

# **Güneş Enerjisi Destekli Zeolit İklimlendirme Sistemi**

**Proje No: 105M244**

Prof.Dr. Bilgin KAFTANOĞLU  
Doç.Dr. Cemil YAMALI  
Yrd.Doç.Dr. Derek K. BAKER  
Arş.Gör. İsmail SOLMUŞ  
Arş.Gör. Ahmet ÇAĞLAR  
Arş.Gör. Onur TAYLAN

OCAK 2009  
ANKARA

## ÖNSÖZ

Bu projede, güneş enerjisi ve zeolit su ikilisinden oluşan yatak kullanılarak bir adsorpsiyonlu soğutma sistemi incelenmiştir. Öncelikle, zeolit su ikilisinin adsorpsiyon özellikleri bulunmuş ve bu bilgiler ışığı altında bir prototip sistem tasarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, zeolit su ikilisinin kullanıldığı adsorpsiyonlu sistemin performansı değerlendirilmiş ve sanayi tipi bir sistem için öneriler geliştirilmiştir. Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin teorik modellemesi de yapılmış ve değişik parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Ayrıca yerli üretilen düzlemsel güneş topaçlarının deneyleri yapılmış ve performansları belirlenmiştir.

Bu amaçla ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Isı Laboratuvarında bir deney düzeni oluşturulmuştur ve deneyler burada gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aynı laboratuvarın çatısında güneş topaçlarını denemek için de bir laboratuvar geliştirilmiştir.

Bu çalışma Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından 105M244 nolu proje çerçevesinde desteklenmiştir. ODTÜ tarafından da gerekli laboratuvar yeri tahsis edilerek, teknik personel sağlanarak ve bazı imalatlar yaptırılarak destek sağlanmıştır. Ayrıca, ATAÇ firması tarafından sağlanan desteklerle de bazı malzemeler ve destekler temin edilmiştir.

Projemizi destekleyen bütün kuruluşlara, proje ekibi adına şükranlarımızı sunarız.

Prof. Dr. Bilgin Kaftanoğlu

Proje yürütücüsü

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLolar.....	vi
ŞEKİLLER.....	viii
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM	
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1 Tanımlar.....	3
2.2 Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan çalışma çiftleri.....	5
2.3 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sisteminin çalışma prensibi.....	6
2.4 Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri için termodinamik döngüler.....	8
2.4.1 Basit ideal adsorpsiyonlu soğutma döngüsü.....	8
2.4.2 Isıl geri kazanımlı adsorpsiyonlu soğutma döngüsü.....	9
2.4.3 Kütle geri kazanımlı adsorpsiyonlu soğutma döngüsü.....	10
2.4.4 Termal dalga döngüsü.....	12
2.4.5 Konveksiyonlu termal dalga döngüsü.....	13
2.4.6 Çok-aşamalı ve kaskatlamalı döngü (Multi-stage and cascading cycle).....	14
2.5 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan toplaçlar	14
2.6 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri.....	15
2.6.1 Silika jel-su çalışma çiftini kullanan sistemler.....	15
2.6.2 Zeolit-su çalışma çiftini kullanan sistemler.....	17
2.7 Egsoz gazları ile desteklenen adsorpsiyonlu soğutma sistemleri.....	18
2.8 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu buz makinaları.....	20
2.9 Egsoz gazları ile desteklenen adsorpsiyonlu buz makinaları.....	21
2.10 Adsorban yatakta ısı ve kütle transferi bakımından iyileştirmeler.....	23
2.11 Sayısal modelleme çalışmaları.....	25
3. ADSORPSİYON DENEY DÜZENİĞİNİN TASARIMI VE İMALATI.....	26
3.1 Elektrikli fırın.....	28

3.2 Su banyosu.....	28
3.3 Zeolit kutusu.....	29
3.4 Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu.....	31
3.5 Vakum hattı.....	32
3.6 Veri kayıt ve kontrol cihazı.....	33
4. ADSORPSİYON DENEYLERİ.....	34
4.1 Zeolitin hazırlanışı.....	34
4.1.1 Yıkamadan ve fırınlamadan önce.....	34
4.1.2 Yıkamadan sonra fırınlamadan önce (ıslak zeolit).....	35
4.1.3 Doğal kurumadan sonra fırınlamadan önce.....	35
4.1.4 Fırınlama Sonrası.....	35
4.2 Adsorpsiyon deney prosedürü.....	36
4.3 Adsorpsiyon deney sonuçları.....	37
4.3.1 Adsorpsiyon dengesi.....	42
5. ÖRNEK SOĞUTMA GRUBU.....	45
5.1 Gövde-borulu adsorban yatak.....	46
5.2 Yoğuşturucu.....	51
5.3 Buharlaştırıcı.....	52
5.4 Isıtma ve soğutma banyoları.....	53
5.5 Ölçü cihazları.....	53
5.6 İlave sistem elemanları.....	54
6. ÖRNEK SOĞUTMA GRUBU ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER.....	56
6.1 Deney prosedürü.....	56
6.2 Deney sonuçları.....	57
7. GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİ.....	62
7.1 Ölçüm Cihazları.....	64
7.2 Kollektör test standartlar.....	65
7.3 Kollektör deney prosedürü.....	67
7.4 Kollektör verim değerleri ve verim eğrileri.....	68
7.4.1 Kollektör-1.....	70
7.4.2 Kollektör-2.....	70
7.4.3 Vakum borulu kollektör.....	71
7.5 Güneş tarafından desteklenebilecek enerji miktarları.....	73

7.6 Kollektör deney sonuçlar.....	73
8. MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	75
8.1 Modelin ayrıntılı açıklaması.....	76
8.1.1 Güneş Kollektörü.....	76
8.1.2 Isıtıcı.....	79
8.1.3 Dolaşım pompası.....	79
8.1.4 Kontrol ünitesi.....	80
8.1.5 Meteorolojik veri.....	80
8.1.6 Adsorpsiyon döngü modeli.....	80
8.2 Yapılan benzetimler.....	83
8.2.1 Kollektör modellerinin sağlanması.....	84
8.2.2 Sentetik ve doğal zeolitlerin karşılaştırma benzetimleri.....	86
8.2.3 Kararlı durum benzetimleri (Zamandan bağımsız yapılan benzetimler)....	87
8.2.4 Zamana bağlı yapılan benzetimler.....	92
9. GELECEK ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER.....	95

## TABLolar

Tablo 2.1	Bazı çalışma çiftlerinin adsorpsiyon ısıları.....	4
Tablo 4.1	Yıkamadan ve fırınlamadan önceki zeolit miktarı.....	35
Tablo 4.2	Yıkamadan sonra fırınlamadan önceki zeolit miktarı.....	35
Tablo 4.3	Fırınlama işleminin detayları.....	36
Tablo 4.4	Birinci set adsorpsiyon deney sonuçları.....	38
Tablo 4.5	Birinci set desorpsiyon deney sonuçları.....	39
Tablo 4.6	İkinci set adsorpsiyon deney sonuçları.....	40
Tablo 4.7	İkinci set desorpsiyon deney sonuçları.....	40
Tablo 4.8	Adsorpsiyon prosesi için farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen $x_0$ , k ve n değerleri.....	43
Tablo 4.9	Desorpsiyon prosesi için farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen $x_0$ , k ve n değerleri.....	44
Tablo 6.1	Buharlaştırıcı sıcaklığının 22.5 °C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri.....	59
Tablo 6.2	Buharlaştırıcı sıcaklığının 15 °C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri.....	60
Tablo 6.3	Buharlaştırıcı sıcaklığının 10 °C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri.....	60
Tablo 7.1	Deney sonuçlarının analiz edildiği örnek bir tablo (VBK: Vakum borulu kollektör).....	69
Tablo 7.2	Örnek günler için değişik kollektörlerden alınabilecek güneş enerjisi miktarları (kJ).....	73
Tablo 8.1	Kollektörlerin performans parametreleri.....	77
Tablo 8.2	Kollektörlerin diğer parametreleri.....	77
Tablo 8.3	Kollektörlerin geliş açısı değiştiricileri.....	78
Tablo 8.4	Vakum tüplü kollektörün parametreleri.....	78
Tablo 8.5	Isıtıcı parametreleri.....	79
Tablo 8.6	Dolaşım pompası parametreleri.....	80
Tablo 8.7	Feniş kollektör modelinin sağlanması.....	84
Tablo 8.8	Solimpeks kollektör modelinin sağlanması.....	85

Tablo 8.9	Viessmann kolektör modelinin sağlanması.....	85
Tablo 8.10	İncelenen durumlar.....	87
Tablo 8.11	İncelenen durumlar.....	93

## ŞEKİLLER

Şekil 2.1	Zeolit 13x-su çiftinin adsorpsiyon eş sıcaklık (izoterm) eğrileri.....	4
Şekil 2.2	Basit adsorpsiyonlu soğutma sistemi.....	7
Şekil 2.3	Clapeyron diyagramı.....	9
Şekil 2.4	Isıl geri kazanımlı iki adsorban yatağa sahip soğutma sistemi.....	10
Şekil 2.5	Isıl geri kazanımlı döngüye ait Clapeyron diyagramı.....	10
Şekil 2.6	Kütle ve ısıl geri kazanımlı döngüye ait Clapeyron diyagramı.....	11
Şekil 2.7	Kütle/ısıl ve kütle geri kazanımlı döngü.....	11
Şekil 2.8	Termal dalga döngüsü.....	12
Şekil 2.9	Konveksiyonlu termal dalga döngüsü.....	13
Şekil 2.10	Soğutma sisteminin şematik çizimi ve deneysel prototipin genel görünüşü.....	16
Şekil 2.11	Soğuk hava deposu.....	17
Şekil 2.12	Sistemin şematik çizimi ve genel görünüşü.....	18
Şekil 2.13	Soğutma sisteminin şematik çizimi ve genel görünüşü.....	18
Şekil 2.14	Soğutma sisteminin şematik çizimi ve genel görünüşü.....	19
Şekil 2.15	Soğutma sisteminin genel görünüşü.....	19
Şekil 2.16	Adsorpsiyonlu buz makinasının şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.17	Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.18	Adsorpsiyon deney düzeneği.....	22
Şekil 2.19	Adsorpsiyonlu buz makinasının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.20	İki farklı adsorban türünün adsorpsiyon performansları.....	24
Şekil 3.1	Adsorpsiyon deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.2	Adsorpsiyon deney düzeneğinin genel görünüşü.....	27
Şekil 3.3	Elektrikli fırın.....	28
Şekil 3.4	Su banyosu.....	29
Şekil 3.5	Zeolit kutusu.....	31
Şekil 3.6	Veri kayıt ve kontrol cihazı.....	33
Şekil 4.1	Birinci deney setine ait eş sıcaklık eğrileri.....	39
Şekil 4.2	İkinci deney setine ait eş sıcaklık eğrileri.....	41
Şekil 4.3	Birinci ve ikinci deney setine ait adsorpsiyon eş sıcaklık eğrileri.....	41



Şekil 4.4	Birinci ve ikinci deney setine ait desorpsiyon eş sıcaklık eğrileri.....	42
Şekil 5.1	Örnek soğutma grubunun şematik gösterimi.....	45
Şekil 5.2	Örnek soğutma grubunun genel görünüşü.....	46
Şekil 5.3	Gövde-borulu adsorban yatağın genel görünüşü.....	47
Şekil 5.4	Gövde borulu adsorban yatağın şematik gösterimi.....	48
Şekil 5.5	Boru tipi adsorban yatağı oluşturan elemanlara.....	49
Şekil 5.6	Boru tipi adsorban yatağın şematik gösterimi.....	50
Şekil 5.7	Yoğuşturucu.....	52
Şekil 5.8	Buharlaştırıcı.....	52
Şekil 7.1	Solimpeks markalı güneş kollektörü.....	62
Şekil 7.2	Feniş markalı güneş kollektörü.....	63
Şekil 7.3	Kollektör test düzeneğinin şematik görünümü.....	63
Şekil 7.4	Kollektör test düzeneğinin genel görünüşü.....	64
Şekil 7.5	1-Nolu debi ölçerin değişik sıcaklıklar için kalibrasyon eğrileri.....	64
Şekil 7.6	2-Nolu debi ölçerin değişik sıcaklıklar için kalibrasyon eğrileri.....	65
Şekil 7.7	1-Nolu kollektörün verim eğrisi (1,6269 m <sup>2</sup> cam yüzey alanı için).....	70
Şekil 7.8	2-Nolu kollektörün verim eğrisi (1,912 m <sup>2</sup> cam yüzey alanı için).....	71
Şekil 7.9	Viessmann marka vakum borulu güneş kollektörü.....	72
Şekil 7.10	Vakum borulu kollektörün verim eğrisi (2 m <sup>2</sup> soğurucu alanı için).....	72
Şekil 8.1	TRNSYS analiz modelinin şematik gösterimi.....	75
Şekil 8.2	Düz panel kollektör içeren TRNSYS modeli.....	82
Şekil 8.3	Vakum tüplü kollektör içeren TRNSYS modeli.....	82
Şekil 8.4	TRNSYS yazılımında MATLAB model entegrasyonu.....	83
Şekil 8.5	Zeolit tiplerinin karşılaştırma sonuçları.....	86
Şekil 8.6	Feniş kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10).....	88
Şekil 8.7	Solimpeks kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10).....	90
Şekil 8.8	Viessmann kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10).....	90
Şekil 8.9	Viessmann kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=0).....	91
Şekil 8.10	Viessmann kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=0, T <sub>cond</sub> =35 °C).....	91
Şekil 8.11	Viessmann kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=0, T <sub>cond</sub> =20 °C).....	92
Şekil 8.12	Solimpeks kollektörünün zamana bağlı benzetim sonuçları (R=10).....	93

Şekil 8.13	Viessmann kollektörünün zamana bağlı benzetim sonuçları (R=10).....	94
Şekil 9.1	Endüstriyel adsorpsiyonlu soğutma grubunun şematik gösterimi.....	98
Şekil 9.2	Endüstriyel prototip için düşünülen adsorban yatağın şematik çizimi.....	97

## ÖZET

Güneş enerjisi ekonomik, temiz ve yenilenebilir bir enerji türüdür. Çevresel faktörler ve artmakta olan enerji talepleri dikkate alındığında bu enerji türünün kullanımı büyük önem kazanmaktadır. Güneş enerjili adsorplanmalı soğutma (GEAS) sistemleri gelecekte yaygın olarak kullanılması düşünülen ve ticarileşmesi için yoğun bir şekilde çaba sarf edilen termal enerji destekli soğutma sistemlerindedir. Bu sistemlerin başarılı bir şekilde çalışması büyük ölçüde adsorban- adsorplanan çiftinin doğru seçimine bağlıdır. Zeolit-su, zeolit-organik soğutucular, silika jel-su ve activated karbon-methanol katı adsorplanmalı güneş enerjili soğutma sistemlerinde kullanılacak uygun adsorban- adsorplanan çiftlerinden bazılarıdır.

Adsorban malzemenin adsorplama kapasitesi,  $x=f(P, T)$ , adsorpsiyon basıncı ve adsorban malzemenin sıcaklığı ile değişmektedir ve bu değişim çoğunlukla eş sıcaklık eğrileri çizilerek ifade edilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak, zeolit-su çalışma çiftine ait eş sıcaklık eğrilerini elde etmek için adsorpsiyon deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Daha sonra, bu düzenek üzerinde bir takım deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, zeolit-su çalışma çiftine ait eş sıcaklık eğrileri, adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için farklı adsorban sıcaklıkları (40-150 °C) ve adsorpsiyon basınçları (0.87-7.38 kPa) altında deneysel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için elde edilen eş sıcaklık eğrilerine Dubinin–Astakhov denklemi uyarlanmıştır. İkinci olarak, adsorpsiyon deneylerinden elde edilen sonuçlar çerçevesinde, zeolit-su çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu örnek soğutma grubu tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, adsorpsiyonlu örnek soğutma grubunun termal performansı farklı buharlaştırıcı sıcaklıklarında deneysel olarak incelenmiştir. Desorpsiyon süreci sırasında zeolit yatağının yenilenmesi için gerekli enerji, güneş enerjisi yerine elektrik enerjisiyle ısıtılan ısı transfer sıvısının gövde ile adsorban yatak arasında dolaştırılmasıyla sağlanmıştır. Diğer bir ifade ile güneş enerjisi elektrik enerjisi kullanılarak benzeştirilmiştir. Deneyler sonucunda, soğutma grubunun COP değeri ortalama 0, 25 olarak bulunmuştur. Son olarak, GEAS sistemlerini başarısı çalışma çiftinin doğru seçiminin yanı sıra sistemde kullanılacak güneş toplaçlarının performansına ve ekonomik maliyetinede büyük ölçüde bağlıdır. Dolayısıyla bu çalışmada, soğutma sisteminin güneş enerjisi destekli olması sebebiyle bir yıl boyunca düzlemsel ve vakumlu boru tipi güneş toplaçlarının performansı Ankara ili iklim koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, güneş enerjisi destekli zeolit-su çalışma çiftini kullanan

adsorpsiyonlu soğutma sisteminin yıllık analizlerini yapmak üzere TRNSYS programı yardımıyla sayısal bir model tasarlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi; Adsorpsiyonlu soğutma; Zeolit

## ABSTRACT

Solar energy is economical, clean and renewable. The use of solar energy is gaining more attention due to environmental factors and increasing demand for energy. Solar powered adsorption cooling (SPAC) systems are considered to have a large potential for use in the future and extensive efforts have been expended to make the thermal powered adsorption cooling systems commercial. The successful operation of these systems mostly depends on the correct choice of the adsorbent-adsorbate working pair. Zeolite-water, zeolite-organic refrigerants, silica gel-water and activated carbon-methanol are some of the suitable adsorbent-adsorbate pairs that can be used in solar powered adsorption cooling systems.

Adsorption capacity of the adsorbent material,  $x=f(P, T)$ , varies with the adsorption pressure and adsorbent temperature and this variation is commonly represented by isotherms of the adsorbent investigated. In this study, firstly, an adsorption experimental set-up was designed and constructed to obtain the isotherms of a natural zeolite-water working pair. After that, a set of experiments was conducted using this set-up. As a result of these experiments, isotherms of the zeolite-water pair were obtained experimentally under various adsorbent temperatures (40-150 °C) and adsorption pressures (0.87-7.38 kPa). In addition, the Dubinin–Astakhov equation was used to fit the isotherm data that were obtained for adsorption and desorption processes. Secondly, within the framework of the results of the adsorption experiments, a prototype of the solar powered adsorption cooling system using the natural zeolite-water working pair was designed and constructed. Afterwards, the thermal performance of the prototype was investigated experimentally under different evaporation temperatures. In these experiments, during the desorption process, the solar energy that is needed to dry out the saturated adsorbent was simulated by using electrical energy. As a result, the average COP value of the prototype studied was found as 0,25. Finally, in addition to the correct choice of the adsorbent-adsorbate pair, the success of the (SPAC) systems depends largely on the thermal performance and cost of the solar collectors. Therefore, in this study, the performance of flat plate and evacuated tube collectors were investigated under the climatic conditions of Ankara for one year. Additionally, a numerical model of the solar powered adsorption cooling system using zeolite-water pair was developed with the help of the TRNSYS program to analyze the annual performance of this system.

Keywords: Solar energy; Adsorption cooling; Zeolite

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Güneş enerjisi ekonomik, temiz ve yenilenebilir bir enerji türüdür. Çevresel faktörler ve artmakta olan enerji talepleri dikkate alındığında bu enerji türünün kullanımı büyük önem kazanmaktadır. Güneş enerjisinden faydalanarak soğutma yapmak cazip bir fikir olarak düşünülebilir. Çünkü yaz aylarında artmakta olan soğutma yüküne bağlı olarak güneşten elde edebileceğimiz enerji miktarı da maksimum değerine ulaşmaktadır. Günümüze kadar farklı çalışma prensiplerine sahip çok sayıda güneş enerjisi destekli soğutma sistemi önerilmiştir. Bu sistemlere örnek olarak sıvı/buhar, katı/buhar absorplanmalı, adsorplanmalı, buhar sıkıştırılmalı ve fotovoltatik- buhar/sıkıştırılmalı sistemler gösterilebilir (SUMATHY, 2003). Güneş enerjili soğutma sistemlerini, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan geleneksel buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemleri ile karşılaştırdığımızda bu sistemlerin sahip olduğu avantajları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Enerji tasarrufu sağlamaları
- Kullandıkları aracı akışkanın çoğunlukla çevreci olması
- Sessiz çalışmaları
- Bakım giderlerinin düşük olması

Fakat güneş enerjisi destekli soğutma sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, performans katsayılarının (COP) ve soğutma gücü kapasitelerinin (SCP) değer olarak düşük olması nedeni ile bu sistemler şimdilik buhar sıkıştırılmalı sistemler ile rekabet edebilecek düzeyde değildirler. Dolayısıyla bu sistemlerin ilk yatırım maliyetlerinin düşürülmesi, COP ve SCP değerlerinin yükseltilmesi ile ticarileşmesinin önündeki engeller büyük ölçüde kaldırılmış olacaktır.

Güneş enerjili adsorplanmalı soğutma (GEAS) sistemleri gelecekte yaygın bir şekilde kullanılması düşünülen ve ticarileşmesi için yoğun bir şekilde çaba sarf edilen termal enerji

destekli soğutma sistemlerindedir. Bu sistemlerin başarılı bir şekilde çalışması büyük ölçüde adsorban- adsorplanan (adsorbent – adsorbate) çiftinin doğru seçimine bağlıdır. Zeolit-su, zeolit-organik soğutucular, silika jel-su ve aktifleştirilmiş karbon-methanol katı adsorplanmalı güneş enerjili soğutma sistemlerinde kullanılabilecek uygun adsorban- adsorplanan (adsorbent – adsorbate) çiftlerinden bazılarıdır (SUMATHY, 2003).

Türkiye’ de artan nüfusa ve büyüyen turizm sektörüne bağlı olarak soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin kullanımı, özellikle ülkenin Ege ve Akdeniz kıyılarında giderek yaygınlaşmaktadır. Diğer taraftan, Türkiye’ deki soğutma taleplerinin büyük bir kısmı yoğun elektrik enerjisi tüketen geleneksel buhar sıkıştırımlı sistemlerle karşılanmaktadır ve soğutma amaçlı olarak konutlarda ve turizm sektöründe kullanılan elektrik enerjisi miktarı buralarda tüketilen toplam elektrik enerjisi miktarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, yaz aylarında, soğutma yüküne bağlı olarak konutlarda ve turizm sektöründe tüketilen elektrik enerjisi miktarında hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Bu durumda, artmakta olan elektrik enerjisi talebinin karşılanması için yeni enerji santrallerinin (nükleer, doğal gaz, linyit, hidrolik v.b) inşa edilmesi gerekmektedir. Fakat bu çözüm yolu hem ekonomik hemde sürdürülebilir değildir. Dolayısı ile alternatif çözüm yollarına gerek duyulmaktadır. Soğutma ve iklimlendirme kaynaklı enerji tüketimi, güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin bu bölgelerde kullanımı ile düşürülebilir. Diğer taraftan, Doğu ve Güney Doğu Anadolu bölgelerinde yaz aylarında yaşanan iklim koşulları ve bu bölgelerin ekonomik gelişmişlik durumu göz önünde bulundurulduğunda hem bu bölgelerde yaşayan insanların yaşam koşullarının iyileştirilmesi, hem de tarım ürünlerinin saklanabilmesi için işletme ve bakım maliyetleri oldukça düşük olan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, Türkiye geniş doğal zeolit ve güneş enerjisi kaynaklarına sahiptir (KAFTANOĞLU, 2005). Bu durum, güneş enerjili adsorplanmalı soğutma sistemlerinin kullanımını mümkün kılmaktadır.



## BÖLÜM 2

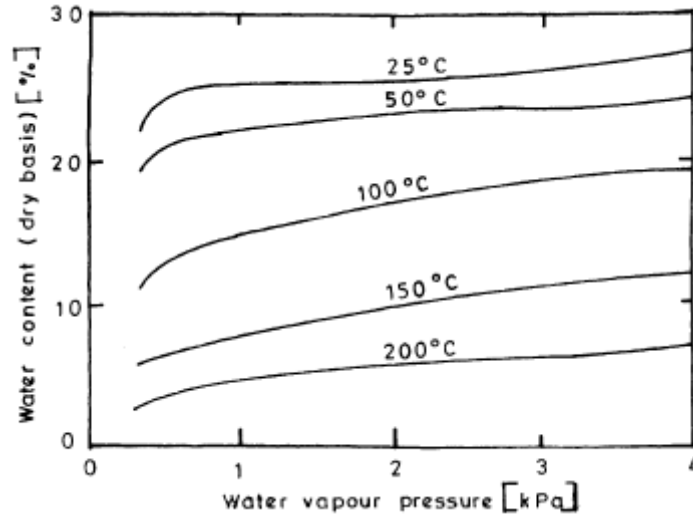
### KAYNAK TARAMASI

#### 2. 1. Tanımlar

Bir gaz, sıvı veya homojen bir karışımın katı bir yüzey tarafından depo edilmesi adsorpsiyon olarak isimlendirilir. Adsorpsiyon sürecinde depo edilen malzeme adsorplanan, depo eden malzeme ise adsorban olarak adlandırılır. Bu durumda zeolit-su çalışma çifti için adsorplanan su adsorban ise zeolit olmaktadır.

Adsorpsiyon süreci, adsorpsiyon sırasında adsorplanan molekülleri ile adsorban malzeme arasında oluşan bağ kuvvetlerine bağlı olarak kimyasal veya fiziksel olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel adsorpsiyonda adsorplanan molekülleri ile adsorban malzeme arasında oluşan bağlar zayıftır ve bu yüzden fiziksel adsorpsiyon süreci tersinirdir. Diğer bir ifade ile adsorban malzeme tarafından fiziksel olarak adsorb edilen adsorplanan molekülleri daha sonra adsorban malzemeye ısı uygulanarak serbest bırakılabilirler (desorpsiyon). Fakat kimyasal adsorpsiyonda adsorplanan molekülleri ile adsorban malzeme arasındaki bağlar çok kuvvetlidir. Dolayısı ile kimyasal adsorpsiyon süreci tersinmezdir. Sonuç olarak, fiziksel adsorpsiyon süreci tersinir olması nedeni ile termal sistemlerde ve soğutma makinalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yükleme ( $C_{\mu}$ ), adsorban malzeme tarafından adsorb edilen adsorplanan miktarının ölçüsüdür. Adsorplananın adsorbana mol/kütle veya kütle/kütle olarak oranıdır. Örneğin, zeolit-su çifti için bu oran su kütesinin ( $m_{H_2O}$ ) zeolite kütesine ( $m_{zeolit}$ ) bölümüdür. Tam yükleme ( $C_{\mu,s}$ ), belirli bir adsorban sıcaklığı ve adsorplanan buhar basıncındaki maksimum yükleme miktarıdır. Kısmi yükleme ( $\Theta = C_{\mu} / C_{\mu,s}$ ) ise yüklemenin tam yüklemeye bölümüdür. Zeolit-su çifti için tam yükleme miktarı zeolit sıcaklığı ve kısmi su buhar basıncı ile değişmektedir ve bu değişim çoğunlukla eş sıcaklık eğrileri çizilerek ifade edilmektedir (ANYANWU, 2004).



Şekil 2.1 Zeolit 13x-su çiftinin adsorpsiyon eş sıcaklık (izoterm) eğrileri (ANYANWU, 2004)

Tablo 2.1 Bazı çalışma çiftlerinin adsorpsiyon ısıları.

	Adsorbate	Heat of adsorption (kJ/kg)	Density of the adsorbate (kg/m <sup>3</sup> )	Application area
Activated alumina	H <sub>2</sub> O	2800	1000	Used mostly for desiccant cooling
	H <sub>2</sub> O	3000		Water is perfect, except for very low operating pressure
Zeolite (various grades)	H <sub>2</sub> O	3300-4200		Natural zeolites have lower values than synthetic zeolites
	NH <sub>3</sub>	4000-6000	681	
	CO <sub>2</sub>	800-1000	-	
Silica gel	CH <sub>3</sub> OH	2300-2600	791	Not suitable above 200°C
	Methyl alcohol	1000-1500	703	
Charcoal			789	Reacts at ca 100°C. Ammonia and methanol are not compatible with copper at high temperature
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1000-1200		
	NH <sub>3</sub>	2000-2700		
	H <sub>2</sub> O	2300-2600		
	CH <sub>3</sub> OH	1800-2000		
Calcium chloride	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	1200-1400		Used for cooling
Metal hydrides	CH <sub>3</sub> OH			For air-conditioning
Complex compounds	Hydrogen			Refrigeration
	Salts and ammonia or water			

Adsorpsiyon süreci sırasında bir miktar ısı açığa çıkar ve açığa çıkan bu ısı adsorpsiyon ısısı olarak isimlendirilir. Adsorpsiyon ısısı ile adsorplananın buhar fazından sıvı fazına geçişi (yoğuşma) sırasında açığa çıkan ısı arasında benzerlik vardır. Adsorpsiyon ısısı genellikle

adsorplananın yoğuşması sırasında açığa çıkan ısı miktarından yüzde 30–100 arasında daha fazladır. Tablo 2.1’ de bazı çalışma çiftlerinin adsorpsiyon ısıları verilmiştir (DIENG, 2001). Adsorpsiyon sırasında açığa çıkan ısı miktarı ya adsorpsiyon izotermelerinden ya da kalorimetrik method kullanılarak deneysel olarak elde edilir.

Desorpsiyon süreci sırasında emilen ısı miktarı desorpsiyon ısısı olarak adlandırılır. Desorpsiyon ısısı ile adsorplananın sıvı fazından buhar fazına geçişi (buharlaşma) için gerekli ısı arasında benzerlik vardır. Sabit sıcaklıkta faz değişimi sırasında buharlaşma ve yoğuşma ısıları birbirine eşittir. Fakat adsorpsiyon ve desorpsiyon ısıları, her iki süreçte tersinir olduğu durumda birbirine eşittir. Güneş enerjisi destekli adsorplanmalı soğutma sistemlerinde, desorpsiyon ısısının temininde güneş toplaçları kullanılmaktadır.

## **2.2 Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan çalışma çiftleri**

Adsorpsiyonlu bir sisteminin başarılı bir şekilde çalışması için çalışma çiftinin (adsorban-adsorplanan) doğru olarak seçilmesi gerekmektedir. Çünkü sistemin performansı büyük ölçüde sistemde kullanılan çalışma çiftine bağlıdır.

