düşünülürse 1 numaralı yatak ısı atarken 2 numaralı yatak ısı alma aşamasındayken sistemde hem ısı alma hem ısı atma işlemi aynı anda gerçekleşmektedir. Bu aşamada bu yatakların buharlaştırıcı ve yoğuşturucu olan bağlantıları yanında bir hat daha bulunmaktadır. Isı transferini gerçekleştirecek olan akışkan sıcak yataktan soğuk yatağa doğru ısıyı transfer etmektedir.

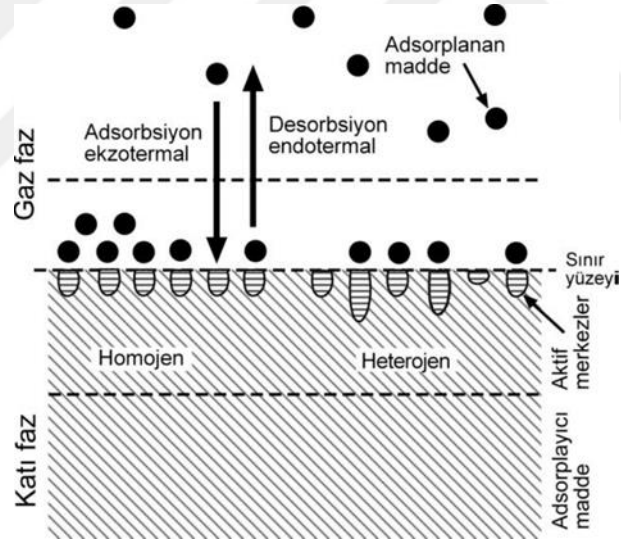
Şekil 2.9'da gösterildiği üzere izosterik soğutma aşamasındaki adsorber 1'e 45°C sıcaklıkta giren akışkan yataktan ısı çekerek giriş sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta yatağı terk eder. Yataktan çıktıktan sonra dış bir ısı kaynağı ile belli bir sıcaklığa sahip olan bu akışkan bir miktar daha ısıtılarak (adsorber 2' de desorpsiyon için gerekli olan sıcaklığa kadar) adsorber 2' ye girmektedir. Burada adsorbent malzemenin ihtiva ettiği nemin atılması amacıyla ısıyı transfer eden akışkan kullanılan adsorbent desorpsiyon sıcaklığında yatağa girmesi gerekmektedir. Adsorber 2'de ısı kaybeden akışkan yataktan düşük bir sıcaklıkta çıkar ve soğutma aşamasında olan adsorber 1'e tekrar girmek için belli bir sıcaklığa düşürülerek bu döngüye devam edilir[6].



Şekil 2.9. Adsorpsiyonlu soğutma sisteminde termal ısı geri kazanımı[6]

2.4. Adsorpsiyon Olayı

Adsorpsiyon olayında adsorbent malzeme kadar adsorban malzemede önem arz etmektedir. Adsorplayıcının yüzeyine aktif merkez denilmektedir. Aktif merkezde bulunan atomların arasındaki bağ kuvvetleri zayıf olduğundan yabancı madde olarak tabir edilen adsorban madde tanecikleri ya da moleküllerinin adsorpsiyonu gerçekleşir. Birde seçici adsorpsiyondan söz edilebilir. Burada adsorplayıcı üzerinde toplanmış olan bir madde bulunmaktadır fakat aktif yüzey tarafından daha fazla adsorplanabilen bir maddeyle karşılaşıldığında yüzeydeki madde desorp edilirken ya da serbest bırakılırken yeni madde adsorplanmış olur. Birçok yerde ve alanda istenmeyen bir maddenin uzaklaştırılması için bu şekilde tercih edilen türlerin adsorpsiyonu olarak adlandırabileceğimiz yöntemlere başvurulur [7]. Şekil 2.10' de adsorpsiyon olayının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.10. Adsorpsiyon ve Desorpsiyon süreçleri[7]

Adsorpsiyon olayı fiziksel, kimyasal ve iyonik adsorpsiyon olarak üç kategoride incelenebilir.

2.4.1. Fiziksel Adsorpsiyon

Fiziksel adsorpsiyon seçici değildir, bu sayede çok katmanlı adsorpsiyon olayının gerçekleşmesi mümkün olmaktadır. Fiziksel adsorpsiyon olayı adsorbent içerisinde bulunan soğutucu akışkanın yoğuşma işlemi olarak tanımlanabilir.

Adsorbent yüzeyi ile adsorplanan maddenin molekülleri arasında gerçekleşen çekim kuvvetleri neticesinde oluşan olaydır. Bu olay esnasında Van Der Waals kuvvetleri gibi zayıf kuvvetler söz konusudur. Fiziksel adsorpsiyon olayında tüm işlemler tersinir olarak gerçekleşir. Bu işlem esnasında yoğunlaşma enerjisinden biraz fazla ısı oluşur. Birçok adsorbent çeşidi için adsorpsiyon ısı, soğutucunun yoğuşma ısısına denktir. Sıcaklık bu adsorpsiyon türünü olumsuz etkiler ve kullanılan adsorbent malzemeye göre bir sıcaklık değerinden sonra adsorpsiyon olayı yerini desorpsiyon olayına bırakabilir.

Başlangıç için bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyulmaz. Fiziksel adsorpsiyon olayı tamamen tersinir olup moleküler düzeyde herhangi bir bozulma ya da ayrışma söz konusu değildir. Buda fiziksel adsorpsiyon olayı için çok kez tekrarlanabilirlik anlamına gelmektedir[5, 8].

2.4.2. Kimyasal Adsorpsiyon

Kimyasal adsorpsiyon fiziksel adsorpsiyondan tamamen farklıdır. Adsorbent malzeme ile adsorban molekülleri arasındaki kimyasal etkileşimi ile oluşan adsorpsiyondur. Bu tür için tepkimeler tersinmez ve tek tabakalıdır. Reaksiyon sonucunda ortaya yeni bir molekül yapısı oluşur. Adsorpsiyon için belli bir aktivasyon enerjisi gerekir ve sıcaklık ile artar[8].

2.4.3. İyonik Adsorpsiyon

Elektrostatik adsorpsiyon olarak da adlandırılmaktadır. Adsorbent yüzeyinde elektronik çekim kuvvetleri sayesinde yüklü bölgeler oluşur ve iyonlar bu bölgelere

tutunurlar. İyonların güçleri bu noktada önemlidir ve küçük olan yüzeye tutunur. Bu üç sisteminde aynı anda olduğu durumlarda söz konusudur [7, 33].

2.5. Adsorbent ve Adsorbat Çiftinin Seçimi

Adsorbent- adsorbat çiftinin karakteristik özellikleri adsorpsiyonlu soğutma sisteminin performansı için oldukça önemlidir. Bu karakteristik özelliklerin sistemin çalışmasına, performansına ve hatta tasarımına dahi önemli etkileri bulunmaktadır.

Çalışma çiftinin seçiminde, her biri için kullanılabilirliğinin kolay, çevre etkisinin az, aşındırıcılığının minimum ve ardı ardına gerçekleşen çevrimlerde performans kayıpları düşük olması gibi özellikler aranmaktadır.

Adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyon ısısı, adsorpsiyon kapasitesi, ısıl iletkenlik ve çiftin özgül ısıları sistem performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Hazne içerisinde adsorbentlere doğru adsorbatın difüzyonu sistemin performansını belirleyen önemli bir parametredir ve tüm bu özellikler sistemde kullanılacak çalışma çifti seçilirken dikkate alınır.

Yaygın olarak kullanılan adsorbent- adsorbat çifti aktif karbon- metanol, aktif karbon fiber- metanol, aktif karbon- amonyak, zeolit- su, silika jel- su, metal hidritler- hidrojen ve kalsiyum klorür- amonyak gibi birçok çeşit bulunmaktadır.

Aktif karbon- metanol çifti için adsorpsiyon ve desorpsiyon konsantrasyonu yüksektir. Desorpsiyon sıcaklığı yaklaşık olarak 100°C civarındadır. Desorpsiyon sıcaklığının düşük olması en büyük avantajıdır. Ayrıca 1800- 2000 kJ/kg civarında oldukça makul adsorpsiyon ısisına sahiptir. Adsorbat olarak metanol buz uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu çift için çalışma sıcaklığı 120°C' yi aşmamalıdır, aksi taktide metanolde bozulmalar meydana gelecektir.

Silika jel- su çifti için desorpsiyon sıcaklığı yaklaşık olarak 150 °C'dir. Bu çiftin çalışma sıcaklıklarını aşması durumunda silika jel yapısında bozulmalar meydana

gelecektir. Silika jel düşük ısı kaynakları için ideal bir adsorbent türüdür. Bu özelliğinden dolayı silika jel-su çifti piyasa uygulamalarında daha fazla görülen çalışma çiftidir.

Zeolit- su çifti geniş bir desorpsiyon sıcaklığına sahiptir. Yaklaşık olarak 70- 250°C arasında desorpsiyon sıcaklığı tanımlanmaktadır. Adsorpsiyon ısısı 3200- 4200kJ/kg arasındadır. Ayrıca suyun gizli buharlaşma ısısı 2400- 2600 kJ/kg' dır. Zeolit bu özelliklerinden dolayı yüksek ısı kaynağına sahip uygulamalarda kullanıma uygundur ve yüksek sıcaklıklarda zeolit yapısında herhangi bir bozulma meydana gelmez. Yüksek sıcaklıklarda fiziksel adsorpsiyon ile çalışmasına devam edebilir[8, 34].

2.6. Adsorbent

Adsorbentler, çevre dostu, suda çözünmeyen, geniş yüzey alanı ve gözenekli yapıya sahip, çevre için zararsız ve elde etmesi kolay maddelerdir. İyi bir adsorbentten beklenen yüksek yüzey alanı, yüksek adsorpsiyon oranı, adsorbat ile iyi uyum, iyi bir ısı iletkenlik ve kararlılıktır.

Adsorbentlerin sahip oldukları bu adsorpsiyon kuvvetinden faydalanılarak birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar. Tarım sektöründe toprakta var olan zararlı bir maddenin ve akışkan türevinin ayrıştırılmasında, içme sularında olan kirleticilerin uzaklaştırılmasında veya içme sularının sertliğinin giderilmesi gibi farklı uygulamalarda adsorbent malzemelerden faydalanılmaktadır. Adsorpsiyon olayının bu kısmında iyon değiştirici olarak adlandırılan bir yöntem başvurulmaktadır.

2.6.1. İyon Değiştirici Reçineler

İyon değişimi, elektrostatik kuvvetler sonucunda katı yüzeyde bulunan iyonların, işlem yapılmak istenen ortamda örneğin atık suda bulunan ve giderilmesi istenen iyonların yerine geçmesi işlemidir. Su içerisinde bulunan kirleticilerin temizlenmesi veya suyun sertliğinin azaltılması bu işlemler sayesinde gerçekleştirilir. Bu işlemlerde

kullanılan iyon değiştirici reğinelerin bir ömrü olup belli bir zaman sonra tükenme noktasına ulaşırlar. Kirleticinin yoğunluğuna göre de reğine ömrü etkilenebilir. İyon değişimi uygulamalarında birçok reğine kullanılır ama bunların en önemli dezavantajı bir ömürlerinin olması ve maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

İyon değiştiricilerin bir diğer tipide doğal iyon değiştirme özelliğine sahip zeolitlerdir. Bu tip zeolitler için bir tükenme ömrü söz konusu değildir. Kapasitelerinde herhangi bir değişiklik söz konusu değildir[35]. Adsorbentler doğal ve sentetik adsorbentler olarak sınıflandırılırlar.

2.6.2. Doğal Adsorbentler

Adsorpsiyonlu ısı pompalarında kullanılmak üzere zeolit, silika jel ve aktif karbon gibi birçok maddeden söz etmek mümkündür. Kullanılan sisteme ve soğutucu akışkan cinsine göre göstermiş oldukları performanslar farklılık gösterir. Genel olarak ticari uygulamalarda adsorbent malzeme olarak silika jel ve zeolit kullanılmaktadır.

2.6.3. Sentetik Adsorbentler

Sentetik (yapay) adsorbentlerin olumsuz yönlerinden söz etmek mümkündür. evre ve insan sağlığı için tehlikeli olabilecek bileşimleri olan yapay adsorbentler mevcuttur. Bunların en önemli avantajları istenilen özelliklere göre tasarlanabilmektedir. Aktif karbon, silika jel ve aktif alümina, endüstriyel atıklardan uçucu kül; ayrıca reğine ve polimerler en yaygın olarak kullanılan ticari türleridir.

Ticari uygulamalarda en çok yer alan ve üzerinde fazlaca çalışmalar yapılan popüler adsorbent türler ile ilgili temel bilgiler aşağıda verilmiştir.

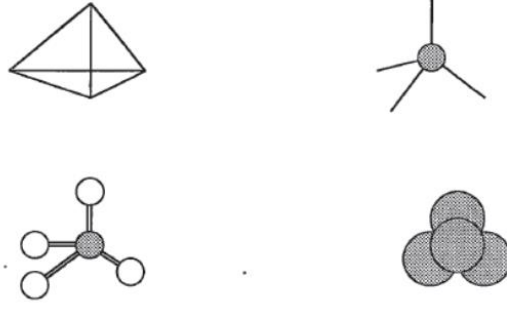
Silika jel, herhangi yapısal ve hacimsel değişime uğramadan bulunduğu ortamdaki suyu rahatlıkla emebilir. Tam tersi şekilde sıcaklığın artması ile suyu herhangi bir bozulmaya uğramaksızın desorbe edebilmektedir. Silika jel malzemesi genel olarak

200°C'nin altındaki sıcaklıklarda çalışmaktadır. Çünkü silika jel aşırı ısıtılırsa adsorpsiyon performansı düşer. Geri dönülemez bir değişiklik olmadığından dolayı silika jel gibi adsorbent malzeme olarak kullanılan bu maddelerin gerçekleştirdiği olay fiziksel adsorpsiyon olarak adlandırılır. Silika jel çalışma sıcaklıklarının uygunluğu dolayısıyla güneş enerjisi gibi düşük nitelikli ısı kaynaklarında kullanım için oldukça uygundur[17].