Adsorbanın seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitesine sahip olmalıdır
- Çevrim süresini kısaltmak için yüksek bir ısı iletim katsayısına sahip olmalıdır
- Özgül ısı kapasitesi düşük olmalıdır
- Seçilen aracı akışkan ile kimyasal olarak uyumlu olmalıdır
- Maliyeti düşük ve kolayca elde edilebilir olmalıdır
- Zamana ve kullanıma bağlı olarak bozulma göstermemelidir

Adsorplananın seçiminde dikkat edilmesi gereken faktörler ise aşağıdaki gibidir;

- Gizli buharlaşma ısısı yüksek olmalıdır
- Buharlaşma sıcaklığı 0 °C nin altında olmalıdır

- Normal çalışma sıcaklığında doyma basıncı düşük (atmosfer basıncının biraz üstünde) olmalıdır
- Moleküler boyutları yeterince küçük olmalıdır
- Isı iletim katsayısı yüksek olmalıdır
- Viskozitesi düşük olmalıdır
- Özgül ısı kapasitesi düşük olmalıdır
- Zehirli, yanıcı ve korozif olmamalıdır

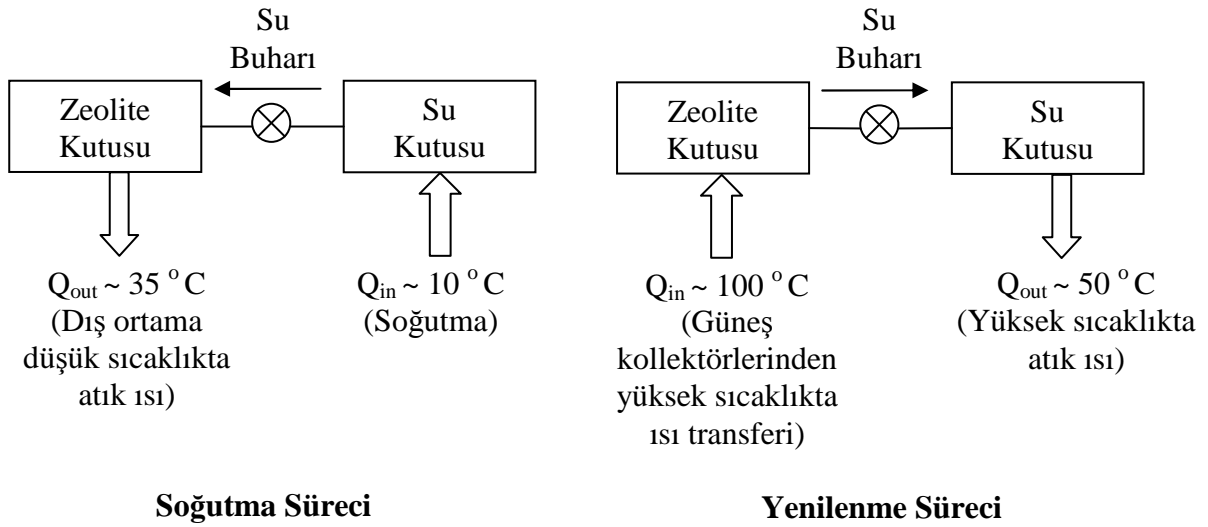
Zeolit-su çifti için gerekli desorpsiyon sıcaklığı yaklaşık 170 °C iken bu sıcaklık aktif karbon-methanol ve özellikle silika jel-su çifti için 100 °C nin altındadır (PAPADOPOULOS, 2003). Methanol ve su gerekli çalışma sıcaklıklarında atmosfer basıncının altındaki doyma basınçlarında çalışmaktadırlar. Dolayısıyla sistemde su veya methanol kullanıldığında sistemin sızdırmazlığı iyi yapılmalıdır aksi takdirde sistem hava alabilir. Fakat sistemde amonyum kullanıldığında böyle bir sorun ile karşılaşmak mümkün değildir. Diğer taraftan amonyum toksik ve korozif iken su ve methanol değildir. Ayrıca suyu 0 °C nin altındaki uygulamalarda kullanmak mümkün değildir (ANYANWU, 2004). Yukarıdaki ölçütler göz önünde bulundurulduğunda adsorpsiyonlu sistemler için en uygun çalışma çiftleri; zeolit-su, zeolit-organik soğutucular, silika jel-su ve aktif karbon-methanol olarak sıralanabilir (SUMATHY, 2003).

### **2.3 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sisteminin çalışma prensibi**

Su- zeolit çalışma çiftini kullanan basit adsorpsiyonlu soğutma sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.2' den faydalanarak aşağıdaki gibi açıklanabilir (KAFTANOĞLU, 2005);

*Soğutma süreci;* iki adet hava sızdırmaz metal kutu bir valf vasıtası ile birbirine bağlanmıştır. Metal kutuların birinde zeolit diğerinde ise su bulunmaktadır. Başlangıçta metal kutular arasındaki valf kapalı tutulmaktadır ve zeolit kutusunun içindeki hava tamamen boşaltılmıştır. Ayrıca, su kutusundaki havanın tamamen boşaltılması nedeni ile metal kutu içinde düşük sıcaklık ve basınçta (  $T \sim 10$  °C ve  $P \sim 1.5$  kPa ) doymuş sıvı buhar karışımı su bulunmaktadır. İki metal kutuyu birbirine bağlayan valf açıldığında, su kutusundaki buhar hızlı bir şekilde zeolit kutusuna akacaktır. Su kutusundaki basınç düştüğünde, kutudaki doymuş sıvı

kaynamaya başlayacak ve daha fazla buhar üretecektir. Bu kaynama süreci için gerekli termal enerji dış ortamdan çekilen ısı ile sağlanacaktır. Dolayısıyla ile metal kutunun dış yüzeyi soğuyacaktır. Soğutma ortam havasını bu soğuk metal yüzey üzerinden geçirilerek sağlanacaktır. Zeolit kutusuna akan su buharı zeolit ile temas ettiğinde zeolit tarafından adsorp edilecektir. Zeolit eşsiz bir malzemedir ve bu malzeme ağırlığının yüzde 20-40'ı kadar su kütlesini adsorp edebilmektedir. Bu yüksek adsorpsiyon kapasitesi zeolit kutusundaki su buharı basıncını su kutusundan daha düşük tutmaktadır. Bu yüzden su kutusundaki kaynama prosesi uzun bir süre sürecektir.



Şekil 2.2 Basit adsorpsiyonlu soğutma sistemi

*Yenilenme (desorpsiyon) süreci;* Zeolit su ile tamamen doyduğunda soğutma süreci son bulacaktır ve bu aşamadan sonra yenilenme sürecine geçilmelidir. Yenilenme aşamasında, zeolit güneşten sağlanan termal enerji ile ısıtılmakta ve zeolit tarafından adsorp edilen su buhar fazına dönüşmektedir. Suyun desorpsiyonundan dolayı hem zeolit kutusunda hemde su kutusundaki buhar basıncı, doymuş su buharının su kutusunda yoğuşmaya başlayıp sıvı fazına döndüğü ana kadar artacaktır. Bu yoğuşma süreci sırasında açığa çıkan termal enerji dış ortama atılmaktadır. Zeolit ısıtılabilceği en yüksek sıcaklığa ısıtıldıktan sonra yenilenme süreci son bulacaktır. Bu aşamadan sonra çevrim soğutma süreci ile devam edecektir.

## 2.4 Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri için termodinamik döngüler

### 2.4.1 Basit ideal adsorpsiyonlu soğutma döngüsü

En basit adsorpsiyon döngüsü, soğutucu buharını alternatifli olarak kondensere yollayan ve evaporatörden soğutucu buharını alan tek bir adsorban yatak kullanılır. Buradaki adsorban yatağın işlevi geleneksel buhar sıkıştırımlı sistemlerdeki kompresörün işlevi ile aynıdır. Soğutucu, kondenserden evaporatöre bir kesme vanasından geçerek akar. Adsorban yatağın doyum kapasitesi, adsorban sıcaklığı  $T_a$  ve soğutucu buhar basıncı  $P_v$  nin bir fonksiyonudur; yani  $C_{\mu,s} = C_{\mu,s}(T_a, P_v)$ . Doyum kapasitesi, azalan  $T_a$  ve artan  $P_v$  ile artar. Adsorban yatağı dört ayrı durumu tanımlayan  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$  sıcaklıklarından geçerek bir döngüsünü tamamlamaktadır. Kondenser ve evaporatörün içindeki sıcaklıklar ve basınçlar sabit olup  $T_o$  ve  $P_{kond}$ ,  $T_{clg}$ ,  $P_{evap}$  değerlerine eşittir. İncelenen durumda, adsorban yatağında termodinamik denge kabul edilmiştir, böylece  $T_{clg} < T_o = T_3 < T_4 < T_2 < T_1 = T_c$ ,  $P_{kond} = P_{sat}(T_o)$  ve  $P_{evap} = P_{sat}(T_{clg})$  dir. Bu basit döngü aşağıdaki aşamalardan oluşur ve en iyi Clapeyron diyagramının eşliğinde açıklanabilir (Şekil 2.3) (BAKER, 2006):

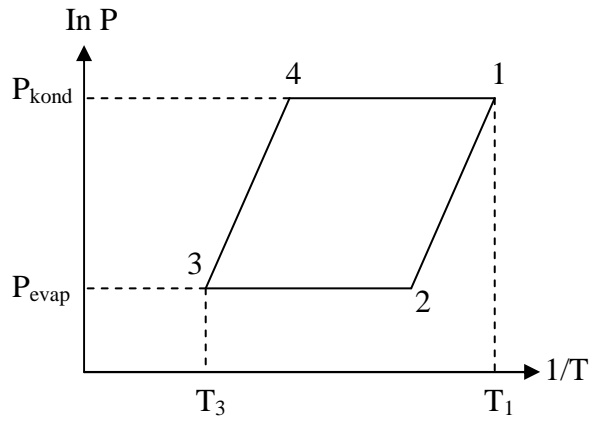
**1 => 2 :** Sistem elemanları arasında aracı akışkan alışverişi olmadan, adsorban yatağı çevreye ısı transferi ile  $T_2$  ara sıcaklığına soğutulur. Kapalı adsorban yatağında, bir miktar soğutucu adsorplanır. Yataktaki basınç, doyum kapasitesini çok az etkileyerek ( $dC_{\mu,s} = 0$ )  $P_{kond}$ ' den  $P_{evap}$ ' e iner. 2 nolu konumdaki sıcaklık  $C_{\mu,s}(T_2, P_{evap}) = C_{\mu,s}(T_1, P_{kond})$  ilişkisi ile sabitlemiştir.

**2 => 3 :** Adsorban yatağı  $T_3$  en düşük sıcaklığına inene kadar çevreye olan ısı transferi ile soğutulur. Doymuş sıvı aracı akışkan kondenserden çıktıktan sonra kesme vanasından geçer ve doymuş buhar olarak kaynadığı evaporatöre gider, takiben adsorplandığı yatağa ulaşır. Adsorplanma yatağı  $P_{kond}$  sabit basıncında soğur ve doyum kapasitesini en yüksek değer olan  $C_{\mu,s,3} = C_{\mu,s,max}$  'a çıkarır. Evaporatördeki kaynama ısı, bu döngü içindeki soğuma ile sağlanır.

**3 => 4 :** Sistem elemanları arasında aracı akışkan alışverişi olmadan, adsorban yatak  $T_4$  ara sıcaklığına güneş enerjisi ile ısıtılır. Kapalı adsorban yatağındaki bir miktar aracı akışkan, desorplanma sonucu doyum kapasitesini fazla değiştirmeden ( $dC_{\mu,s} = 0$ ) yataktaki basıncı  $P_{evap}$

den  $P_{kond}$  ' e artırır. 4 nolu konumdaki sıcaklık  $C_{\mu,s}(T_4, P_{kond}) = C_{\mu,s}(T_3, P_{evap})$  bağıntısı ile belirlenmiştir.

**4 => 1** : Adsorban yatağı güneş enerjisi ile ısıtılmaya devam eder. Aracı akışkan, adsorban yatağında desorplanır ve daha sonra yoğuştuğu ve depolandığı kondensere gider. Adsorban yatağının ısıtılması  $P_{kond}$  sabit basıncında devam eder.

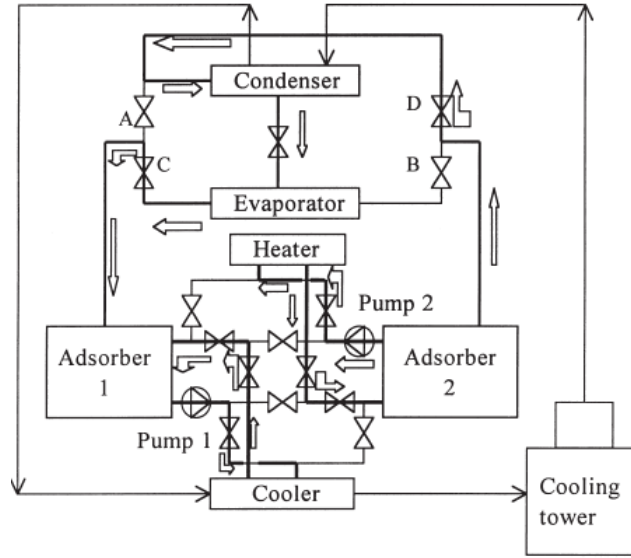


Şekil 2.3 Clapeyron diyagramı

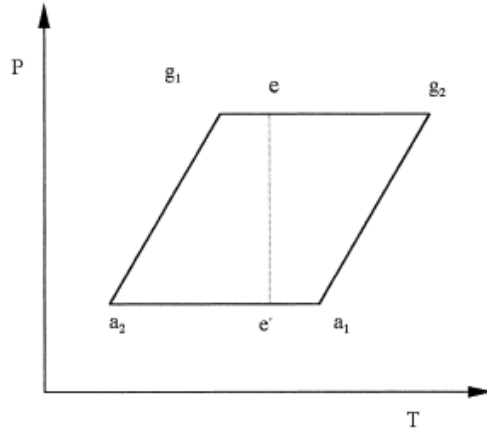
#### 2.4.2 Isıl geri kazanımlı adsorpsiyonlu soğutma döngüsü

Şekil 2.4' de ısıl geri kazanımlı iki adsorban yatağına sahip bir soğutma sistemine ait şematik çizim verilmiştir (WANG R.Z, 2001). İki adsorban yatağına sahip ısıl geri kazanımlı döngüde adsorban yataklardan biri soğutulur iken ( Şekil 2.5' de  $g_2$  noktası) diğeri ısıtılmaktadır (Şekil 2.5' de  $a_2$  noktası ). Adsorpsiyon prosesinin gerçekleştiği yatakta açığa çıkan ısı (duyulur ve adsorpsiyon) bu döngüde diğeri yatağın ısıtılmasında kullanılmaktadır. Bu durumda iki adsorban yatak arasındaki ısı transferi aracı akışkanın bir pompa vasıtası ile yataklar arasında dolaştırılması ile sağlanmaktadır. Bu süreç, her iki yataktaki sıcaklıklar birbirine eşit olana dek sürmektedir. Bu durum Şekil 2.5' de e ve e' noktaları ile gösterilmiştir (QU, 2001). Adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin performans katsayısı (COP) ısıl geri kazanımlı döngünün kullanılması ile önemli ölçüde artırılabilir. Wang, adsorpsiyonlu soğutma sistemine ısıl geri kazanımın ilave edilmesiyle, ısıl döngünün COP değerinin yüzde 25 den daha fazla artırılabilirliğini ifade etmiştir. Diğeri taraftan, daha fazla ısıl geri kazanım elde etmek ve

bunun sonucundada daha yüksek bir COP değerine ulaşmak için çok yataklı ısıl geri kazanımlı döngü kullanılabilir.



Şekil 2.4 Isıl geri kazanımlı iki adsorban yatağa sahip soğutma sistemi (WANG R.Z, 2001).



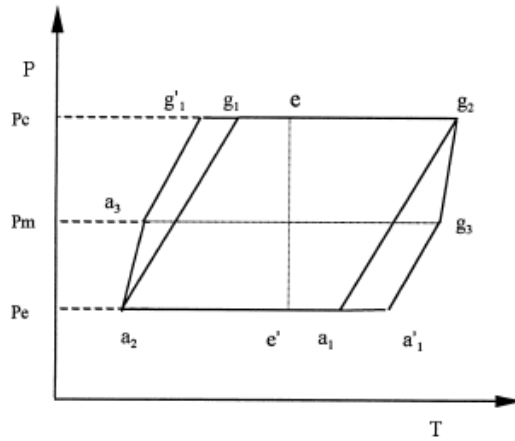
Şekil 2.5. Isıl geri kazanımlı döngüye ait Clapeyron diyagramı (WANG R.Z, 2001).

### 2.4.3 Kütle geri kazanımlı adsorpsiyonlu soğutma döngüsü

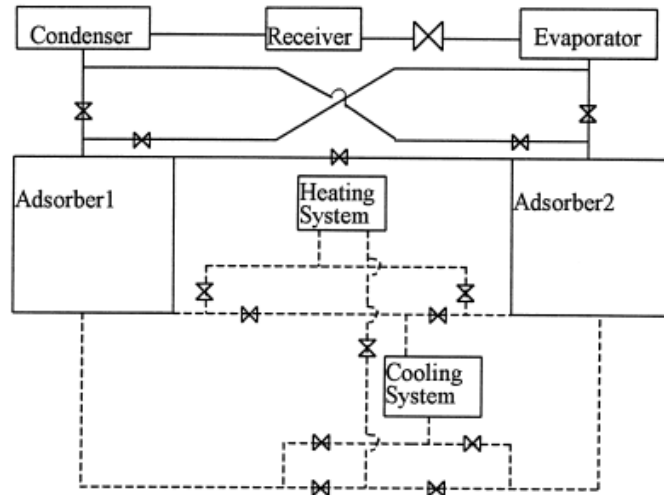
Bu döngüde, döngünün orta noktasında adsorban yataklardan biri yüksek sıcaklık ve basınçta iken diğeri daha düşük sıcaklık ve basınçtedir (Şekil 2.6' da sırası ile  $g_2$  ve  $a_2$  noktaları).



Döngünün devamında, yüksek basınçlı adsorban yatağın soğutulup basıncının evaporatör basıncına düşürülmesi gerekir iken, düşük basınçlı adsorban yatağın ısıtılıp basıncının kondenser basıncına yükseltilmesi gerekmektedir. Bunun için, iki adsorban yatak birbirine bir tüp vasıtası ile bağlanır ve bunun sonucunda soğutucu buharı yüksek basınç yatağından düşük basınç yatağına akar. Bu işlem kütle geri kazanımı prosesi olarak adlandırılır ve şematik olarak Şekil 2.7’ de verilmiştir.



Şekil 2.6 Kütle ve ısı geri kazanımlı döngüye ait Clapeyron diyagramı (QU, 2001).

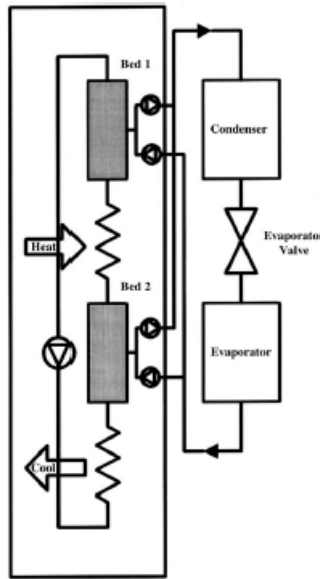


Şekil 2.7 Kütle/ısı ve kütle geri kazanımlı döngü (QU, 2001) (Yataklar arasındaki kesikli çizgiler ısı geri kazanıma, sürekli çizgiler ise kütle geri kazanıma ait prosesleri simgelenmektedir).

Bir nolu adsorban yatakta basıncın kütle çıkışı nedeni ile düşmesi bu yatakta desorplanma prosesinin devam etmesini sağlayacaktır. Aynı zamanda iki nolu adsorban yatakta basıncın kütle girişi nedeni ile artması bu yatakta daha fazla adsorplananın adsorplanmasına sebep olacaktır. Bu işlem her iki yatakta aynı basınç değerine  $P_m$  (Şekil 2.6) ulaşılan dek devam edecektir. Daha sonra yataklar arasındaki bağlantı kesilecek ve her bir yatak basit döngüdeki gibi ısıtma ve soğutma sürecine devam edecektir (QU, 2001). Bu yöntem sayesinde sistemin COP değerinde herhangi bir değişim olmadan soğutma gücü % 10' dan daha fazla iyileştirilebilir (SUMATHY, 2003).

#### 2.4.4 Termal dalga döngüsü

Isıl geri kazanım oranını daha da fazla iyileştirmek için Shelton (SHELTON, 1990) termal dalga döngüsü (thermal wave cycle) olarak isimlendirdiği farklı bir döngü tasarlamıştır. Sürekli soğutma sağlamak için bu döngüde iki adsorban yatak ve iki ısı değiştirgeci kullanılmıştır. Adsorban yatakların ısıtılması ve soğutulmasında basit bir ısı transferi akışkanından faydalanılmıştır (örneğin yüksek sıcaklıktaki yağ). Bu döngüye ait genel görünüş Şekil 2.8' de verilmiştir (SUMATHY, 2003).

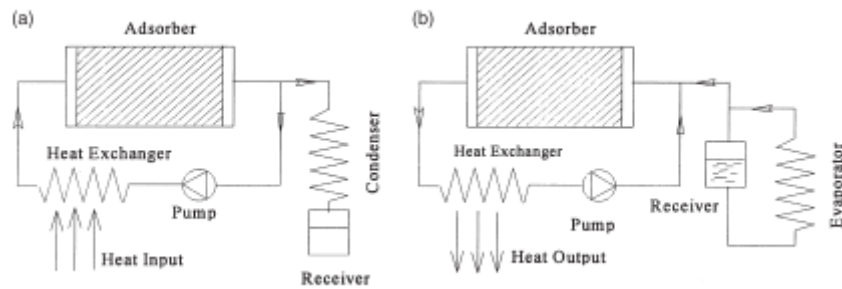


Şekil 2.8 Termal dalga döngüsü (SUMATHY, 2003)

Döngü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, sistemde dolaştırılan yağ iki nolu yataktaki (sıcak) ısıyı geri kazandıktan sonra ısı değiştirgecinde daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılmaktadır. Daha sonra ısı değiştirgecinden ayrılan yağ bir nolu adsorban yatağa girerek burayı ısıtmaktadır. Bu durumda bir nolu yatak ısıtılır iken aracı akışkan ısıtılan yataktan desorplanmakta ve kondensere akmaktadır. Aynı zamanda iki nolu yatak ise adsorpsiyon sürecine devam ederek soğutma işlemini sürdürmektedir. Döngünün ikinci aşamasında ise sirkülasyon pompası ters döndürülerek aynı şekilde bir nolu yatak soğutulmakta (adsorplanma) iki nolu yatak ise ısıtılmaktadır (desorplanma). Bu aşama son bulduktan sonra sirkülasyon pompası tekrar ters çevrilmektedir. Şimdiye kadar bir çok araştırmacının bu döngüyü çalışmasına rağmen, bu döngüyü kullanarak çalışan başarılı bir prototip geliştirilememiştir.

#### 2.4.5 Konveksiyonlu termal dalga döngüsü

Konveksiyonlu termal dalga döngüsü (Convective thermal wave cycle) Critoph (SUMATHY, 2003) tarafından önerilmiştir. Bu döngüde soğutucu akışkan ısıtma/soğutma aracı olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden adsorban yatakta konveksiyonla ısı ve kütle transferi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.9 Konveksiyonlu termal dalga döngüsü (SUMATHY, 2003)

Şekil 2.9 (a) da gösterildiği gibi, soğutucu akışkan ısıtıldıktan sonra bir pompa vasıtası ile adsorban yatakta dolaştırılır. Burada adsorban yatak ile soğutucu akışkan arasında doğrudan bir ısı transferi gerçekleşir ve adsorban yatağın sıcaklığı yükselerek desorplanma prosesi

başlar. Bu durumda soğutucu akışkanın buhar basıncı da kondenser basıncına kadar yükselir. Bu yüzden adsorban yatakta dolaştırılan soğutucu akışkanın bir kısmı kondenserde yoğunlaşarak alıcıda toplanır. Geri kalan kısmı ise tekrar ısıtıldıktan sonra adsorban yatakta dolaştırılır. Isıtma-desorplanma prosesi son bulduğunda, sirkülasyon pompası ters yönde çalıştırılarak sistem soğutma-adsorplanma sürecine döndürülür. Soğutucu akışkan ısı değiştirgecinde soğutulduktan sonra adsorban yatakta dolaştırılarak yatak soğutulacak ve adsorplanma süreci başlatılacaktır. Bu durumda soğutucu akışkan evaporatörden buharlaşarak soğutma etkisi sağlayacaktır.

#### **2.4.6 Çok- aşamalı ve kaskatlamalı döngü (Multi-stage and cascading cycle)**

Çok-aşamalı döngünün altında yatan temel fikir, aynı aracı akışkanı kullanarak desorplanma-yoğuşma ve buharlaşma-adsorplanma süreçlerini farklı sıcaklık/basınç düzeylerinde gerçekleştirmektir. Yoğuşma veya adsorplanma ısısının sistem içinde tekrar kullanılması ile sistemin performansı kayda değer ölçüde artırılabilir. Yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağından iyi bir şekilde yararlanmaya olanak sağlayan diğer bir döngüde kaskatlamalı döngüdür. Bu döngüde farklı çalışma çiftleri kullanılmaktadır örneğin zeolit-su/aktif karbon-metanol veya zeolit-su/silika jel-su, vb. Kaskatlamalı döngü, özellikle ısı kaynağı ile dış ortam arasında ve evaporatör ile soğutulacak ortam arasındaki sıcaklık farkı büyük olduğu durumda uygulanmaktadır. Bu iki döngüyle ilgili olarak daha detaylı bilgiye referans (WANG R.Z, 2001) den ulaşılabilir.

#### **2.5 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde kullanılan toplaçlar**

GEAS sistemlerini başarısı çalışma çiftinin doğru seçiminin yanı sıra sistemde kullanılacak güneş toplaçlarının performansına ve ekonomik maliyetine büyük ölçüde bağlıdır. Güneş toplaçlarının verimi, artan toplaç sıcaklığı ile düşüş göstermekte iken sistemin performans katsayısı (COP) artan toplaç sıcaklığı ile artmaktadır (KAFTANOĞLU, 2005). Güneş enerjisi destekli soğutma sistemlerinde genel olarak düz, vakumlu tüp tipi ve parabolik güneş toplaçları kullanılmaktadır. Sistemde kullanılacak toplaçların alanı aşağıdaki denklem vasıtası ile yaklaşık olarak belirlenebilir [25].

$$A_{\text{coll,spec}}/\text{m}^2 = \frac{1}{G_{\perp} \cdot \eta_{\text{collector}} \cdot \text{COP}}$$

$G_{\perp}$  :yatay yüzeye gelen güneş enerjisi miktarı,  $\eta_{\text{collector}}$  : tasarım koşullarındaki toplaç verimi, COP: performans katsayısı.

## 2.6 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri

### 2.6.1 Silika jel-su çalışma çiftini kullanan sistemler

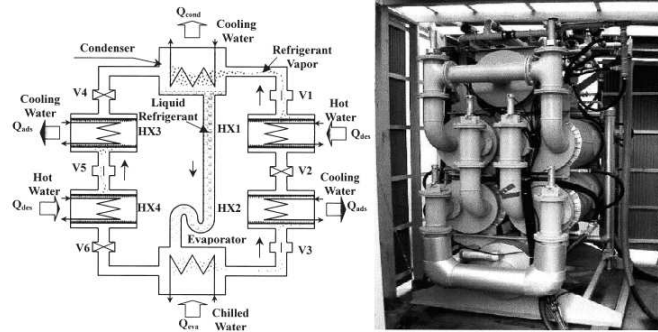
D.C. Wang ve diğerleri (WANG D.C, 2005) silika jel-su çiftini kullanan yeni adsorpsiyonlu bir soğutma sistemi tasarlamışlardır ve bu sistemimin performansını incelemiştir. Tasarlanan soğutma sistemi üç vakum odacığından oluşmaktadır; iki adet adsorpsiyon/desorpsiyon vakum odacığı ve bir adet evaporatör olarak kullanılan ısı borulu vakum odacığı. Bu çalışmada, tasarlanan soğutma sisteminin performansını artırmak için özellikle de sistem düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağı ile çalıştırıldığında bir adet vakum vanası adsorpsiyon/desorpsiyon vakum odacıkları arasına yerleştirilmiştir. Soğutma sistemin güvenilirliğinin sistemde kullanılan vana sayısının azaltılması ile büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; sistemin soğutma kapasitesi normal bir çalışma koşulu altında ve sıcak su sıcaklığının 85 °C, soğutma suyu sıcaklığının 31 °C ve soğutma (chilled) suyu giriş sıcaklığının 15 °C olduğu durumda 10 kW ın üstündedir. Ayrıca, ısı kaynağının sıcaklığının 65 °C altında olduğu bir durumda bile sistemin COP değeri 0.5'i aşmaktadır.

W. S. Chang [26] ve diğerleri silika jel-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu bir soğutma sistemini deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada, soğutma sisteminin ilk yatırım maliyetini azaltmak ve imalatını kolaylaştırmak için adsorban yatağını, evaporatörü ve kondenseri kapsayan bir vakum tank tasarlanmıştır. Adsorban yataklarında adsorban ile ısı değiştirgeci arasındaki ısı transferini iyileştirmek için düz tüp şeklinde kıvrımlı kanatçıklara sahip ısı değiştirgeçleri kullanılmıştır. Normal çalışma koşulları altında ve 80 °C sıcak su, 30 °C soğuk su ve 14 °C soğutma (chilled) suyu giriş sıcaklıklarında sistemin soğutma kapasitesi 4.3 kW olarak bulunmuştur. Ayrıca, bu koşullar altında sistemin performans katsayısı (COP)

0.45 değerindedir. Fakat sıcak suyun akış debisi düşürüldüğü zaman daha yüksek bir COP değeri elde edilmiştir.

Y.L. Liu ve diğerleri (LIU, 2005) adsorpsiyonlu düşük ısı kaynağı (güneş veya atık ısı) destekli bir su soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Bu soğutma sisteminde vana kullanılmamıştır. Dolayısı ile geleneksel sistemlerde soğutucu akışkan vanadan geçerken görülen basınç düşüşü bu sistemde vana kullanılmayarak ortadan kaldırılmıştır. Bu sistemde silika jel-su çalışma çifti olarak seçilmiştir. Deneysel sonuçlara göre sistem 6.3 kW lık bir soğutma gücüne sahiptir ve bu durumda sistemin performans katsayısı 0.4 değerine eşittir. Sistemin COP değeri ısıl geri kazanım ile birlikte yüzde 34.4 oranında artış göstermiştir. Kütle geri kazanımı ile birlikte sistemin soğutma gücü yüzde 13.7 ve COP değeri ise yüzde 18.3 oranında artmıştır.

B.B. Saha ve diğerleri (SAHA, 2001) güneş/atık ısı destekli, silika jel-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu bir soğutma sistemi tasarlamışlardır. Bu sistemde, 50 ile 70°C arasında değişen güneş/atık ısı kaynağından ve 30°C lik soğutma kaynağından faydalanmak için iki aşamalı, dört yataklı, yenilemesiz adsorpsiyonlu soğutma çevrimi kullanılmıştır. Çünkü eğer soğutma kaynağınız 30°C veya daha yüksek sıcaklıkta ise 50°C ısı kaynağı ile desteklenen tek aşamalı (geleneksel) silika jel-su çevrimini kullanmanız mümkün değildir. Bu nedenle, Saha ve yardımcıları adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde bu sıcaklıklara sahip kaynaklardan faydalanmak için iki aşamalı bir çevrim tasarlamışlardır. Soğutma sisteminin şematik çizimi ve deneysel prototipin genel görünüşü Şekil 2.10 da verilmiştir. Standart çalışma koşulları için, sistemin ölçülen soğutma kapasitesi 3.2 kW ve performans katsayısı (COP) 0.36' dır.



Şekil 2.10 Soğutma sisteminin şematik çizimi ve deneysel prototipin genel görünüşü (SAHA, 2001)

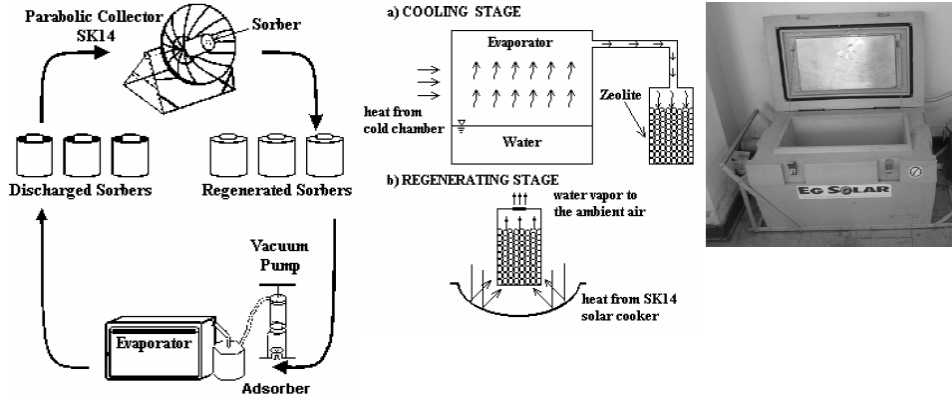
## 2.6.2 Zeolit-su çalışma çiftini kullanan sistemler

Grenier ve diğerleri (GRENIER, 1988) zeolit-su çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu bir soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem, 12-m<sup>3</sup> lük hacime sahip bir soğuk hava deposunu soğutmak için tasarlanmıştır ve genel görünüşü Şekil 2.11 de verilmiştir. Bu sistemde kullanılan güneş kolektörlerinin toplam alanı 20m<sup>2</sup> dir. Güneş kolektörleri tarafından alınan enerji miktarı yaklaşık olarak 22MJ/m<sup>2</sup> ye eşit olduğu durumda, soğuk hava deposu 1000 kg lık sebze için günlük 130 kg lık rotasyonla birlikte dış ortam sıcaklığını yaklaşık olarak 20 °C altında tutabiliyor ve bu durumdaki performans katsayısı da 0.1 olarak bulunuyor.