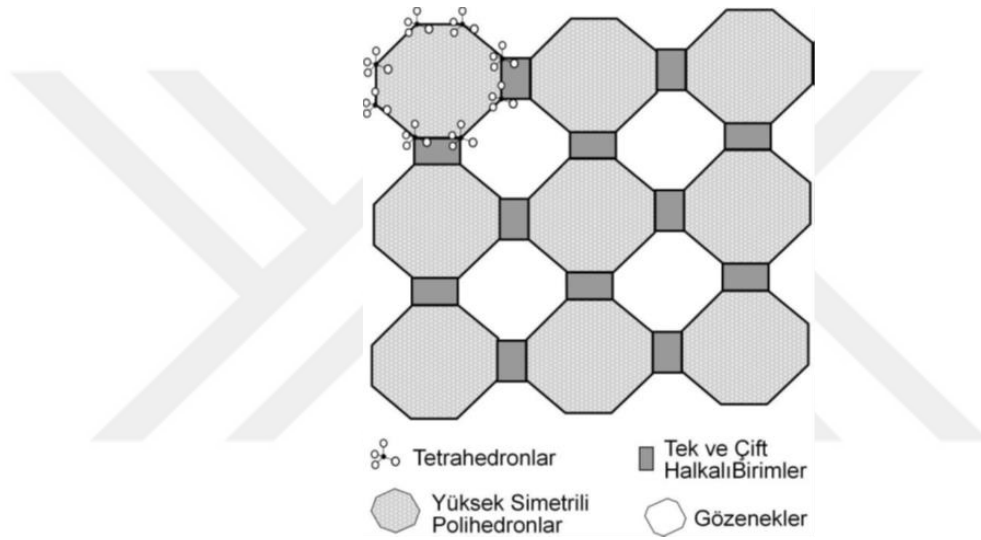
Zeolit, kelime olarak ilk 1756 yılında Crönstedt adında İsveçli bir bilim adamı tarafından literatüre kazandırılmıştır. Zeolitler doğada kristal yapıda bulunurlar. İçerisinde alkali ve toprak alkali elementler ihtiva ederler. Doğal ve sentetik zeolitler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Sentetik zeolitler laboratuvar ortamlarında silika ve alümina tozlarının çeşitli alkali veya toprak alkali hidroksitler, metal tozları ve jel aktifleştirici gibi bileşikler ile birleştirilerek oluşturulurlar. Sentetik zeolitler ihtiyaca hitap edecek şekilde üretilebildiği için ticari olarak daha çok ilgi gören zeolit olmuştur. Ağırlığının çok üstünde su buharı tutabilme özelliği sayesinde çok çeşitli bilimsel ve ticari alanlarda kullanılabilir[33].

Kristal Yapısı ve Termo-Fiziksel Özellikleri

Kristal yapıda olması ve düzenli ve hemen hemen benzer boyutlardaki mikro gözeneklere sahip olması sebebiyle zeolit önemli bir adsorbent malzemedir. Zeolitler üç boyutlu kristal yapıya sahip silikatlar olan tekto silikatlar gurubunda ve içerisinde alkali ve toprak alkali elementleri ihtiva eden sulu alümina silkatlardır. Doğada bilinen 40 çeşit doğal zeolit bulunmaktadır. Temel birimi TO_4 tetrahedralidir (T: silisyum ya da alüminyum, O: oksijen).



Şekil 2.11. TO4 tetrahedrallerinin farklı gösterimleri[33]



Şekil 2.12. Zeolitin yapısı[7]

Yapılan araştırmalarda, düşük sıcaklıktaki açık hidrolik ve jeotermal sistemler, derin deniz tortuları, tuzlu alkali göller ve alkali toprakların zeolit kaynakları olduğu tespit edilmiştir. Zeolitler yapıları bozulmadan su alıp verebilme, düşük yoğunluk, moleküler elek olabilme, yüksek iyon değiştirme kapasitesi ve yüzeye soğurma gibi birçok özelliğe sahiptir. Tüm bu faydaları ve ulaşılabilir olması sebebiyle endüstriyel anlamda ciddi önem arz etmektedir[35].

Ayrıca ısı transferi özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yaklaşık 150 adet sentezlenmiş zeolit bulunmaktadır. A, X, Y gibi harflendirmeler ile

nitelendirilmektedir. Isı transferi üstünlükleri dolayısıyla doğal zeolitlerden daha değerlidirler. Adsorpsiyonlu soğutma uygulamalarında 4A, 5A, 10X ve 13X gibi tipleri kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmasıyla ilgili bir sorun yoktur. Zeolit çok farklı bilim dallarında da kullanılmaktadır. Kimya, biyoloji, maden ve çevre ile ilgili alanlarda yapılan çalışmalarda zeolite sıkça rastlanır. Kirliliğin giderilmesi konusunda zeolitten faydalanılan çalışmalarda mevcuttur. Kullanım durumuna göre örneklendirmek gerekirse, şehir sularında toksik etki oluşturan amonyumun alınması, su pH'nın düzenlenmesi, baca gazlarının temizlenmesi, hava kirliliğine yol açan zararlı gazların tutulması, kapalı mekânlardaki kötü kokunun giderilmesi gibi uygulamalar mevcuttur[36].

Sentetik zeolitlerin yoğun olarak talep edildiği bir diğer alan ise deterjan vb. maddelerin üretimidir. Deterjan maddesi çoğunlukla fosfat katkılı olarak üretilmektedir. Fosfat doğası gereği temizlik ürünlerinde kullanılan bir üründü. Fakat son yıllarda fosfat katkılı temizlik ürünleri ile yıkanan yiyeceklerde, iyi bir durulama olsa dahi kalıntıların kaldığı tespitleri mevcuttur. Fosfat çevre içinde ciddi sorunlar barındırmaktadır ve doğada kaybolması oldukça zordur. Hatta bir yerde kullanıldıktan sonra anlık olarak yok olsa da uygun ortam koşulları oluştuğunda o bölgede tekrar görülebilir. Deterjan vb. ürünlerde kullanılan fosfat suya karışarak yeraltı sularına geçer. Buradan doğal yaşam alanlarında bitkiler ve yosunlar da bütünleşerek çoğalmaya başlar. Fosfatın en tehlikeli özelliği bu aşamada ortaya çıkar belli bir zaman sonra yosunlardaki bakteriler yosunları parçalamaya başlar. Azalan yosun dokusu sayesinde o bölgede mevcut oksijen yoğunluğu azalır, canlı çeşitliliği ve yaşamı olumsuz etkilenir. Tüm bu olumsuzluklar araştırmacıları alternatif maddeler bulmaya yöneltmiştir. Dünyada üretilen zeolit kapasitesinin büyük bir miktarı deterjan tipi temizlik maddelerinin üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sektörde kullanılan sentetik tür zeolit 4A olarak adlandırılır.

Zeolit 4A, sert suların yumuşatılmasında, ağır metallerin tutulmasında ve suyun yüzey gerilimlerinin giderilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özellikler istenmeyen maddelerin ayrışması, suyun yumuşak etkisi ve lekelerin dağılmasının kolaylaştırılması gibi uygulamada kolaylıklar oluşturduğu tespit edilmiştir[37].

Çizelge 2.3. Doğal zeolitin termo-fiziksel özellikleri[38]

Appearance	Ivory white
Porosity (%)	45-50
Average pore diameter (A)	4
pH	7-8
Bulk density (kg m ⁻³)	650-850
Melting temperature (°C)	1300
Mesopore surface area (m ² g ⁻¹)	29
Micropore surface area (m ² g ⁻¹)	11
Thermal conductivity (W m K ⁻¹)	0.155

Zeolitin ve en çok kullanılan adsorbent- adsorbat çiftlerinin daha iyi anlaşılması için verilen tabloda her çiftin özellikleri ayrı ayrı görülmektedir.

Çizelge 2.4. Adsorbent- adsorbat çiftlerinin karşılaştırılması[39]

Adsorbent-adsorbate	Maximum adsorbate capacity (kg/kg) ^a	Average heat of adsorption (kJ/kg adsorbate) ^a	Adsorbent specific heat (kJ/kg) ^a	Energy density (kJ/kg adsorbate)	Temperature range (°C)
Water-zeolite 4A	0.22	4400	1.05	1250	30-350
Water-zeolite 5A	0.22	4180	1.05	1200	30-350
Water-zeolite MgA	0.29	3400	1.06	800	60-250
Water-zeolite 13X	0.30	4400	0.92	1290	30-350
Water-zeolite 13X	0.27		0.84	930	20-300
Water-zeolite 10A	0.20	4000		897	50-250
Water-zeolite 13X	0.27	3400	1.06	1200	30-350
Water-clinoptilolite	0.12	3000	1.11	480	20-240
Water-mordenite	0.11	4000		419	30-350
Water-chabazite	0.17	3000	1.08	700	30-250
Water-charcoal	0.40	2320	1.09	1200	30-250
Water-ac. alumina	0.19	2480	1.00	660	30-250
Water-silica gel	0.37	2560	0.88	1000	30-150
Water-silica gel	0.20	2500	1.045	600	20-130
Methanol-zeolite 13X	0.20	2400	1.07		
Methanol-zeolite 4A	0.16	2300	1.07		
Methanol-zeolite 5A	0.17	2300	1.07		
Methanol-zeolite 5A	0.17	2300	1.07		
Methanol-ac. carbon	0.32	1400	0.9	590	20-140

Çizelge 2.4' da görüldüğü üzere zeolit 13X sentetik türler içerisinde en yüksek adsorbat adsorplama kapasitesine sahip olan türdür. Fakat dezavantajlarından en önemlisi zeolitin desorpsiyon sıcaklığının diğer adsorbent türlerine göre oldukça yüksek olmasıdır. Bu nedenle normal şartlarda çalışan güneş enerjisi sistemleri veya

düşük proses sıcaklığına sahip atık ısı kaynakları ile zeolitle çalışan adsorpsiyonlu soğutma sistemlerini çalıştırmak mümkün olmayacaktır.

Güneş enerjisi tahrikli bir soğutma sistemi tasarlanmak isteniyorsa ve adsorbent olarak zeolit kullanılacaksa konsantre güneş enerjisi sistemleri kullanılmalıdır. Ancak bu tip güneş enerjisi sistemi ile zeolit desorpsiyon sıcaklığında bir ısı enerjisi üretilebilir. Zeolit kullanımının getirdiği en önemli avantaj ise yüksek adsorbat konsantrasyonu sayesinde sistemin soğutma performansı ciddi miktarda diğer adsorbent- adsorbat çiftlerine göre yükselecektir.

2.7. Soğutucu Akışkanlar

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin kullanımı klima ve soğutma amacının yanında termal transformatörlerle ısı yükseltilmesi uygulamaları da mevcuttur. Burada ortaya çıkan durumda sistemde kullanılacak soğutucu akışkanın belirlenmesinde önemli olan kriterler nelerdir. Öncelikle hacim birimi başına gizli buharlaşma ısısının yüksek olması, yanıcı olmaması ve en önemlisi çevre açısından zararsız olmasıdır. Tüm bu özellikleri barındıran bir akışkan bulmak zordur. Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde gerek yapılan teorik çalışmalarda gerekse deneysel verilerde ve az sayıdaki ticari uygulamalarında genellikle su, amonyak ve methanol kullanılmaktadır. Çizelge 2.5’ te bu akışkanlara ait bazı özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Adsorpsiyon teknolojisinde yaygın olarak kullanılan soğutucu akışkanların fiziksel özellikleri[8]

Refrigerants	Chemical formula	Normal boiling point (°C)	Molecular weight	Latent heat of vaporization L (kJ/kg)	Density ρ (kg/m ³)	$\rho \times L$ (MJ/m ³)
Ammonia	NH ₃	-34	17	1368	681	932
Water	H ₂ O	100	18	2258	958	2163
Methanol	CH ₃ OH	65	32	1102	791	872
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	79	46	842	789	665

Su insanlık için en önemli maddelerin başında gelmektedir. Suyun yapısı ve su moleküllerinin katı yüzeylerle olan ilişkisi suyu geniş bir alanda bilimsel konularda kullanımına neden olmaktadır. Su, hidrojen ve oksijen atomlarının özelliklerinden dolayı elektrik dipol momentine sahip bir polar moleküldür. Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde de adsorbent malzeme ile su molekülleri arasındaki etkileşimlerin adsorpsiyon olayında önemli olması sebebiyle su adsorbat madde olarak kullanılmaktadır. Buharlaştırıcıda 0°C' nin altına inilmek istendiğinde ise genelde amonyaktan faydalanılmaktadır[40].

Methanol gelende aktif karbon ile çift oluşturur. Düşük doygunluk basıncı ve donma sıcaklığının 0°C olması haricinde su en uygun soğutucudur. Silika jel ve zeolit ile uygulamaları mevcuttur.

Adsorpsiyon teknolojisinde hidrojen, oksijen, R134a, R22, R407c ve ethanol gibi soğutucu akışkanların kullanılması da mümkündür. Fakat birim kütle başına soğutma gücü ve yetersiz adsorpsiyon miktarlarından dolayı methanol, silika jel ve zeolite göre tercih edilmezler[8, 41].

2.8. Adsorbent Yatak Tasarımı

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin temeli adsorbent yatak oluşturmaktadır. Adsorbent yatak tasarımı tüm sistemin performansını doğrudan etkilemektedir. Adsorbent yatak, buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma sistemlerinde kompresörün yapmış olduğu görevin benzerini gerçekleştirmektedir. Soğutucu akışkanın soğutma görevini gerçekleştirebilmesi için sürekli olarak buhar faza dönüşmesi gerekmektedir. Desorpsiyon sürecinde, soğutucu akışkanın yoğunlaştırıcuya hareketi için yatak, yüksek basınç ve sıcaklık altındadır. Benzer şekilde akışkan hareketi sağlamak amacıyla yatak, adsorpsiyon esnasında düşük basınç ve sıcaklıkta bulunmalıdır. Tüm bu süreç göz önüne alındığında bir kompresör gibi akışkan hareketi yatakta gerçekleşen sıcaklık ve basınç değişiklikleri ile yani termal olarak yönetilir[8].