Şekil 2.11 Soğuk hava deposu (GRENIER, 1988)

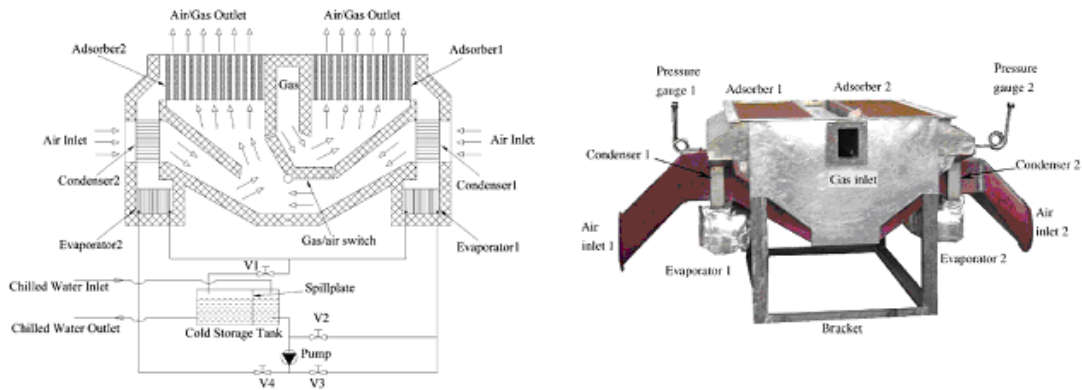
M. Ramos ve diğerleri (RAMOS, 2003) elektrik enerjisinin mevcut olmadığı kırsal bölgelerde hayvansal ve tarımsal ürünlerin bozulmadan korunabilmesi için güneş enerjisi destekli, zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu prototip bir soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Sistemin şematik çizimi ve genel görünüşü Şekil 2.12 de verilmiştir. Bu soğutma sisteminde kullanılan adsorban yatak taşınabilir olarak tasarlanmıştır. Diğer bir ifade ile adsorban yatağın yenilenme işlemi soğutma çevriminin dışında yapılmaktadır ve bu işlem için gerekli termal enerji güneşten sağlanmaktadır. Soğutma çevriminde kondenser kullanılmamıştır çünkü yenilenme işlemi sırasında oluşan su buharı dış ortama atılmaktadır. Bu sistemin en önemli dezavantajı, her bir çevrim için vakum pompası vasıtasıyla sistemin havasının alınması ve evaporatörün su ile doldurulması gerekmektedir.



Şekil 2.12 Sistemin şematik çizimi ve genel görünüşü (RAMOS, 2003)

## 2.7 Egzos gazları ile desteklenen adsorpsiyonlu soğutma sistemleri

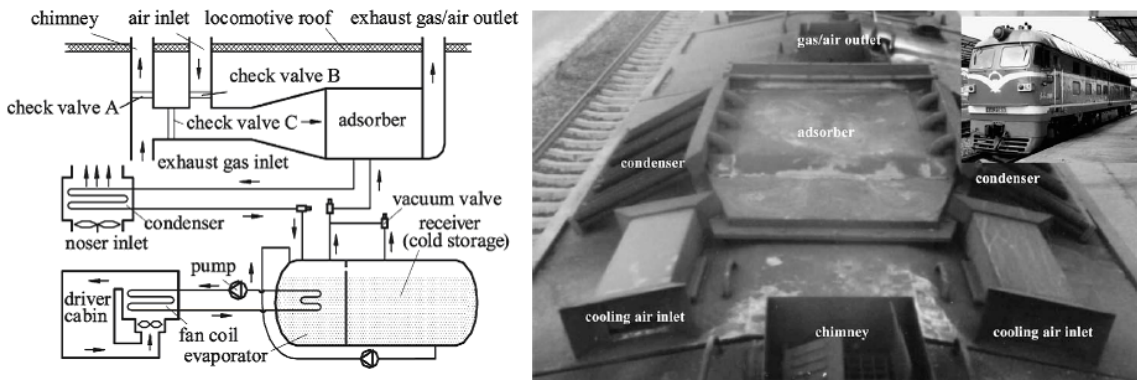
D.C. Wang ve diğerleri (WANG D.C, 2006) iki adsorban yataklı sürekli soğutma sağlayan yeni bir soğutma sistemi tasarlamışlardır ve sisteme ait numerik bir model geliştirmişlerdir. Tasarlanan sistemde çalışma çifti olarak zeolit-su çifti kullanılmıştır. Sistem lokomotif motoru tarafından üretilen egzos gazları (350–450 °C) ile desteklenmekte ve lokomotif sürücü kabinindeki havalı soğutucuya 8–12 °C arasında soğutma suyu sağlamaktadır. Sistemin şematik çizimi ve genel görünüşü Şekil 2.13’ de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sistemin soğutma kapasitesi 5 kW ve performans katsayısı 0.25 dir.



Şekil 2.13 Soğutma sisteminin şematik çizimi ve genel görünüşü (WANG D.C, 2006)



S. Jiangzhou ve diğerkleri (JIANGZHOU, 2003) zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu prototip soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Lokomotif surcu kabininin soğutulması için tasarlanan prototip sistemin şematik çizimi ve genel görünüşü Şekil 2.14’ de verilmiştir. Bu sistem dizel motorunun ürettiği egzoz gazları ile sürdürülmekte ve lokomotif kabinindeki havalı soğutucuya, soğutma suyu sağlamaktadır. Geliştirilen sistemin ortalama soğutma gcu kapasitesi 5 kW ve havalı soğutucudan ayrılan soğutma havasının sıcaklığı yaklaşık olarak 18 °C dir.



Şekil 2.14 Soğutma sisteminin şematik çizimi ve genel görünüşü (JIANGZHOU, 2003)

Y.Z. Lu (LU, 2004) ve diğerkleri lokomotif surcu kabinlerinin soğutulması için egzoz gazları ile sürdürülen, zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu yeni bir soğutma sistemi tasarlamışlardır. Sistemin genel görünüşü Şekil 2.15’ de verilmiştir.

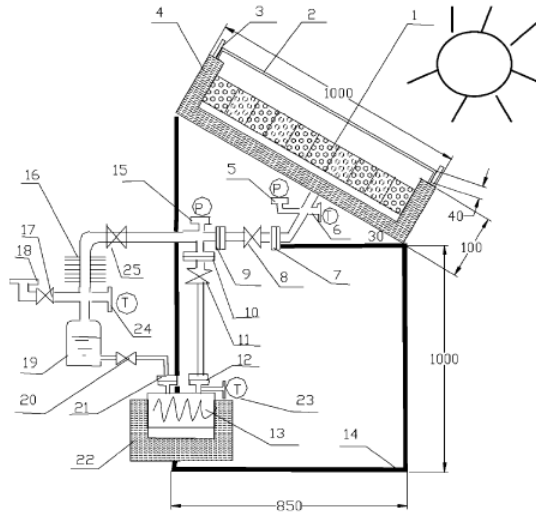


Şekil 2.15 Soğutma sisteminin genel görünüşü (LU, 2004)

Bu sistemde tek bir adsorban yatak kullanılmıştır. Adsorban yatağın yenilenmesi sırasında soğutma işlemine devam etmek için soğuk su depolama tankı sisteme entegre edilmiştir. Labaratuvarında prototip makina üzerinde bir takım deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden, kondenser ve evaporatör sıcaklıklarının sırası ile 40 °C ve 7 °C olduğu durumda makinanın ortalama soğutma gücü yaklaşık olarak 3.3 kW olarak elde edilmiştir. Ayrıca, bazı çalışma koşullarının sistemin performansı üzerine olan etkileri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

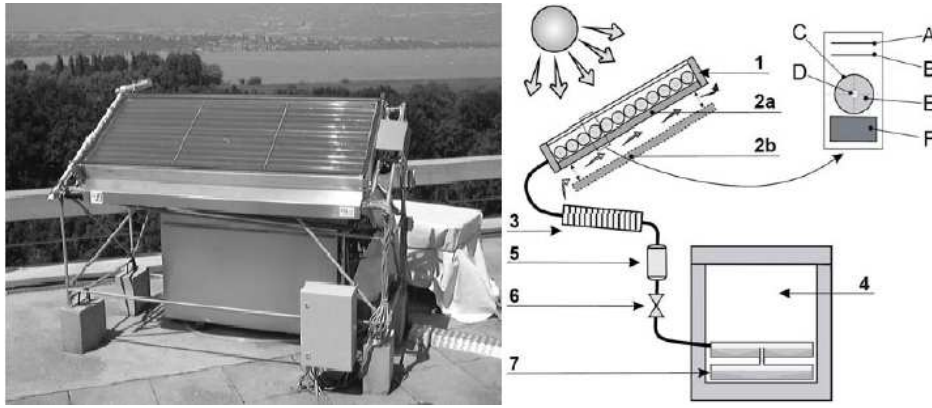
## 2.8 Güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu buz makinaları

M. Li ve diğerleri (LI, 2002) güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu bir buz makinasının performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Sistemin şematik çizimi Şekil 2.16' da verilmiştir. Bu makinada, çalışma çifti olarak aktif karbon- metanol çifti kullanılmıştır. Sistem genel olarak güneş enerjili adsorban yatak (1), kondenser (16), evaporatör (13), depo (19), buz kutusu (22), ve çeşitli valflerden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlara göre sistemin performans katsayısı 0.12 ile 0.14 arasında değişmekte ve sistem 0.75 m<sup>2</sup> lik yüzey alanı ile 14–16 MJ lük enerji aldığı anda 4–5 kg buz üretebilmektedir.



Şekil 2.16 Adsorpsiyonlu buz makinasının şematik gösterimi (LI, 2002): (1) adsorban yatak; (2) cam kapak; (3) damper;(4) izole edilmiş malzeme; (5,15) basınç ölçer; (6,23,24) sıcaklık ölçer; (7,9,10,12) bağlantı flanşları; (8,11,17,20,25) valfler; (13) evaporatör; (14) destek; (16) kondenser; (18) soğutucu giriş ; (19) depo; (22) buz kutusu.

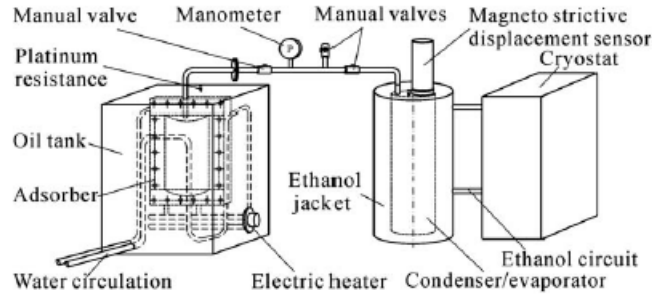
C. Hildbrand ve diğerleri (HILDBRAND, 2001) güneş enerjisi destekli slika jel-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu prototip bir soğutma sistemi geliştirmişlerdir ve geliştirdikleri bu sistemin performansını farklı çalışma ve iklim koşulları altında test etmişlerdir. Soğutma sisteminin genel görünüşü ve şematik çizimi Şekil 2.17’ de verilmiştir. Temel olarak, 2 m<sup>2</sup> lik yüzey alanına sahip çift geçişli düzlemsel güneş kolektörü, evaporatör ve kondenserden oluşan bu prototip makina buz üretmektedir ve üretilen bu buz vasıtası ile 320 litrelik hacime sahip olan bir kabin soğuk tutulmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, sistemin performansı büyük ölçüde dış ortam sıcaklığına ve güneşten elde edilebilecek enerji miktarına bağlıdır. Işınım miktarı 20 MJ/m<sup>2</sup> nin üzerinde ve dış ortam sıcaklığı 12 ile 25 °C arasında iken, makinanın performans katsayısı 0.12 ile 0.23 arasında değişmektedir.



Şekil 2.17 Adsorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik gösterimi (HILDBRAND, 2004). (Güneş kolektörü/adsorban: (1) cam yüzey (A); teflon film (B); seçici yüzey ile kaplanmış tüp (C) ve içten Papyex ile katmanlı; buhar transferi için merkez tüp (D); silika jel yatak (E); yalıtım (F); (2) havalandırma damperi (a—kapalı; b—açık); (3) kondenser; (4) soğuk ortam; (5) evaporatör ve buz deposu).

## 2.9 Egsoz gazları ile desteklenen adsorpsiyonlu buz makinaları

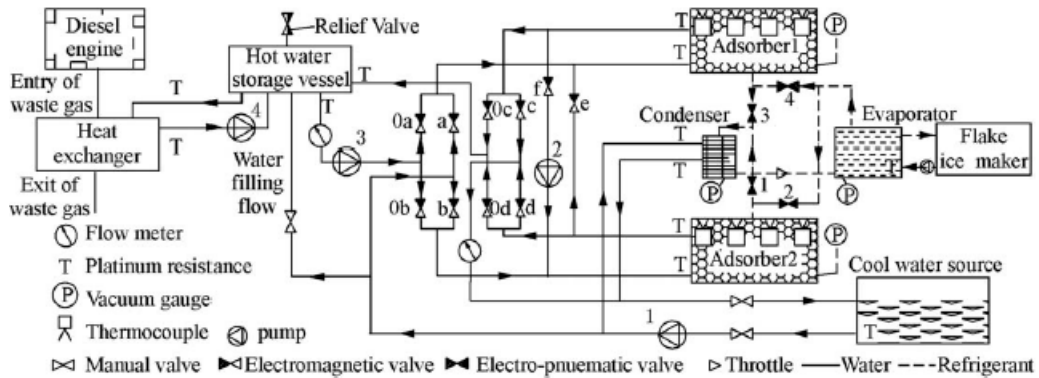
L.W. Wang ve diğerleri (WANG L.W., 2006) adsorban olarak aktif karbon ve karbon kompozit malzemelerin kullanıldığı iki farklı durum için egsoz gazları ile sürdürülen bir buz makinasının performansını incelemiştir. Ayrıca, aktif karbon ve karbon kompozit adsorbanın adsorpsiyon özelliklerini test etmek için Şekil 2.18’ de verilen deney düzeneğini tasarlamışlardır.



Şekil 2.18 Adsorpsiyon deney düzeneği (WANG L.W., 2006)

Elde edilen deney sonuçlarına göre, adsorpsiyon performansı bakımından aktif karbon–methanol çifti aktif karbon–ammonia çiftine göre daha iyidir. Isı transferi bakımından ise konsolide aktif karbon malzeme en iyisidir. Ayrıca, granüler kompozit adsorban ve kimyasal adsorban malzemeler ile karşılaştırıldığında, konsolide kompozit adsorban malzeme en yüksek soğutma kapasitesine sahiptir.

Konsolide aktif karbon –methanol çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu buz makinasına ait şematik çizim Şekil 2.19’ da verilmiştir. Bu makinanın optimum performans katsayısı (COP) 0.125, hacimsel soğutma gücü yoğunluğu (volume cooling power density) ( $SCP_v$ )  $9.25 \text{ kW/m}^3$  ve kilogram adsorban başına özgül soğutma gücü (specific cooling power per kilogram adsorbent) (SCP)  $32.6 \text{ W/kg}$ ’ dır. Diğer taraftan bu makinarya ait maksimum COP,  $SCP_v$  ve SCP değerleri ise sırasıyla 0.35,  $52.68 \text{ kW/m}^3$  ve  $493.2 \text{ W/kg}$ ’ dır.

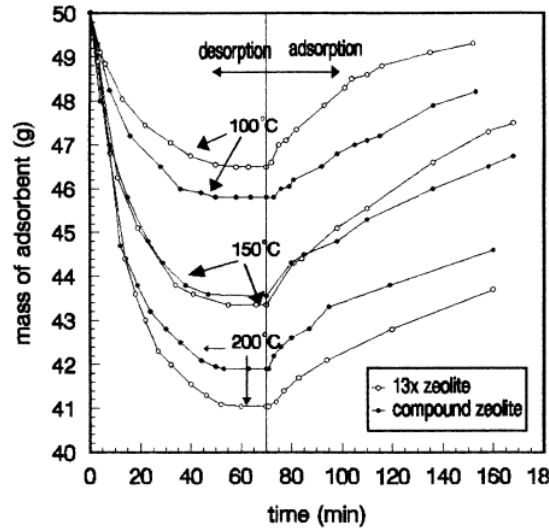


Şekil 2.19 Adsorpsiyonlu buz makinasının şematik gösterimi (WANG L.W., 2006)

## 2.10 Adsorban yatakta ısı ve kütle transferi bakımından iyileştirmeler

Adsorban yatak adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin en önemli kısmıdır. Bu nedenle, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin performansı büyük ölçüde adsorban yataktaki ısı ve kütle transferi koşullarına bağlıdır. Adsorban yatakta ısı ve kütle transferi koşullarının iyileştirilmesi ile döngü zamanı kısaltılabilir ve adsorban ağırlığı azaltılabilir.

L. Zhenyan ve diğerleri (ZEHENYAN, 1998), bileşik zeolit-aktif karbonlu adsorban (compound zeolite-active carbon adsorbent) (CZACA) olarak isimlendirdikleri adsorban bir malzeme geliştirmişlerdir. Bu adsorban malzemenin güneş enerjisi destekli soğutma sisteminde kullanımı ile adsorban yataktaki ısı transferi koşulları iyileştirilmiş ve desorplanma süresi düşürülmüştür. Ayrıca yazarlar bu çalışmada zeolit-su çalışma çiftinin adsorpsiyonlu soğutma sistemleri için en iyi çalışma çift olduğunu ifade etmişlerdir. Fakat zeolitin güneş enerjisini adsorplama kapasitesi oldukça düşüktür. Bu nedenle, geleneksel güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri güneş enerjisini özel kolektörler vasıtası ile toplamaktadırlar. Diğer bir ifade ile siyah kaplama yüzey tarafından emilen güneş enerjisi adsorban malzemeye iletimle veya adsorban yatak içindeki ısı değiştirgeçleri vasıtası ile transfer edilmektedir. Bu yüzden, adsorban malzeme ile metal yüzey arasındaki ısıl direnç oldukça yüksektir ve bu sistemin bir dezavantajıdır. Güneş kolektörlerinin ilk yatırım maliyeti ve iki yüzey arasındaki ısıl direnç adsorban yatağın güneş enerjisini doğrudan emmesi ile önemli ölçüde düşürülebilir. Bu amaç doğrultusunda, yazarlar zeolit 13x granüllerini aktif karbon ve sodyum silikat karışımı ile ince bir tabaka şekline kaplamışlardır. Bunu sonucunda elde ettikleri adsorban malzemeyi zeolit-aktif karbon adsorban (zeolite-active carbon adsorbent) (CZACA) olarak isimlendirmişlerdir. Zeolit 13x ve CZACA'ın adsorpsiyon performanslarını karşılaştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır ve bu deneysel çalışmanın sonuçları Şekil 2.20' de verilmiştir.



Şekil 2.20 İki farklı adsorban türünün adsorpsiyon performansları (ZEHENYAN, 1998).

D. Zhu ve S. Wang (ZHU, 2002) güneş enerjili adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin adsorban yatağındaki termal direnci deneysel olarak incelemişlerdir ve şunu ifade etmişlerdir; adsorban yataktaki kötü ısı transferi koşulları döngü zamanının uzamasına ve düşük güç yoğunluğuna sebep olmaktadır. Bu nedenle, adsorban malzemenin ısı iletim katsayısını artırmak için yüksek ısı iletim katsayısına sahip poly-anilin malzeme adsorban yatağına ilave edilmiştir. Bunun sonucunda zeolit/poly-anilin kompleks malzemesinin ısı iletim katsayısı doğal zeolit'den yaklaşık olarak 4 kat daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, şekillendirilmiş adsorban malzemenin granüler adsorbana göre ısı iletim katsayısı yaklaşık 30% daha fazla iken adsorpsiyon kapasitesinde kayda değer bir düşüş gözlemlenmemiştir. Ayrıca bu çalışmada yalnızca adsorban malzemenin ısı iletim katsayısını yükseltmenin yeterli olmayacağına iki yüzey arasındaki (adsorban malzeme ile metal yüzey) temas direncinde azaltılması gerektiğinin sonucuna varılmıştır. Bunu için farklı basınçlar altında iki yüzey arasındaki temas direncini ölçmek için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, basınç uygulanarak adsorban malzemenin partikülleri arasındaki ısı direnci ve adsorban malzeme ile metal yüzey arasındaki temas direncinin düşürülebileceği belirtilmiştir. Fakat adsorban yataktaki kütle transferinin olumsuz yönde önemli ölçüde etkilenmemesi için uygulanan basıncın belirli bir aralıkta olması gerektiği ifade edilmiştir (örneğin 20–25 kPa). Ayrıca, adsorban malzemenin granül ebatları arttıkça iki yüzey arasındaki temas direncide artmaktadır. Bu nedenle iki yüzey arasındaki ısı transferini artırmak için küçük ebatlardaki adsorban malzemeler ile çalışılması gerektiği vurgulanmıştır.

## 2.11 Sayısal modelleme çalışmaları

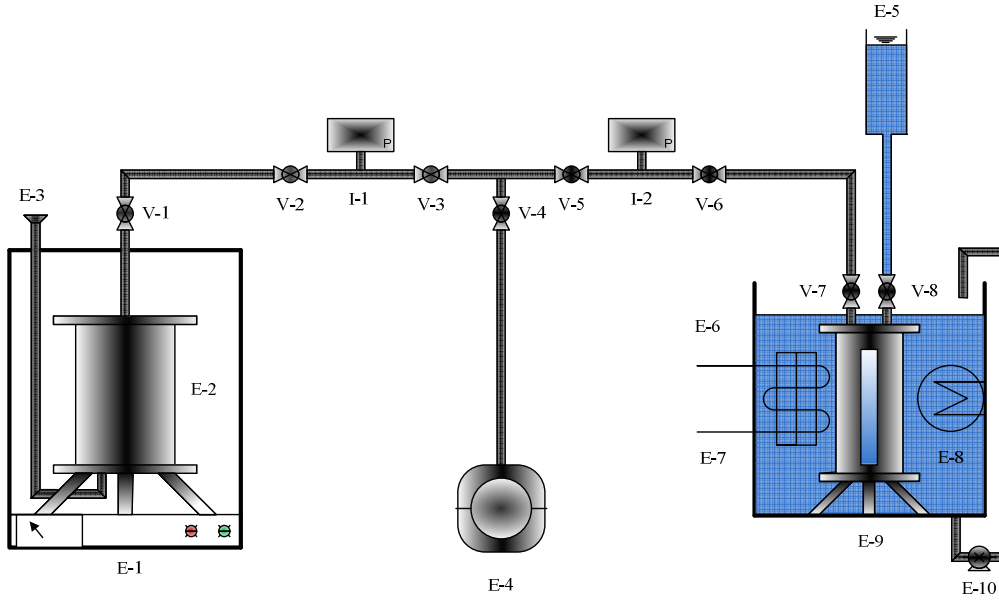
Y. Liu ve K.C. Leong (LIU, 2005) zeolit 13X-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu bir soğutma sisteminin termal performansını sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal modelde ısı ve kütle transferi sınırlamaları dikkate alınmıştır. Kütle transferi sınırlamaları partiküler arasında ve partikül içinde sırasıyla Darcy kanunu ve doğrusal sürücü kuvvet (linear driving force) (LDF) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada, adsorpsiyon, desorpsiyon, yoğuşma ve buharlaşma sıcaklıkları gibi faktörlerin sistem performansı üzerine olan etkileri geniş bir şekilde irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri oldukça büyüktür. Soğutma sisteminin performansı hem COP hem de SCP değerleri bakımından yoğuşma ve buharlaşma sıcaklığı ile doğrusal olarak değişmektedir. Ayrıca, optimum adsorpsiyon sıcaklığında (320- 340 K) sistemin COP değeri 0.43 ve SCP değeri ise yaklaşık olarak 50W/kg olarak elde edilmiştir.

K.C. Leong ve Y. Liu (LEONG, 2004) çift tüplü silindirik adsorban yataklara sahip zeolit-su çalışma çiftini kullanan bir soğutma sistemini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, ısı ve kütle transferi katsayılarının, yatak kalınlığının, partiküllerin çapının ve gözenekliliğin sistemin termal performansı üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlara göre, sistemin COP değeri artan yatak kalınlığı ile artmakta fakat sistemin SCP değeri artan bu değer ile birlikte düşüş göstermektedir. Partikül boyutlarının soğutma çevriminin performansı üzerine olan etkileri ise oldukça düşüktür. Fakat soğutma çevriminin performansının yatak malzemesinin sıkıştırılması ile artabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, sistemin COP değerinin artan desorpsiyon sıcaklığı ile belli bir noktaya kadar arttığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, belirli bir desorpsiyon sıcaklığına karşılık olarak sistemin maksimum bir SCP değerinin sahip olduğu ifade edilmiştir.

## BÖLÜM 3

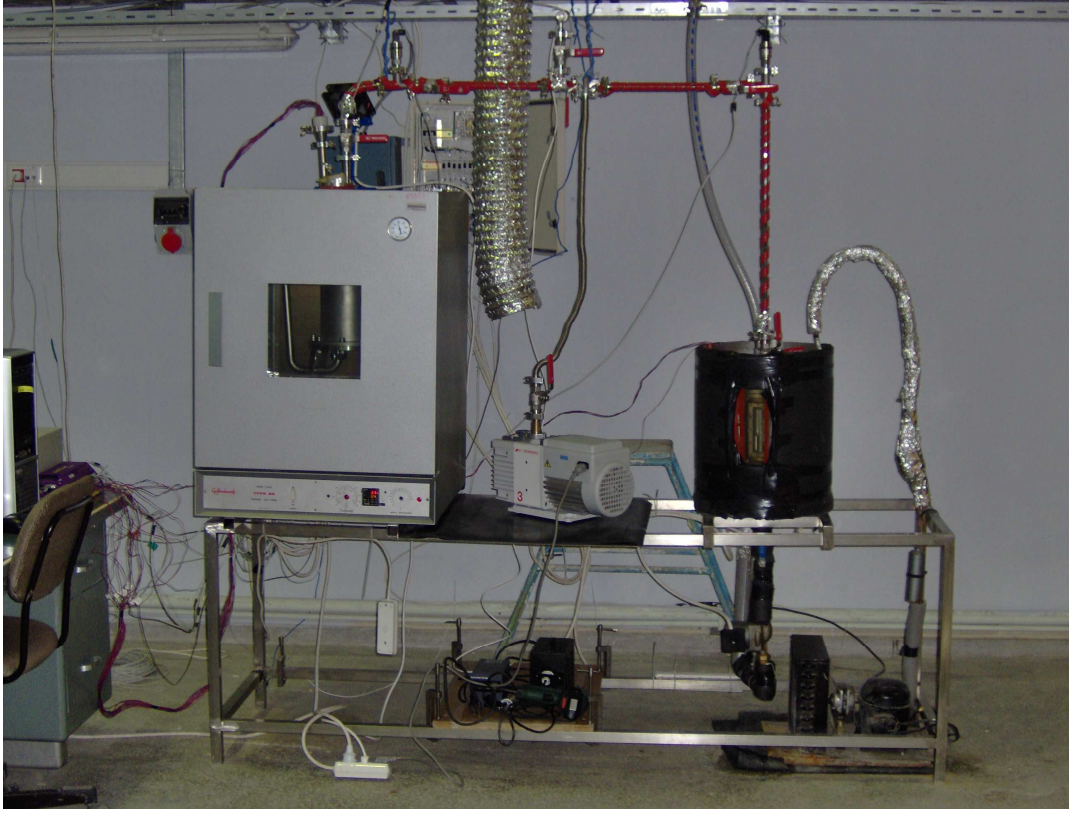
### ADSORPSİYON DENEY DÜZENİĞİNİN TASARIMI VE İMALATI

Türkiye zeolitlerinin adsorpsiyon ve termofiziksel özelliklerini elde etmek için Şekil 3.1' de şematik gösterimi, Şekil 3.2' de ise genel görünüşü verilen adsorpsiyon deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Adsorpsiyon deney düzeneğinin şematik gösterimi (E-1 Fırın, E-2 Zeolit kutusu, E-3 Termoeleman çıkışı, E-4 Vakum pompası, E-5 Soğutucu akışkan beslemesi, E-6 Su banyosu, E-7 Soğutma grubu, E-8 Elektrikli ısıtıcılar, E-9 Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu, E-10 Dolaşım pompası, V-1...8 Vakum vanaları, I-1, I-2 Basınç sensörleri).





Şekil 3.2 Adsorpsiyon deney düzeneğinin genel görünüşü.

Adsorpsiyon deney düzeneğini oluşturan başlıca elemanlar aşağıda sıralanmıştır ;

- Elektrikli fırın
- Su banyosu
- Zeolit kutusu (adsorban yatak)
- Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu
- Vakum hattı
- Veri kayıt ve kontrol cihazı

Aşağıda, bütün sistem elemanlarının imalat aşamaları ve kullanım amaçları ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

### 3.1 Elektrikli fırın

Çalışmakta olduğumuz zeolit örneğine ait eşsıcaklık eğrilerini elde eder iken, zeolit kutusunun (adsorban yatak) istenilen bir sıcaklıkta (40–150 °C) sabit tutulması gerekmektedir. Bu amaçla, genel görünüşü Şekil 3.3’ de verilen fırın deney düzeneğinde kullanılmıştır. Söz konusu fırının çektiği güç 2 kW mertebesindedir. Ayrıca, fırının içindeki elektrikli ısıtıcıların üzerinde bulunan fan, içeride homojen bir sıcaklık dağılımının oluşmasına yardımcı olmaktadır. Fırının sıcaklığı röle ve kontrol cihazı vasıtası ile bilgisayar üzerinden kontrol edilmektedir. Termoelemanların içinde bulunduğu boru ile zeolit kutusu bağlantılı buhar borusu daha sonrada açıklanacağı gibi vakum kaçaklarını önlemek amacıyla fırının dışına, fırın üzerine 100 mm çapında bir delik açılarak alınmıştır.



Şekil 3.3 Elektrikli fırın

### 3.2 Su banyosu

Su banyosu kaynak yöntemi ile 1 mm et kalınlığına sahip paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir ve genel görünüşü Şekil 3.4’ de verilmiştir. Su banyosu 175 mm yarı çapa, 450 mm yüksekliğe ve 43.3 L hacme sahiptir. Banyo ısı kayıp ve kazançlarına karşı ısı iletim katsayısı 0.036 W/m.K olan 2 cm kalınlığındaki klimaflex malzeme ile kaplanmıştır. Soğutma grubunun bakır borudan helisel olarak imal edilen evaporatör kısmı, banyo içerisine daldırılarak banyonun soğutulması ve istenen sıcaklık değerinde röle ve bilgisayar kontrolü vasıtası ile sabit tutulması sağlanmıştır. Ayrıca banyonun gerektiği zaman ısıtılması için herbiri 1,5 kW gücünde olan üç adet elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Diğer taraftan 56 W

gücündeki bir dolaşım pompası vasıtası ile banyo içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3.4 Su banyosu.

### 3.3 Zeolit kutusu

Genel görünüşü Şekil 3. 5 ile verilen zeolit kutusu dört parça halinde imal edilmiştir. Birinci parça iç çapı 150 mm, dış çapı 154 mm, yüksekliği 250 mm olan paslanmaz çelik silindirdir. Bu silindirin alt tarafına et kalınlığı 12 mm, iç çapı 155 mm, dış çapı 231 mm ve üzerinde 12 adet 8 mm çapında civata deliği bulunan flanş kaynak edilmiştir. Silindirin üst kısmına ise et kalınlığı 12 mm, iç çapı 155 mm ve dış çapı 180 mm olan üzerinde sıkıştırma civataları için kanal bulunan flanş kaynak edilmiştir. Ayrıca bu silindirin iç kısmına tabandan itibaren et kalınlığı 3 mm, eni 65 mm, boyu 150 mm olan ve aralarında 90 derece mesafe bulunan dört adet paslanmaz çelik kanatçık kaynak yapılmıştır. Bu kanatçıklardan birinin üzerine zeolit içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için gerekli olan termoelemanlar eşit aralıklarla radyal yönde üç sıra halinde aksel yönde ise dört sıra halinde olmak üzere toplamda oniki adet olarak yerleştirilmişlerdir. Termoelemanlar silindir dışına seramik borular içinden geçirilerek alınmış ve seramik boru ile termo eleman arasındaki boşluk sızdırmazlık sağlamak için vakum macunu ile doldurulmuştur. Ancak deneyler sırasında fırın içerisinde yüksek sıcaklıklara çıkıldığında vakum macununda çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu problem

silindirden çıkarılan termoelemanların vakum altında bir boru içerisinden geçirilerek fırın dışına alınması ile çözülmüştür.