Isıl yayılım adsorpsiyonlu soğutma için önemli parametrelerden biridir. Adsorbent yatağı içerisinde bulunan zeolitlerin duruşu konumu tanecik boyutları yataktaki ısı ve kütle transferine direk etki etmektedir. Bu nedenle adsorbent yatak tasarımları bu alanda araştırma yapanlar için önemli bir parametre olmuştur.

Buharlaştırıcıdan emilen adsorbat hızlı bir şekilde adsorbent yatağa dolar. Bu esnada bu buharın hızlı bir şekilde adsorbent tarafından emilmesi gerekmektedir. Tasarım gereği hazne ortasından geçen bir akışkan hattı olup bu hattan yatak içerisine akışkan dağılımı gerçekleşir. Merkez akışkan hattına yakın adsorbent malzemeler buharla yeterli temas sonucu adsorpsiyon olayını gerçekleştirebilirler fakat yatağın dış cidarına yakın olan malzeme buharla temas edemeyebilir. Bu sistemin buharlaştırıcıdan adsorbat buharlaştırabilme kapasitesini ayrıca sistemin ısıl performansını olumsuz yönde etkiler.

Su buharının adsorbat yatağı içerisinde homojen olarak dağılabilmesi için farklı tasarımlar yapılmıştır. Adsorbent malzemeyi yığın halinde kalmaktan kurtaracak ve belli aralıklarla kanatçıklar veya tel örgülü borular vasıtasıyla yapılan tasarımlar sonucu buharın tüm yatak içerisinde homojen dağılımı sağlanmaya çalışılmıştır[20].

Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performansı COP (Performans Katsayısı) ve SCP (Özgül Soğutma Gücü) ile değerlendirilir. COP genellikle ısı ve kütle geri kazanımlarıyla ilişkili iken SCP sistemin adsorpsiyon yatağı ile yakından ilgilidir.

$$SCP \approx \frac{L\Delta x}{t_c} \quad (2.1)$$

Burada L, gizli buharlaşma ısısı ve t zamanı ifade etmektedir. Görüldüğü üzere soğutma kapasitesini arttırmak için buradaki süreyi kısaltmak zorunludur. Çevrim süresini azaltılabilmek için düşük basınçlarda kütle transferi artırılabilir. İkinci olarak da adsorpsiyon yatağının ısı transferi kabiliyeti artırılarak çevrim süresi azaltılabilir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Adsorbent Madde Seçimi

Bu tip soğutma sistemleri için adsorbent malzeme sistem çalışma prensibini etkilemese de tüm sistem tasarımına ciddi etkisi bulunmaktadır. Adsorbent malzemenin cinsine göre yatak tasarımı, yatak içi akış yolu, sensörler ve bağlantı elemanları değişkenlik göstermektedir. Çünkü her adsorbent malzemenin desorpsiyon sıcaklığı farklılık göstermektedir. Bahsedilen bu tasarım unsurlarını adsorbent malzemenin desorpsiyon sıcaklığı direk etkilemektedir.

Çalışmamızda adsorbent malzemesi olarak zeolit 13X kullanılmıştır. Zeolit 13X' in maksimum adsorplama kapasitesi 0.3 (kg/kg), ortalama adsorpsiyon ısısı 4400 (kj/kg adsorbat) ve çalışma sıcaklığı 0- 350 °C olan sentetik bir zeolit çeşididir.

Zeolit 13X adsorpsiyon ısısı ve adsorplama kapasitesi olarak ciddi avantajları olan bir malzemedir. Fakat piyasada azda olsa bulunan örneklere göz atıldığında zeolit 13X'in yerine silika jel ve aktif karbon gibi malzemelerin daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Bunun temel sebebi zeolitın desorpsiyon sıcaklığıdır. Zeolit 13X yaklaşık olarak 250°C sıcaklığa ulaştığında desorpsiyon sürecine girer. Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri genel olarak atık ısı ve güneş enerjisi sistemleri destekli olarak çalışmaktadır. Atık ısı düşünüldüğünde bu sıcaklıkların elde edilebileceği bir kaynak bulmak oldukça zordur. Güneş enerjisi destekli sistemler içinde bu sıcaklıklarda bir ısı kaynağı üretmek sıkıntılıdır. Zeolit 13X'in fiziksel üstün özelliklerinin yanında dezavantajları olarak bu konu başlıkları sayılabilmektedir.

3.2. Deney Düzenegi Tasarımı

3.2.1. Adsorbent Yatak Tasarımı

Üzerinde en fazla durulan sistem elemanıdır. Tasarımsal olarak literatürde de çok farklı tasarımlar gerçekleştirilmektedir. Adsorbent yatakta tasarımın odak noktası adsorbent hazne içerisinde ısı iletimini hızlandırmak, sızdırmazlık ve hazne içerisindeki tüm adsorbent tanecikleri ile adsorban maddeyi buluşturmadır.

Adsorbent yatak tasarımında sistemin çalışması için önemli bazı kriterler mevcuttur. Tasarım aşamasında tüm bu kriterler değerlendirilmeye çalışılmıştır. Öncelikle adsorbent yataktan beklenen vakum altında tam sızdırmazlık göstermesidir. Adsorbent maddenin zeolit 13X olması ve bu maddenin desorpsiyon sıcaklığının 250°C olmasından ötürü yatağın yüksek sıcaklıklara çıkıp tekrar ortam şartlarına soğumaya adapte olması ve sızdırmazlığın bu durumdan etkilenmemesi gerekmektedir. Yatak üzerinden, yatak sıcaklık ve basıncın ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle M13 boyutunda bir basınç sensörü yuvası ve M12 boyutunda bir sıcaklık yuvası bırakılmıştır. Sıcaklık ölçümü için dışarıya açık içeride kapalı şekilde yatak dip noktasına uzanan bir boru imal ettirilmiştir. J tipi termo eleman yardımıyla iç yüzeyden sıcaklık ölçümleri alınması planlanmıştır.

Yatak içerisinde akışkanın hareket etmesi için elek şeklinde bir tel ile yatak başlangıç ve bitiş noktasına bu şekilde geçişli bir yüzey oluşturulmuştur. Bu delikli tel boru yatak üst kapağına kaynak ile sabitlenmiştir. Bu akış yolunun yatak kapandığında ve adsorbent malzeme dolumu esnasında sabit durması için alt kapağına delikli akış yolunun çapında bir kılavuz oluşturulmuştur.

Yatak içerisine adsorbent dolumu için üst kapakta vidalı bir delik ve tıpa yeri imal ettirilmiştir. Yatak içerisi boşaltılırken alt kapağın sökülmesi gerekmektedir. Yatak üst ve alt girişleri özel vakum vanaları ile kontrol edilmektedir. Bu ara bağlantı elemanları özel vakum aparatları olan kelepçeleme işlemi ile birbirine bağlanmıştır. Yataklar bu vanalar yardımıyla manuel olarak kontrol edilmektedir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçleri bu şekilde yönetilmektedir. Sistem performansı yatak içerisine transfer olan

akışkan miktarı ile doğrudan alakalıdır. Bu nedenle yatak içinde delikli boru çapı 50mm olarak tasarlanmış ve yatak çıkışında redüksiyon ara elemanı ile boru çapı normal hat çapına düşürülerek imalat tasarlanmıştır. Yatak cidar kalınlığı 3 mm kalınlıktadır. Bu kalınlık belirlenirken desorpsiyon esnasında yatak içindeki sıcaklık artışı ve soğuma esnasında yataktan atılacak olan ısı dikkate alınmıştır.



Şekil 3.1. Adsorbent yatak imalat çizimi

3.2.2. Buharlaştırıcı Hazne Tasarımı

Sistemin önemli parçalarından biridir. Tasarımı adsorpsiyon performansına doğrudan etki etmektedir. Buharlaştırıcı üzerinden yapılacak tasarımsal her iyileştirme sistem performans katsayısına etki edecektir. Öncelikle hazne içerisinde sürekli olarak ağırlık ve yatak sıcaklığı gözlenmesi gerekmektedir. Adsorbent yatakta olduğu gibi burada da dışarıya açık içte sızdırmaz kapalı bir ince boru ile hazne dip noktasına kadar ulaşan boru imal ettirilmiş ve montajlanmıştır. Bu boru içerisinde cidardan sıcaklık okuması yapılmaktadır. Hazne alt yüzeyi sabittir. Hazne içerisine giriş ve çıkış üst kapaktan

sağlanmaktadır. Hazne üst kapağı bağlantısı için flanş üzerine conta yuvası açılmıştır. Bu yuva içerisinde bakır conta ile sızdırmazlık sağlanmıştır. Flanş etrafında eşit aralıklarla dış açılarak konulan 4 adet cıvata ile hazne kapatılmıştır.

3.2.3. Bağlantı Elemanı Tasarımları

Bağlantı elemanları sistem tasarımında önemli bir yer teşkil etmiştir. Sistemin ana parçaları tasarlanırken alınacak ölçümler dikkate alınarak tasarımlara dahil edilmiştir. Deney düzeneği vakum altında çalıştığından birinci öncelik olan sızdırmazlık bağlantı elemanları açısından da önemli bir konudur. Bu hususlar göz önünde alınarak uygun bağlantı elemanları ve montaj yöntemleri belirlenmiştir. KF25 tipinde birbirleriyle tam uyumlu vakuma dayanıklı vanalar, hatları birbirine bağlayan kelepçeler ve kelepçelerde sızdırmazlığı sağlayan contalar deney düzeneğinde kullanılmıştır.

Deney düzeneğinde kullanılan bazı bağlantı elemanların resimleri Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Bu bağlantı elemanı basınç sensörü ve nem sensörü bağlantısının yapılabilmesi için kullanılmıştır. Nem sensörünün kullanım yeri özel olarak tasarlanmak durumundadır. Ölçüm yaptığı kafa kısmının akışın merkezinde olması ve akışkan ile temas halinde olması gerekmektedir. Bu sebeple çok yollu bir ara bağlantı tercih edilerek nem sensörü bağlantı şekline göre üst yoldan bağlanmış ve alt yola doğru hat içinde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.2. a)Kelepçe aparatı ile nem sensörü bağlantısı b)Altı yollu ara bağlantı Elemanı

Şekil 3.2' in 'a' numaralı resminde gösterilen basınç sensörünün hatta bağlanması için kelepçe ile montajı gösterilmiştir. Bu şekilde tesisatta istenilen her noktaya bağlanabilmektedir. Bu bağlantı şekliyle sızdırmazlık problemi de ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Vakum pompası ve buharlaştırıcı haznenin deney düzeneğine bağlantısı için spiral boru kullanılmıştır. Bu spiral borular sistemin çalışma şartlarına uyumlu olarak seçilmiştir. Montaj ve kullanım açısından kolaylıkları açısından tercih edilmiştir. Spiral boru ağzlarına KF25 tip sistem hattına uyan flanşlar kaynatılmış ve kelepçeler vasıtasıyla montaj gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. KF25 spiral boru flanş bağlantısı

3.2.4. Basınç Sensörü Bağlantısı

12 mm dış üstü çapına sahip olan basınç sensörünün sızdırmazlık koşulu altında sisteme montajı için sistem ana hat borularına uygun bir flanş yaptırılmıştır. Bu flanş üzerine dişi yuva açılmış ve ara yüzeye teflon sarılarak sensör bu flanşa monte

edilmiştir. Bu sayede KF25 tip sistem hattına kolayca montajı sağlanmıştır. Standart vakum bağlantı elemanı olan kelepçe vasıtasıyla ana hatta bağlantı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Basınç sensörü flanş bağlantısı

3.2.5. Nem ve Sıcaklık Sensörü Bağlantısı

Nem ve sıcaklık ölçerimizin dış yüzeyi plastik kaplamadan oluşmaktadır. Çalışma sistemine göre de akış hattının merkezine konumlandırılması gerekmektedir. Basınç sensörüne benzer şekilde bir flanş burada da imal ettirilmiştir. Fakat flaş üzerine sadece dişi yuva açılmış ve sensör buraya sıkılarak monte edilmiştir. Kablo bağlantı tarafı dışarıda kalacak şekilde imalatı yapılan flaş ile sızdırmazlık elemanımız kelepçe yardımıyla sistem hattına bağlantı sağlanmıştır.



Şekil 3.5. Nem ve sıcaklık ölçer flanş bağlantısı

3.2.6. Yoğuşturucu Soğutma Hattı

Deney düzeneğinde yoğuşturucu hattı ilk tasarlandığında spiral borularda doğal taşınım ile yoğuşma işlemi gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Daha sonra yoğuşma hattının yetersiz kalması ihtimaline karşın çift fanlı ve R134a soğutucu akışkan ile çalışan bir sistem imal ettirilmiş ve yoğuşturucu spiral borusu üzerine sabitlenmiştir. Burada adsorpsiyon esnasında yataktan yükselen nemli akışkanın yoğuşma sıcaklığına hızlıca düşürülmesi ve çevrim zamanının iyileştirilmesi düşünülmüştür.



Şekil 3.6. Soğutucu düzenek

3.3. Deney Düzeneği Bileşenleri

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi kesikli çalışmayı engellemek amacıyla iki veya daha fazla hazne kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada soğutma sistemi iki adsorbent yatak, bir yoğuşturucu ve bir buharlaştırıcıdan oluşmaktadır.

3.3.1. Buharlaştırıcı

Buharlaştırıcı hazne sistemde adsorbent yataklardan daha alt bir seviyede konumlandırılmıştır. Sistemde hareket eden soğutucu akışkanın bulunduğu haznedir. Deney düzeneği şase bağlantısı üzerine bir tartım cihazı konulmuştur. Haznedeki kütle artış ve azalmaları tartım cihazına bağlı olan bir ekrandan takip edilebilmektedir. Deney düzeneği vakum altında çalışmaktadır. Fakat buharlaştırıcı içerisinde soğutucu akışan olarak kullanılan su bulunmaktadır. Bu sebeple bu haznede vakum uygulandığında su buharlaşmaya başlamakta ve vakum pompası hattında yoğuşma yaparak pompa performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Buharlaştırıcı hazne tarafında su üzerinde fazla hava kalması durumunda ise adsorpsiyon esnasında yatak ile hazne arasındaki vana açıldığında basınç olumsuz etkilenmekte buda adsorpsiyon miktarını azaltıcı etki göstermektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak hazne st çıkış ve girişi noktalarına iki adet vana konulmuştur. Bu sayede hazne üzerinde ve hattaki hava kütlesi azaltılmak amaçlanmıştır.