Zeolit kutusunu oluşturan ikinci parça ise silindirin alt kapağıdır ve termoelemanlar bu kapak üzerinden dışarı çıkarılmıştır. Bu parça paslanmaz çelik olup 12 mm et kalınlığına, 231 mm de dış çapa sahiptir. Parçanın 208 mm lik çapı üzerine eşit aralıklarla 12 adet 8 mm çapında civata deliği açılmıştır. Ayrıca bu kapağın üzerine (15 ile 75 mm lik yarıçaplar arasında kalan bölüme) ısı transferi yüzey alanını artırmak için et kalınlığı 3 mm, eni 60 mm, boyu 150 mm ve aralarında 90 derece mesafe bulunan dört adet paslanmaz çelik kanatçık kaynak edilmiştir. Buna ek olarak yine alt kapak üzerine hem ısı transferi yüzey alanını artırmak hemde buhar difüzyonunu kolaylaştırmak için üzerinde 3 mm çapında delikler bulunan iç çapı 10 mm, dış çapı 12 mm, boyu 167 mm olan paslanmaz çelik borular sıkı geçme olarak monte edilmiştir. Boruların dış yüzeyleri zeolit geçişini engellemek için mikron boyutunda deliklere sahip elek malzemesi ile kaplanmıştır. Bu boruların kapak üzerindeki yerleri teknik resimlerde detaylı olarak verilmiştir.

Zeolit kutusunu oluşturan üçüncü parça ise sıkıştırma plakasıdır. Bu parça paslanmaz çelik olup 7 mm et kalınlığına, 149 mm de çapa sahiptir ve üzerinde 3 mm çapında delikler bulunmaktadır. Bu delikler üzerinden zeolit geçişini engellemek için plaka elek malzemesi ile kaplanmıştır. Bu plaka silindirin üst tarafından konarak zeolit üzerine oturtulur ve bir yay vasıtası ile malzemenin sıkıştırılması sağlanır.

Zeolit kutusunu oluşturan son parça ise silindir üst kapağıdır. Paslanmaz çelik malzemenin imal edilen üst kapağın et kalınlığı 12 mm, çapı ise 180 mm dir. Bu kapak üzerine zeolit kutusu ile buharlaştırıcı/yoğuşturucu kutusu arasındaki bağlantı için gerekli olan 20 mm çapında bir delik açılmıştır.

Sızdırmazlık için borunun her iki tarafında bulunan flanşların üzerine standartlara uygun olarak o-ring kanalı açılmıştır. Burada kullanılan o-ringler viton malzemenin imal edilmiştir ve yaklaşık olarak 300 °C sıcaklığa kadar bozulmadan kullanılabilirler.



Şekil 3.5 Zeolit kutusu.

### 3.4 Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu

Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu üç parçadan oluşmaktadır. Birinci parçası iç çapı 90 mm dış çapı 94 mm ve yüksekliği 200 mm olan silindir bir borudur. Bu borunun alt ve üst kısımlarına iç çapı 95 mm dış çapı 155 mm et kalınlığı 12 mm olan üzerinde 12 adet 8 mm çapında civata deliği bulunan flanş kaynak edilmiştir. Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusunun ikinci parçası paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş olan silindir alt kapağıdır. Bu kapağın et kalınlığı 12 mm çapı ise 155 mm dir ve 131 mm lik çapı üzerine aralarında eşit mesafe bulunan 12 adet 8 mm çapında civata deliği açılmıştır. Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusunun son elemanı 155 mm çapında olan silindir üst kapağıdır ve bu kapağın üzerinde 20 mm çapında iki adet boru bağlantı deliği bulunmaktadır. Bu deliklerden bir tanesi vakum hattı diğeri ise soğutucu akışkan bağlantısı için kullanılmıştır. Soğutucu akışkan vakum altındaki yoğuşturucu/buharlaştırıcı kutusuna deney düzeneğinin üst kısmına monte edilen ölçekli bir cam beherden alınmaktadır. Cam beher ile yoğuşturucu/buharlaştırıcı arasındaki bağlantı küresel vana bağlantılı 1000 mm uzunluğundaki PVC boru ile sağlanmıştır. Ayrıca, buharlaştırıcı/yoğuşturucu içerisindeki sıvı miktarının deney sırasındaki değişiminin gözlemlenebilmesi için silindir yüzeyine bir kanal açılarak bu kanal üzerine viton o-ring vasıtası ile plexiglass gözlemele camı sabitleştirilmiş ve camın üzerine de seviye ölçüm cetveli yapıştırılmıştır. Son olarak, buharlaştırıcı/yoğuşturucu kutusu içindeki akışkanın sıvı ve gaz durumundaki sıcaklıklarını okumak için iki adet termoeleman silindir alt ve üst kısmına bir metal çubuk vasıtasıyla yerleştirilmiştir. Termo elemanlar silindir dışına zeolit

kutusunda olduğu gibi seramik malzeme içinden geçirilerek alınmıştır ve seramik malzeme ile termoeleman arasındaki boşluk vakum macunu ile doldurulmuştur. Burada yüksek sıcaklıklara çıkmadığı için vakum macununda çatlama gibi bir durum söz konusu olmamıştır.

Sızdırmazlık için ise yine zeolit kabında olduğu gibi silindirin her iki tarafındaki flanşların üzerine o-ring kanalı açılarak viton o-ring kullanılmıştır.

### 3.5 Vakum hattı

Zeolit kutusu ile buharlaştırıcı/yoğuşturucu kutusu arasındaki bağlantı bir boru hattı vasıtası ile sağlanmış ve bu hat vakum hattı olarak adlandırılmıştır. Bu hat üzerindeki elemanların zeolit kutusundan itibaren olan dizilişleri aşağıdaki gibidir (şekil 3.1 ve şekil 3.2);

- Zeolit kutusu
- Paslanmaz elik boru
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- Esnek boru
- Paslanmaz elik boru
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- T bağlantılı basınç sensörü (BOC EDWARDS *ASG1000*)
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- Pompa (BOC EDWARDS *RV3*) bağlantısı için T bağlantılı küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- T bağlantılı basınç sensörü (BOC EDWARDS *ASG1000*)
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)
- Paslanmaz elik boru
- Dirsek
- Paslanmaz elik boru
- Küresel vakum vanası (BOC EDWARDS *IBV16MKS*)

- Buharlaştırıcı/Yoğuşturucu kutusu

Bu elemanlar arasındaki bağlantı kelepçe vasıtası ile sağlanmıştır ve sızdırmazlık için bağlantı noktalarına o-ring konulmuştur. Ayrıca vakum hattı, soğutucu buharının yoğuşmasını engellemek için, elektrik ısıtıcılı bant ile sarılmıştır.

### 3.6 Veri kayıt ve kontrol cihazı

Deneyler sırasında elde edilen verilerin (sıcaklık, basınç) belirli zaman aralıkları ile kayıt altına alınması, fırın, su banyosu ve vakum hattı sıcaklıklarının sabit bir değerde tutulması için Şekil 3.6' da verilen DataTaker DT800 veri kayıt ve kontrol cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ait olan yazılım DeLogger, bir masa üstü bilgisayara kurularak bir kablo vasıtasıyla cihaz ile bilgisayara arasındaki bağlantı sağlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri için toplam 17 adet T tipi termoeleman, veri kayıt ve kontrol cihazına bağlanmıştır. Bu termoelemanlardan 14 tanesi zeolit ve yoğuşturucu/buharlaştırıcı kutusu içindeki sıcaklık dağılımını diğer üç tanesi ise fırın, su banyosu ve vakum hattı sıcaklıklarını okumak için kullanılmıştır. Bu üç termoelemandan gelen çıkış değerleri vasıtası ile cihaz (DT800) röleleri açıp kapayarak, diğer bir ifade ile ısıtıcıları ve soğutma grubunu devreye alıp çıkararak, fırın, su banyosu ve vakum hattı sıcaklıklarının sabit bir değerde kalması sağlanmıştır. Ayrıca veri kayıt ve kontrol cihazına iki adet basınç sensörü bağlanmıştır.



Şekil 3.6 Veri kayıt ve kontrol cihazı

## BÖLÜM 4

### ADSORPSİYON DENEYLERİ

#### 4.1 Zeolitin Hazırlanışı

ROTA firmasından temin edilen ve yaklaşık 0,5 mm tane büyüklüğünde olan doğal zeolit ( klinoptilolit ), zeolit kutusuna doldurulmadan önce de-iyonize suyla yıkanıp 200° C lik fırında kurutulmuştur. Yıkama ve kurutma işleminin aşamaları aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir:

- i. Deney için gerekli zeolit miktarının biraz üzerinde zeolit alınmıştır (yaklaşık olarak % 50 fazlası).
- ii. Toplam zeolit kütlesi yıkama ve kurutma işlemine tabi tutulmadan önce 0,5 mm boyutunda deliklere sahip elekte elenerek küçük boyutlu zeolit taneciklerinden arındırılmıştır.
- iii. Zeolit elendikten sonra de-iyonize su ile yıkanıp temiz bir yüzeyin üzerine serilmiştir ve yaklaşık olarak bir gün boyunca doğal olarak kurumaya bırakılmıştır.
- iv. Son olarak doğal olarak kurumaya bırakılan zeolitin tamamı 200° C' ye ayarlanmış fırında kurutma işlemine tabi tutulmuştur ve bu işlem boyunca her 30 dakikada bir zeolit fırından çıkarılarak tartılmıştır. Kurutma işlemine arka arkaya gelen iki ölçüm arasındaki fark 1 gr olana dek devam edilmiştir.

Zeolitin deneye hazır hale getirilmesi sırasındaki kütle değişimi aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

#### 4.1.1 Yıkamadan ve fırınlamadan önce

Yıkamadan ve fırınlamadan önce toplam olarak 3847 gr doğal zeolit alınmıştır (Tablo 4.1).



Tablo 4.1 Yıkamadan ve fırınlamadan önceki zeolit miktarı

Beher	Kütle (gr)	Dara (gr)	Net Kütle (gr)	Nem (%)	Sıcaklık (°C)
1. Beher	1962	376	1586	29	29
2. Beher	2020	368	1652	29	29
3. Beher	894	285	609	29	29
Toplam	4876	1029	3847	29	29

#### 4.1.2 Yıkamadan sonra fırınlamadan önce (ıslak zeolit)

Yıkamadan sonra fırınlamadan önce toplam olarak 5856 gr ıslak zeolit elde edilmiştir (Tablo 4.2) ve bu zeolit bir gün süreyle doğal olarak kurumaya bırakılmıştır.

Tablo 4.2 Yıkamadan sonra fırınlamadan önceki zeolit miktarı

Elek	Kütle (gr)	Dara (gr)	Net Kütle (gr)	Nem (%)	Sıcaklık (°C)
1. Elek	3091	697	2394	31	28
2. Elek	3214	718	2496	31	28
3. Elek	1651	685	966	31	28
Toplam	7956	1029	5856	31	28

#### 4.1.3 Doğal kurumadan sonra fırınlamadan önce

Bir gün süre ile doğal olarak kurumaya bırakılan zeolit kuruyup elendikten sonra toplam 3950 gr olarak ölçülmüştür (Nem:30 %, Sıcaklık: 27° C).

#### 4.1.4 Fırınlama Sonrası

Doğal olarak kurumaya bırakılan zeolit elendikten sonra fırına verilmiştir ve bu fırınlama işleminin sonunda toplam 3328 gr kuru zeolit elde edilmiştir. Fırınlama işleminin detayları Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3 Fırınlama işleminin detayları

Tarih	Saat	Fırın Sıc. (°C)	Ortam Sıc. (°C)	Nem (%)	Dara (gr)	F. Önce (gr)	F. Sonra (gr)
11.09.07	14:00	150	28	31	944	4894	4582
11.09.07	15:00	100	28	31	944	4582	4573
11.09.07	15:30	100	28	31	944	4573	4565
11.09.07	16:00	100	28	31	944	4565	4553
11.09.07	16:30	100	28	31	944	4553	-
12.09.07	08:30	200	24,5	29	944	4546	4528
12.09.07	09:00	200	24,9	29	944	4528	4494
12.09.07	09:30	200	25,2	28	944	4494	4452
12.09.07	10:00	200	25,4	28	944	4452	4421
12.09.07	10:30	200	25,6	27	944	4421	4393
12.09.07	11:00	200	25,8	27	944	4393	4376
12.09.07	11:30	200	26	26	944	4376	4363
12.09.07	12:00	200	26	26	944	4363	4354
12.09.07	12:30	200	26,2	26	944	4354	4345
12.09.07	13:00	200	26,5	26	944	4345	4336
12.09.07	13:30	200	26,5	26	944	4336	4327
12.09.07	14:00	200	26,5	26	944	4327	4322
12.09.07	14:30	200	26,5	26	944	4322	4317
12.09.07	15:00	200	26,6	26	944	4317	4313
12.09.07	15:30	200	26,6	26	944	4313	4310
13.09.07	08:30	200	25,6	31	944	4310	4274
13.09.07	09:00	200	25,6	32	944	4274	4273
13.09.07	09:30	200	25,8	32	944	4273	4272
13.09.07	10:00	200	25,9	32	944	4272	4272
13.09.07	10:30	200	26,1	31	944	4272	4272
13.09.07	10:50	200	26,1	31	944	4272	4272

Son yapılan deneyde zeolit kutusuna yukarıdaki prosedüre göre hazırlanan zeolitten toplam 1680 gr konulmuştur. Doldurulan zeolitin yoğunluğu ise  $747 \text{ kg/m}^3$  olarak hesaplanmıştır.

#### 4.2 Adsorpsiyon deney prosedürü

Adsorpsiyon deneyleri sırasında aşağıdaki deney prosedürü takip edilmiştir.

- i. İlk olarak aşağıdaki koşul incelenecektir

Yenilenme: Buradaki amaç su buharı ile doymuş zeolitin yenilenmesi için gerekli sıcaklık değerine karar vermektir. Ayrıca, bu değer sayesinde sistemde kullanılacak kollektör tipi de belirlenecektir.

- ii. Zeolit daha önce tarif edildiği gibi hazırlanacaktır.
- iii. Kuru zeolitin yoğunluğu hesaplanacaktır.
- iv. Kütlesi ve hacmi bilinen zeolit madeni zeolit kutusuna doldurulacak ve üzerine sıkıştırma plakası konulduktan sonra kapağı kapatılacaktır.
- v. Zeolit kutusu fırının içine yerleştirildikten sonra vakum hattına bağlanacaktır.
- vi. Vakum pompası kullanılarak sistem tamamen boşaltılacaktır. Sistem boşatıldıktan sonra vana kapatılacak fakat pompanın sistem ile olan bağlantısı kalacaktır.
- vii. Zeolit kutusu ile buharlaştırıcı/yoğusturucu kutusu arasındaki vana kapatılacaktır.
- viii. Su besleme hattı de-iyonize su ile doldurulacak ve bu hat üzerindeki vana yavaşça açılarak sisteme su girişi sağlanacaktır.
- ix. Sisteme sağlanan suyun hacmi iki şekilde kontrol edilecektir.
  - x.1. Besleme hattındaki suyun hacminin değişiminden
  - x.2. Buharlaştırıcı/yoğusturucu içerisindeki su miktarından ( içerideki su buharı kütlesi, ihmal edilebilir).
- xi. Soğutma grubu çalıştırılacak ve su banyosu sıcaklığı ilk olarak 5 °C ( $P_v = 0,88$  kPa) ye ayarlanacak ve zeolit kutusu ile buharlaştırıcı arasındaki vana yavaşça açılacaktır. Fırının sıcaklığı ise başlangıçta 150 °C olacaktır.
- xii. Her 10 dakikada bir elde edilen veriler kayıt altına alınacak ve bu durum zeolit ile çevresi arasındaki sıcaklık farkı bir derece olana kadar sürecektir.
- xiii. xi ve xii sırasıyla 10, 20, 30 ve 40 °C lik su banyosu sıcaklıkları için tekrar edilecektir.
- xiv. Zeolit kutusu ile buharlaştırıcı arasındaki vana kapatılacak. Fırının sıcaklığı 25 °C azaltılarak 40 °C lik fırın sıcaklığına kadar xi den sonraki aşamalar takip edilecektir.

### 4.3 Adsorpsiyon deney sonuçları

Adsorban malzemenin adsorplama kapasitesi,  $x=f(P, T)$ , adsorpsiyon basıncı ve adsorban malzemenin sıcaklığı ile değişmektedir ve bu değişim çoğunlukla eş sıcaklık eğrileri çizilerek ifade edilmektedir. Deneyler sırasında adsorban malzemenin (zeolit) sıcaklığı elektrikli fırın vasıtasıyla, adsorpsiyon basıncı ise buharlaştırıcı/yoğusturucu kutusunun içinde bulunduğu su banyosu sıcaklığının kontrol edilmesiyle istenilen bir değerde sabit tutulmuştur.

Zeolit-su çalışma çiftine ait eş sıcaklık eğrilerini elde etmek için yukarıdaki deney prosedürü çerçevesinde iki set deney yapılmıştır ve her bir deney seti kendi içerisinde adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesi olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. İlk deney setinde, öncelikle zeolit sıcaklığı sabit tutulur iken (başlangıçta 150 °C ), sırası ile 5, 10, 20, 30, 40 °C lik su banyosu sıcaklıklarına karşılık gelen doymuş buhar basıncı değerlerinde adsorpsiyon sonuçları elde edilmiştir ve daha sonra aynı işlem sırası ile 125, 100, 75, 40 °C lik zeolit sıcaklıkları için tekrarlanmıştır. Bu deneyler sırasında adsorban sıcaklığı sabit tutulur iken su buharı basıncı banyo sıcaklığı değiştirilerek giderek artırılmıştır ve bu şekilde yapılan deneyler adsorpsiyon deneyleri olarak adlandırılmıştır. Çünkü su buharı adsorban malzeme tarafından sürekli olarak adsorplanmaktadır. Desorpsiyon deneyleri ise zeolit sıcaklığı sabit tutulur iken (başlangıçta 150 °C), sırası ile 40, 30, 20, 10, 5 °C lik su banyosu sıcaklıklarına karşılık gelen doymuş buhar basıncı değerleri için yapılmıştır ve aynı işlem adsorpsiyon deneylerinde olduğu gibi sırası ile 125, 100, 75, 40 °C lik zeolit sıcaklıkları için tekrar edilmiştir. Diğer bir ifade ile desorpsiyon deneylerinde başlangıçta adsorban malzeme sabit sıcaklıkta ve 40 °C lik sıcaklığa karşılık gelen adsorpsiyon basıncında su ile tamamen doyurulmuştur (en fazla miktarda). Daha sonra su buharı basıncı giderek düşürülerek adsorplanan suyun buharlaşması ve yoğunlaşmada sıvı fazına dönüşmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak her iki prosedenden elde edilen adsorpsiyon değerlerinin aynı olup olmadığı karşılaştırılmıştır.

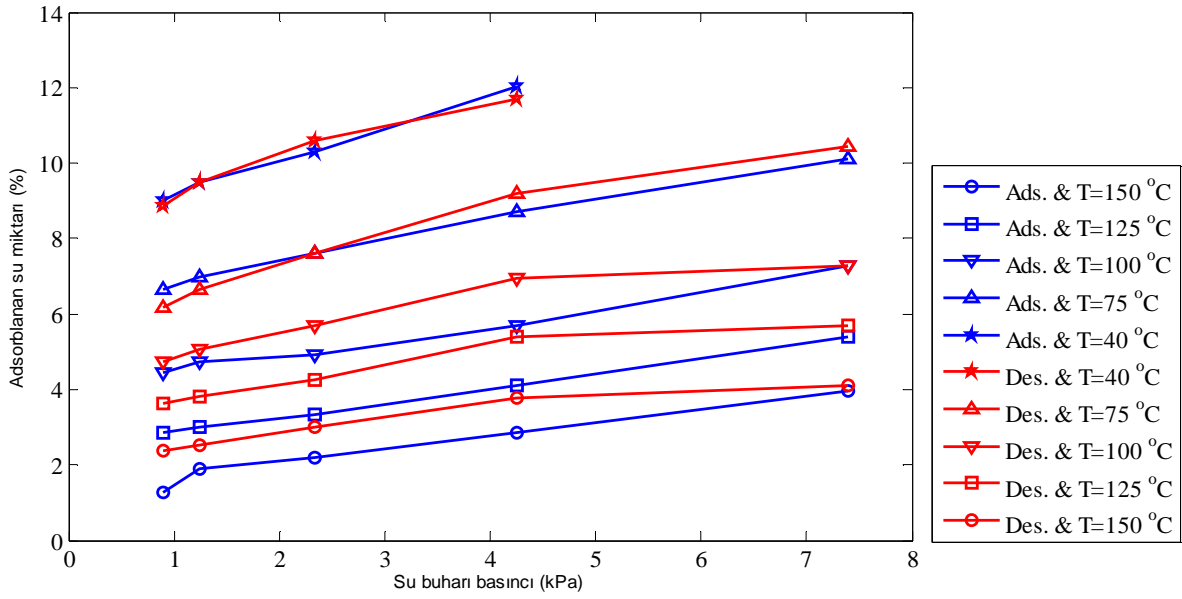
İkinci deney setinde ise, zeolit sıcaklığı sabit tutulur iken (başlangıçta 150 °C), önce adsorpsiyon ve daha sonrada aynı zeolit sıcaklığında desorpsiyon deneyleri yapılmıştır. Bu işlem sırası ile 125, 100, 75, 40 °C lik zeolit sıcaklıkları için tekrarlanmıştır.

Tablo 4.4 Birinci set adsorpsiyon deney sonuçları

T <sub>su ban.</sub> (°C)	Adsorpsiyon yüzdesi				
	T=150 °C	T=125 °C	T=100 °C	T=75 °C	T=40 °C
5	1,26	2,84	4,43	6,65	9,02
10	1,89	3	4,74	6,97	9,5
20	2,21	3,32	4,91	7,6	10,29
30	2,84	4,11	5,7	8,7	12,03
40	3,96	5,38	7,28	10,13	

Tablo 4.5 Birinci set desorpsiyon deney sonuçları

T <sub>su ban.</sub> (°C)	Adsorpsiyon yüzdesi				
	T=150 °C	T=125 °C	T=100 °C	T=75 °C	T=40 °C
5	2,37	3,64	4,75	6,17	8,86
10	2,53	3,8	5,06	6,64	9,49
20	3	4,27	5,69	7,6	10,6
30	3,79	5,38	6,96	9,18	11,71
40	4,11	5,7	7,28	10,44	



Şekil 4.1 Birinci deney setine ait eş sıcaklık eğrileri

Zeolit-su çiftine ait birinci deney setinden elde edilen eş sıcaklık eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir. Birinci deney setinden elde edilen veriler ise Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’de sırası ile adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için sunulmuştur. Adsorplanan su miktarı toplam zeolit kütlelerinin yüzdesi olarak ifade edilmiştir.

Şekil 4.1’den görüldüğü üzere deneylerin yapıldığı adsorban sıcaklığı ve adsorpsiyon basıncı aralığında, adsorban malzeme ağırlığının yaklaşık olarak en fazla yüzde oniki si kadar su tutabilmektedir. Adsorplanan su miktarı artan adsorpsiyon basıncı ve azalan adsorban sıcaklığıyla artış göstermektedir. Fakat yüksek adsorban sıcaklıklarında adsorplanan su miktarı adsorpsiyon basıncına zayıf bir şekilde bağlıdır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon

proseslerinden elde edilen sonuçlar düşük adsorban sıcaklıkları için uyumlu iken adsorban sıcaklığının yükselmesi ile her iki proseden elde edilen sonuçlarda sapmalar oluşmuştur. Bu sapmaların başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Eğer yoğuşma yüzey alanınız yeterli değil ise düşük basınç altında yoğuşma olayı oldukça uzun sürmektedir.
- Yoğuşma yüzeyinin üzerinde yoğuşmayan gazların varlığı (örneğin hava gibi) yoğuşma olayını olumsuz yönde etkilemektedir.
- Yüksek sıcaklıklarda adsorplanan su miktarı düşük sıcaklıklara göre daha azdır. Dolayısıyla, yoğuşturucudaki sıvı seviyesini okumadan kaynaklanan hatalar daha yüksektir.

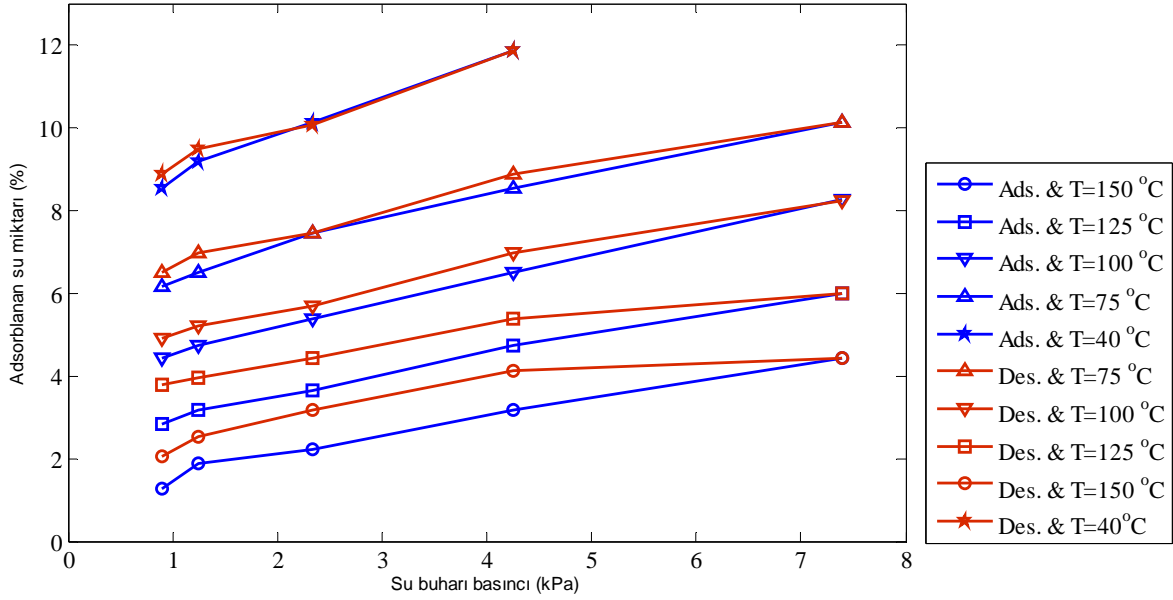
Tablo 4.6 İkinci set adsorpsiyon deney sonuçları

T <sub>su ban.</sub> (°C)	Adsorpsiyon yüzdesi				
	T=150 °C	T=125 °C	T=100 °C	T=75 °C	T=40 °C
5	1,26	2,84	4,43	6,17	8,54
10	1,89	3,16	4,75	6,5	9,18
20	2,21	3,64	5,38	7,44	10,13
30	3,16	4,75	6,5	8,54	11,87
40	4,43	6	8,23	10,13	

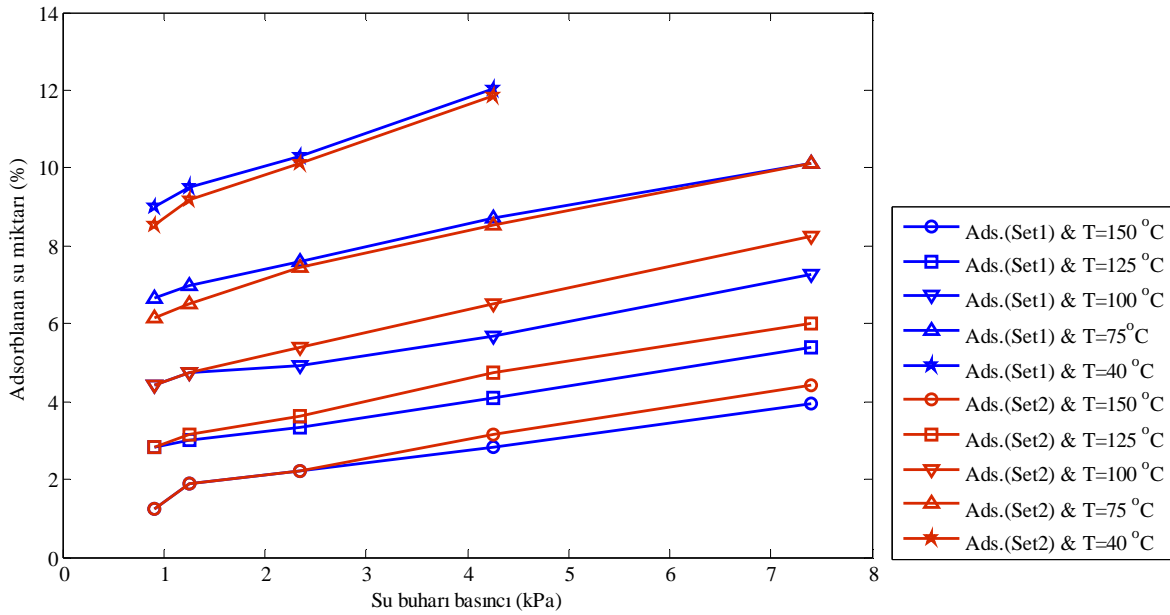
Tablo 4.7 İkinci set desorpsiyon deney sonuçları

T <sub>su ban.</sub> (°C)	Adsorpsiyon yüzdesi				
	T=150 °C	T=125 °C	T=100 °C	T=75 °C	T=40 °C
5	2,05	3,8	4,9	6,5	8,86
10	2,53	3,95	5,22	6,96	9,49
20	3,16	4,43	5,69	7,44	10,06
30	4,11	5,38	6,96	8,86	11,87
40	4,43	6	8,23	10,13	

Şekil 4.2’ de zeolit-su çalışma çiftine ait ikinci deney setinden elde edilen eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’ de ise ikinci deney setinden elde edilen veriler sırası ile adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için sunulmuştur.

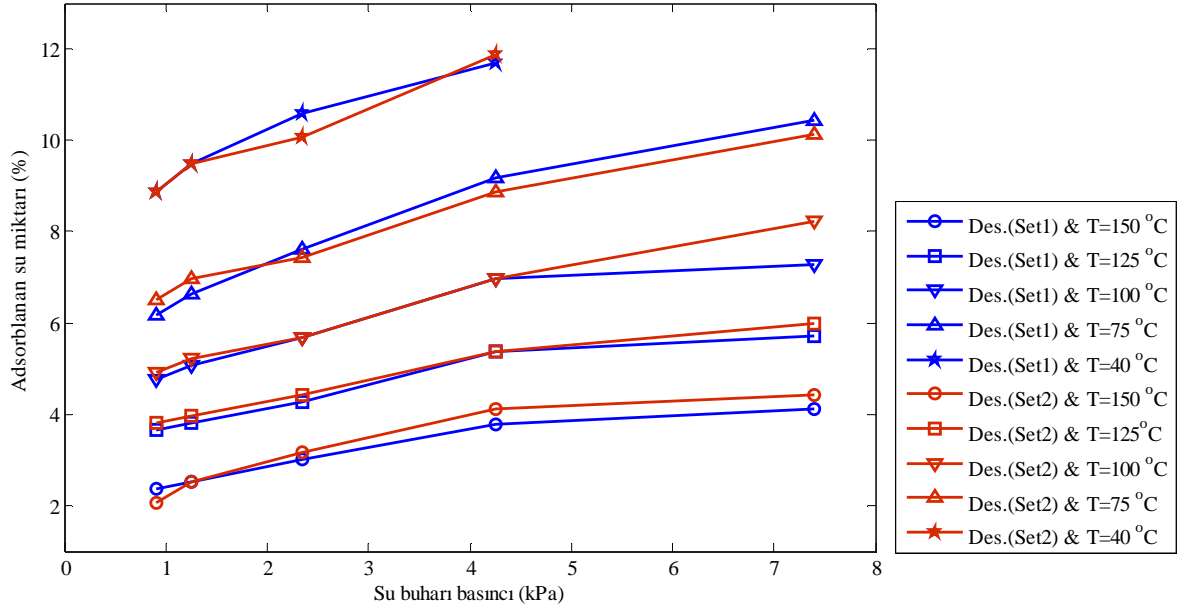


Şekil 4.2 İkinci deney setine ait eş sıcaklık eğrileri



Şekil 4.3 Birinci ve ikinci deney setine ait adsorpsiyon eş sıcaklık eğrileri

Adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri için birinci ve ikinci deney setinden elde edilen eş sıcaklık eğrileri sırası ile Şekil 4.3 ve 4.4’ de verilmiştir. İkinci deney setinden hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon prosesleri için elde edilen veriler yaklaşık olarak birinci deney setinden elde edilenler ile uyumludur.



Şekil 4.4 Birinci ve ikinci deney setine ait desorpsiyon eş sıcaklık eğrileri

### 4.3.1 Adsorpsiyon dengesi

Doğal zeolitin adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitesini bulmak için aşağıda verilmiş olan Dubinin–Astakhov (D–A) denklemi kullanılabilir.

$$x = x_0 \exp \left[ -k \left( \frac{T}{T_s} - 1 \right)^n \right] \quad (4.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $x$  ( $\text{kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{zeolit}}$ ) adsorpsiyon kapasitesini,  $T$  (K) adsorpsiyon sıcaklığını,  $T_s$  (K) soğutucu akışkanın doyma sıcaklığını,  $k$ ,  $x_0$  ve  $n$  değerleri ise çalışma çiftine ait



karakteristik değerleri temsil etmektedir. Ayrıca, bir numaralı denklemde yer alan karakteristik değerler çalışma çiftine göre değişim göstermektedir.

Çalışmakta olduğumuz zeolit-su çiftine ait eş sıcaklık deney sonuçlarına 4.2 numaralı denklem uydurularak  $x_o$  ve  $k$  katsayılarının sayısal değerleri bulunmuştur. Bu değerlerin elde edilmesi sırasında ilk önce bir  $n$  değeri varsayılmıştır ve bu değer değiştirilerek eş sıcaklık verilerine en uygun eğri uydurulmaya çalışılmıştır.

$$x = x_o \exp[-ky] \quad (4.2)$$

Buradaki  $y$  ifadesi denklem 4.3 ile ifade edilmiştir.

$$y = \left( \frac{T}{T_s} - 1 \right)^n \quad (4.3)$$

Birinci deney setinden adsorpsiyon prosesi için elde edilen eş sıcaklık verilerine 4.2 numaralı denklemin uydurulması ile farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen  $x_o$ ,  $k$  ve  $n$  değerleri bulunmuştur ve bu değerler Tablo 4.8' de verilmiştir.

Tablo 4.8 Adsorpsiyon prosesi için farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen  $x_o$ ,  $k$  ve  $n$  değerleri

T (K)	$x$ (kg <sub>su</sub> /kg <sub>zeolit</sub> )	$k$	$n$
423	3,022	7,365	0,5
398	0,6931	4,967	0,5
373	0,311	3,411	0,5
348	0,2355	2,557	0,5
313	0,1612	1,648	0,5

Aşağıda ise sırasıyla denklem 4.4 ve 4.5 ile  $x_o$  ve  $k$  değerleri adsorban sıcaklığının fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$x_o(T) = 0,01356 * \exp(0,007984 * T) + 8,683.10^{-15} * \exp(0,0788 * T) \quad (4.4)$$

$$k(T) = 1,647 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(0,02845 \cdot T) + 0,06947 \cdot \exp(0,009897 \cdot T) \quad (4.5)$$

Birinci deney setinden desorpsiyon prosesi için elde edilen eş sıcaklık verilerine 4.2 numaralı denklemin uydurulması ile farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen  $x_o$ ,  $k$  ve  $n$  değerleri ise Tablo 4.9'de verilmiştir.

Tablo 4.9 Desorpsiyon prosesi için farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen  $x_o$ ,  $k$  ve  $n$  değerleri

T (K)	$x$ (kg <sub>su</sub> /kg <sub>zeolit</sub> )	$k$	$n$
423	0,5845	4,437	0,5
398	0,3711	3,553	0,5
373	0,2825	3,035	0,5
348	0,3054	3,182	0,5
313	0,1567	1,561	0,5

Desorpsiyon prosesi için farklı adsorban sıcaklıklarına karşılık gelen  $x_o$  ve  $k$  değerleri aşağıda sırasıyla denklem 4.6 ve 4.7 ile adsorban sıcaklığının fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$x_o(T) = 7,121 \cdot 10^{-18} \cdot \exp(0,08848 \cdot T) + 0,007574 \cdot \exp(0,009679 \cdot T) \quad (4.6)$$

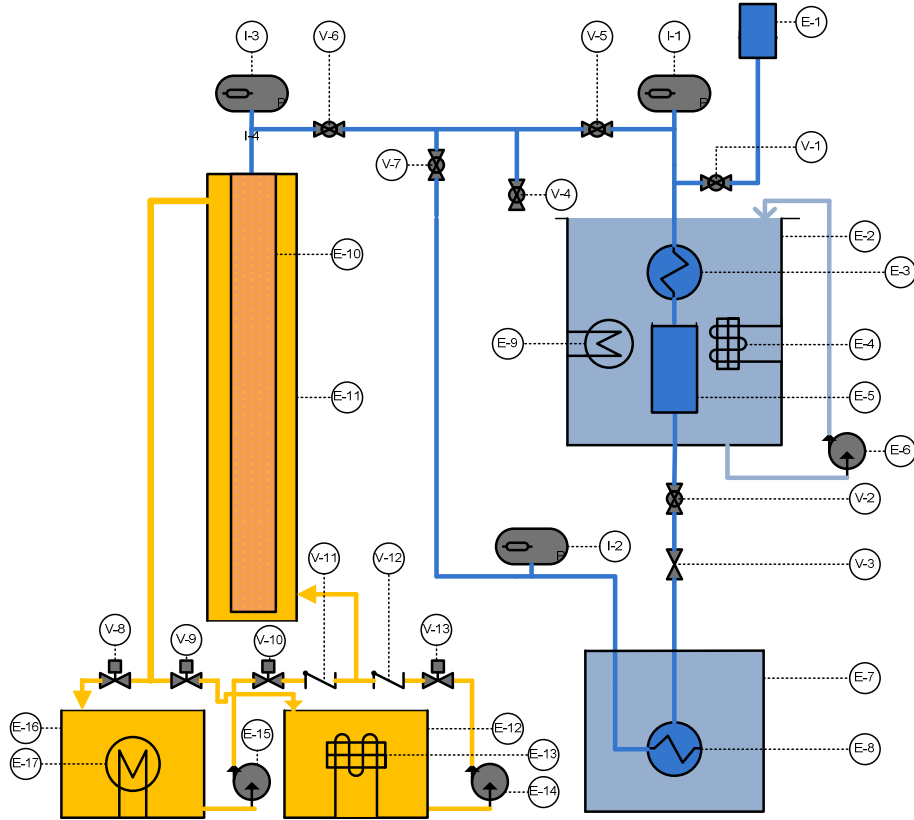
$$k(T) = 0,1026 \cdot \exp(0,008924 \cdot T) \quad (4.7)$$

Sonuç olarak,  $x_o$ ,  $k$  ve  $n$  değerlerinin bulunmasıyla birlikte eş sıcaklık deneylerinin yapıldığı basınç ve sıcaklık aralığında zeolit-su çalışma çiftinin adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitesi farklı adsorban sıcaklıkları ve soğutucu akışkan buhar basıncı için Dubinin–Astakhov denklemi yardımıyla hesaplanabilir.

## BÖLÜM 5

### ÖRNEK SOĞUTMA GRUBU

Aşağıda Şekil 5.1’ de şematik gösterimi, Şekil 5.2’ de ise genel görünüşü verilen zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu deneysel örnek soğutma grubu tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, adsorpsiyonlu soğutma sisteminin termal performansı sistemin farklı çalışma koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir.



Şekil 5.1 Örnek soğutma grubunun şematik gösterimi. (E-1 Su besleme kabı, E-2 Su banyosu, E-3 Yoğuşurucu, E-4 Soğutma grubu, E-5 Soğutucu akışkan toplama kabı, E-6 Dolaşım pompası, E-7 Soğutulan Ortam (su), E-8 Buharlaştırıcı, E-9 Elektrikli ısıtıcı, E-10 Zeolit yatağı, E-11 Isı transferi sıvısının dolaştığı gövde, E-12/16 Isı transferi sıvısı depolama tankı, E-13 Soğutma grubu, E-14/15 Dolaşım pompası, E-17 Elektrikli ısıtıcı, V-1/2/4/5/6/7 Küresel vakum vanası, V-3 Kısılma vanası, V-8/9/10/13 Selenoid vana, V-11/12 Çek valf, I-1/2/3 Basınç sensörü.



Şekil 5.2 Örnek soğutma grubunun genel görünüşü

Deneysel soğutma grubunu oluşturan başlıca elemanlar aşağıdaki gibidir;

- Gövde-borulu adsorban yatak
- Yoğuşturucu
- Buharlaştırıcı
- Isıtma ve soğutma banyoları
- Ölçü cihazları
- İlave sistem elemanları

Aşağıdaki bölümde her bir sistem elemanı ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

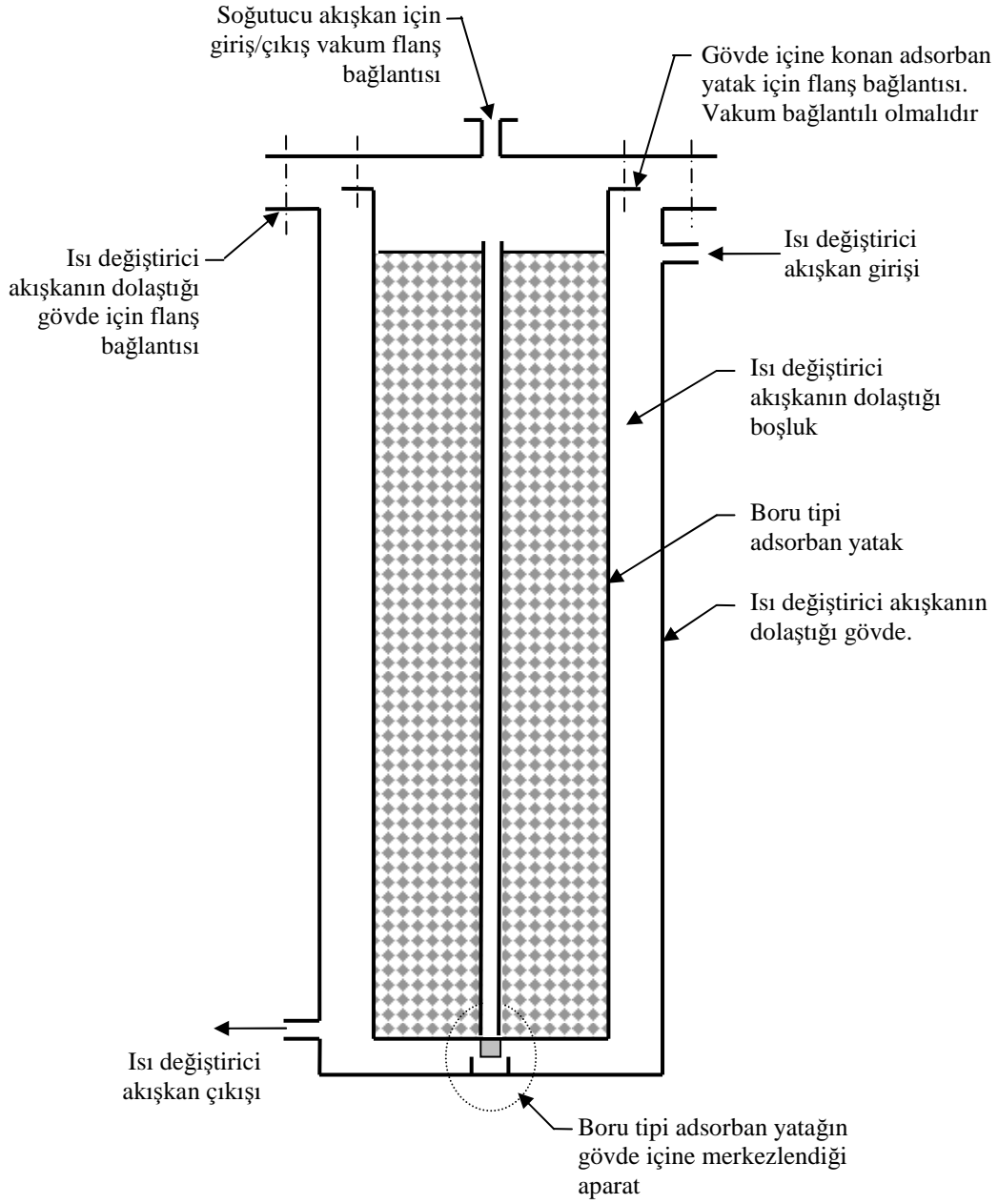
### 5.1 Gövde-borulu adsorban yatak

Genel görünüşü Şekil 5.3 ve şematik gösterimi Şekil 5.4 ile verilen gövde-borulu adsorban yatak, ısı transfer sıvısının dolaştığı gövde ile adsorban malzemenin vakum altında tutulduğu boru tipi adsorban yataktan oluşmaktadır.

Gövde kısmı iç çapı 136 mm, dış çapı 140 mm yüksekliği 821 mm olan paslanmaz çelik boru malzemeden imal edilmiştir. Bu borunun alt ve üst kısımlarına et kalınlığı 15 mm, iç çapı 140 mm, dış çapı 205 mm ve üzerinde 8 adet 7 mm çapında civata deliği bulunan flanş kaynak yapılmıştır. Gövdenin alt kısmı, üzerinde borulu adsorban yatağın merkezlendiği aparat bulunan 15 mm et kalınlığına sahip 205 mm dış çapında paslanmaz çelik kapak ile kapatılmıştır. Kapağın 185 mm lik çapı üzerine eşit aralıklarla 8 adet 7 mm çapında civata deliği açılmıştır. Gövdenin üst kısmı ise borulu adsorban yatağın gövde içine yerleştirilmesi ile kapatılmıştır. Diğer bir ifade ile burada kullanılan kapak hem gövdenin hem de adsorban yatağın üst kısmını kapatmaktadır. Bu kapağın et kalınlığı 15 mm çapı ise 205 mm dir. Sırası ile kapağın 185 ve 95 mm lik çapları üzerine 8 adet 7 ve 6 mm çapında civata deliği açılmıştır. Ayrıca bu kapak üzerine vakum sistemlerinde sıcaklık ölçümü için kullanılan bir adet termal eleman girişi kaynak edilmiştir. Bu termal eleman girişi vasıtasıyla adsorban yatak içerisinde üç farklı noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Son olarak gövdenin alt ve üst kısmına birer adet ısı transfer sıvısını dolaştırmak için gerekli olan boru bağlantı deliği açılmıştır. Gövde kısmında vakum olmadığı için kapak kısımlarında sıradan sızdırmazlık elemanları kullanılmıştır.



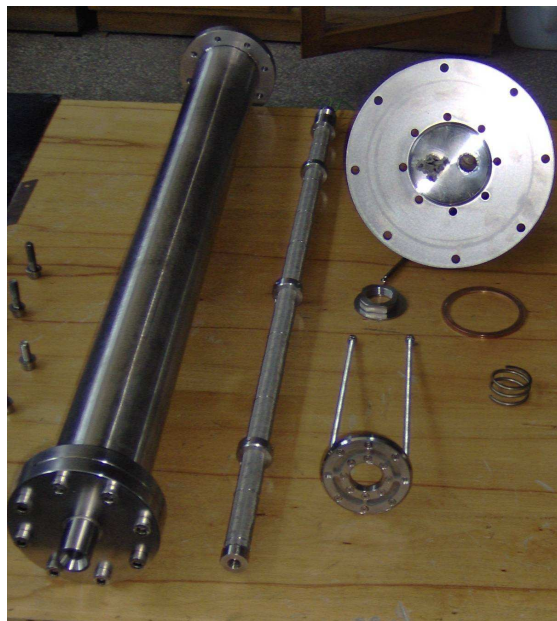
Şekil 5.3 Gövde-borulu adsorban yatağın genel görünüşü



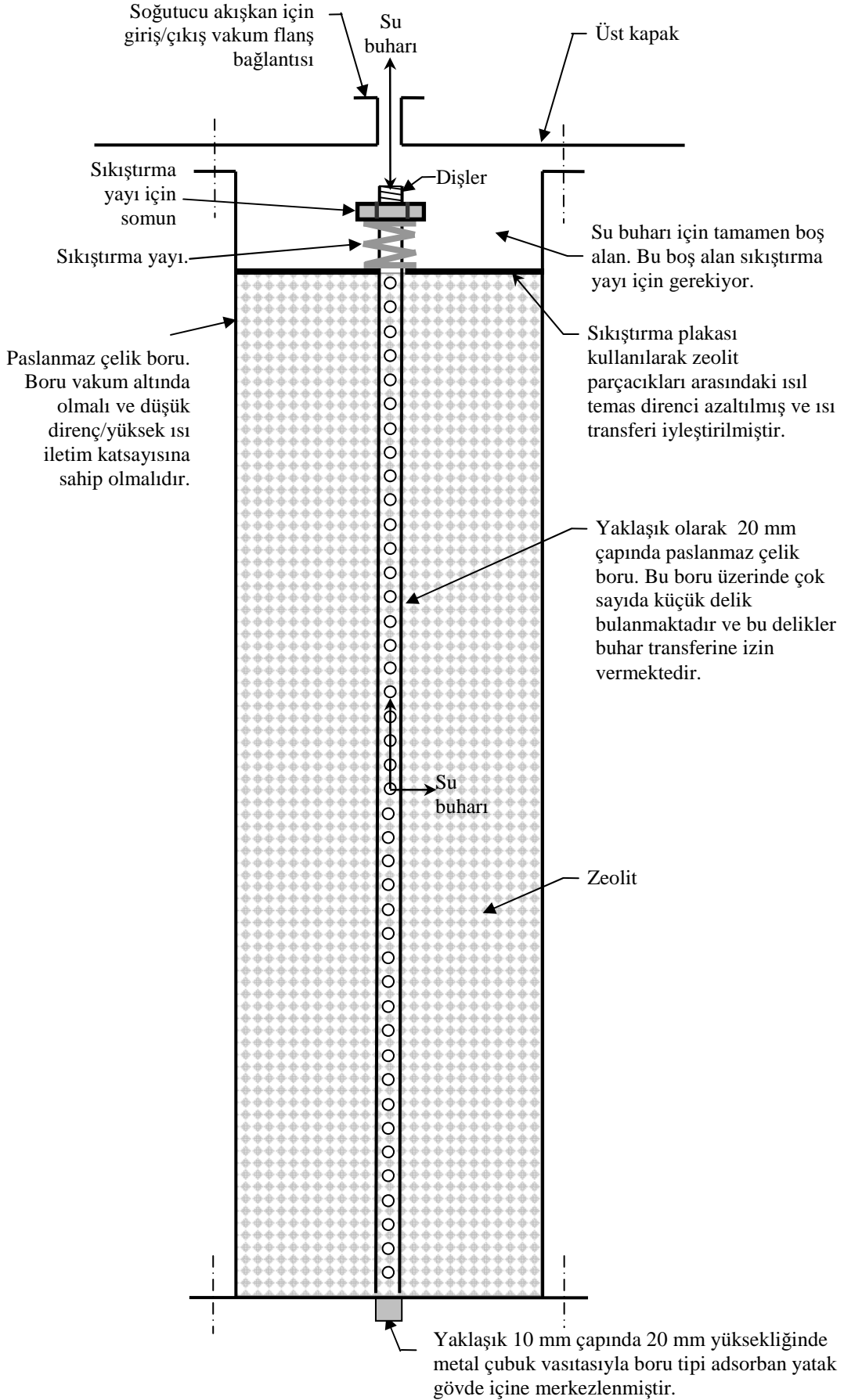
Şekil 5.4 Gövde borulu adsorban yatağın şematik gösterimi

Boru tipi adsorban yatağı oluşturan elemanlara ait resimler Şekil 5.5' de, yatağın şematik gösterimi ise Şekil 5.6' da verilmiştir. Borulu adsorban yatağın iç çapı, dış çapı ve yüksekliği sırasıyla 73, 76 ve 765 mm dir ve tamamen paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Yatağın alt ve üst kısmına et kalınlığı 15 mm, iç çapı 76 mm, dış çapı 115 mm ve üzerinde 8 adet 6 mm çapında civata deliği bulunan flanş kaynak yapılmıştır. Yatağın alt kısmı, 15 mm

et kalınlığına sahip dış yüzeyi üzerinde gövde merkezleme halkasının bulunduğu kapak ile kapatılmıştır. Bu kapağın iç yüzeyine merkezinden, hem ısı transferi yüzey alanını artırmak hem de buhar difüzyonunu kolaylaştırmak için üzerinde 3 mm çapında delikler bulunan iç çapı 16 mm, dış çapı 19 mm, boyu 710 mm olan paslanmaz çelik boru sıkılmıştır. Borunun dış yüzeyi adsorban malzeme transferini engellemek için 100 mikron boyutunda deliklere sahip elek malzemesi ile sarılmıştır. Termal eleman girişinden gelen üç adet ısı eleman, seramik malzeme vasıtasıyla bu boru üzerine tabandan itibaren 130 mm, 350 mm ve 570 mm olan noktalara yerleştirilmiştir. Ayrıca boru adsorban malzeme ile doldurulduktan sonra adsorban malzeme sıkıştırma plakası ve bir yay vasıtasıyla sıkıştırılmıştır. Bu plakanın et kalınlığı 7 mm, çapı ise 72 mm dir ve üzerinde 3 mm çapında delikler bulunmaktadır. Bu plakanın alt yüzeyi kütle transfer borusunda olduğu gibi aynı türden elek malzemesi ile kaplanmıştır. Adsorban yatağın üst kısmı ise daha öncede bahsedildiği üzere gövdenin üst kısmını kapatan kapak ile kapatılmıştır. Ayrıca bu kapağın merkezine akışkan transferi için gerekli olan boru bağlantı flanşı kaynak edilmiştir. Sızdırmazlık için boru tipi adsorban yatakta viton o-ring yerine bakır conta kullanılmıştır. Bunun için üst flanşa standartlara uygun olarak bakır conta kanalı açılmıştır. Bakır contalar tek kullanımlık olup her söküp takma işleminden sonra değiştirilmesi gerekmektedir. Fakat bakır conta viton o-ringe göre daha iyi sızdırmazlık sağlamaktadır. Son olarak, boru tipi adsorban yatak ısı kayıplarına karşı cam yünü ile izole edilmiştir.



Şekil 5.5 Boru tipi adsorban yatağı oluşturan elemanlar



Şekil 5.6 Boru tipi adsorban yatağın şematik gösterimi

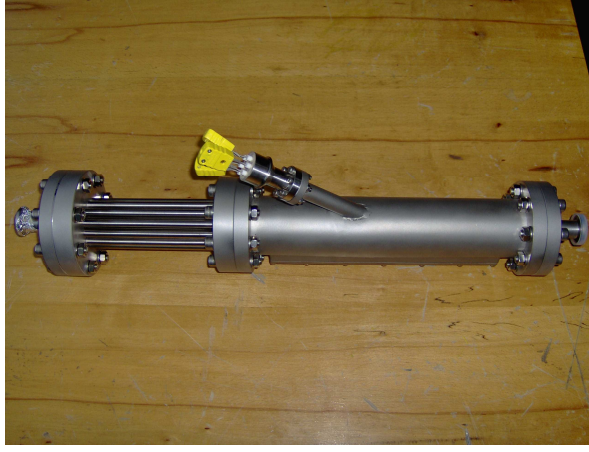


## 5.2 Yoğuşturucu

Yoğuşturucu, soğutucu akışkanın biriktiği toplama kabı ve yoğuşma yüzeyini oluşturan boru demetinden oluşmaktadır. Yoğuşturucunun genel görünüşü Şekil 5.7’ de verilmiştir.

Soğutucu akışkan toplama kabı, iç çapı 58 mm, dış çapı 61 mm ve yüksekliği 300 mm olan paslanmaz çelik bir borudur. Bu borunun alt ve üst kısımlarına iç çapı 61 mm, dış çapı 100 mm, et kalınlığı 15 mm olan ve üzerinde 8 adet 6 mm çapında civata deliği bulunan flanş kaynak yapılmıştır. Borunun alt kısmı, üzerinde soğutucu akışkan transfer borusunun bulunduğu et kalınlığı 15 mm çapı ise 100 mm olan kapak ile kapatılmıştır. Alt kapağın 78 mm lik çapı üzerine aralarında eşit mesafe bulunan 8 adet 6 mm çapında civata deliği açılmıştır. Toplama kabının üst kısmı ise üzerinde yoğuşma yüzeyini oluşturan boru demetinin bulunduğu kapak ile kapatılmıştır. Kapağın et kalınlığı 15 mm olup çapı ise 100 mm dir. Boru demetinde kullanılan borular paslanmaz çelik olup iç çap, dış çap ve yüksekliği sırası ile 6 mm, 8 mm ve 13,5 mm dir ve toplam olarak 22 adet boru kullanılmıştır. Boru demetinin üst kısmına ise üzerinde soğutucu akışkan giriş borusunun olduğu dağıtıcı civata somun bağlantısıyla bağlanmıştır. Yoğuşturucu içerisinde, soğutucu akışkanın sıvı ve gaz fazındaki sıcaklıklarını okumak için üç adet termal eleman kullanılmıştır. Bu ısıl elemanlar yoğuşturucu dışına bir adet termal eleman girişi kullanılarak alınmıştır. Son olarak toplama kabının içindeki soğutucu akışkanın seviyesinde meydana gelen değişimi gözlemlemek için boru yüzeyine bir kanal açılarak bu kanal üzerine viton o-ring vasıtası ile flexiglass gözlemeleme camı sabitleştirilmiş ve camın üzerinede seviye ölçüm cetveli yapıştırılmıştır. Sızdırmazlık için ise bağlantı noktalarında bakır conta kullanılmıştır.

Yoğuşturucu, yoğuşma basıncını ayarlayabilmek için iyi bir şekilde izole edilmiş sabit sıcaklık banyosu içine yerleştirilmiştir. Su banyosu 72 litre hacminde olup paslanmaz çelik malzemedan imal edilmiştir. Banyonun sabit sıcaklıkta tutulması 1.5 kW gücünde bir adet elektrikli ısıtıcı ve buhar sıkıştırırmalı soğutma grubunun kullanılması ile sağlanmıştır. Ayrıca banyo içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edebilmek için 56 W gücünde bir dolaşım pompası kullanılmıştır.



Şekil 5.7 Yoğuşturucu

### 5.3 Buharlaştırıcı

Genel görünüşü Şekil 5.8’ de verilen buharlaştırıcı, iç çapı 8 mm, dış çapı ise 10 mm olan 3 m uzunluğundaki pazlanmaz çelik borunun helisel olarak bükülmesiyle imal edilmiştir. Helisel borunun düz olan ucuna kısılma ve küresel vakum vanası takıldıktan sonra bir boru vasıtasıyla yoğuşturucunun alt kısmına bağlanmıştır. Diğer ucu ise gövde- borulu adsorban yatağa bağlanmıştır. Şekil 5.8’ den de açıkça görüleceği üzere buharlaştırıcıda bir adet termal eleman girişi kullanılmıştır. Bu termal eleman girişi vasıtasıyla soğutucu akışkanın sıcaklığı buharlaştırıcının üç farklı noktasında (alt, orta ve üst kısmında) okunmuştur.



Şekil 5.8 Buharlaştırıcı

Buharlaştırıcı, hacmi yaklaşık olarak 5 litre olan paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiş yalıtımlı bir su banyosu (soğutulan ortam) içerisine daldırılmıştır. Banyo içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde etmek için bir adet 28 W gücünde dolaşım pompası kullanılmıştır. Ayrıca, üç adet termal eleman banyo içerisinde farklı noktalara yerleştirilerek soğutulan ortamın sıcaklık dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır.

#### **5.4 Isıtma ve soğutma banyoları**

Isıtma ve soğutma banyoları 28 litre hacminde olup paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Bu banyolar adsorban yatağı ısıtmak ve soğutmak için gerekli olan ısı değiştirici sıvısını (yağ) sabit bir sıcaklıkta sürekli olarak temin etmektedirler. Isıtma banyosunun ısıtılmasında iki adet 1.5 kW gücünde elektrikli ısıtıcı, soğutma banyosunun soğutulmasında ise buhar sıkıştırmalı soğutma grubu kullanılmıştır. Ayrıca, banyo sıcaklıklarının ölçümü için iki adet thermo eleman kullanılmıştır. Adsorban yatağın ısıtılması veya soğutulması işi, ısı değiştirici akışkanın ısıtma veya soğutma banyosu ile adsorban yatağın gövde kısmı arasında bir pompa vasıtası ile dolaştırılmasıyla sağlanmaktadır.

#### **5.5 Ölçü cihazları**

*Thermo-elemanlar* : Deney düzeneğinde kullanılan bütün thermo-elemanlar K tipi olup toplamda 16 adet thermo-eleman kullanılmıştır ve bu thermo-elemanlar hepsi veri kayıt ve kontrol cihazına bağlanmıştır (Datataker DT800). Düzenek üzerinde sıcaklık ölçümü alınan noktalar aşağıda verilmiştir:

- Üç adet adsorban yatak içerisinde
- Bir adet aracı akışkan transfer hattı üzerinde
- Üç adet yoğuşturucuda
- Bir adet yoğuşturucunun içinde olduğu banyoda
- Üç adet buharlaştırıcıda
- Üç adet buharlaştırıcının içinde olduğu banyoda
- Birer adet ısıtma ve soğutma banyolarında

*Basınç sensörleri* : Adsorban yatak, yoğuşturucu ve buharlaştırıcı basınçlarını ölçmek için üç adet Kurt J. Lesker series 910 tipi basınç sensörü kullanılmıştır.

*Elektrik sayacı* : Isıtma banyosu içindeki ısıtıcı KÖHLER AEL. MF.02 tipi elektronik elektrik sayacına bağlanarak desorpsiyon prosesi sırasında adsorban yatağı ısıtmak için gerekli olan enerji miktarı ölçülmüştür.

*Veri kayıt ve kontrol cihazı* : Deneyle sırasında elde edilen verilerin (sıcaklık, basınç) belirli zaman aralıkları ile kayıt altına alınmasında ve çeşitli sistem elemanlarının kontrolünde DataTaker DT800 tipi veri kayıt ve kontrol cihazı kullanılmıştır. Bütün sensörlerin ölçtüğü sinyal değerleri veri kayıt ve kontrol cihazı tarafından tarandıktan sonra RS485 arayüzü vasıtasıyla masaüstü bilgisayara taşınmaktadır. Verilerin depo ve analiz edilmesi, 0-10 V çıkış anahtarlarının kontrolü cihaz ait olan yazılım (DeLogger) vasıtasıyla sağlanmaktadır.

## **5.6 İlave sistem elemanları**

Adsorban yatak, yoğuşturucu ve buharlaştırıcı arasında kullanılan ilave sistem elemanları aşağıdaki gibidir:

*Küresel vakum vanaları* : Deneyle düzeneğinde toplam altı adet BOC EDWARDS IBV16MKS tipi küresel vakum vanası kullanılmıştır. Vanaların sistem üzerinde kullanıldığı noktalar şu şekilde sıralanabilir; gövde-borulu adsorban yatak girişinde, vakum pompası bağlantı noktasında, buharlaştırıcı çıkışında, yoğuşturucu girişinde, besleme suyu girişinde, yoğuşturucu çıkışında.

*Kısılma vanası* : Yoğuşturucu ile buharlaştırıcı arasında yoğuşturucudan gelen aracı akışkanı buharlaştırıcı basıncına düşürmek için bir adet BOC EDWARDS LV10K tipi genişleme vanası kullanılmıştır. Ayrıca, kısılma vanasının devamında buharlaştırıcı ile kısılma vanası arasında yaklaşık 0.5 m uzunluğunda kılcal bir boru kullanılmıştır.