Buharlaştırıcı giriş ve çıkış noktalarında birer adet vana bulunmaktadır. Çevreden ısı çekerek buharlaşan adsorbat miktarının gözlenebilmesi amacıyla buharlaştırıcı hassas bir terazi üzerinde konumlandırılmıştır. Terazide hassas okuma yapılabilmesi için haznenin askıda olması sistem bağlantı borularının üzerinde bir kuvvet oluşturmaması gerekmektedir. Bu nedenle spiral borular kullanılmıştır. Hem kondenser tarafı hem de yataklara giden boru bağlantısı sabit olmayan esnek spiral borular yardımıyla buharlaştırıcı hazne askıda kalacak şekilde bağlantı gerekleştirilmıştir.



Şekil 3.7. Buharlaştırıcı haznesi



Őekil 3.8. Buharlařtırıcı űst kapak (sıcaklık űlçűm bűlgesi)

3.3.2. Yoğurturucu

İzobarik desorpsiyon süreci esnasında adsorbent yatak ısıtılmakta ve adsorbent malzeme için desorpsiyon sıcaklığına erişildiğinde adsorbat buhar fazında yoğurturucuya doru hareket etmektedir. Adsorbent yataklar ile hazne arasında bir vana bulunmaktadır ve yatak basıncı yoğurturucu basıncına ulaştığında bu vana açılır ve gaz fazındaki adsorbat yoğurturucuya doğru hareket eder.

Yoğurturucu yeterince uzun bir spiral boru olarak tasarlanmıştır. Bu hatta doğal taşınım yoluyla soğuma sağlanmaktadır. Adsorbat desorpsiyon olduktan sonra yoğurturucuya ulaşmaya kadar aradaki hat boyunca da belli bir miktar yoğurtmaya maruz kalmaktadır. Bu aradaki hatta yoğurtan adsorbatın yoğurturucuya akışını kolaylaştırmak amacıyla belli bir sehimde akış sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.9. Yoğurturucu hattı

3.3.3. Adsorbent Yatak

Deney düzeneğinin bu bölümünde adsorpsiyon ve desorpsiyon olayları gerçekleşmektedir. Deney düzeneğinde iki adet yatak bulunmaktadır. Yatak içerisinde 1.10^{-5} bar vakum değerlerine inilebilmektedir. Yatak içerisinde delikli bir tel örgü ile adsorban maddenin akış hattı boru şeklinde yapılmıştır. Adsorbent malzeme bu delikli borunun etrafına dökülmektedir. Yatak görüntüsü Şekil 3.11’ de verilmiştir.



Şekil 3.10. Adsorbent yatak üst kapak (sıcaklık- basınç ölçüm)

3.3.4. Isıtıcılar

Soğutma sisteminde izobarik desorpsiyon aşamasında zeolit malzemesinin desorpsiyon olayını gerçekleştirmesi için gerekli olan ısı enerjisi dışarıdan elektrikli ısıtıcılar vasıtasıyla sağlanmıştır. 2 kW gücünde iki adet elektrikli ısıtıcı bir yatak etrafına sarılmıştır. Üzerindeki ayar sayesinde yelek şeklindeki bu ısıtıcılar hazne yüzeyine arada boşluk kalmayacak şekilde montajlanmıştır. Isıtıcılar deney düzeneğinin elektrik hattının bağlandığı kontrol panosundan kontrol edilmektedir. Yatak dış yüzey sıcaklığını ölçebilmek amacıyla ısıtıcı üzerinde bulunan girişten bir termo eleman ile yatak yüzeyinden sıcaklık ölçümü alınmaktadır. Yatak üzerine monte edilmiş halde ısıtıcıların görüntüsü Şekil 3.11’ de verilmiştir.

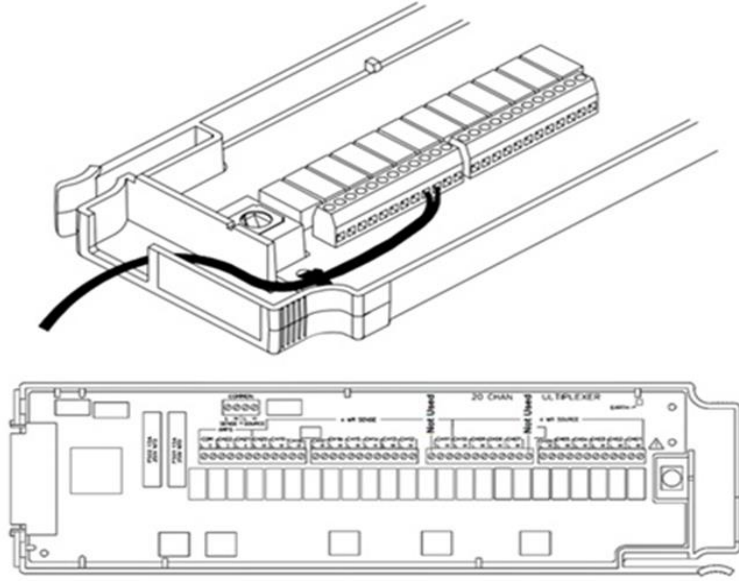


Şekil 3.11. Adsorbent yatak ve ısıtıcılar

3.3.5. Sensörler ve Veri Aktarma

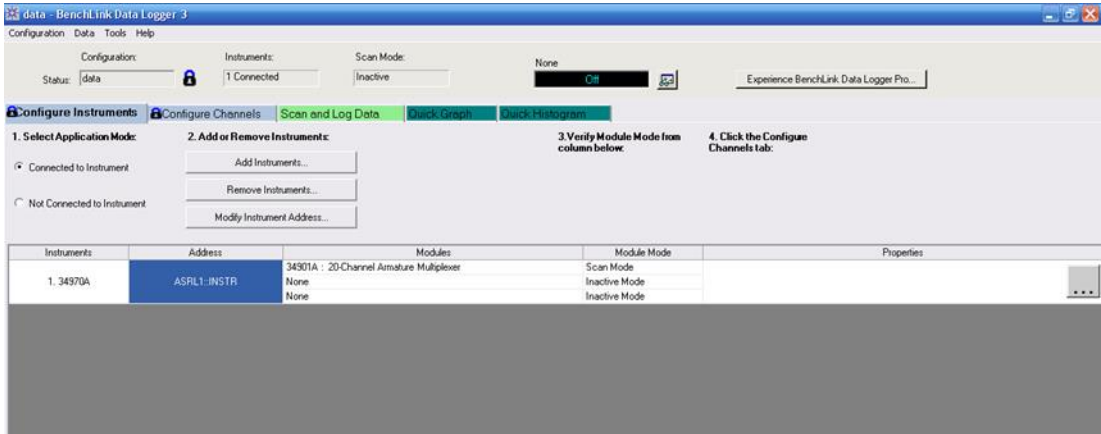
3.3.5.1. Veri Toplama Cihazı

Sistem üzerinde gerekli olan basınç ve sıcaklık değerleri deney düzeneğine uyumlu çalışabilecek sensörler vasıtasıyla okunmuştur. Sensörlerden gelen tüm veriler bir Agilent 34970A model bir veri toplama cihazı vasıtasıyla depolanmıştır. Veri toplama cihazı üzerinde üç adet kart girişi bulunmaktadır. Bu kart girişleri yukarıdan aşağıya doğru 100, 200 ve 300 sayıları ile temsil edilmektedir. Ayrıca her kart üzerinde de 20 adet kanal bulunmaktadır. Örneğin elinizdeki kartı veri toplama cihazında 100 numaralı girişe taktığınızda ve kart üzerinde 5 numaralı kanala sensörünüzü bağlamışsanız cihaz üzerinde sensörünüzü 105 numarası ile kontrol edebilirsiniz. Tüm bu kodlamalar her sensör bağlantısı için farklılıklar gösterebilir (bağlantı kablosundaki kablo sayısına göre). Deney düzeneğinde kullandığımız veri toplama cihazında 20 girişi bulunan iki adet kart bulunmaktadır. Cihaza ait kart Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Veri toplama cihazı bağlantı kartı

Veri toplama cihazı ile bilgisayar arasındaki bağlantı RS232 veri aktarım kablosu ile sağlanmaktadır. Öncelikle bilgisayara veri toplama cihazının programı yüklenmiştir. Cihaz ile bilgisayar arasındaki bağlantının durumunu IO Libraries adındaki program vasıtasıyla kontrol edilmektedir.



Şekil 3.13. IO Libraries bağlantı penceresi

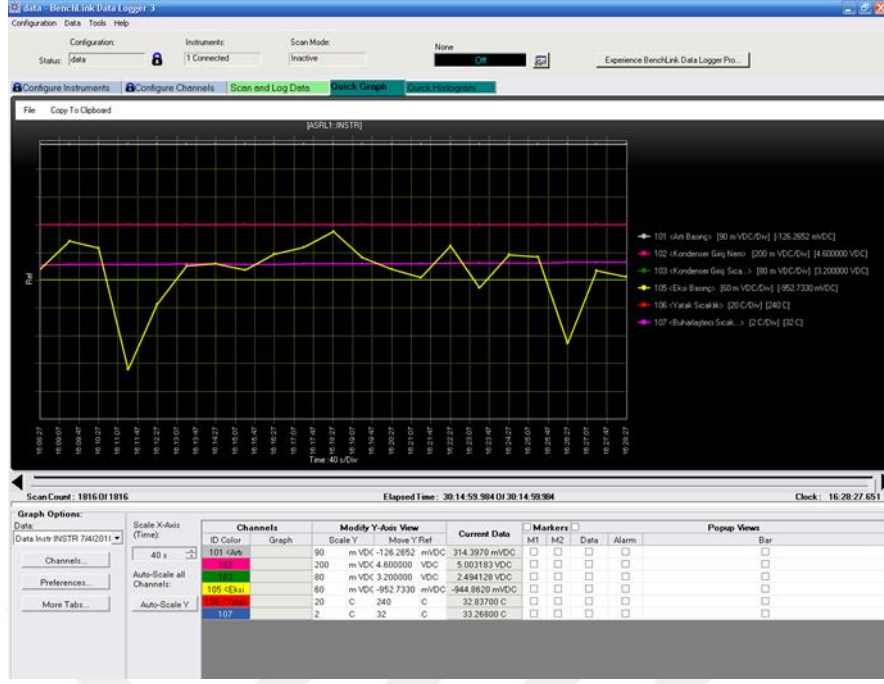
Bağlantı için önemli olan kriter cihaz üzerindeki RS232 veri aktarım özelliklerinin IO Libraries üzerindeki bilgiler ile aynı olmasıdır. Bu bilgiler bilgisayar üzerinde programa girildikten sonra cihaz bilgileri programda görünür ve cihaz ismi üzerinde yeşil onay işareti çıkar.

Bu aşamadan sonra veri toplama cihazını yönetmek için Benchlink Data Logger 3 programı çalıştırılır. Burada veri toplama cihazına bağlı olan kart bilgileri düzenlendikten sonra kart üzerinde bağlı olan tüm sensörlerin veri alma şekline göre bilgiler bu programa tanımlanır. Örneğin J tipi bir termo eleman kullanılıyorsa cihaz üzerinde veri alımı °C veya basınç sensörü kullanılıyorsa DC akım okuma modu programda kanallara göre tanımlanmaktadır.

Channels	Enable Channel	Name	Function	Range	Res	More	Scale	Gain (M)	Offset(B)	Label	Test	Low	High	HW/Alarm	More
34901A															
101	<input checked="" type="checkbox"/>	Arı Basınç	DC Voltage	+/- 100 V	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
102	<input checked="" type="checkbox"/>	ndensetir Giriş Ni	DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
103	<input checked="" type="checkbox"/>	ndensetir Giriş Sici	DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
104	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
105	<input checked="" type="checkbox"/>	Ekiri Basınç	DC Voltage	+/- 100 V	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
106	<input checked="" type="checkbox"/>	Yatakl Sıcaklık	Temp (Type-J)	None	C			1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
107	<input checked="" type="checkbox"/>	İhlatırlıncı Sıcak	Temp (Type-J)	None	C			1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
108	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
109	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
110	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
111	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
112	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
113	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	+/- 10 V	5.5			375	0	HUM	Off	0	1	Alarm 1	...
114	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
115	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
116	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
117	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
118	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
119	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
120	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5			1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
121	<input type="checkbox"/>		DC Current	Auto	5.5			1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...
122	<input type="checkbox"/>		DC Current	Auto	5.5			1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...

Şekil 3.14. Sensörlerin tanımlanması

Deney başladıktan sonra alınan datalar hem tablo hem de grafiksel olarak istenilen zaman aralığında takip edilebilmektedir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon aşamalarında kayıt sonlandırılarak excel dosyasında tüm veriler programdan alınabilmektedir.



Şekil 3.15. Veri okuma ekranı

3.3.5.2. Nem ve Sıcaklık Sensörü

Vakum altında ve sistem çalışma sıcaklığına uygun şartlarda çalışabilecek bir sıcaklık sensörü seçilmiştir. Sıcaklık sensörü seçiminde sensör bağlantı şekli ve bağlantı malzemesi dikkate alınmıştır. Yatak içerisinde 200°C' nin üzerinde sıcaklıklar görüldüğünden bu sensörlerin yatak içerisinde direk kullanılması uygun değildir. Çünkü sensör için alt ve üst çalışma sıcaklıkları -40°C ile 85°C arasındadır. Bu nedenle tasarımda yataklardan sonra akış hattı üzerinde yoğuşturucudan hemen önce bu sensör ile ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.16. Nem ve sıcaklık ölçer

Şekil 3.16' da görüldüğü üzere nem sensörü algılama alanı delikli şekildedir ve nem algılayıcı bu hazne içerisinde. Bu koşullarda bu ölçüm alanının akışın merkezinde olması ölçüm doğruluğu açısından önemli bir parametredir. Bu sensörü akış hattının merkezine yerleştirmek amacıyla şekilde görüldüğü üzere sensör tarafımızca tasarlanan küçük bir flanşa sabitlenmiştir. Bu flanş ebat ve uyumu vakum hattında kelepçe bağlantı bölgelerinde sızdırmazlığı sağlayan plastik contaların benzeri şekilde tasarlanmıştır. Bu sebeple KF 25 tip akış hattının merkezine nem ve sıcaklık sensörü bu flanş sayesinde sanki bir kelepçe gibi bağlanmış ve hatta merkezlenebilmiştir. Bu bağlantı sayesinde sensör bağlantısında sızdırmazlık koşulları da sağlanmış olur.