*Selenoid vanalar ve çek valfler* : Isı transfer sıvısını boru tipi adsorban yatak ile ısıtma ve soğutma banyoları arasında dolaştığı hatta toplam dört adet PVD T-AU 204 tipi normal

selenoid vana ve iki adet çek valf kullanılmıştır. Bu sistem elemanlarının deney düzeneği üzerindeki yerleri Şekil 5.1' de açık bir şekilde gösterilmektedir. Selenoid vanalar röleler vasıtasıyla veri kayıt ve kontrol cihazı tarafından kontrol edilmektedir.

*Vakum pompası* : Düzenek üzerinde bir adet küresel vakum vana bağlantılı pompa bağlantı noktası bulunmaktadır ve sistemde BOC EDWARDS RV3 tipi vakum pompası kullanılmıştır.

İlave sistem elemanlar, bağlantı boruları ve basınç sensörleri arasındaki bağlantı kelepçe vasıtası ile sağlanmıştır ve sızdırmazlık için bağlantı noktalarına viton o-ring konulmuştur. Ayrıca, aracı akışkan transfer hattı, aracı akışkanın hat üzerinde yoğuşmasını engellemek için elektrik ısıtıcı bant ile sarılmıştır.

## BÖLÜM 6

### ÖRNEK SOĞUTMA GRUBU ÜZERİNDE YAPILAN DENEYLER

#### 6.1 Deney prosedürü

Öncelikle üzerinde deney yaptığımız örnek soğutma grubu aşağıdaki aşamalar takip edilerek deneye hazır hale getirilmiştir. Bu aşamalar şöyle sıralanabilir:

- Boru tipi adsorban yatak, deney için hazır hale getirilmiş zeolit ile tamamen doldurulduktan sonra kapağı kapatılıp gövde içine yerleştirilmiştir. Boru içine doldurulan zeolitin ağırlığı 1,87 kg, hacmi ise 2.5 litre dir.
- Gövde borulu adsorban yatak yoğunlaştırıcı buharlaştırıcı hattına bağlanmıştır.
- Vakum pompası yardımıyla bütün sistem tamamen boşaltıldıktan sonra pompa ile sistem arasındaki vana kapatılmıştır.
- Yoğuşturucu giriş ve çıkışındaki vakum vanalarının kapalı olduğu konumda besleme suyu hattındaki vana belirli bir süre açık tutularak yoğunlaştırıcıya çalışma sıvısının girişi sağlanmıştır.
- Banyo başlangıç sıcaklıklarının sabit ve sistemde vakum kaçağı olmadığına kanat getirildikten sonra deney başlatılmış ve ilk çevrim boyunca veri alınmamıştır.

Tam bir çevrim boyunca (soğumanın sağlandığı adsorpsiyon prosesi ve adsorbanın yenilendiği desorpsiyon prosesi) aşağıdaki aşamalar takip edilmiştir:

#### *Adsorpsiyon*

- Adsorban yatak soğutma banyosundaki ısı değiştirici sıvısının gövde içerisinde dolaştırılması ile soğutulur (istenen eş sıcaklık değerine).
- Eğer adsorban içindeki basınç buharlaştırıcı basıncının altında ise yoğunlaştırıcıyla buharlaştırıcı arasındaki vana açılır ve böylece çalışma sıvısı kısımla vanasından

geçirilerek buharlaştırıcıya alınır. Aynı zamanda buharlaştırıcı ile adsorban yatak arasındaki vana açılır, adsorban yatak ile yoğunlaştırıcı arasındaki vana kapalı konumda kalır.

- Bu durum adsorbanın istenen eş sıcaklık değerindeki basıncının buharlaştırıcı basıncına eşit olmasına kadar sürer. Basınçların eşit olduğu eş sıcaklık durumunda yoğunlaştırıcıyla buharlaştırıcı ve buharlaştırıcı ile adsorban yatak arasındaki vanalar kapatılır.

### *Desorpsiyon*

- Isıtma banyosundaki ısı değiştirici sıvısının gövde içerisinde dolaştırılması ile adsorban yatak istenen eş sıcaklık değerine ısıtılır.
- Eğer yatak içerisindeki basınç yoğunlaştırıcı basıncını aşarsa yoğunlaştırıcı ile adsorban yatak arasındaki vana açılır ve adsorban yatak dan yoğunlaştırıcıya buhar transferi başlar.
- Adsorban yatağın istenen eş sıcaklık değerinde yoğunlaştırıcı basıncına ulaşması durumunda adsorban yatak ile yoğunlaştırıcı arasındaki vana kapatılır.
- Çevrim soğumanın sağlandığı adsorpsiyon prosesi ile devam eder.

## **6.2 Denev Sonuçları**

Güneş enerjisi destekli zeolit-su çalışma çiftini kullanan adsorpsiyonlu örnek soğutma grubunun termal performansı farklı buharlaştırıcı sıcaklıklarında deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, soğumanın sağlandığı adsorpsiyon ve zeolit yatağının yenilediğı desorpsiyon prosesi olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Desorpsiyon prosesi sırasında zeolit yatağının yenilenmesi için gerekli enerji, güneş enerjisi yerine elektrik enerjisiyle ısıtılan ısı transfer sıvısının gövde ile adsorban yatak arasında dolaştırılmasıyla sağlanmıştır. Diğerv bir ifade ile güneş enerjisi elektrik enerjisi kullanılarak benzeştirilmiştir. Bu durumda tüketilen enerji (sisteme girilen enerji) ısıtıcıya bağlanan elektronik elektrik sayacı vasıtasıyla ölçülmüştür. Fakat burada ölçülen enerji miktarı deney süresince zeolit yatağından dış ortama olan ısı geçişini, toplam metal kütleveyi ısıtmak için gerekli ısı miktarını ve son olarak zeolitın duyulur, soğutucu akışkanın duyulur ve gizli ısısını içermektedir. Dolayısıyla öncelikle

sisteme sağlanan faydalı enerji miktarının bulunması gerekmektedir. Bunu için adsorban yatak boş olarak ortalama desorpsiyon prosesi süresince ısıtılmıştır ve bunun sonucunda tüketilen enerji miktarı adsorban yatağın dolu olduğu durumdaki tüketilen enerji miktarından çıkarılarak sisteme girilen faydalı enerji miktarı bulunmuştur. Diğer bir ifade ile faydalı enerji miktarı  $Q_{use}$  (kJ), zeolitin ortam sıcaklığından desorpsiyon sıcaklığına kadar ısıtılması için gerekli duyulur ısı miktarını ve zeolit tarafından adsorplanan suyu buharlaştırmak için gerekli gizli ve duyulur ısı miktarını içermektedir.

Örnek soğutma grubunun soğutma miktarı  $Q_{ref}$  (kJ), deneylerden elde edilen veriler vasıtasıyla aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Q_{ref} = (x_{ads} - x_{des}) * h_{fg} \quad (\text{kJ}) \quad (6.1)$$

Yukarıdaki denklemde  $x_{ads}$  ( $\text{kg}_{su}/\text{kg}_{zeolit}$ ) adsorbanın adsorpsiyon kapasitesini simgelemektedir. Örnek soğutma grubunun performansının değerlendirilmesi sırasında adsorban malzemesinin adsorpsiyon kapasitesi Denklem 4.1, 4.4 ve 4.5 yardımıyla başlangıçta adsorban basıncının mutlak sifira yakın olduğu durum (kuru zeolit) için hesaplanmıştır. Fakat soğutma grubu termodinamik bir çevrim gerçekleştirdiği için adsorban basıncı hiçbir zaman mutlak sıfır değerine yakın olmayacaktır. Diğer bir ifade ile desorpsiyon prosesi sırasında adsorplanan suyun tamamı buharlaştırılamayacaktır. Denklem 6.1 de  $x_{des}$  ( $\text{kg}_{su}/\text{kg}_{zeolit}$ ), desorpsiyon prosesi sonunda adsorban malzeme tarafından adsorplanan suyun buharlaştırılamayan kısmını simgelemektedir ve denklem 4.1, 4.6 ve 4.7 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Sonuç olarak, örnek soğutma grubu üzerinde yapılan deneylerde, adsorpsiyon prosesi sırasında birim kilogram adsorban başına adsorplanan suyun miktarı ( $x_{ads} - x_{des}$ ) farkına eşittir. Adsorbanın adsorpsiyon kapasitesinin ( $x_{ads}$ ) hesaplanması sırasında, Denklem 4.1 deki adsorpsiyon sıcaklığı  $T$  (K) yaklaşık olarak ortam sıcaklığına (318 K), soğutucu akışkanın doyma sıcaklığı  $T_s$  (K) de buharlaştırıcının ortalama sıcaklığına eşit alınmıştır. Benzer şekilde denklem 4.1 de adsorbanın desorpsiyon kapasitesinin ( $x_{des}$ ) hesaplanması sırasında, adsorpsiyon sıcaklığı  $T$  (K) desorpsiyon sıcaklığına, soğutucu akışkanın doyma sıcaklığı  $T_s$  (K) de yoğuşurucu sıcaklığına eşit alınmıştır. Denklem 6.1 deki soğutucu akışkanın gizli buharlaşma ısısı  $h_{fg}$  (kJ/kg) ise buharlaştırıcının ortalama sıcaklığında termodinamik tablolardan alınmıştır.



Örnek soğutma grubunun performans katsayısı COP Denklem 6.2, hacimsel özgül soğutma miktarı ( $SC_v$ ) Denklem 6.3 ve kilogram adsorban başına özgül soğutma miktarı (SC) Denklem 6.4 vasıtasıyla başlangıçta buharlaştırıcı sıcaklığının 22.5, 15, 10 °C olduğu durumlar için hesaplanmıştır ve sonuçlar aşağıda tablolar halinde verilmiştir.

$$COP = \frac{Q_{ref}}{Q_{use}} \quad (6.2)$$

$$SC_v = \frac{Q_{ref}}{V_z} \quad (6.3)$$

$$SC = \frac{Q_{ref}}{m_z} \quad (6.4)$$

Tablo 6.1 Buharlaştırıcı sıcaklığının 22.5°C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri

Adsorpsiyon süresi	220
Desorpsiyon süresi	180 dak
Desorpsiyon sıcaklığı	150 °C
Adsorpsiyon sıcaklığı	45 °C
Buharlaştırıcı sıcaklığı	22,5 °C
Yoğuşturucu sıcaklığı	30 °C
Soğutulan ortamın ilk sıcaklığı	22,5 °C
Soğutulan ortamın son sıcaklığı	17,5 °C
Sisteme girilen enerji miktarı	10548 kJ
Kayıp enerji miktarı	9288 kJ
Sisteme sağlanan faydalı enerji miktarı	1260 kJ
Sistemin soğutma kapasitesi	314 kJ
COP	0,249
$SC_v$	125600 kJ/m <sup>3</sup>
SC	168 kJ/kg

Tablo 6.2 Buharlaştırıcı sıcaklığının 15 °C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri

Adsorpsiyon süresi	210 dak
Desorpsiyon süresi	180 dak
Desorpsiyon Sıcaklığı	150 °C
Adsorpsiyon sıcaklığı	45 °C
Buharlaştırıcı sıcaklığı	15 °C
Yoğuşturucu sıcaklığı	30 °C
Soğutulan ortamın ilk sıcaklığı	15 °C
Soğutulan ortamın son sıcaklığı	12,5 °C
Sisteme girilen enerji miktarı	10440 kJ
Kayıp enerji miktarı	9288 kJ
Sisteme sağlanan faydalı enerji miktarı	1152 kJ
Sistemin soğutma kapasitesi	285 kJ
COP	0,247
SC <sub>v</sub>	114000 kJ/m <sup>3</sup>
SC	152,4 kJ/kg

Tablo 6.3 Buharlaştırıcı sıcaklığının 10 °C olduğu durumda soğutma grubunun performans değerleri

Adsorpsiyon süresi	200 dak
Desorpsiyon süresi	190 dak
Desorpsiyon Sıcaklığı	150 °C
Adsorpsiyon sıcaklığı	50 °C
Buharlaştırıcı sıcaklığı	10 °C
Yoğuşturucu sıcaklığı	30 °C
Soğutulan ortamın ilk sıcaklığı	10 °C
Soğutulan ortamın son sıcaklığı	10 °C
Sisteme girilen enerji miktarı	10512 kJ
Kayıp enerji miktarı	9576 kJ
Sisteme sağlanan faydalı enerji miktarı	936 kJ
Sistemin soğutma kapasitesi	253 kJ
COP	0,27
SC <sub>v</sub>	101200 kJ/m <sup>3</sup>
SC	135,3 kJ/kg

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu örnek soğutma grubu ile ilgili olarak aşağıdaki çıkarımlarda bulunulabilir:

- Adsorpsiyon sıcaklığının 45 °C, desorpsiyon sıcaklığının 150 °C, yoğuşturucu sıcaklığının 30 °C olduğu değişik buharlaştırıcı sıcaklıkları (22,5, 15 ve 10 °C) için örnek soğutma grubunun ortalama COP değeri 0,25 olarak bulunmuştur.

- Soğutma grubunun COP değeri buharlaştırıcı sıcaklığının zayıf bir fonksiyonudur.
- Soğutma grubunun ortalama hacimsel özgül soğutma miktarı ( $SC_v$ )  $110000 \text{ kJ/m}^3$  civarındadır.
- Ortalama hacimsel özgül soğutma miktarı artan buharlaştırıcı sıcaklığı ile artış göstermektedir.
- Soğutma grubunun ortalama kilogram adsorban başına özgül soğutma miktarı (SC)  $150 \text{ kJ/kg}$  civarındadır.
- Ortalama kilogram adsorban başına özgül soğutma miktarı, sistemin  $SC_v$  değerinde olduğu gibi aratan buharlaştırıcı sıcaklığı ile artış göstermektedir. Her iki değerinde buharlaştırıcı sıcaklığı ile artış göstermesi, doğrudan adsorbanın adsorpsiyon kapasitesinin buharlaştırıcı sıcaklığı ile artmasıyla açıklanabilir.
- Desorpsiyon prosesi sırasında, sisteme girilen enerji miktarı ortalama  $10500 \text{ kJ}$  mertebesindedir.
- Desorpsiyon prosesi sırasında sisteme girilen enerjinin faydasız kısmı ortalama  $9500 \text{ kJ}$  civarındadır ve bu enerji miktarı, deney süresince zeolit yatağından dış ortama olan ısı geçişini, toplam metal kütleyi ısıtmak için gerekli ısı miktarını ve son olarak zeolitin duyulur, soğutucu akışkanın duyulur ve gizli ısını içermektedir.
- Soğutma grubunun ortalama adsorpsiyon ve desorpsiyon süreleri sırasıyla 210 ve 180 dakika civarındadır. Dolayısıyla, soğutma grubunun çevrim zamanı oldukça uzundur.

## BÖLÜM 7

### GÜNEŞ KOLLEKTÖRLERİ

Su buharı ile doymuş zeolitin yenilenme aşamasında kullanılan düzlemsel kollektörler Feniş ve Solimpeks firmalarından temin edilmiş ve bu kollektörleri test etmek için gerekli olan platform ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü A blok çatısında kurulmuştur. Şekil 7.1’ de genişliği 90 cm, yüksekliği 190 cm olan Solimpeks markalı kollektörün, Şekil 7.2’ de ise genişliği 100 cm, yüksekliği 200 cm olan Feniş markalı kollektörün genel görünüşü verilmiştir. Bu iki kollektörün dışında ayrıca daha yüksek sıcaklıklara çıkabilen, Viessmann firmasının üretmiş olduğu vakum borulu kollektör test edilmiştir.

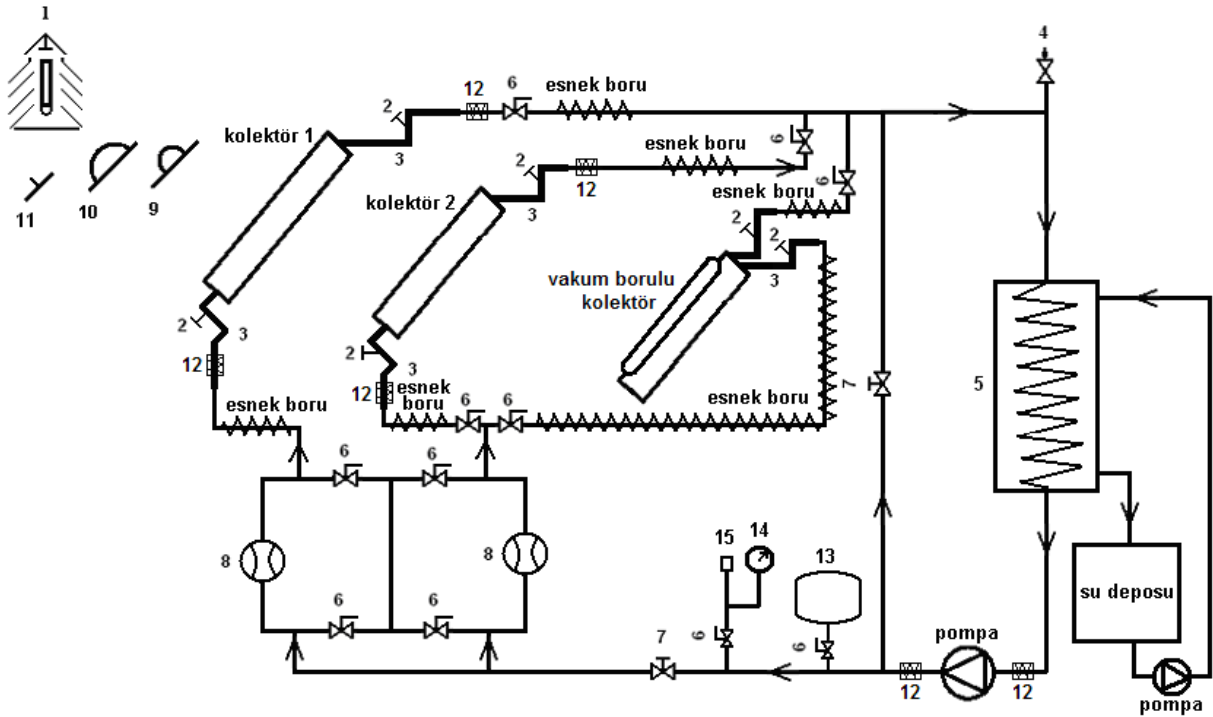


Şekil 7.1 Solimpeks markalı güneş kollektörü

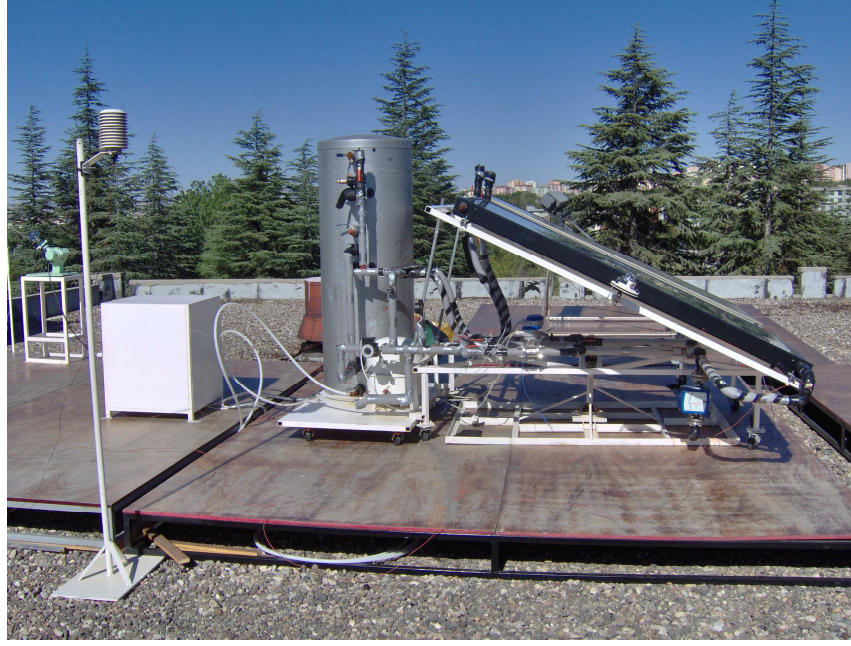


Şekil 7.2 Fenix markalı güneş kolektörü

Güneş kolektörlerinin performanslarını incelemek için kurulan deney düzeneğinin şematik ve genel görünüşü sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4' de verilmiştir.



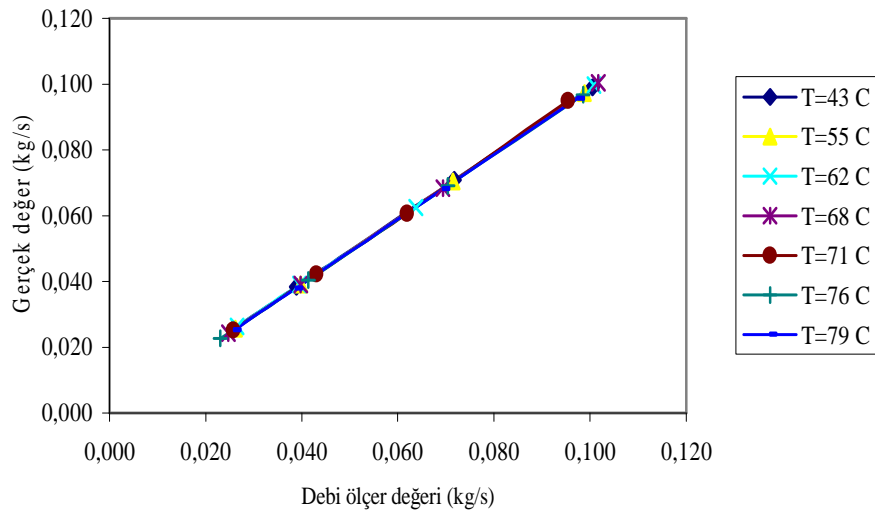
Şekil 7.3 Kolektör test düzeneğinin şematik görünümü (1-Dış ortam sıcaklığı ölçüm sensörü, 2-Termo elemanlar, 3-İzolasyonlu boru, 4-Otomatik pürjör, 5-Tank, 6-Küresel vana, 7-İğne uçlu vana, 8-Debi ölçer, 9-Piranometre, 10-Pireliyometre, 11-Gölge ölçer, 12-Rekor bağlantıları, 13-Genleşme tankı, 14-Manometre, 15-Emniyet ventili).



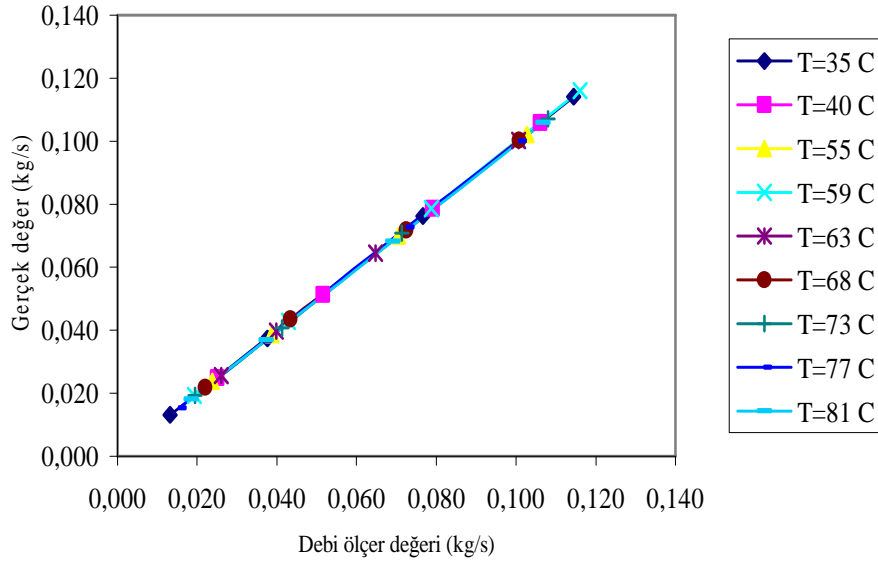
Şekil 7.4 Kollektör test düzeneğinin genel görünüşü

## 7.1 Ölçüm Cihazları

*Debi ölçer:* Sistemde dolaşan akışkanın debisini ölçmek için elektromanyetik debi ölçerler kullanılmıştır. Krohne OPTIFLUX 5000 hassas debi ölçerlerin kalibrasyonu yapılmış ve değişik sıcaklıklar için kalibrasyon eğrileri Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’ da verilmiştir. Ayrıca bu hassas debi ölçerlerle beraber iki adet değişken alan debimetresi de kullanılmıştır.



Şekil 7.5 1-Nolu debi ölçerin değişik sıcaklıklar için kalibrasyon eğrileri



Şekil 7.6 2-Nolu debi ölçerin değişik sıcaklıklar için kalibrasyon eğrileri

*Termo elemanlar:* Kollektörlerin giriş ve çıkışlarındaki akışkan sıcaklığını ve ortam sıcaklığını ölçmek için sistemde toplam 7 adet T-tipi termo eleman kullanılmıştır.

*Piranometre:* Kollektör ve yatay yüzey üzerine düşen toplam güneş ışınımını ölçmek için iki adet piranometre cihazı kullanılmıştır.

*Pireliyometre:* Direkt güneş ışınımını ölçmek için güneş takip sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Bu ve daha önce bahsedilen bütün ölçüm cihazları bir veri toplama cihazına bağlanmıştır ve bu yolla ölçümler bilgisayar ortamına kaydedilmiştir.

## 7.2 Kollektör test standartları

Güneş kolektörlerinin testleri ile ilgili Türkiye’de TS EN 12975-1 ve TS EN 12975-2 standartları mevcuttur. Bu standartlara uygun testler yapabilmek amacıyla deney düzeneği kurulurken üzerinde durulması gereken bazı önemli noktalar aşağıda özetlenmiştir:

- Kollektörler, alt kenarları düzeneğin kurulduğu yer yüzeyinden 0.5 m yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca kolektörler çatının dört kenarından en az 2 metre uzak olacak şekilde yerleştirilmiştir.

- Direkt ışınım verilerinin sağlıklı alınması açısından yüksek yansıtıcılığa sahip cam, metal veya su gibi malzemelerin kollektörlerin görüş alanı içerisinde bulunmaması gereklidir. Bu amaçla deneyleri etkileyeceği düşünülen çatı etrafındaki ağaçlar kesilmiştir.
- Difüz güneş ışınımını ölçebilmek amacıyla, global ışınımı ölçen Piranometre cihazı ile birlikte direkt ışınımı ölçen Pireliyometre cihazı da kullanılmıştır.
- Piranometre ölçüm cihazı kollektör yüzeyine paralel olarak  $\pm 1^\circ$  hassasiyetle, kollektör yüzeyine gölge düşürmeyecek şekilde ve kollektörün yanına orta yükseklikte yerleştirilmiştir.
- Güneş ışınlarının kollektör yüzeyine düşme açısını ölçebilmek için gölge boyu tekniğiyle çalışan bir ölçüm cihazı imal edilmiş ve iğnesi kollektör yüzeyine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir ( $\tan\alpha = \text{gölge boyu/iğne boyu}$ ).
- Kollektör giriş ve çıkışındaki sıcaklıkları sağlıklı okuyabilmek için ilk boruya dik kısa boru bağlantıları sisteme dâhil edilmiştir. Böylece akışkanın daha iyi karışması sağlanmış ve termo elemanlar bu borular içerisinde yerleştirilmiştir.
- Dış ortam sıcaklığını ölçmede kullanılan termo eleman, direkt ve yansıyan ışınımı gölgeleyecek şekilde tasarlanmış bir kutu içerisine, kollektör orta yüksekliğinde ve yerden en az bir metre olacak şekilde yerleştirilmiştir.
- Sistemde akışkan debisini ölçmek için hassas (<%1) elektromanyetik debimetre kullanılmıştır. Bu debimetre, hem debi değerini görsel olarak okuma hem de bir veri toplama cihazına bağlanarak verileri bilgisayardan okuma ve kaydetme imkânı sağlamaktadır.
- Borulamada korozyona ve yüksek sıcaklığa dayanıklı borular kullanılmıştır ve ayrıca borular pasa karşı antipas ile boyanmıştır. Ayrıca kollektör giriş ve çıkışlarında sınırlı kalmak üzere, ısı kayıplarını önlemek ve sıcaklık ölçümlerinin sağlıklı yapılabilmesi açısından borular izole edilmiştir.
- Sistemde oluşabilecek havayı tahliye edebilmek için kollektör çıkışında otomatik pürjör kullanılmıştır.
- Sistem debisinin stabilizasyonunu sağlamak ve uygun bir akış kontrolü elde edebilmek için sistemde baypas hattı ve iğne uçlu vanalar kullanılmıştır.
- Deney düzeneğinin kullanılmadığı durumlarda sistemde buhar oluşumunu önlemek için kollektörlerin üstü bir örtü ile kapatılmaktadır.



### 7.3 Kollektör deney prosedürü

Düzlemsel bir kollektörün verimi aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabilir:

$$\eta = \frac{Q_u}{A \times G} = (\tau\alpha)_e - U_L \times \frac{T_p - T_a}{G} \quad (7.1)$$

Denklem 7.1, test prosedürünün temelini oluşturmaktadır. Bu denklemde  $Q_u$  (W) güneş kollektöründen gelen faydalı ısıyı,  $A$  ( $m^2$ ) kollektör alanını,  $G$  ( $W/m^2$ ) kollektör yüzeyine düşen güneş ışınımını,  $(\tau\alpha)_e$  efektif iletme-soğurma katsayısını (transmittance-absorptance product),  $U_L$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) kollektörün ısı kayıp katsayısını,  $T_p$  ve  $T_a$  ( $^\circ C$ ) da sırasıyla, kollektör soğurucusunun (absorber plate) ortalama yüzey sıcaklığı ve dış ortam hava sıcaklığını göstermektedir. Pratikte soğurucu yüzey sıcaklığı yerine akışkanın kollektöre giriş sıcaklığını belirlemek ve bunu bir  $F_R$  faktörü ile denkleme uygulamak daha uygundur. Bu durumda denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta = F_R \times (\tau\alpha)_e - F_R \times U_L \times \frac{T_{f,i} - T_a}{G} \quad (7.2)$$

Burada  $T_{f,i}$  akışkanın kollektör giriş sıcaklığını ifade etmektedir.  $F_R$ 'ın tanımı ise aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$F_R = \frac{\text{Toplanan gerçek faydalı enerji}}{\text{Bütün kolektör yüzeyinin akışkanın kolektöre giriş sıcaklığı ile aynı sıcaklığa sahip olması halinde toplanan faydalı enerji}} \quad (7.3)$$

Ayrıca literatürde bir  $F'$  faktörü tanımlanarak kollektör giriş ve çıkış sıcaklıklarının kullanıldığı bir verim ifadesine de aşağıdaki denklemde olduğu gibi rastlamak mümkündür:

$$\eta = \frac{Q_u}{A \times G} = F' \times (\tau\alpha)_e - F' \times U_L \times \frac{\left( \frac{T_{f,i} + T_{f,e}}{2} \right) - T_a}{G} \quad (7.4)$$

$T_{f,i}$  ve  $T_{f,e}$  sırasıyla akışkan giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. Yukarıdaki verim ifadelerinin hepsi akışın durgun halde olduğu durumlar için geçerlidir.

Kollektör verimini bulmak için tasarlayıp kurduğumuz deney düzeneğinden alacağımız verilerle verimi aşağıdaki gibi bulabiliriz:

$$\eta = \frac{\dot{m} \times c_p \times \int_{t_1}^{t_2} (T_{f,i} - T_{f,e}) \times dt}{A \times \int_{t_1}^{t_2} G \times dt} \quad (7.5)$$

Yukarıdaki denklemde  $\dot{m}$  (kg/s) akışkanın kütleli debisini,  $c_p$  (J/kg.°C) akışkanın özgül ısısını,  $t$  (s) ise zaman göstermektedir. Bu denklemde elde edilen verim değerleri, kollektöre ait gerçek verim değerleri olup kollektör verim eğrisinin denklemini bulmakta kullanılmaktadır. Deneylerimizde verim hesaplamaları için standartlara uygun olarak 15 dakikalık zaman dilimleri esas alınmıştır.

Deneyler sırasında, kollektör giriş ve çıkışındaki akışkan sıcaklıkları, dış ortam sıcaklığı, akışkanın debisi, direkt ve toplam güneş ışıını, sistemin basıncı ve direkt güneş ışıınıın gelme açısı ölçülmüştür.