Bu sensör ile yoğuşturucudan önce yatak içerisinde desorpsiyon süreci sonunda harekete geçen akışkanın nem ve sıcaklık verileri alınmıştır. Sensör üzerinde özel bir bağlantı kablosu bulunmaktadır. Dört adet kablodan oluşmaktadır. Sensör 15- 35 VDC aralığında besleme voltajına ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç elektrik panomuza entegre ettiğimiz 25 V' luk bir adaptör yardımıyla sağlanmıştır. Sensör üzerinden nem ve sıcaklık ile ilgili veriler VDC olarak alınmaktadır. Bu değerlerin nem değeri olarak karşılığı Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Sensör üzerinde kahverengi beyaz mavi ve siyah olmak üzere dört adet kablo bulunmaktadır. Kablo özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Nem ve sıcaklık ölçer bağlantı şeması

Renk	Özellik	Bağlantı Kodu
Kahverengi	Besleme voltajı, V+	1
Beyaz	RH çıkışı, çığ noktası veya mutlak nem	2
Mavi	Besleme V-	3
Siyah	Sıcaklık Çıkışı	4

Çizelge 3.2. Nem ve sıcaklık ölçer dönüşümü

Okunan değer, VDC	Nem Değeri, %rh	Sapma değeri, %rh
1,491	29,8	-0,2
2,416	48,3	-1,5
3,438	68,8	-1,5



Şekil 3.17. Nem ve sıcaklık sensörü montajı

3.3.5.3. Sıcaklık Sensörü

Sistemde yatak içerisinde desorpsiyon ve adsorpsiyon süreçleri esnasında sıcaklık takibi yapılmaktadır. Adsorpsiyon esnasında sıcaklıktaki yükseliş adsorpsiyon miktarını etkilemektedir. Desorpsiyon esnasında yatak iç sıcaklığı desorpsiyon performansını etkilemektedir. Bu nedenle zamana bağlı olarak tüm bu verilerin yatak içerisinde okunması gerekmektedir. Burada J tipi termo eleman kullanılmıştır. Bu eleman iki kablo bağlantısı ile veri toplama cihazına bağlanmaktadır. Yatak içerisinde sıcaklık ölçüm hattına yerleştirilen sensörün bağlantı kabloları veri toplama cihazındaki kartta herbir kanal için bulunan H ve L girişlerine uygun şekilde bağlanır ve anlık olarak tüm veriler bilgisayar ortamında kaydedilmektedir.

3.3.5.4. Basınç Sensörü

Sistem üzerinde KELLER PA-21Y marka basınç sensörü kullanılmıştır. Bu sensör için çalışma koşulları -40°C ile 100°C arasındadır. Bu nedenle nem ve sıcaklık sensöründe olduğu gibi yatak üzerinden ölçüm alınmamıştır. Akışkanın hareket ettiği hat üzerinde yoğunlaştırucuya girmeden evvel bu sensör bağlantısı yapılmış ve çalışma sıcaklıkları sağlanarak sağlıklı sonuçlar alınması hedeflenmiştir.



Şekil 3.18. Basınç sensörü ve bağlantı elemanı

Veri toplama cihazı basınç sensöründen gelen VDC (Volt Direct Current) akım üzerinden değer okumaktadır. Sensör bağlantı kablosunda dört farklı renkte bağlantı kablosu bulunmaktadır. Veri toplama cihaz kartında kanal bağlantısında Sarı renkli kablo L girişine, yeşil renkli kablo H girişine bağlanmıştır. Bu kabloların özellikleri Çizelge 3.3' de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Basınç sensörü bağlantı şeması

Renk	Özellik	Bağlantı Kodu
Kahverengi	-24 V	1
Sarı	+ Çıkış 0-10V	2
Beyaz	+ 24 V	3
Yeşil	-Çıkış 0-10 V	4



Şekil 3.19. Basınç sensörü montajı

3.3.5.5. Vakum Pompası ve Sensörü

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi vakum altında çalışmaktadır. Bu sistemde sızdırmazlık ne kadar önemli ise vakum seviyesinin kontrolü de o kadar önemlidir. Normal şartlarda 1.10^{-4} bar basınçlara rahatlıkla düşebilen Pfeiffer DuoLine marka pompa kullanılmıştır. Pompa egzoz kısmında ses azaltmak amaçlı susturucu kullanılmıştır. Vakum deney düzeneğinde yatakların alt kısmından yapılmaktadır. Vakum pompasında meydana gelebilecek sarsıntı göz önünde bulundurularak ara bağlantıda sabit boru kullanılmamıştır. Spiral boru aracılığıyla pompa bağlantısı gerçekleştirilmiştir.

Düzenekte Pfeiffer D- 35614 marka bir vakum sensörü kullanılmıştır. Vakum sensörünün ayrı olarak bar ve mbar cinsinden basınç gösterebildiği özel bir veri toplama ve okuma gösterge ekranı bulunmaktadır. Deney devam ederken sistem üzerindeki vakum bu cihaz ile takip edilmektedir.



Şekil 3.20. Vakum sensörü



Şekil 3.21. Vakum pompası

3.3.5.6. Ağırlık Sensörü

Sistemin soğutma performansının hesaplanabilmesi için buharlaştırıcıdan buharlaşan akışkan miktarının bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple buharlaştırıcıyı üzerine yerleştirebileceğimiz bir tartım cihazı deney düzeneğine eklenmiştir. Bu cihaz 24V besleme hattı ile çalıştığından diğer sensörleri beslediğimiz 24V adaptörden ağırlık sensörüne de bir besleme hattı çekilerek çalıştırılmıştır. Cihaz üzerinden çıkan iki veri kablosu da okuma için kullandığımız ekranlı okuyucuya bağlanmaktadır. Ağırlık okuması cihaza bağlantılı olan bu veri cihazından okunmaktadır.



Şekil 3.22. Ağırlık sensörü ve gösterge ekranı

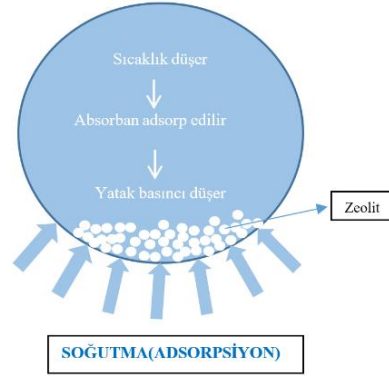
3.4. Çalışma Sistemi

Soğutma sistemi dört ana başlık altında incelenebilir.

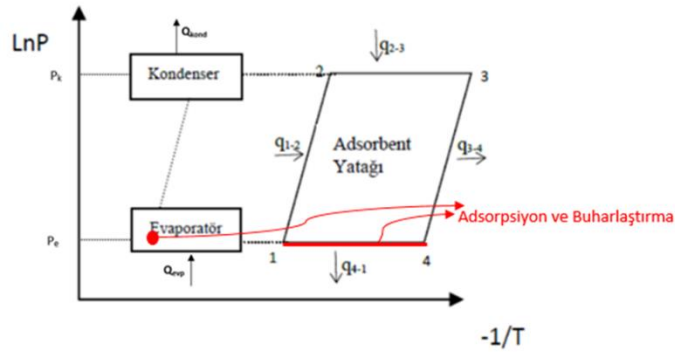
- **İzobarik Adsorpsiyon**

Başlangıçta adsorbent yatağında adsorbent malzeme kuru halde yani soğutucu akışkan miktarı sıfıra yakındır. Başlangıç halinde sistem üzerindeki tüm vanalar kapalı halde bulunmaktadır. Adsorbent yatak başlangıçta yaklaşık olarak 1×10^{-5} bar basınç altında yani vakum halinde bulunmaktadır. Adsorbent akışkan olarak su kullanıldığı ve suyun donma noktası düşünüldüğünde buharlaştırıcı haznesinde vakum altında olması suyun donma noktasını düşürdüğünden sistemin verimine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle başlangıçta buharlaştırıcı hazne basıncında 1×10^{-2} civarlarında tutulur. Şekil 3.29' da görüldüğü üzere buharlaştırıcı ile adsorbent yatak arasında bulunan V_1 vanasının açılmasıyla adsorpsiyon süreci çalışmaya başlamış olur. Vakum etkisi ve zeolitin adsorpsiyon çekim kuvveti sayesinde buharlaştırıcıdaki su belirli bir süre içerisinde bulunduğu yerden ısı çekerek buharlaşır ve adsorbent hazneye hareket eder. Bu sayede buharlaştırıcıda bulunan soğutma suyu sıcaklığı düşürülmüş olur. Bu süreç sonucunda adsorbent konsantrasyonu artmış ve tanecikler doymuş hale gelmiştir. Soğutma işlemi sırasında su buharı ile zeolit taneciklerinin yüzeyi arasında adsorpsiyon esnasında

direnç kuvvetleri nedeniyle yatak içerisinde adsorpsiyon ısısı ortaya çıkmaktadır. Tüm bu işlemler sabit basınç kabulü altında gerçekleşmiştir



Şekil 3.23. Soğutma ve adsorpsiyon süreci

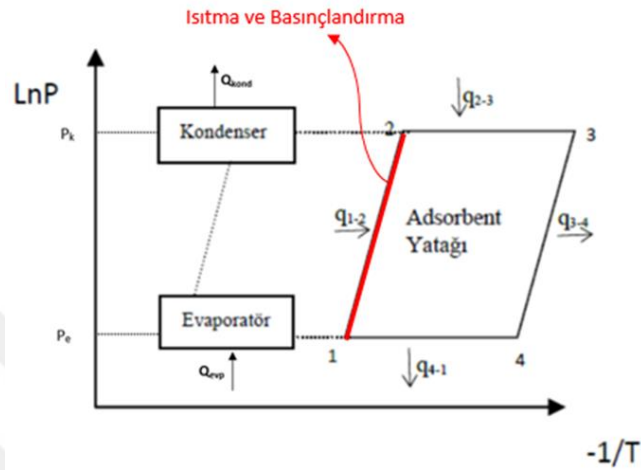


Şekil 3.24. İzobarik adsorpsiyon şeması

- **İzosterik Isıtma**

İzobarik adsorpsiyon süreci tamamlandıktan sonra su buharı hazne içerisindeki kuru zeolit tanecikleri tarafından adsorbe edilmiştir. Bu süreçten sonra adsorbent yatak ile buharlaştırıcı arasındaki V_1 vanası kapatılır. Zeolit yapısı gereği 200-300 °C sıcaklıklarına ulaştığında adsorbe ettiği nemi desorb etmeye başlamaktadır. Bu nedenle kullanılan adsorbent malzemenin desorpsiyon sıcaklığı dikkate alınarak adsorbent yatak ısıtılmaya başlanır. Sistemin çalışma prensibine göre bu ısı atık ısı,

güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi birçok farklı ısı kaynağından temin edilebilir. Adsorbent yatağa her birisi 2kW'lık üç adet ısıtıcı yelek vasıtasıyla ısı verilerek yatak sıcaklık ve basıncı artırılır. Bu aşama izosterik ısıtma olarak tanımlanır. Bu işlem adsorbent yatağının yoğuşturucu basıncına ulaşınca kadar devam eder.



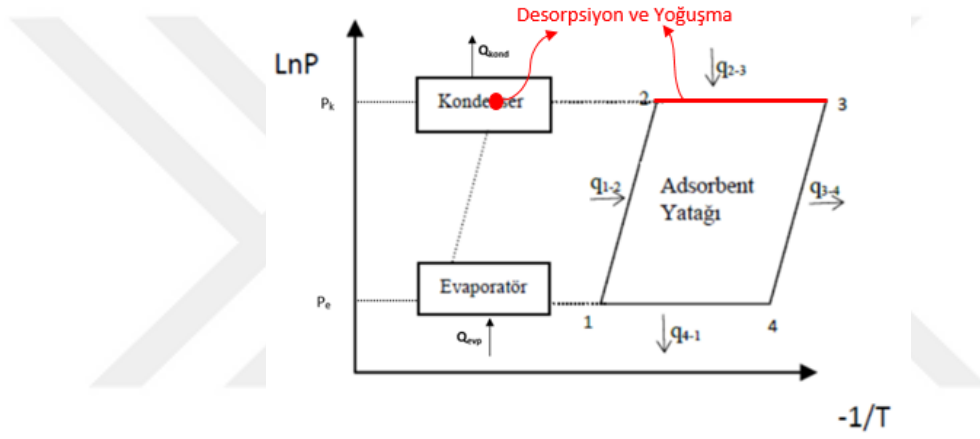
Şekil 3.25. İzosterik ısıtma şeması

- **İzobarik Desorpsiyon**

Adsorbsiyon yatağının sahip olduğu basınç yoğuştrucu basıncına ulaştıktan sonra Şekil 3,29' da gösterilen V_2 vanası açılır (V_1 vanası kapalı) ve desorpsiyon işlemi başlamış olur. Desorpsiyon işlemi esansında da adsorbent yatağa ısı transfer edilmeye devam edilerek sıcaklığı zeolit 13X'in desorpsiyon sıcaklığında tutulmaktadır. Bütün adsorplanan su buharının adsorbentten ayrılması gerçekleşene kadar bu işlem devam eder. Bu esnada adsorbentten ayrılan adsorbat yoğuşturucuya doğru hareket eder. Adsorbat yoğuşturucu da çevreye ısı atarak yoğuşmaya başlar. İzobarik desorpsiyon süreci adsorbent yatakta bulunan adsorbent yatağının başlangıçtaki şartlarına gelinceye kadar devam edilir. Yoğuşturucudan geçerken sıvı faza geçen adsorbat buharlaştırıcıya aktarılmış olur.