#### 7.4 Kollektör verim değerleri ve verim eğrileri

Yapılan deneyler sonucunda her üç kollektör için verim hesaplamaları yapılmıştır. Sonuçlar Excel programında tablolar halinde listelenmiştir. Aşağıda bu tabloların içeriğini göstermek için sadece belli bir kısmı örnek olarak verilmiştir.

Tablo 7.1 Deneysel sonuçların analiz edildiği örnek bir tablo (VBK: Vakum borulu kolektör)

Gün ve Saat	G (W/m <sup>2</sup> )	C <sub>p</sub> (kJ/kgK)	m (kg/s)	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>e</sub> (°C)	ΔT (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>m</sub> - T <sub>a</sub>	(T <sub>m</sub> - T <sub>a</sub> )/G	η	Koll.
2008/10/19 10:45-11:00	787,1	4,18	0,0368	50,64	57,51	6,87	54,07	15,97	38,10	0,04841	0,671	VBK
2008/10/19 11:00-11:15	822,6	4,18	0,0373	54,51	61,56	7,04	58,03	16,38	41,66	0,05064	0,666	VBK
2008/10/19 11:30-11:45	876,6	4,18	0,0380	61,75	68,98	7,24	65,36	17,37	47,99	0,05475	0,655	VBK
2008/10/19 11:45-12:00	876,6	4,18	0,0383	65,21	72,33	7,11	68,77	17,98	50,80	0,05794	0,650	VBK
2008/10/19 12:30-12:45	882,7	4,18	0,0395	73,02	79,77	6,76	76,39	18,62	57,78	0,06546	0,632	VBK
2008/10/19 12:45-13:00	859,1	4,18	0,0394	75,02	81,54	6,51	78,28	19,09	59,19	0,06890	0,625	VBK
2008/10/19 13:00-13:15	918,4	4,19	0,0394	79,73	86,94	7,21	83,34	20,01	63,32	0,06895	0,648	VBK
2008/10/19 13:15-13:30	831,8	4,19	0,0398	78,48	84,71	6,23	81,60	19,87	61,73	0,07421	0,623	VBK
2008/10/19 14:00-14:15	792,4	4,18	0,0393	75,06	81,02	5,96	78,04	19,95	58,09	0,07330	0,619	VBK
2008/10/19 14:15-14:30	759,3	4,18	0,0396	76,70	82,33	5,64	79,51	20,08	59,44	0,07827	0,615	VBK

Bu sonuçlardan elde edilen kolektör verim eğrileri aşağıda Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de gösterilmiştir. Bu şekillerde yatay eksenle gösterilen  $(T_m - T_a)/G$  parametresi literatürde indirgenmiş sıcaklık farkı olarak tanımlanmakta olup  $T_m$  giriş-çıkış ortalama sıcaklığını,  $T_a$  ortam sıcaklığını ve  $G$  daha öncede bahsedildiği gibi kolektöre düşen güneş radyasyonunu ifade etmektedir. Kolektör verim eğrileri çizilirken yatay eksenle genellikle bu parametre kullanılmaktadır. Bilindiği gibi kolektör giriş sıcaklıkları arttıkça kolektör verimi düşmektedir. İndirgenmiş sıcaklık farkı da giriş sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu için giriş sıcaklığının artmasıyla meydana gelen verim düşüşü Şekil 7.7, 7.8 ve 7.9’ dan açıkça görülmektedir.

Verim eğrilerinin daha geniş bir sıcaklık bandında elde edilmesi için kolektör verimleri standartlarda indirgenmiş sıcaklık farkına bağlı birinci veya ikinci dereceden denklemlerle ifade edilmektedir. Genel olarak kolektör verim eğrileri aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \times \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \times \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (7.6)$$

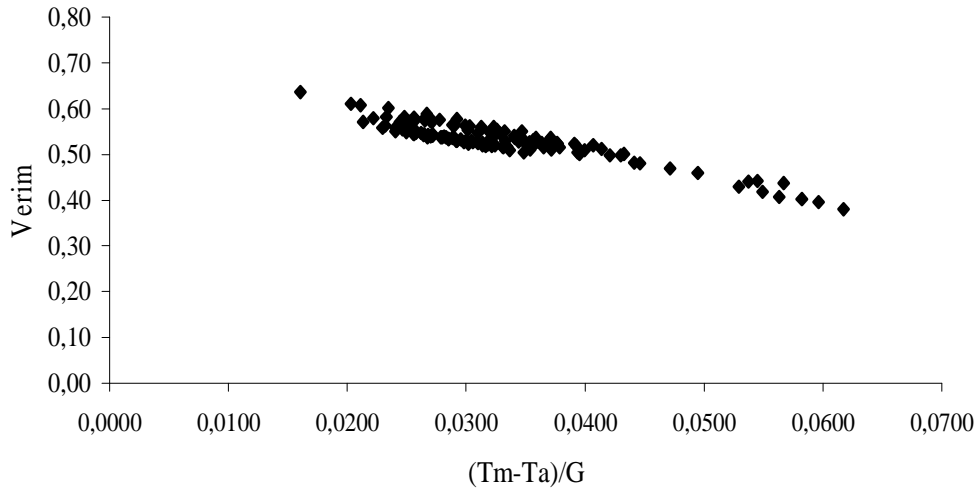
Denklemden  $\eta_0$  kolektör verim eğrisinin düşey eksenle çakıştığı nokta olup maksimum verimi ifade etmektedir.  $a_1$  ve  $a_2$  denklemin katsayılarıdır. Verim denklemi görüldüğü gibi hem meteorolojik veriye (güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı) hem de sistemin çalışma şartlarına bağlıdır.

Verim denklemlerinin katsayılarını bulmak için farklı giriş sıcaklıklarında çok sayıda deney yapılmıştır. Deney sonuçları Mathcad programında analiz edilmiş ve verim eğrileri her bir kollektör için yukarıdaki denklemde olduğu gibi ikinci dereceden ifade edilmiştir. Aşağıda her bir kollektöre ait verim eğrisi ve verim denklemi gösterilmiştir.

#### 7.4.1 Kollektör-1

Şekil 7.1’ de gösterilen Solimpeks markalı kollektördür. Aşağıda bu kollektöre ait verim eğrisi ve denklemi verilmiştir.

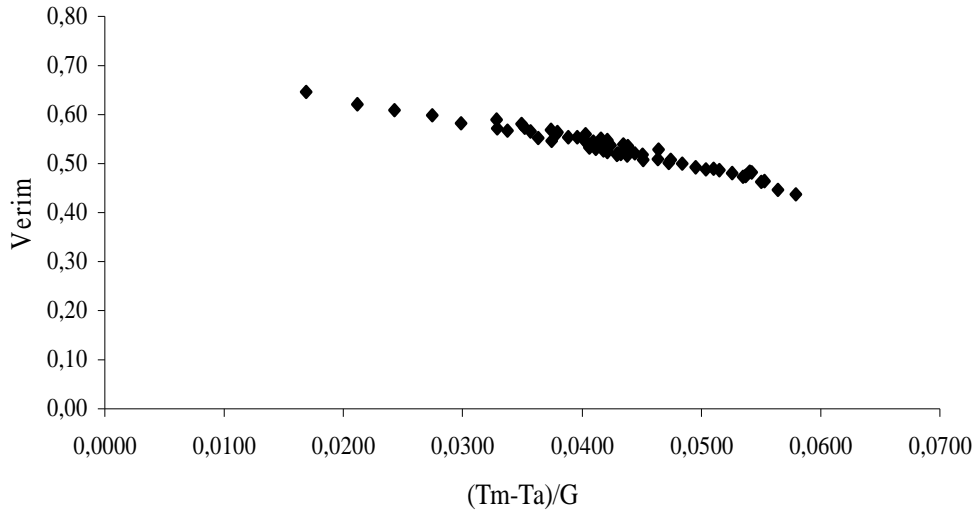
$$\eta = 0.665 - 3.805 \times \frac{T_m - T_a}{G} - 0.0082 \times \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad \eta_0 = 0.665, \quad a_1 = 3.805, \quad a_2 = 0.0082 \quad (7.7)$$



Şekil 7.7 1-Nolu kollektörün verim eğrisi (1,62 m<sup>2</sup> cam yüzey alanı için)

#### 7.4.2 Kollektör-2

Şekil 7.2’ deki Feniş markalı kollektördür. Verim eğrisi ve denklemi aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.8 2-Nolu kolektörün verim eğrisi (1,91 m<sup>2</sup> cam yüzey alanı için)

$$\eta=0.735-4.715 \times \frac{T_m-T_a}{G}-0.0022 \times \frac{(T_m-T_a)^2}{G} \quad \eta_0=0.735, a_1=4.715, a_2=0.0022 \quad (7.8)$$

### 7.4.3 Vakum borulu kolektör

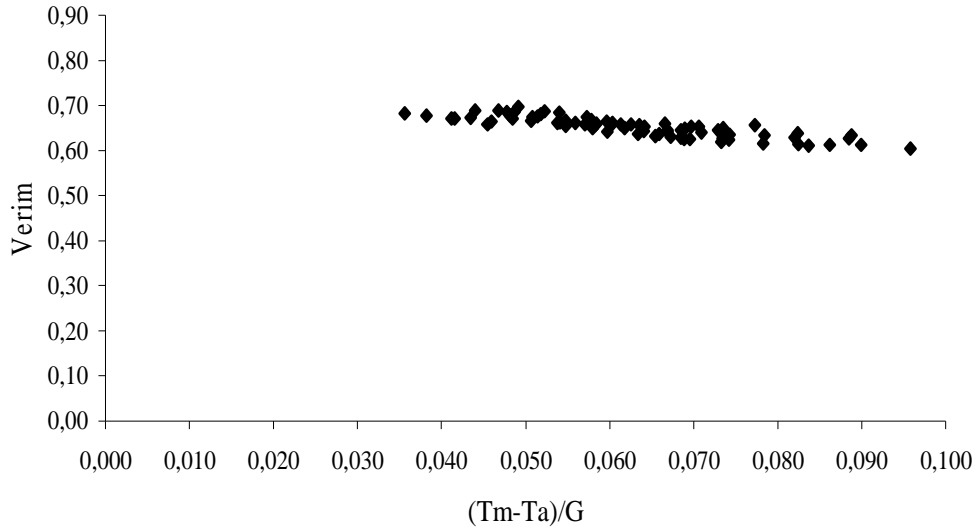
Deneylerde kullanılan vakum borulu kolektörün resmi aşağıda verilmiştir. Vakum borulu kolektörlerin ısı kayıpları çok düşük olduğu için verimleri yüksektir ve kısa zamanda yüksek sıcaklığa çıkabilirler. 200 °C nin üzerindeki sıcaklıklara dayanıklı olarak imal edilirler.

Bu kolektörlerde soğurucu plaka (absorber plate) altına içlerinde düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen bir akışkan içeren ısı boruları yerleştirilmiştir. Isınan akışkan, boru içinde yukarıya doğru hareket eder ve ısınımlı kolektörün üst kısmındaki kondenser yardımıyla sistemde dolaşan esas akışkana (suya) bırakır.



Şekil 7.9 Viessmann marka vakum borulu güneş kolektörü

Bu kolektöre ait verim eğrisi ve denklemi aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.10 Vakum borulu kolektörün verim eğrisi (2.00 m<sup>2</sup> soğurucu alanı için)

$$\eta = 0.74 - 1.358 \times \frac{T_m - T_a}{G} - 0.006 \times \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad \eta_0 = 0.74, a_1 = 1.358, a_2 = 0.006 \quad (7.9)$$

## 7.5 Güneş tarafından desteklenebilecek enerji miktarları

Aşağıdaki tabloda (Tablo 7.2) yaz aylarındaki değişik günlerde her bir kollektörden alınabilecek enerji miktarları kJ cinsinden verilmiştir. Enerji miktarları birer saatlik ortalamalar olarak hesaplanmış ve günlük toplamlar son sütunda listelenmiştir. Sütunlarda G güneşten gelen ışınımı, Q ise kollektör tarafından iletilen faydalı enerjiyi temsil etmektedir. K1 1-Nolu kollektörü, K2 2-Nolu kollektörü, VKB ise vakum borulu kollektörü göstermektedir. Bu çalışma, adsorpsiyon prosesi sonrasında desorpsiyon prosesinin gerçekleşmesi için zeolitin ihtiyaç duyduğu enerjinin mevcut kollektörlerle temin edilemeyeceği veya ne kadarının temin edileceği konusunda fikir vermesi bakımından yapılmıştır.

Tablo 7.2 Örnek günler için değişik kollektörlerden alınabilecek güneş enerjisi miktarları (kJ)

Gün	Kollektör	SAATLER																			
		8		9		10		11		12		13		14		15		16		Toplam	
		G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q	G	Q
17.06.2008	K1	2301	1241	3505	1750	5412	2465	5578	2158	5893	2146	5641	1890	5718	1929	5497	1760	4818	1383	44361	16723
03.07.2008	K1	4187	2645	5087	3178	5662	3232	5350	2292	5471	2152	5911	2263	5815	2063	5314	1737	3786	821	46584	20383
18.07.2008	K1	2582	1477	3737	2020	4739	2404	5464	2622	5776	2599	5785	2463	5362	2131	4571	1636	3562	1077	41577	18428
21.07.2008	K1	2574	1477	3853	2107	4877	2509	5559	2702	5910	2706	5861	2518	5352	2128	4603	1670	3618	1157	42207	18974
17.06.2008	K2	2704	1554	4119	2193	6360	3118	6555	2742	6925	2745	6630	2419	6720	2472	6460	2248	5662	1744	52135	21235
03.07.2008	K2	4921	3417	5978	4099	6654	4134	6288	2907	6430	2736	6947	2894	6834	2652	6246	2239	4449	1052	54747	26128
18.07.2008	K2	3034	2068	4392	2996	5569	3789	6422	4322	6788	4571	6799	4584	6302	4241	5372	3269	4186	2301	48863	32142
21.07.2008	K2	3024	2078	4529	3108	5731	3876	6533	4201	6946	4242	6888	4231	6290	3904	5410	3163	4252	2328	49603	31130
26.07.2008	K2	3168	1907	4549	2568	5710	3014	6596	3276	6894	3228	6535	2834	5578	2192	4683	1650	3844	1260	47557	21927
30.07.2008	K2	3477	2121	5537	3163	6260	3264	6580	3202	6790	3373	6859	3366	6360	3012	4212	1652	3585	1427	49660	24580
02.08.2008	K2	2864	1111	4346	2151	5575	3019	6479	3484	6900	3599	6461	3145	5803	2724	5424	2403	4185	1396	48037	23032
05.08.2008	K2	2826	1117	4292	2090	5877	3178	6908	3870	6797	3626	6678	3471	6395	3196	6414	2410			46187	22958
09.10.2008	VBK	441	90	2987	2127	6258	5319	6641	5506	6709	5363	6836	5474	6633	4921	3530	2121	2965	1580	43000	32500
14.10.2008	VBK	2607	1390	4266	2834	5543	3800	5658	3778	5794	3644	5015	3108	2765	1452	844	123			32492	20129
15.10.2008	VBK	1321	638	4081	1963	5069	3253	2586	1673	2051	1026	3503	2148	2826	1630	2009	1011	660	132	24105	13473
18.10.2008	VBK	2229	1292	4109	2291	5408	3782	6204	4294	5876	3922	5217	3359	3192	1867	1949	997	895	259	35079	22061
21.10.2008	VBK	2300	1089	3950	2566	5232	3540	5991	4058	6442	4299	6028	3970	5265	3433	4135	2520	2509	1192	41851	26668

## 7.6 Kollektör deney sonuçlar

Bu çalışmadaki ana amaç kollektörlerin güneş soğutma sisteminde desorpsiyon prosesinin gerçekleşebilmesi için yeterli sıcaklığa çıkıp çıkamayacağını anlamak olduğu için kollektörlerin ulaşabileceği maksimum sıcaklıklar elde edilen verim eğrisi denklemlerinden bulunmuştur. Bu değerler ortam sıcaklığına ve güneş ışınımına bağlı olarak değişmektedir ve

verim eğrisinin x-ksenini kestiği noktada hesaplanmaktadır. Örneğin yaz koşullarında 1000 W/m<sup>2</sup> lik ortalama ışınım değeri için maksimum sıcaklıklar 1-Nolu kollektörde (135+T<sub>a</sub>) °C, 2-Nolu kollektörde (146+T<sub>a</sub>) °C ve vakum borulu kollektörde ise (256+T<sub>a</sub>) °C olarak hesaplanmaktadır. T<sub>a</sub> ortam sıcaklığıdır.

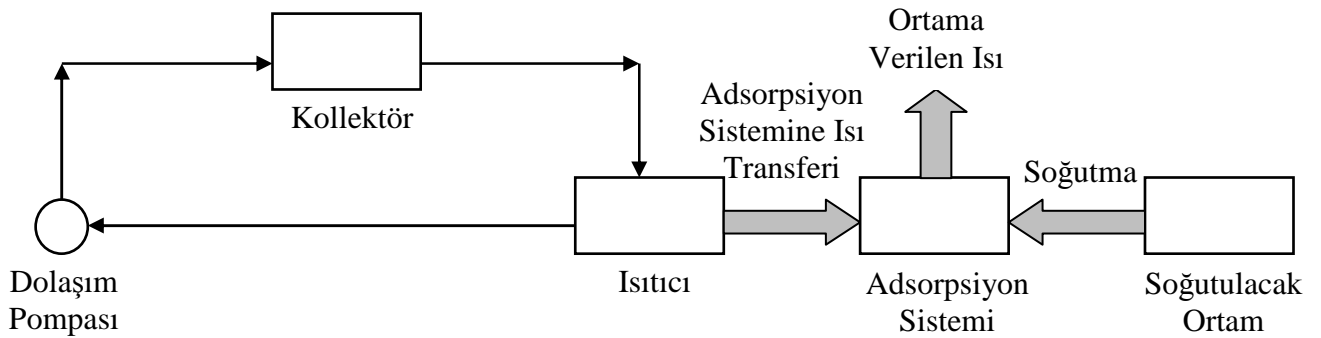
Sonuç olarak düz plakalı kollektörler güneş ışınımının yeterli olması durumunda yeterli sıcaklığa (150 °C) çıkabilmektedir. Bununla birlikte hem sistemin yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olması açısından hem de daha yüksek verimde çalışarak daha kısa sürede yüksek sıcaklığa çıkabildiği için vakum borulu kollektör tercih edilmelidir. Güneşten alınan günlük toplam faydalı enerji bakımından kıyaslandığında da, vakum borulu kollektörlerin yüksek verimle çalışması nedeniyle bu kollektörden alınan enerji daha fazladır.



## BÖLÜM 8

### MODELLEME ÇALIŞMALARI

Güneş enerjisi ile çalışan adsorplanmalı soğutma sisteminin dönemsel veya yıllık analizlerini yapmak üzere TRNSYS (A Transient Systems Simulation Program) programı kullanılarak bir model tasarlanmıştır. Sistemin kararlı durumda olduğunu kabul eden benzetimlerin yanı sıra çevresel koşulların (öncelikle kolektör üzerine düşen radyasyon ve ortam sıcaklığı) etkisini incelemeyi mümkün kılan benzetimler de yapılmıştır. Bu etkiler sistemin Türkiye’de kurulacağı göz önüne alınarak sisteme dâhil edilmiştir. Sistemin temel şematik gösterimi aşağıda Şekil 8.1’de verilmiştir. Bu kapalı sistem bir dolaşım pompası, bir güneş kolektörü ve bir ısıtıcıdan oluşmaktadır. Isıtıcıdan açığa çıkan ısı, adsorban yatağın temel ısı kaynağını oluşturmaktadır. Elde edilen bu modelde akış hızı sabit olup bir kontrol ünitesi yardımıyla adsorban yatağa verilen ısı miktarı değiştirilerek ısıtıcıdan çıkan akışkanın sıcaklığı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Buradaki temel amaç, güneş kolektörünün tamamen eşit ısıda kabul edildiği daha önceki model ile bu modelin bütünleşmesini kolaylaştırmaktır. Sonuç olarak elde edilen bu modelde adsorplanmalı soğutma sisteminin soğutma kapasitesi, çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 8.1 TRNSYS analiz modelinin şematik gösterimi

Yukarıda yazılan çalışmalara ek olarak, bahsi geçen adsorplanma soğutma sistemi için daha önce elde edilen modelleme kodları MATLAB programı ile uyumlu hale getirilmiştir. Daha

sonra MATLAB programı ile TRNSYS programı etkileşimli kullanılarak bütünleşik bir model ve modellerdeki temel değişkenlere bağlı olarak sistemin yıllık genel performans eğilimleri elde edilmiştir.

## 8.1 Modelin ayrıntılı açıklaması

Model yukarıda belirtildiği gibi bir güneş kolektörü, bir ısıtıcı ve bir dolaşım pompasına ek olarak bir kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Bileşenler bazında ayrıntılı bilgi aşağıda verilmiştir.

### 8.1.1 Güneş kolektörü

Modelin adsorpsiyon sistemi ile birlikte en önemli bileşenlerindendir. TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen hazır öğeler temel alınarak modellenmiştir. Hazırlanan modeli mümkün olduğunca gerçekçi kılmak için proje kapsamında temin edilen kolektörlerin kataloglarında belirtilen değerler bu öğelerin parametreleri olarak alınmıştır. Alt bölümlerde bu parametreler verilmiştir.

#### *Düz panel kolektörler*

TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen Type1c öğesi, düz panel kolektörleri modellemek için kullanılmıştır. Bu öğe ikinci dereceden verim formülünü temel almaktadır. İkinci dereceden verim formülü Denklem 8.1'de verilmiştir.

$$\eta = a_0 - a_1 \times \frac{T_m - T_{amb}}{I} - a_2 \times \frac{(T_m - T_{amb})^2}{I} \quad (8.1)$$

Denklem 8.1'de;

$\eta$  : Güneş kolektörün termal verimini,

$T_m - T_{amb}$  : Kollektördeki giriş-çıkış sıcaklık ortalamasını ile ortam sıcaklığı arasındaki farkı,

I: Güneş kollektörü üzerine düşen ışıının miktarını belirtmektedir.

$a_0, a_1$  ve  $a_2$  ise güneş kollektörüne özgü performans parametreleridir. Modellerde kullanılan performans parametreleri Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1 Kollektörlerin performans parametreleri

Kollektör Üreticisi/Adı	Feniş	Solimpeks
Dönüşüm Katsayısı $a_0$ (-)	0.78	0.751
Kayıp Katsayısı $a_1$ (W/m <sup>2</sup> .K)	3.591	4.999
Kayıp Katsayısı $a_2$ (W/m <sup>2</sup> .K <sup>2</sup> )	0.0199	0.000

Kollektörlerde kullanılan diğer parametreler ise Tablo 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.2 Kollektörlerin diğer parametreleri

Kollektör Üreticisi/Adı	Feniş	Solimpeks
Kollektör Alanı (m <sup>2</sup> )	1.912	1.62
Akışkanın Özgül Isısı (kJ/kg.K)	4.19	4.19
Test Edilen Akış Debisi (kg/h.m <sup>2</sup> )	74.791	53.5

Son olarak kollektörün modellenmesinde parametreleri tamamlayan Geliş Açısı Değiştiricileri (IAM – Incidence Angle Modifiers) Tablo 8.3’te belirtilmiştir. Geliş açısı değiştiricileri, en temel anlamda kollektöre gelen ışıının miktarını belirtmek için kullanılan değerlerdir. Kollektörün en yüksek ışıının aldığı zaman bir, hiç almadığı zaman ise sıfır değerini alırlar.

Tablo 8.3 Kollektörlerin geliş açısı değıştiricileri

Kollektör	Feniş							
Açı	0		50			90		
IAM	1.000		0.865			0.000		
Kollektör	Solimpeks							
Açı	0	20	30	40	50	60	70	90
IAM	1.000	0.983	0.958	0.918	0.851	0.732	0.484	0.000

### *Vakum tüplü kollektör*

TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen Type71 ögesi, vakum tüplü kollektörü modellemek için kullanılmıştır. Bu öge de düz panel kollektörlerde olduğu gibi ikinci dereceden verim formülünü temel almaktadır. İkinci dereceden verim formülü Denklem 8.1’de verilmiştir. Vakum tüplü kollektörlerin düz panel kollektörlerden ayrıldığı nokta geliş açısı değıştiricileridir. Düz panel kollektörlerde tek yönlü geliş açısı değıştiricileri kullanılırken vakum tüplü kollektörlerde ise iki yönlü (hem enine hem boyuna) geliş açısı değıştiricileri kullanılmaktadır. TRNSYS modelinde kullanılan vakum tüplü kollektörün parametreleri Tablo 8.4’te verilmiştir.

Tablo 8.4 Vakum tüplü kollektörün parametreleri

Kollektör Adı	Viessmann
Dönüşüm Katsayısı $a_1$ (-)	0.825
Kayıp Katsayısı $a_1$ ( $W/m^2 \cdot K$ )	1.190
Kayıp Katsayısı $a_2$ ( $W/m^2 \cdot K^2$ )	0.009
Kollektör Alanı ( $m^2$ )	2
Akışkanın Özgül Isısı ( $kJ/kg \cdot K$ )	4.19
Test Edilen Akış Debisi ( $kg/h \cdot m^2$ )	3.0 (TRNSYS tarafından varsayılan değer)

### 8.1.2 Isıtıcı

TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen Type92 ögesi, ısıtıcıyı modellemek için kullanılmıştır. Bu ısıtıcının temel amacı, adsorpsiyon döngüsünün ihtiyacı olan ısıyı adsorban yatağa aktarmaktır. Bu ısıtıcı Şekil 8.1'deki döngüyü dolaşan akışkanın sıcaklığını düşürmek suretiyle gerekli ısıyı aktarmaktadır. Modelde kullanılan Type92 ögesi, kendi içinde bir kontrol ünitesi barındırmaktadır. Bu kontrol ünitesi, basit bir açma-kapama işlevi görmekte olup gerekirse dışarıdan da sinyal gönderilerek işletilebilmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, bu proje için kurulan modelde bu kontrol ısıtıcıdan bağımsız olarak uygulanmıştır. Bu modeldeki temel amaç, bütün sistemden gelebilecek maksimum verimi hesaplamak olduğundan bu ısıtıcıdaki kayıplar ihmal edilmiştir. Ayrıca ısıtıcının maksimum kapasitesi sistem performansının ısıtıcı tarafından belirlenmesini engellemek amacıyla olabildiğince yüksek seçilmiştir. Modelde ısıtıcı için kullanılan parametreler Tablo 8.5'te verilmiştir.

Tablo 8.5 Isıtıcı parametreleri

Maksimum Kapasite (kJ/h)	100,000
Akışkanın Özgül Isısı (kJ/kg.K)	4.19
Kayıp Katsayısı (kJ/h.K)	0
Isıtıcı Verimi	1.0

### 8.1.3 Dolaşım pompası

TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen Type3d ögesi, dolaşım pompasını modellemek için kullanılmıştır. Bu öge, değişken denetim fonksiyonu kullanarak akış debisini hesaplamakta ve bağlı olduğu döngüdeki akış debisini kontrol etmektedir. Bu bilgilerin aksine bu modelde kullanılan öge sürekli olarak çalışmakta ve akış debisini sabit ve belli bir değerde tutmaktadır. Isıtıcıda olduğu gibi dolaşım pompasındaki kayıplar ihmal edilmiştir. Modelde dolaşım pompası için kullanılan parametreler Tablo 8.6'da verilmiştir.

Tablo 8.6 Dolaşım pompası parametreleri

Maksimum Akış Debisi (kg/h)	100
Akışkanın Özgül Isısı (kJ/kg.K)	4.19
Maksimum Güç (kJ/h)	60
Kayıp Katsayısı	0

#### **8.1.4 Kontrol ünitesi**

TRNSYS yazılımı ile birlikte gelen Type2b ögesi, kontrol ünitesini modellemek için kullanılmıştır. Yukarıda da belirtildiği üzere bu öge adsorpsiyon döngüsüne aktarılan ısının sabit ve belirtilen sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlamak amacıyla modele eklenmiştir. Böylelikle kayıplar asgari seviyede tutulup sistemden maksimum verim elde etmek mümkün olacaktır. Bu kontrol ünitesi, kollektörden çıkan sıcaklığa göre ısıtıcıya sinyal göndermektedir. Eğer kollektörün çıkış sıcaklığı belirtilen değerin üzerindeyse ısıtıcıyı çalıştırmakta ve ısıtıcının çıkış sıcaklığını o belirtilen değerde tutmaktadır. Eğer kollektörün çıkış sıcaklığı belirtilen değerin altında ise ısıtıcı çalıştırılmamaktadır.

#### **8.1.5 Meteorolojik veri**

Modelde yukarıda belirtilen öğelere ek olarak Tipik Meteorolojik Yıl (TMY – Typical Meteorological Year) verisini içeren ve TRNSYS yazılımı ile birlikte Type109-TMY2 ögesi de kullanılmıştır. Bu veriler modele aktarılırken sistemin ülkemizde kurulacağı göz önünde bulundurulmuştur.

#### **8.1.6 Adsorpsiyon döngü modeli**

Yukarıda belirtildiği üzere MATLAB yazılımı kullanılarak basit bir adsorpsiyon döngüsü modellenmiştir. Bu döngü olabilecek en yüksek döngü verimini alabilmek için olabildiğince basit fakat gerçek sistemlerden de çok fazla sapmayacak şekilde düşünülmüş ve ona uygun

şekilde programlanmıştır. Bu döngü modelinde kabul edilen bazı varsayımlar şöyle sıralanabilir:

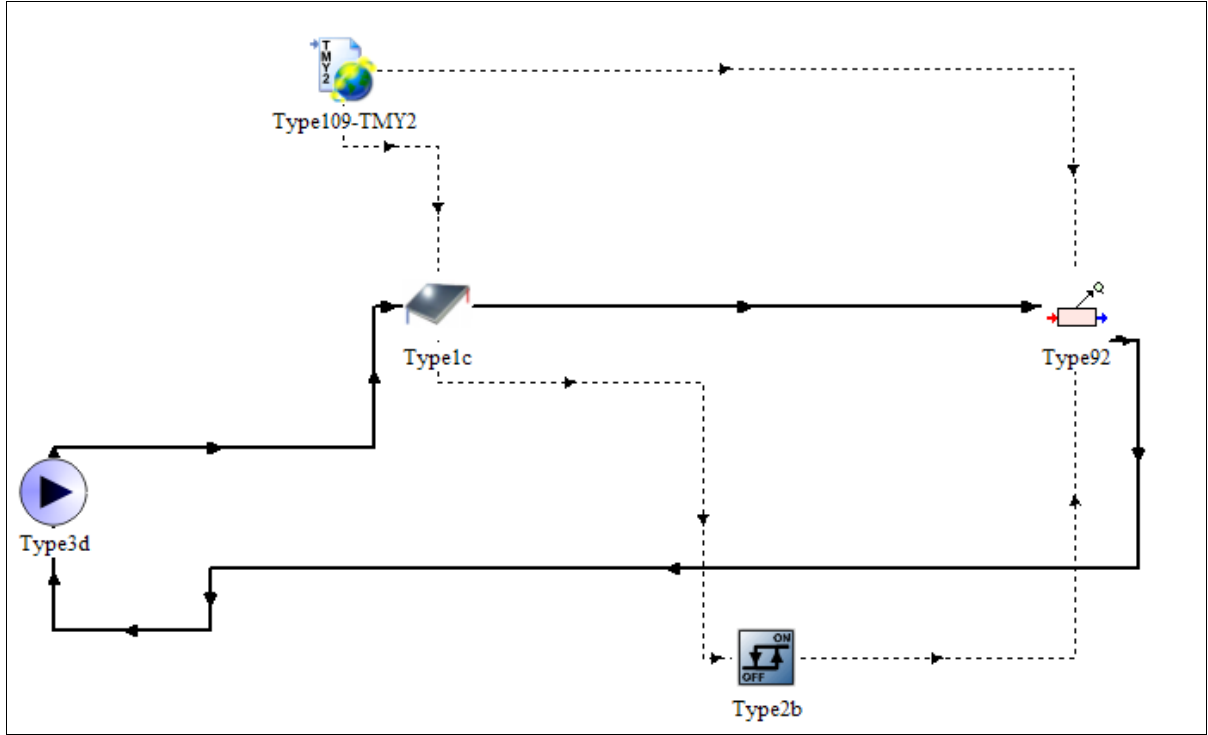
- Tek bir adsorban yatak kullanılması,
- Adsorban yataktaki sıcaklık değişimlerinin ihmal edilmesi (başka bir deyişle adsorban yatağında termodinamik dengede olması),
- Akışkanların sabit özgül ısı olması,
- Kesme vanasındaki işlemin aynı entalpi değerinde gerçekleşmesi.