Şekil 3.26. Adsorbent yatakta desorpsiyon süreci

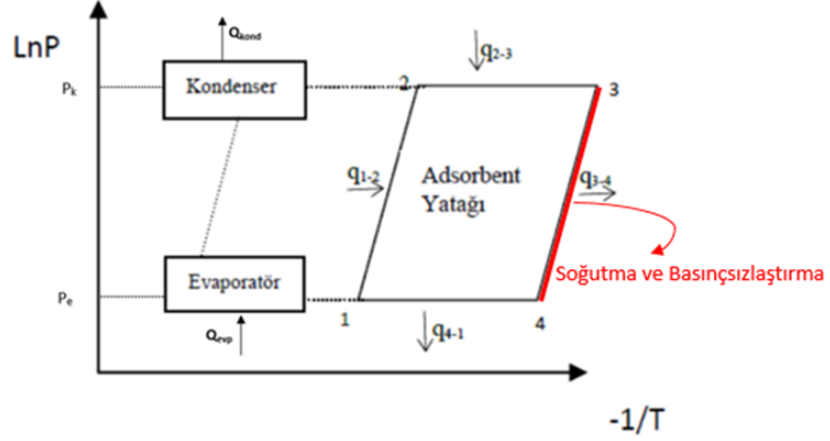


Şekil 3.27. İzobarik desorpsiyon şeması

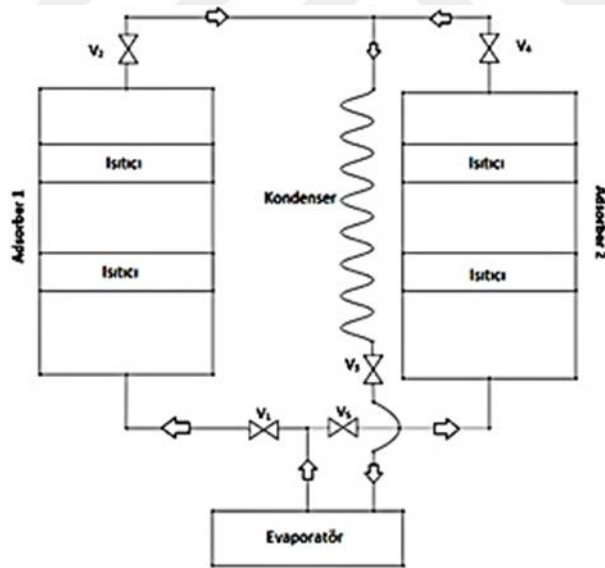
- İzosterik Soğutma

Desorpsiyon işlemi tamamlandığında başlangıçta buharlaştırıcıdan buharlaşan adsorbat miktarının tekrar buharlaştırıcıya gelmesi beklenmektedir. Desorpsiyon işleminin tamamlandığı tespit edildikten sonra adsorbent yatak ile yoğuşturucu arasındaki V_2 vanası kapatılır. Bu işlemde adsorbent yatak ilk konsantrasyonuna dönmüş olup yatak sıcaklık ve basıncı yüksektir. İzosterik soğutma safhasında adsorbent yatak soğumaya tabi tutulur. Yatağın basıncı buharlaştırıcı basıncına

düşünceye kadar soğutma süreci devam eder. Çevrimin tamamlanmasının ardından sistem ilk haline geri döner ve tekrar ikinci soğutma için hazır hale gelmiş olur[42].



Şekil 3.28. İzosterik soğutma şeması



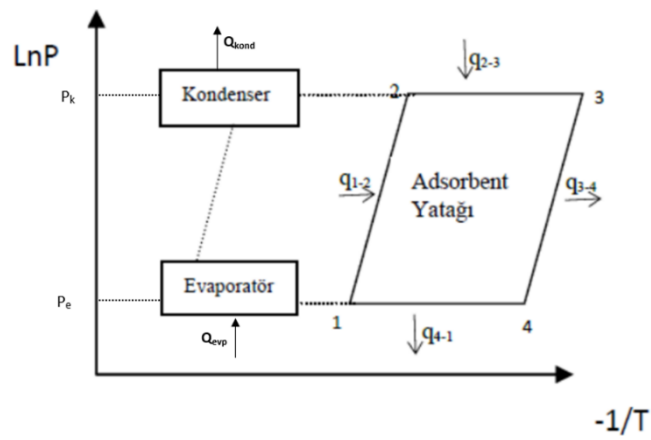
Şekil 3.29. Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 3.30. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi deney düzeneği

3.5. Sistemin Termodinamik Olarak İncelenmesi

Şekil 3.31’ de gösterildiği üzere, 1-2 arasında izosterik ısıtma, 2- 3 arasında izobarik desorpsiyon, 3-4 arasında izosterik ısıtma, 4- 1 arasında izobarik adsorpsiyon süreçleri gerçekleşmektedir. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi çevrimi Clausius Clapeyron diyagramı ile açıklanabilmektedir.



Şekil 3.31. Clapeyron diyagramı

Adsorbent yatak ile buharlaştırıcı arasındaki vana açıldığında adsorpsiyon olayı gerçekleşir. Bu esnada adsorbatın adsorbent tarafından emilmesi sonucunda bir ısı açığa çıkar. Bu ısı enerjisi katı malzemenin yüzeyi ile akışkan arasında gerçekleşen fiziksel adsorpsiyon olayından kaynaklanmaktadır. Hem adsorpsiyon olayının devam etmesi hem de adsorpsiyon kapasitesinin düşmemesi için açığa çıkan bu enerjinin atılması ve yatak sıcaklığının T_1 ' e düşmesi önemlidir.

1) Q_{41} ifadesi İzobarik Adsorpsiyon sürecini esnasında adsorbent yatağından çevreye verilen ısı miktarını temsil etmektedir.

$$Q_{41} = m_z C_{p,z}(T_4 - T_1) + m_z \frac{w_4 + w_1}{2} C_{p,a}(T_4 - T_1) + m_z (w_{\max} - w_{\min}) \Delta H_{\text{ads}} \quad (3.1)$$

2) Q_{12} ifadesi İzosterik ısıtma sürecinde adsorbent yatak ile ortam arasındaki ısı alışverişini temsil etmektedir.

$$Q_{12} = m_z c_{p,z}(T_2 - T_1) + m_z w_{\max} c_{p,a}(T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

3) Q_{23} ifadesi izobarik desorpsiyon sürecinde adsorbent yatak ile ortam arasındaki ısı alışverişini temsil etmektedir.

$$Q_{23} = m_z C_{p,z}(T_3 - T_2) + m_z \frac{w_2 + w_3}{2} C_{p,a}(T_3 - T_2) + m_z (w_{\max} + w_{\min}) \Delta H_{\text{ads}} \quad (3.3)$$

4) Q_{34} ifadesi izosterik soğutma sürecinde adsorbent yatak ile ortam arasındaki ısı alışverişini temsil etmektedir.

$$Q_{34} = m_z c_{p,z}(T_3 - T_4) + m_z w_{\min} c_{p,a}(T_3 - T_4) \quad (3.4)$$

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu için denklem (3.4) ve (3.5) dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$Q_{\text{evp}} = m_z(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})\Delta h_{\text{fg(evp)}} \quad (3.5)$$

$$Q_{\text{kond}} = m_z(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})\Delta h_{\text{fg(kond)}} \quad (3.6)$$

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi performans katsayısı;

$$\text{COP}_{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{evp}}}{Q_{12}+Q_{23}} \quad (3.7)$$

$$\text{COP}_h = \frac{Q_{\text{kond}}+Q_{34}+Q_{41}}{Q_{12}+Q_{23}} \quad (3.8)$$

Adsorpsiyonlu soğutma sistemi özgül ısıtma gücü;

$$\text{SHP} = \frac{Q_{\text{kond}}+Q_{34}+Q_{41}}{m_z t_{\text{çevrim}}} \quad (3.9)$$

Adsorbent yatağındaki enerji giriş ve çıkışlarında Adsorbent (zeolit), adsorbe edilen adsorbat (su buharı), adsorbent yatağı (gövde ve içindekiler) ve gizli buharlaşma ve yoğunlaşma ısılarından oluşmaktadır. Bu enerji geçişlerinde deneysel olarak elde edilen sıcaklık ve kütle değerleri esas alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Deney, yatak içerisindeki adsorbent malzeme (zeolit) kuru haldeyken başlamaktadır. Başlangıç şartları sağlandıktan sonra sadece buharlaştırıcı hazne giriş ve çıkış vanaları kapalı iken vakum pompası çalıştırılır. Adsorbent yatak, yoğuşturucu ve sistem hattı istenilen vakum koşullarına getirilir. Çizelge 4.1’ de verilen değerler başlangıç vakum değeri $7,6 \times 10^{-3}$ bar basınç değerinde elde edilmiştir. Deney başlangıcında buharlaştırıcı haznede 1864,7 gr su varken adsorpsiyon süreci sona erdikten sonra yapılan tartımlarda su kütlelerinin 87,2 gr azaldığı görülmüştür. Teorik olarak buharlaşan su miktarına göre buharlaştırıcı hazneden çekilen ısı miktarı sonucundaki sıcaklık değişimleri anlık olarak görülmüş ve seçilen önemli zamanlardaki değerler çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem verileri (26-06)

Zaman	101- Artı Basınç (VDC)	102- Kondens er Giriş Nem (VDC)	103- Kondens er Giriş Sıcaklık (VDC)	106- Yatak Sıcaklık (C)	107- Buharlaştırıcı Sıcaklık (C)
1	1,010	0,431	2,140	41,607	31,463
2	0,995	3,465	2,417	56,158	31,697
3	0,985	4,171	2,499	56,021	31,752
4	0,983	4,292	2,554	55,725	31,887
5	0,981	4,442	2,584	55,142	31,950
6	0,980	4,538	2,606	54,728	32,096
7	0,978	4,593	2,621	54,227	32,160
8	0,976	4,634	2,629	54,787	31,547
9	0,969	4,706	2,641	56,695	26,184
10	0,968	4,709	2,639	56,406	26,339
11	0,964	4,719	2,626	55,230	26,817
12	0,963	4,724	2,621	54,882	26,915
13	0,962	4,724	2,614	54,558	26,965
14	0,962	4,729	2,608	54,163	26,961
15	0,959	4,754	2,592	53,051	27,983

Çizelge 4.1.(devam). Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem verileri (26-06)

16	0,957	4,767	2,584	52,697	28,033
17	0,914	4,902	2,462	40,587	28,745
18	0,914	4,905	2,459	40,491	28,783
19	0,899	4,910	2,447	38,496	29,097
20	0,895	4,912	2,444	38,066	29,050
21	0,895	4,910	2,444	37,982	28,980
22	0,894	4,912	2,444	37,904	28,916
23	0,893	4,910	2,444	37,772	29,006
24	0,892	4,915	2,444	37,716	28,955
25	0,890	4,917	2,444	37,523	29,037

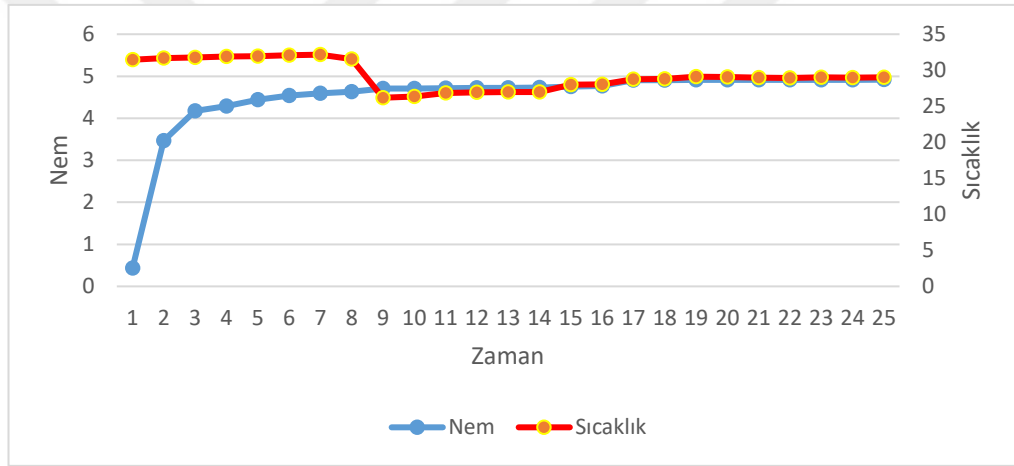
Çevrimin adsorpsiyon kısmı tamamlandıktan sonra izosterik ısıtma ve desorpsiyon aşamalarına geçilir. Bu esnada yatağa ısı verilir ve yoğunlaşma anında yatak ile yoğunlaştırıcı arasındaki vana açılarak adsorbent tarafından emilen suyun yoğunlaştırıcıya toplanması sağlanır. Tüm bu süreçte meydana gelen sıcaklık, basınç ve nem değişimleri de Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Desorpsiyon süreci tamamlandıktan sonra buharlaştırıcıda yoğunlaşan su kütlesi 132,6 gr ölçülmüştür.

Çizelge 4.2. Desorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değişimi (27-06)

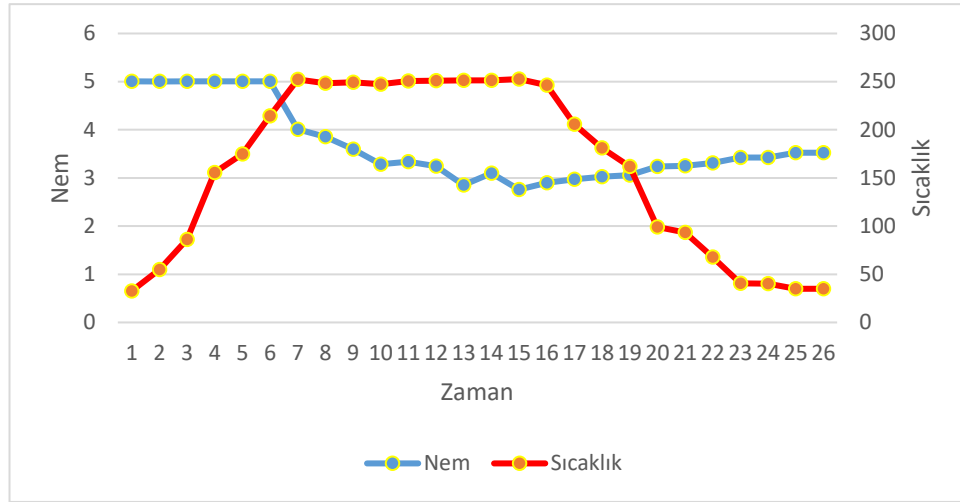
Zaman	101- Artı Basınç (VDC)	102- Kondenser Giriş Nem (VDC)	103- Kondenser Giriş Sıcaklık (VDC)	106- Yatak Sıcaklık (C)	107- Buharlaştırıcı Sıcaklık (C)
1	0,203	5,003	2,457	32,655	29,535
2	0,194	5,003	2,532	54,842	29,968
3	0,766	5,003	2,574	86,149	30,355
4	0,624	5,003	2,719	155,727	30,453
5	0,583	5,003	2,734	174,753	30,544
6	0,369	5,003	2,769	214,391	31,047
7	-0,388	4,008	2,764	252,298	32,734
8	-0,429	3,860	2,849	248,332	32,743
9	-0,471	3,596	2,900	249,154	32,777
11	-0,510	3,284	2,869	247,293	32,590
12	-0,554	3,339	2,887	250,699	32,656
13	-0,590	3,243	2,905	250,822	32,779
14	-0,629	2,852	3,170	251,168	32,689
15	-0,662	3,098	2,964	251,287	33,042
16	-0,897	2,758	2,884	252,694	33,996

Çizelge 4.2.(devam). Desorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değişimi (27-06)

17	-0,806	2,902	2,826	246,292	34,994
18	-0,799	2,975	2,784	205,731	34,304
19	-0,793	3,023	2,752	181,191	34,053
20	-0,790	3,060	2,721	161,875	33,933
21	-0,765	3,236	2,604	99,237	33,334
22	-0,763	3,248	2,592	93,308	33,243
23	-0,741	3,314	2,539	67,709	32,652
24	-0,676	3,422	2,487	40,737	31,832
25	-0,674	3,422	2,484	40,408	31,800
26	-0,624	3,523	2,464	35,002	31,634
27	-0,619	3,525	2,462	34,796	31,584



Şekil 4.1. Adsorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi (26-06)



Şekil 4.2. Desorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi (27-06)

Deney düzeneğinde başlangıç koşulları tekrar sağlandıktan sonra ikinci kez yapılan deneysel çalışma sonuçları Çizelge 4.3’ de verilmiştir. Bu aşamada sistemde vakum değeri $6,4 \times 10^{-4}$ olarak ölçülmüştür. Adsorpsiyon işlemi sonucunda buharlaştırıcı haznedeki 103,7 gr su buharlaşmıştır.

Çizelge 4.3. Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değerleri (28-06/29-06)

Zaman	101- Artı Basınç (VDC)	102- Kondensör Giriş Nem (VDC)	103- Kondensör Giriş Sıcaklık (VDC)	106- Yatak Sıcaklık (C)	107- Buharlaştırıcı Sıcaklık (C)
1	1,008	0,747	1,910	34,596	30,905
2	1,008	0,629	1,972	34,674	30,802
3	1,010	0,410	2,135	34,615	30,821
4	1,009	0,252	2,487	34,505	30,637
5	1,011	0,217	2,501	34,568	30,658
6	1,000	1,538	2,512	34,338	26,295
7	0,996	2,074	2,519	35,700	24,747
8	0,996	1,882	2,519	36,458	23,916
9	0,996	1,786	2,519	36,796	23,527
10	0,997	1,621	2,492	34,663	20,586
11	0,996	1,543	2,514	34,975	20,500
12	0,995	1,500	2,519	35,422	20,577
13	0,996	1,473	2,519	35,905	21,047

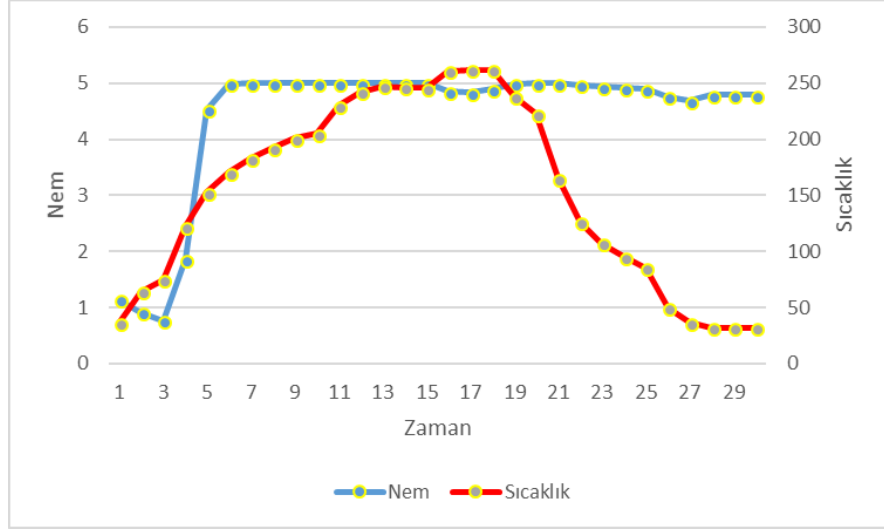
Çizelge 4.3.(devam). Adsorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değerleri (28-06/29-06)

14	0,996	1,450	2,514	36,267	21,310
15	0,997	1,382	2,499	37,324	22,037
16	0,997	1,369	2,492	37,536	22,301
17	0,997	1,189	2,369	36,718	22,963
18	0,997	1,188	2,367	36,684	23,042
19	0,997	1,186	2,367	36,573	23,019
20	0,994	1,161	2,349	35,594	23,900
21	0,995	1,161	2,347	35,540	24,045
22	0,995	1,153	2,347	35,520	24,049
23	0,993	1,134	2,334	34,466	24,999
24	0,993	1,129	2,334	34,408	25,063
25	0,993	1,129	2,334	34,376	25,110
26	0,991	1,121	2,328	33,563	25,930
27	0,992	1,119	2,329	33,535	25,920

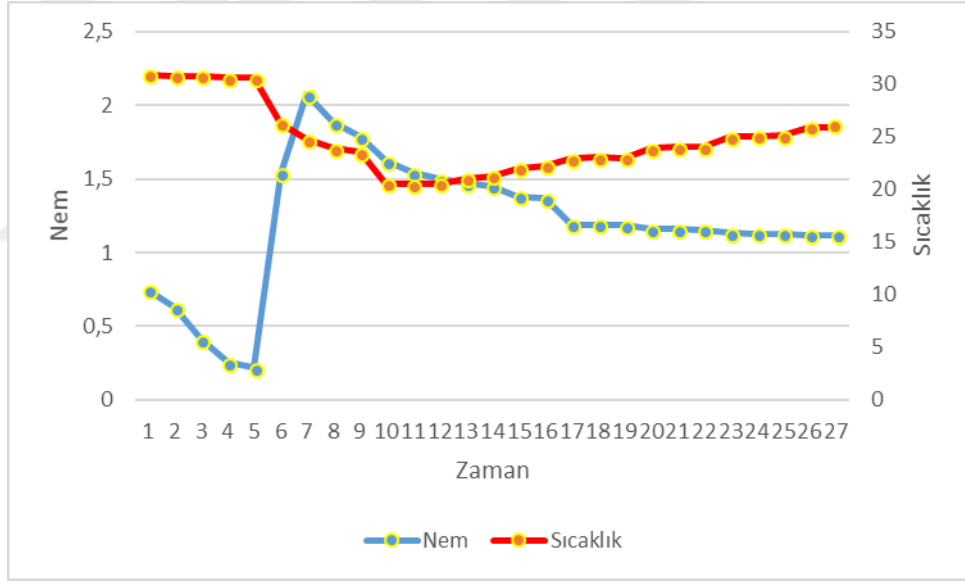
Desorpsiyon aşamasında ise 3 adet ısıtıcı yelek ile ısıtma işlemi gerçekleştirildi. Isıtıcı yelek sıcaklıkları 350 °C sıcaklıkta tutulurken yatak sıcaklığı kararlı hale geldiğinde yaklaşık 260°C sıcaklık değeri okunmuştur. Desorpsiyon işlemi sona erdiğinde buharlaştırıcı haznede 186,4 gr suyun yoğuştuğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Desorpsiyon süreci basınç, sıcaklık ve nem değerleri (29-06/02-07)

Zaman	101- Artı Basınç (VDC)	102- Kondenser Giriş Nem (VDC)	103- Kondenser Giriş Sıcaklık (VDC)	106- Yatak Sıcaklık (C)	107- Buharlaştırıcı Sıcaklık (C)
1	0,989	1,139	2,337	36,142	27,255
2	0,989	0,908	2,382	64,316	28,038
3	0,990	0,765	2,412	74,596	28,423
4	0,686	1,859	2,489	122,421	28,729
5	0,563	4,526	2,551	152,570	29,089
6	0,419	4,991	2,577	170,587	28,755
7	0,340	5,003	2,601	183,279	29,454
8	0,320	5,003	2,626	192,218	30,124
9	0,306	5,003	2,606	201,009	30,467
10	0,295	5,003	2,656	204,801	30,804
11	0,272	5,003	3,135	230,297	31,369
12	0,238	5,003	2,832	242,223	32,301
13	0,175	5,003	2,611	247,155	35,121
14	0,156	5,003	2,842	246,528	34,377
15	0,122	5,003	2,774	246,040	33,752
16	0,016	4,852	2,804	260,874	36,056
17	0,012	4,837	2,701	262,188	32,949
18	0,027	4,900	2,606	261,777	33,525
19	0,141	4,988	2,587	238,055	34,026
20	0,262	5,003	2,592	222,687	33,586
21	0,275	5,003	2,608	165,329	33,760
22	0,278	4,973	2,544	126,060	33,774
23	0,277	4,940	2,524	107,125	33,308
24	0,277	4,920	2,509	95,182	33,112
25	0,278	4,900	2,496	85,521	33,093
26	0,274	4,762	2,449	49,558	32,533
27	0,270	4,681	2,444	36,912	31,976
28	0,243	4,787	2,489	31,895	32,088
29	0,242	4,792	2,489	31,811	32,024
30	0,242	4,794	2,489	31,753	31,948



Şekil 4.3. Adsorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi



Şekil 4.4. Desorpsiyon esnasında sıcaklık ve nem ilişkisi

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada adsorbent malzeme olarak zeolit 13X kullanan bir temel adsorpsiyonlu soğutma sistemi deney düzeneği imalatı yapılmıştır. İmalatı gerçekleştirilen bu soğutma sistemi için deneysel veriler ile performans katsayısı hesapları gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney düzeneği tek kademeli olarak çalışan adsorpsiyonlu soğutma sistemidir.

Tüm sistem bileşenlerin tasarımı ve imalatı dışarıdan hizmet alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinden veri alınması konusunda tüm sensör bağlantılarının veri toplama cihazı ile olan bağlantıları yapılmıştır. Sistemden alınan veriler bir dakikalık zaman aralıklarında kayıt altına alınmıştır.

Deney düzeneği Şekil 3.29' da şematik olarak gösterildiği üzere adsorbent yatak, su haznesi, yoğuşturucu hat ve vakum pompası bağlantı hattı şeklinde özetlenebilir. Deney düzeneğinde vakum esnasında negatif basınç değeri, desorpsiyon esnasında adsorbent yatak sıcaklığı, ısıtıcı sıcaklığı, adsorbent yatak çıkışında nem, sıcaklık ve basınç değerleri okunmaktadır. Adsorbent yatağının ısıtılması esnasında aynı anda yoğuşma süreci de başlamış olduğundan su haznesinde yoğuşan su miktarı ve bu haznenin iç ortam sıcaklığı da kayıt altına alınmaktadır.

Araştırma Bulguları bölümünde verilen veriler iki ayrı tam çevrim üzerinden alınan verilerdir. Bu veriler üzerinde detaylı incelemeler yapıldığında iki farklı deney arasında buharlaştırıcı haznede sıcaklık düşümü ve yoğuşan su kütlelerinde farklılıklar olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 ile başlayan adsorpsiyon olayında başlangıçta sistem vakum değerinin $7,6 \times 10^{-3}$ bar' dır. Bu şartlarda başlanılan deney sonucunda buharlaştırıcıdan yoğuşturulan su kütlesi miktarı 87,2 gr' dır. Normal şartlarda beklenen, yoğuşan bu su kütlesinin desorpsiyon aşamasında buharlaştırıcı haznede yeniden toplanmasıdır. Fakat desorpsiyon aşamasına gelindiğinde yoğuşturucuda 132,6 gr suyun biriktiği tespit edilmiştir. Buradan yapılacak yorumda adsorpsiyon esnasında hazneden alınan

su kütlesinin yanında desorpsiyon aşamasında adsorbent malzemede önceden var olan neminde açığa çıkması olmuştur. Zeolit yapısı gereği yaklaşık 250°C sıcaklıkta yeteri kadar bekletilmesi sonucunda ihtiva ettiği nemi bırakmaktadır. Bu noktada mevcut yatak tasarımı içerisinde zeolitin kararlı hal sıcaklığının desorpsiyon sıcaklığında yeteri kadar tutamadığımız kanısına varılmıştır. Ortaya çıkan bu tespit sonucunda adsorbent yatak üzerinde bulunan iki adet ısıtıcı sayısı üçe çıkarılmış ve ısıtıcılar yatak içerisinde kararlı hal sıcaklığı 250°C sıcaklığa ulaşmaya kadar yaklaşık 350°C sıcaklık verecek şekilde kontrol panosundan ayarlanmıştır. Bu değişiklik ile izosterik soğutma süreci sonunda adsorbent yatakta neminden tamamen kurtulmuş zeolit 13X maddesine sahip olunmuştur.

Ayrıca adsorpsiyon sürecinin iyileştirilmesinde vakum değeri etkisi görülmüş ve vakum alma süresi uzatılarak sistem vakum değeri $6,4 \times 10^{-4}$ bar' a kadar düşürülmüştür. Buharlaştırıcı giriş ve çıkışında bulunan vanalar yer değiştirilerek hazne giriş çıkışlarının hemen önüne monte edilmiştir. Yapılan bu işlem ile vakum altında bulunan hacim miktarı arttırılmıştır. Ayrıca adsorpsiyon esnasında yatak ile hazne arasındaki vana açıldığında ortalama basınç değişimi azaltılmıştır. Arka arkaya verilen iki farklı çevrim değerleri arasında yoğuşan akışkan miktarında yaklaşık 60 gr bir artış gözlenmiştir.

İyileştirmeler neticesinde Çizelge 4.3' de verilen deneysel verilere ulaşılmıştır. Hem vakum değerinde hem de yoğuşan adsorbat miktarında gerçekleştirilen iyileştirmeler olumlu bir sonuç olarak buharlaştırıcı haznede sıcaklık düşümü şeklinde görülmüştür.

Sistem üzerinde önemli konu başlıklarından biri olan sızdırmazlık ve vakum konusunda deneyler esnasında bazı aksaklıklar ile karşılaşılsa da gerçekleştirilen flanş, kelepçe ve bakır conta uygulamaları ile sistem sızdırmazlığı sağlanmış ve sistem üzerinde istenilen basınç değerlerinin yakalanması ile hedeflediğimiz yoğuşma miktarlarına ve sıcaklık düşümlerine daha da yaklaşılmıştır.

Alınmış olan sonuçlar literatür bilgisi ile karşılaştırıldığında ortaya sıcaklık ve yoğuşan akışkan kütlesi değerleri arasında bir fark olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sürerken aynı zamanda bu farkların kaynaklanma sebepleri belirlenmeye

çalışılmıştır. Yukarıda yatak sıcaklıkları ile ilgili verilen bilgilerde ısıtma konusunda bazı dezavantajlar olduğu görülmektedir. Buradan çıkacak sonucun ısıtıcının hazne içerisinde tasarlanması ve her iki yönde de hazne içerisinde ısı akışının gerçekleşmesi sağlanmasıdır. Bu durum ileriki çalışmalar için göz ardı edilmemesi gereken bir durum olarak not edilmiştir.

Hazne içerisindeki ortalama sıcaklığın 250°C civarında olmasını sağlarken elbette hazne içerisindeki sıcaklık dağılımı da çok önemlidir. Yoğuşturulan su miktarlarına bakıldığında yatak içerisindeki adsorbent malzemenin büyük bir bölümünde su buharı uzaklaştırmasının gerçekleşmediği görülmüştür. Bu durumun nedeni yatak içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilememesindedir.

Alınan sonuçlar ve yapılan termodinamik hesaplamalar ile sistem performans katsayısı hesaplamaları yapılmıştır. Sistem performans katsayısı 0,2 civarında hesaplanmıştır. Literatür ile alınan değerler arasında bir fark olduğu görülmüştür. Tam performanslı çalışan bir sistem ile tasarlanan sistem arasında oluşan bu performans değeri farkının bazı küçük ek imalatlar ile düzeltilebilecektir.

Sıcaklık düşümlerinin beklenen düzeyde gerçekleşmemesinin sebepleri olarak sistem üzerindeki vakum kaçaklarının çok sınırlı olsa var olması, su haznesi boyutlarının büyük olması, su haznesi ve adsorbent haznesi bağlantılarının uzun ve çok sayıda bağlantı ekipmanlarından oluşuyor olması, hazne ve bağlantı ekipmanlarının yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip alüminyum malzemeden yapılmış olması ve sıcaklık sensörlerinin haznelere bir koruyucu içerisinde salınmış olması sayılabilir.

Buharlaştırıcı hazne ile yatak bağlantı noktası arasında imalattan kaynaklı mesafe, adsorpsiyon için olumsuz etki göstermektedir. Buharlaştırıcı haznenin adsorbent yatağın hemen altına alınması önemlidir. Bu sayede hem akışkanın kat ettiği yol kısalmak hem de yatak ile hazne arasındaki vana açılıp adsorpsiyon süreci başladığında sistem toplam basıncında pozitif yönlü artışın daha az olacağı beklenilmektedir.

Proje kapsamında imalatı gerçekleştirilen buharlaştırıcı hazne tasarımında da değişiklik yapılması gerektiği belirlenmiştir. Mevcut tasarımda hazne çapı yüksekliğe oranla küçüktür. Buda adsorpsiyon anında su temas yüzey alanının küçük olduğu anlamına gelmektedir. Çap yükseklik oranı 1:3 oranında olacak şekilde bir hazne tasarımı yapılması gerekliliği tespit edilmiştir. Temas yüzey alanı artırılarak buharlaşan kütle miktarının artacağı bu sayede de sistemde elde edilen en düşük sıcaklık değerinin hedeflenen değere yaklaşacağı tespiti yapılmıştır.

Sonuç olarak çalışma başlangıcında gerçekleştirilmek istenilen hedefler yakalanmıştır. Temel adsorpsiyonlu soğutma sistemi deney düzeneği kurulmuş ve başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon işlemleri hakkında ciddi bilgi kazanımı elde edilmiştir. Adsorpsiyonlu soğutma sistemi ve bileşenleri hakkında teorik bilgiler yanında deneysel çalışmalar sonucunda birçok tecrübe kazanılmıştır. Bu tecrübe ve uygulama becerileri ile adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin etkinliğini arttırabilecek ve performans değerlerini iyi düzeylere çekebilecek düzenlemeler hakkında oldukça fazla tecrübe edinilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] TEİAŞ. "Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu.",2016
- [2] Horuz, İ., "Absorpsiyonlu Isı Yükselticisi Takviyeli Çift Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri,"11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir,801-813, 2013.
- [3] Bataineh, K. M.,Alrifai, S., "Recent Trends In Solar Thermal Sorption Cooling System Technology," Advances in Mechanical Engineering,7 (5),1-20, 2015.
- [4] Singh, V. K.,Kumar, E. A., "Thermodynamic Analysis Of Single-Stage And Single-Effect Two-Stage Adsorption Cooling Cycles Using Indigenous Coconut Shell Based Activated Carbon-CO2 Pair," International Journal of Refrigeration,84,238-252, 2017.
- [5] Xu, S. Z., Wang, R. Z.,Wang, L. W., "Temperature–Heat Diagram Analysis Method For Heat Recovery Physical Adsorption Refrigeration Cycle – Taking Multi-Stage Cycle As An Example," International Journal of Refrigeration,74,254-268, 2017.
- [6] Li, T. X., Wang, R. Z.,Li, H., "Progress In The Development Of Solid–Gas Sorption Refrigeration Thermodynamic Cycle Driven By Low-Grade Thermal Energy," Progress in Energy and Combustion Science,40,1-58, 2014.
- [7] Demir, E.,Yalçın, H., "Adsorbentler: Sınıflandırma, Özellikler, Kullanım ve Öngörüler," Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi 7 (2),70-79, 2014.
- [8] Wang, R., Wang, L.,Wu, J., Adsorption Refrigeration Technology, 514, Wiley, 2014.

- [9] Henninger, S. K., Munz, G., Ratzsch, K. F. et al., "Cycle stability of sorption materials and composites for the use in heat pumps and cooling machines," *Renewable Energy*,36 (11),3043-3049, 2011.
- [10] Demir, H., "An Experimental And Theoretical Study On The Improvement Of Adsorption Heat Pump Performance," Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 2008.
- [11] Demir, H., Mobedi, M.,Ülkü, S., "Adsorpsiyonlu Isı Pompaları,"VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi,535-545. 2005.
- [12] Gupta, Y., "Research And Development Of A Small- Scale Adsorption Cooling System," Doktora Tezi, Arizona Devlet Üniversitesi, Arizona, 2011.
- [13] Yakar, G., Karabacak, R.,Altan, B. D., "Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri İle Mekanik Sıkıştırılmalı Soğutma Sistemlerinin Etkinlik Ve Ekserji Verimlilikleri Yönünden Karşılaştırılmaları," Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 11 (2),161-169, 2005.
- [14] Corral, F., "Enhancement Of Heat Transfer In An Adsorbent Bed," Yüksek Lisans Tezi, San Jose Eyalet Üniversitesi, Washington, 2001.
- [15] Solmuş, İ.,Yıldırım, C., "Adsorpsiyonlu Bir Soğutma Sisteminin Performansının Farklı Çalışma Çiftleri İçin Teorik Analizi," Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi,34 (2),29-37, 2014.
- [16] Qasem, N., "Thermodynamic Analysis And Modeling Study Of An Intermittent Solar Adsorption Refrigeration System," Yüksek Lisans Tezi, Kral Fahd Üniversitesi, Dhahran, 2013.
- [17] Orhan, B.,Güngör, A., "Adsorpsiyonlu Su Soğutucu Tasarımları Ve Uygulamaları,"X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi,1161-1169. 2011.

- [18] Chan, K. C., "Development of Carbon Nanotube Embedded Zeolite 13X/CaCl₂ Composite Adsorbent for Adsorption Cooling Systems," Doktora Tezi, Hong Kong Üniversitesi, Pokfulam, 2015.
- [19] San, J.-Y., Lin, W.-M., "Comparison among three adsorption pairs for using as the working substances in a multi-bed adsorption heat pump," *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008), 988-997, 2008.
- [20] Çağlar, A., "Design And Experimental Testing Of An Adsorbent Bed For A Thermal Wave Adsorption Cooling Cycle," Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [21] Rezk, A., Al-Dadah, R. K., Mahmoud, S. et al., "Effects Of Contact Resistance And Metal Additives In Finned-Tube Adsorbent Beds On The Performance Of Silica Gel/Water Adsorption Chiller," *Applied Thermal Engineering*, 53 (2), 278-284, 2013.
- [22] Stitou, D., Mazet, N., Mauran, S., "Experimental Investigation Of A Solid/Gas Thermochemical Storage Process For Solar Air-Conditioning," *Energy*, 41 (1), 261-270, 2012.
- [23] Wang, Y., Li, M., Ji, X. et al., "Experimental Study Of The Effect Of Enhanced Mass Transfer On The Performance Improvement Of A Solar-Driven Adsorption Refrigeration System," *Applied Energy*, 224, 417-425, 2018.
- [24] Wang, D. C., Xia, Z. Z., Wu, J. Y., "Design And Performance Prediction Of A Novel Zeolite–Water Adsorption Air Conditioner," *Energy Conversion and Management*, 47 (5), 590-610, 2006.
- [25] Vasta, S., Freni, A., Sapienza, A. et al., "Development and lab-test of a mobile adsorption air-conditioner," *International Journal of Refrigeration*, 35 (3), 701-708, 2012.

- [26] Horuz, İ., “Absorpsiyonlu Isı Yükselticisi Takviyeli Çift Kademeli Absorpsiyonlu Soğutma Sistemleri,” 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 2013.
- [27] Wang, Y., Li, M., Du, W. et al., “Experimental Investigation Of A Solar-Powered Adsorption Refrigeration System With The Enhancing Desorption,” *Energy Conversion and Management*,155,253-261, 2018.
- [28] Panyam, V. R.,Banker, N. D., “Thermodynamic Assessment Of A Gas Turbine Power Plant Integrated With An Adsorption Refrigeration System,” *Applied Thermal Engineering*,117,577-583, 2017.
- [29] Mitra, S., Thu, K., Saha, B. B. et al., “Performance Evaluation And Determination Of Minimum Desorption Temperature Of A Two-Stage Air Cooled Silica Gel/Water Adsorption System,” *Applied Energy*,206,507-518, 2017.
- [30] V, B.,C, M., “Performance Study Of A Two Stage Solar Adsorption Refrigeration System,” *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*,3, 2011.
- [31] Sah, R. P., Choudhury, B.,Das, R. K., “A Review On Adsorption Cooling Systems With Silica Gel And Carbon As Adsorbents,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,45,123-134, 2015.
- [32] Mitra, S., Kumar, P., Srinivasan, K. et al., “Instrumentation And Control Of A Two-Stage 4-Bed Silica Gel+Water Adsorption Cooling Cum Desalination System,” *Measurement*,79,29-43, 2016.
- [33] Ersoy, B., “Çeşitli Katyonik Yüzey Aktif Maddelerin Klinoptilolit (Doğal Zeolit) Üzerine Adsorpsiyon Mekanizmalarının İncelenmesi ve Modifiye Klinoptilolit İle Sıvılardaki Non-İyonik Organik Kirleticilerin Tutulması,” Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.

- [34] Kowalska, K., Ambrožek, B., “Modeling The Performance Of Water-Zeolite 13X Adsorption Heat Pump,” *Archives of Thermodynamics*, 38 (4), 191-207, 2017.
- [35] Soylu, M., Gökkuş, Ö., “Türkiye'deki Doğal Zeolitler Ve İyon Değişimi,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (1), 2017.
- [36] Bilgin, Ö., Koç, E., “Doğal Zeolitlerin Çevre Kirliliği Kontrolünde Kullanımı,” *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi* 6 (1), 169-174, 2013.
- [37] Yüksel, E. F., “Mikro Gözenekli Yapıların İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [38] Solmuş, İ., Kaftanoğlu, B., Yamalı, C. et al., “Experimental Investigation Of A Natural Zeolite–Water Adsorption Cooling Unit,” *Applied Energy*, 88 (11), 4206-4213, 2011.
- [39] Demir, H., Mobedi, M., Ülkü, S., “A review on adsorption heat pump: Problems and solutions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (9), 2381-2403, 2008.
- [40] Sayılğan, Ş. Ç., “Determination Of Characteristics Of Adsorbent For Adsorption Heat Pumps,” Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 2013.
- [41] Aristov, Y. I., “Challenging Offers Of Material Science For Adsorption Heat Transformation: A Review,” *Applied Thermal Engineering*, 50 (2), 1610-1618, 2013.
- [42] Akkoyunlu, T., Uzun, İ., “Adsorbsiyonlu Soğutma Sistemlerinde Zeolit- Su Buharı Isıl Performansının İncelenmesi,” *International Journal of Engineering Research and Development*, 9 (2), 104-110, 2017.