Bu modelde ayrıca yoğuşturucu ve buharlaştırıcı içindeki sıcaklıklar ve basınçlar sabit olup bu basınçlar sıcaklığın bir fonksiyonu olan akışkanın doyum sıcaklıklarıdır. Bu döngü modelinde girdi parametreleri şöyle sıralanabilirler:

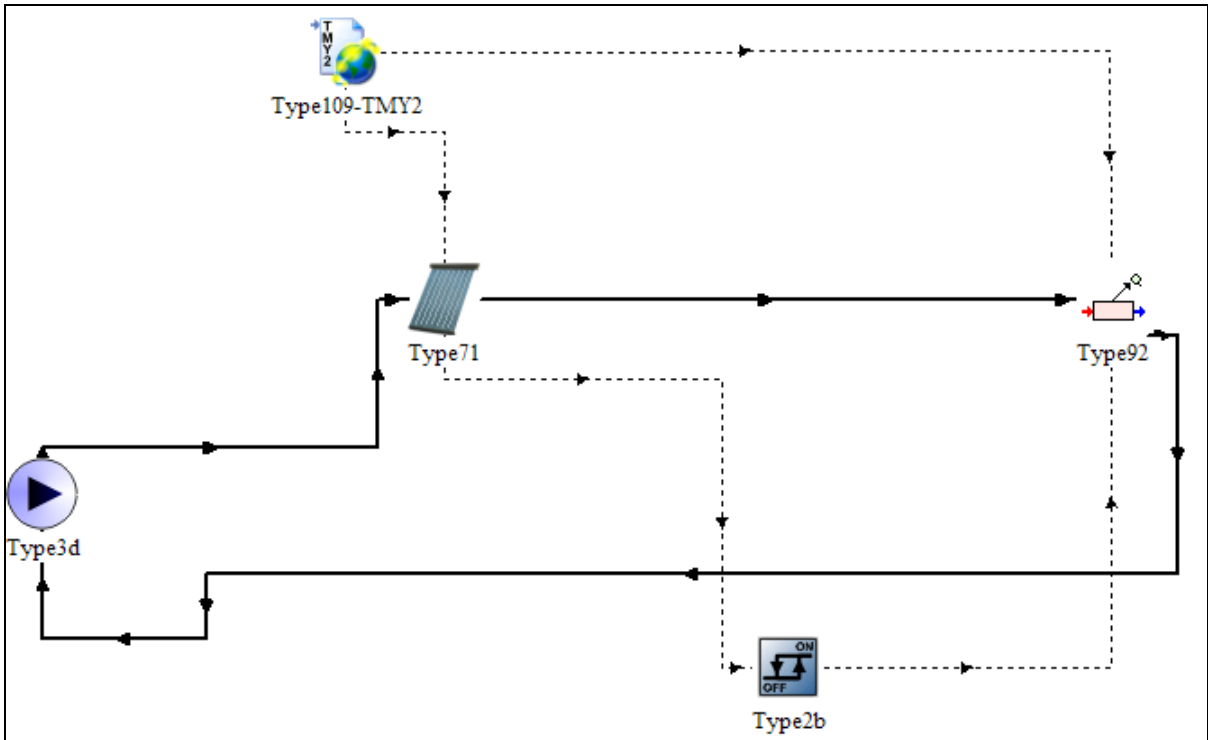
- En düşük adsorban yatak sıcaklığı
- En yüksek adsorban yatak sıcaklığı
- Buharlaştırıcı sıcaklığı
- Yoğuşturucu sıcaklığı
- R oranı (Bu değer sistemin tasarım termal kapasitesinin sistemin toplam termal doğal kapasiteye oranıdır.)

Çıktı değeri olarak döngü modeli döngünün performans katsayısını (COP – Coefficient of Performance) vermektedir. Bu değer ile kolektörün ısı verimi çarpılarak sistemin toplam ısı verimi hesaplanmaktadır.

Şekil 8.2’de düz panel kolektör ile ve Şekil 8.3’te vakum tüplü kolektör ile kurulan TRNSYS modelleri verilmiştir.



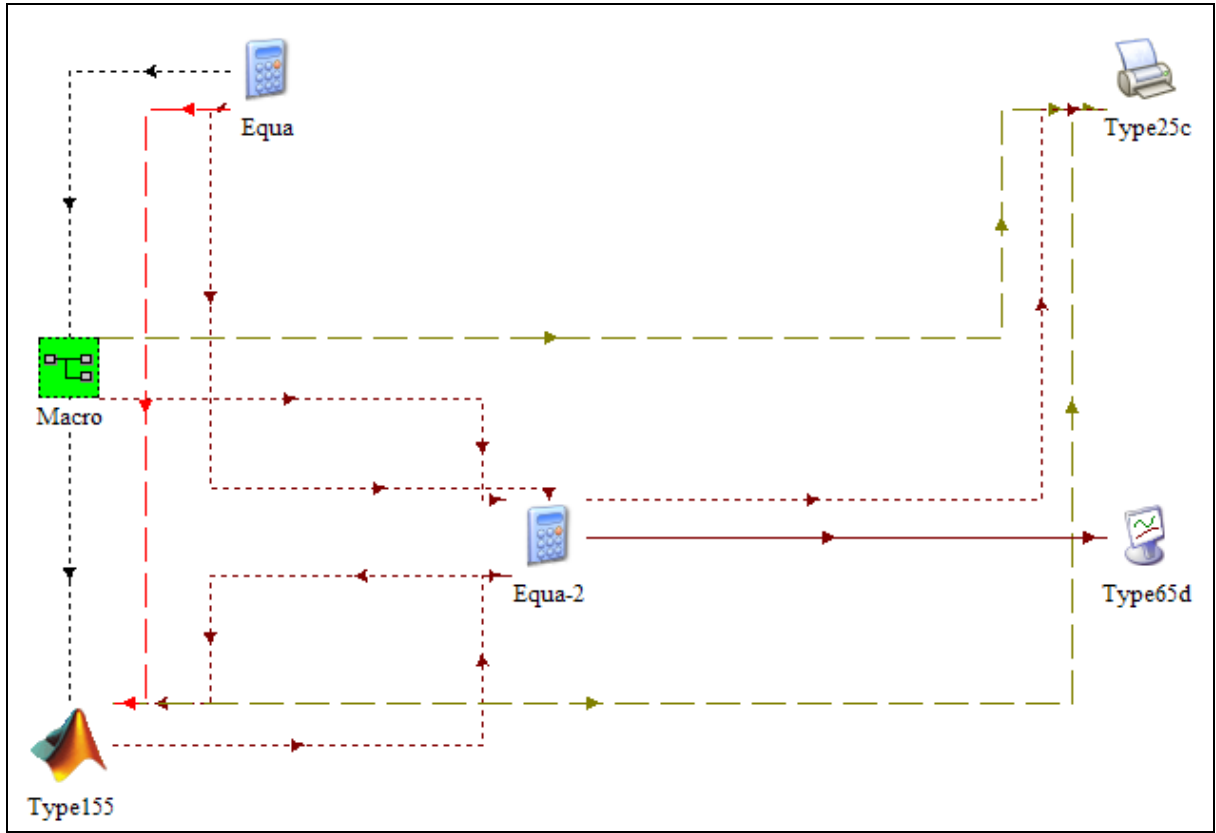
Şekil 8.2 Düz panel kolektör içeren TRNSYS modeli



Şekil 8.3 Vakum tüplü kolektör içeren TRNSYS modeli



Şekil 8.2 ve Şekil 8.3'te kalın düz çizgiler akışkan döngüsünü, kesik çizgiler ise öğeler arasındaki bilgi akışını ifade etmektedirler. Şekil 8.4'te ise TRNSYS yazılımı içerisinde MATLAB modelinin entegrasyonu verilmiştir. Bu şekilde Macro Şekil 8.2 veya Şekil 8.3'teki döngüleri, Type 155 MATLAB yazılımını çağıran öğeyi, Equa ve Equa-2 öğeleri Şekil 8.2 veya Şekil 8.3'te gösterilen modellere parametreleri gönderen öğeleri, Type65d ekrana çıktı veren öğeyi ve Type25c ise Excel dosyasına çıktı gönderen öğeyi temsil etmektedir.



Şekil 8.4 TRNSYS yazılımında MATLAB model entegrasyonu

## 8.2 Yapılan benzetimler

Şu ana kadar yapılan benzetimler üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar,

- Kollektör modellerinin sağlanması için yapılan benzetimler,
- Sentetik ve doğal zeolitlerin karşılaştırılması için yapılan benzetimler,

- Kararlı durum benzetimleri,
- Zamana bağı (yıllık veya dönemsel) benzetimlerdir.

### 8.2.1 Kollektör modellerinin sağlanması

Bölüm 8.1'deki modeller oluşturulduktan sonra bu modellerin gerçek veriler ile uyumunu görmek amacıyla bir seri benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde kollektörler ile yapılan deneylerin verileri modele girdi olarak girilmiş ve deneydeki ile modeldeki çıkış sıcaklıkları düz panel kollektörler için karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Tablo 8.7 ve Tablo 8.8'de verilmiştir. Benzetim yapılan değerler 2008 yılı Ağustos ayında yapılan deneylerden rastgele seçilmiştir. Düz panel kollektörler için yapılan bu çalışma, benzer bir şekilde vakum tüplü kollektör ile 2008 yılı Ekim ayında yapılan deney sonuçlarıyla yapılmış olup sonuçları Tablo 8.9'da verilmiştir.

Tablo 8.7 Feniş kollektör modelinin sağlanması

Işınım Miktarı (W/m <sup>2</sup> )	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (Deney) (°C)	Dış Ortam Sıcaklığı (°C)	Akış Debisi (kg/h)	Çıkış Sıcaklığı (Model) (°C)	Deneysel Verim (%)	Model Verimi (%)
873.9	70.48	75.71	27.18	135.81	76.20	49.41	54.05
977.3	64.25	70.37	25.31	136.82	71.15	52.03	58.62
966.9	61.00	66.89	24.16	143.05	67.63	52.97	59.62
1000.8	75.14	81.08	27.67	135.26	81.79	48.75	54.51
997.0	64.66	70.86	26.41	143.42	71.45	54.23	59.39
1004.9	60.66	67.40	25.93	138.60	67.97	56.48	61.22
975.8	74.42	80.69	28.84	132.36	81.10	51.59	54.98
936.3	56.31	62.59	28.66	140.58	63.31	57.23	63.83
973.8	56.30	62.92	23.22	137.92	63.46	56.90	61.59
952.0	80.14	85.16	28.91	134.28	86.13	42.95	51.27

Tablo 8.8 Solimpeks kolektör modelinin sağlanması

Işınım Miktarı (W/m <sup>2</sup> )	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (Deney) (°C)	Dış Ortam Sıcaklığı (°C)	Akış Debisi (kg/h)	Çıkış Sıcaklığı (Model) (°C)	DeneySEL Verim (%)	Model Verimi (%)
984.9	68.93	74.31	30.20	127.59	74.73	49.75	53.85
931.6	57.78	63.41	26.09	123.78	63.70	53.33	56.39
884.8	55.20	60.88	28.59	115.81	61.41	53.03	58.18
950.9	58.38	64.44	32.36	115.70	65.20	52.63	59.50
898.0	62.97	68.44	33.69	113.74	69.24	49.45	56.93
955.5	57.18	63.63	30.54	116.39	63.97	56.06	59.25
802.9	45.01	50.40	30.70	116.42	51.18	55.77	64.13
946.3	58.19	64.23	32.83	116.58	64.96	53.04	59.78
895.5	51.26	57.04	29.97	117.34	57.79	54.03	61.26
909.5	50.56	56.48	29.13	117.04	57.21	54.36	61.36

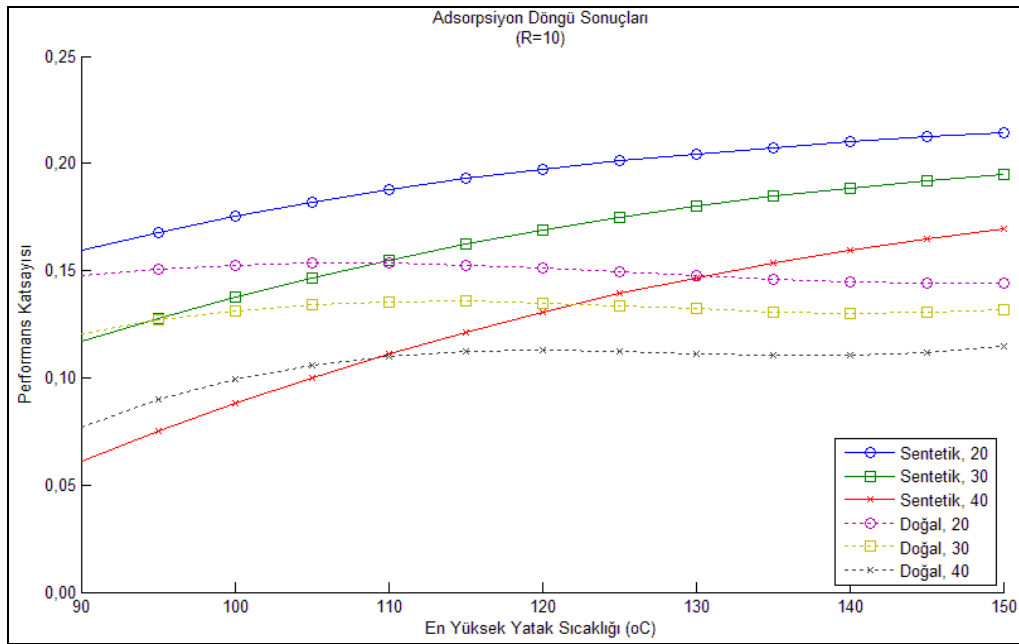
Tablo 8.9 Viessmann kolektör modelinin sağlanması

Işınım Miktarı (W/m <sup>2</sup> )	Giriş Sıcaklığı (°C)	Çıkış Sıcaklığı (Deney) (°C)	Dış Ortam Sıcaklığı (°C)	Akış Debisi (kg/h)	Çıkış Sıcaklığı (Model) (°C)	DeneySEL Verim (%)	Model Verimi (%)
722.1	74.14	79.42	16.35	143.42	80.13	60.96	69.16
899.0	73.85	80.83	16.85	139.51	81.84	62.93	72.04
852.9	84.61	91.22	21.05	140.50	91.91	63.18	69.75
889.8	70.83	77.76	18.72	140.60	78.80	63.57	73.10
903.3	75.08	82.12	16.71	142.54	82.91	64.50	71.79
929.3	50.35	57.63	16.97	144.18	58.94	65.55	77.37
960.2	42.66	50.42	15.19	143.81	51.57	67.52	77.53
892.8	46.64	53.88	16.13	144.01	54.82	67.75	76.63
933.6	45.88	53.52	16.44	143.75	54.50	68.34	77.05
771.1	46.82	52.82	13.79	152.56	53.38	68.87	75.31

Tablo 8.7, Tablo 8.8 ve Tablo 8.9’da model hataları, hem doğrudan fark olarak hem de birimsiz oranlar halinde verilmiştir. Sağlama benzetim sonuçlarından da görüldüğü üzere kurulan model sonuçları deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Böylelikle kollektör modelinin başarısı ortaya çıkarılmıştır ve diğer benzetimlere geçilmiştir. Ayrıca bundan sonra yapılan benzetimlere, daha uygun sonuçlar verdiğiinden (ısı verimi ve maksimum erişme sıcaklığı daha yüksek olduğundan) sadece Solimpeks kollektörü kullanılarak devam edilmiştir.

## 8.2.2 Sentetik ve doğal zeolitlerin karşılaştırma benzetimleri

Bu benzetimleri yapmaktaki temel amaç, modellenen adsorpsiyon döngüsünde kullanılan zeolit tipinin sistemin performans katsayısına olan etkisini incelemektir. Literatürden alınan sentetik zeolit (SCHAWÉ, 2000) ve deneylerde kullanılan doğal zeolit adsorpsiyon kapasite denklemleri kullanılarak adsorpsiyon döngü modeli yardımıyla bu iki zeolit tipinin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları maksimum yatak sıcaklığına göre adsorpsiyon döngünün performans katsayısı değişimi olarak Şekil 8.5’de verilmiştir.



Şekil 8.5 Zeolit tiplerinin karşılaştırma sonuçları (Göstergedeki ilk değişken zeolit tipini, ikinci değer ise °C cinsinden yoğunlaşma sıcaklığını göstermektedir.)

Bu şeklin göstergesindeki ilk değişken zeolit tipini, ikinci değer ise yoğuşma sıcaklığına eşit olan minimum yatak sıcaklığını vermektedir. Karşılaştırma sabit buharlaşma sıcaklığında (10 °C) ve R değerinde ( $R = 10$ ) yapılmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere sentetik zeolit çoğu durumda doğal zeolitten daha yüksek performans katsayısı vermiştir. Bu nedenle benzetimlere sentetik zeolit ile devam edilmiştir.

### 8.2.3 Kararlı durum benzetimleri (Zamandan bağımsız yapılan benzetimler)

Bu benzetimleri yapmaktaki temel amaç, sistemin en uygun çalışma koşullarını belirlemektir. Toplamda sentetik zeolit-su buharı çifti ile 756 farklı durum incelenmiştir ve Tablo 8.10'da belirtilen değerler kullanılmıştır. Tablo 8.10'daki R değeri ise dış adsorban kabuğunun ve ısı transferi sıvısının termal kapasitelerinin soğutucunun termal kapasitesine olan oranını göstermektedir.

Tablo 8.10 İncelenen durumlar

En yüksek adsorban yatak sıcaklığı (°C)	90
	100
	110
	120
	130
	140
	150
Işınım miktarı (W/m <sup>2</sup> )	500
	750
	1000
Yoğuşma sıcaklığı (°C)	20
	35
	50
En düşük adsorban yatak sıcaklığı	Yoğuşma sıcaklığı
	Yoğuşma sıcaklığı + 10 °C
	Yoğuşma sıcaklığı + 15 °C
Dış ortam sıcaklığı	35 °C
	Yoğuşma sıcaklığı
R değeri	0
	10
Buharlaşma sıcaklığı (°C)	10

Şekil 8.6, Şekil 8.7 ve Şekil 8.8’de kararlı durum benzetimlerinin ilk sonuçları verilmiştir. Bu benzetimlerde incelenen durumlar:

- En yüksek adsorban yatak sıcaklığı: 90-150 °C
- Işınım miktarı: 500, 750, 1000 W/m<sup>2</sup>
- En düşük adsorban yatak sıcaklığı: 20, 35, 50 °C
- Yoğuşma sıcaklığı, en düşük adsorban yatak sıcaklığına eşit
- Dış ortam sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığına eşit
- R oranı: 10
- Buharlaşma sıcaklığı: 10 °C

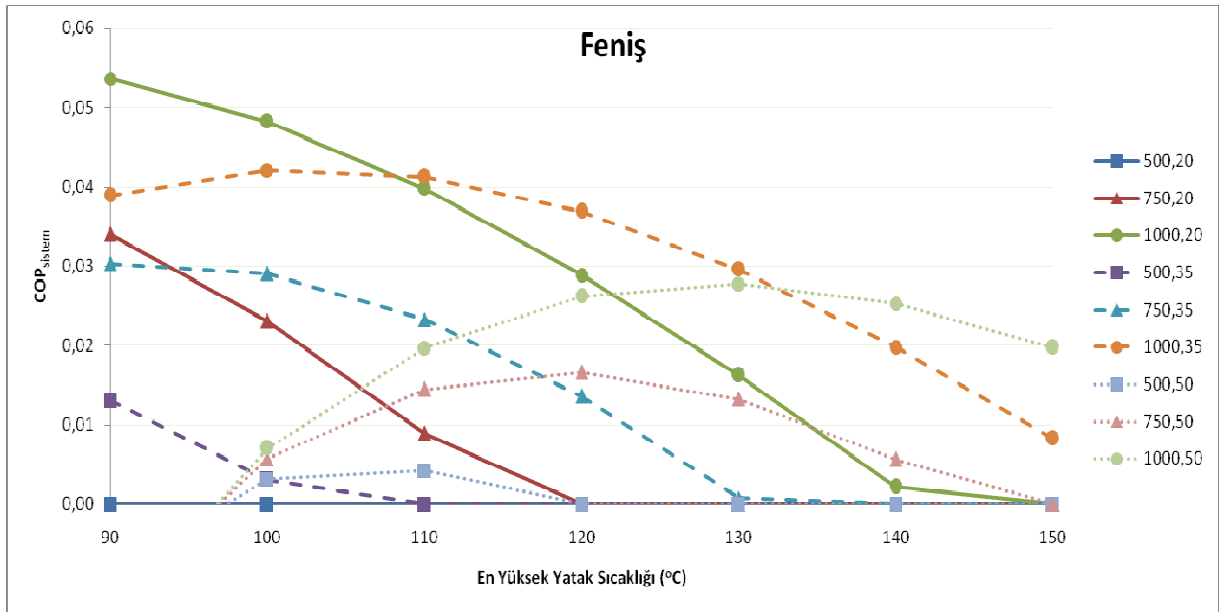
Bu raporda sunulan zamandan bağımsız benzetim şekillerinin göstergelerindeki ilk değer W/m<sup>2</sup> cinsinden ışınım miktarını, ikinci değer ise °C cinsinden yoğuşma sıcaklığını göstermektedir.

Sonuçlardan da belli olduğu üzere en iyi toplam sistem verimini vakum tüplü kollektör ile yapılan benzetimler vermiştir. Ayrıca ışınım miktarı arttıkça da sistem verimi artmaktadır, fakat yine sonuçlardan görülmektedir ki düz panel kollektörler bazı durumlarda doyma noktalarına ulaştıklarından kullanılmaları uygun değildir. Bu şekillerden çıkarılacak bir diğer sonuç ise yoğuşma sıcaklık değişiminin sistem verimine olan etkisidir. Görülmektedir ki düşük adsorban yatak sıcaklıklarında düşük yoğuşma sıcaklıkları daha iyi sonuç verirken yatak sıcaklığı arttıkça daha iyi sistem verimi alabilmek için yoğuşma sıcaklığını da artırmak gerekmektedir.

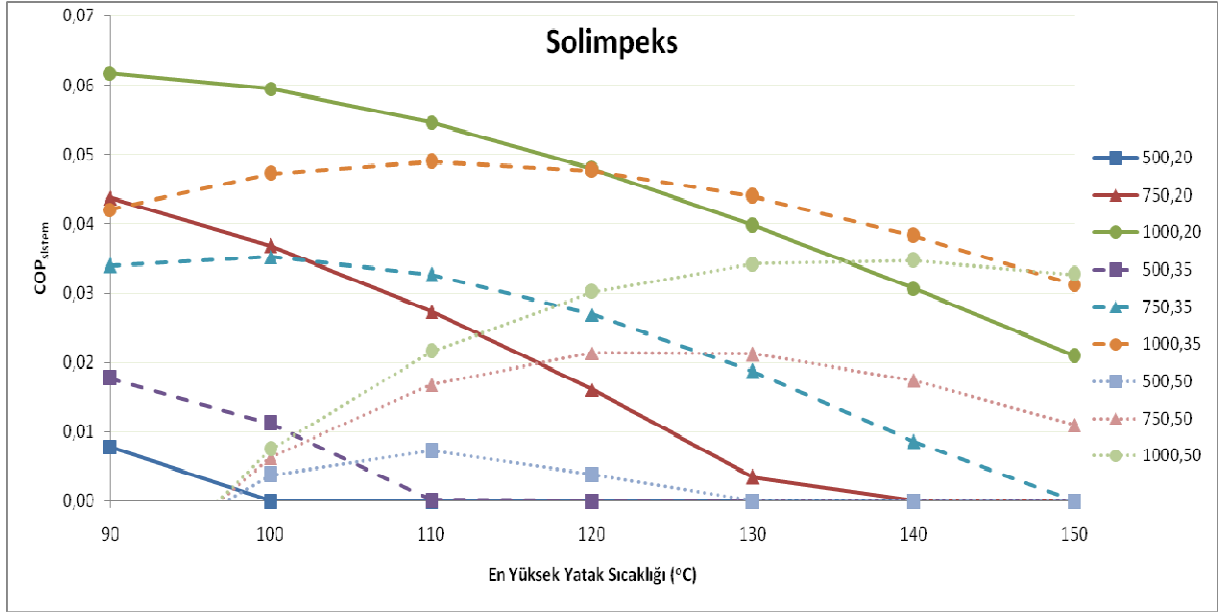
Bu benzetimler üç farklı güneş kollektörü için ayrı değerlendirilmiş ve yapılan ön değerlendirme sonucu benzetimlere iki düz kollektör yerine daha yüksek kollektör verimi ve maksimum çalışma sıcaklığı sağlayan Solimpeks kollektörü ile devam edilmiştir.

İlk benzetimlerden sonra R değerinin (sistemin termal kapasitesinin) etkisini incelemek üzere bütün parametreleri sabit tutup R değerini sıfıra eşitleyip benzetimler tekrar yapılmıştır. Vakum tüplü kollektör için yapılan benzetim sonuçları Şekil 8.9’da verilmiştir. Şekil 8.8 ile Şekil 8.9 karşılaştırıldığı zaman sistem verimi 2.7-6.5 kat arttığı görülmektedir. Aynı sonuç Solimpeks kollektörü ile de elde edilmiştir.

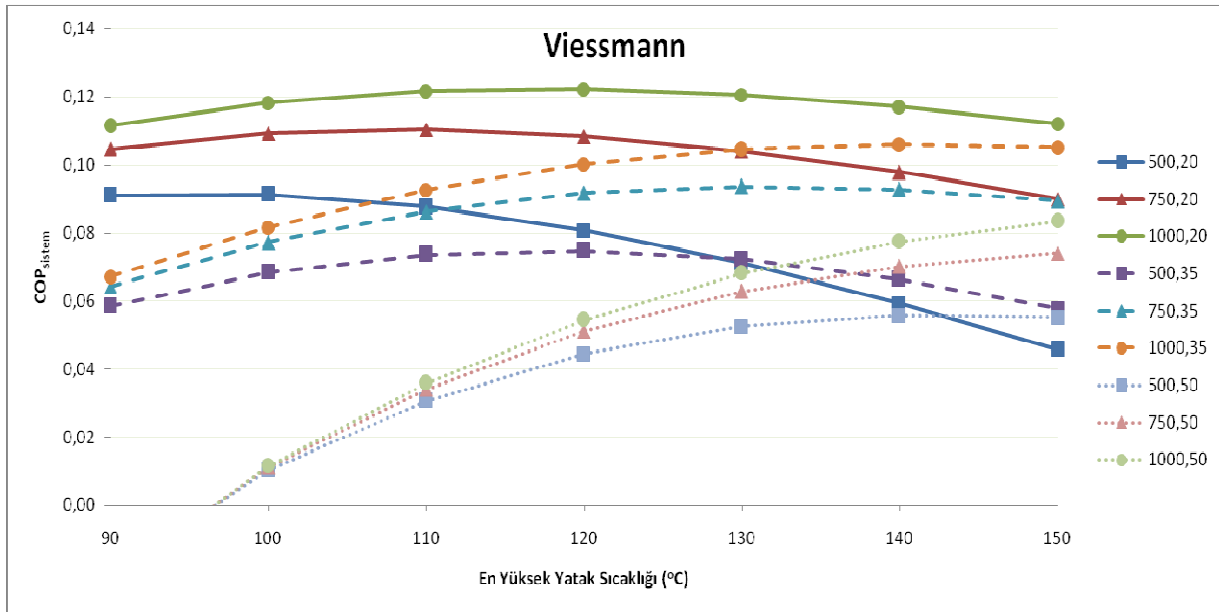
Bir seri benzetim çalışması da en düşük adsorban yatak sıcaklığının sistem üzerindeki etkilerini incelemek üzere yapılmıştır. Önceki benzetimlerde minimum adsorban yatak sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığına eşit kabul edilirken bu çalışmalarda iki değer birbirinden ve ortam sıcaklığından ayrılmıştır. Vakum tüplü kollektör ile R değerinin sıfır, dış ortam sıcaklığı ve yoğuşma sıcaklığını 35 °C kabul edilerek yapılan çalışma sonucu Şekil 8.10'da verilmiştir. Bu şeklin göstergesindeki üçüncü değer minimum yatak sıcaklığı ile yoğuşma sıcaklığı arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 8.10'da görüldüğü üzere bu iki sıcaklığı birbirinden ayırmak düşük yatak sıcaklıklarında sistem verimini düşürürken yüksek yatak sıcaklıklarında artırmaktadır. Dış ortam sıcaklığını sabit tutup yoğuşma sıcaklığını ayırdığımızda düşük yoğuşma sıcaklıklarında minimum yatak sıcaklığı ile yoğuşma sıcaklık değerlerini ayırmanın sistem verimini artırdığı fakat yüksek yoğuşma sıcaklıklarında daha düşük sistem verimleri görülmüştür. Yoğuşma sıcaklığının 20 °C, R değerinin sıfır kabul edildiği benzetim sonuçları Şekil 8.11'de verilmiştir. Aynı sonuçlar düz panel kollektör ile de elde edilmiştir.



Şekil 8.6 Feniş kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10) (Göstergedeki ilk değer W/m<sup>2</sup> cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise °C cinsinden yoğunlaşma sıcaklığını göstermektedir.)

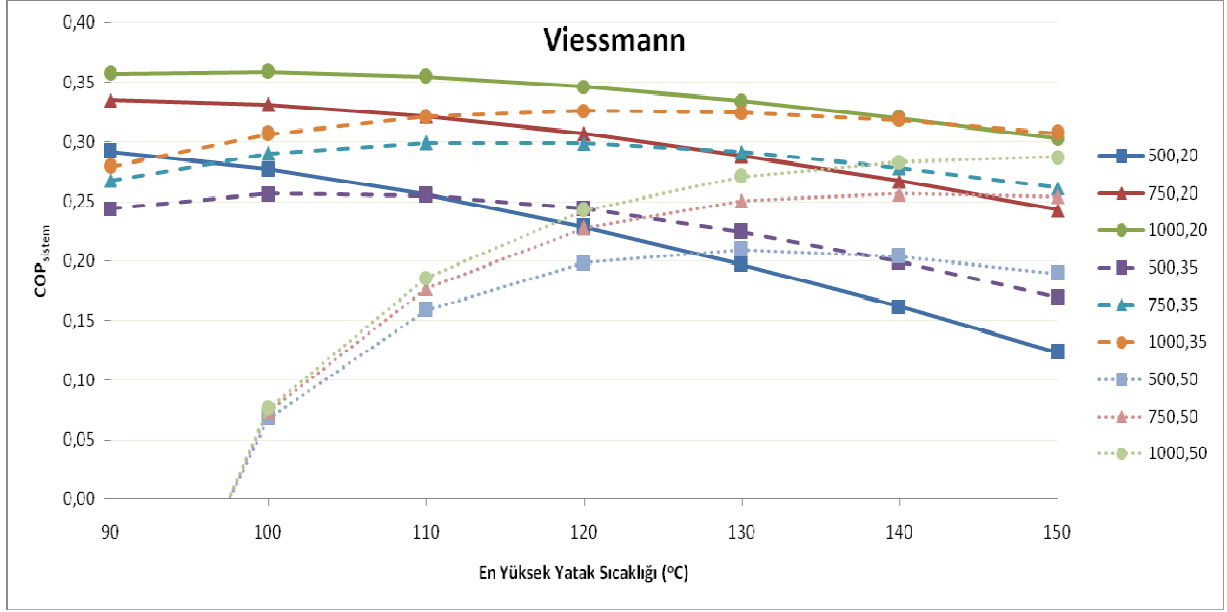


Şekil 8.7 Solimpeks kolektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10) (Göstergedeki ilk değer  $W/m^2$  cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise  $^{\circ}C$  cinsinden yoğunlaşma sıcaklığını göstermektedir.)

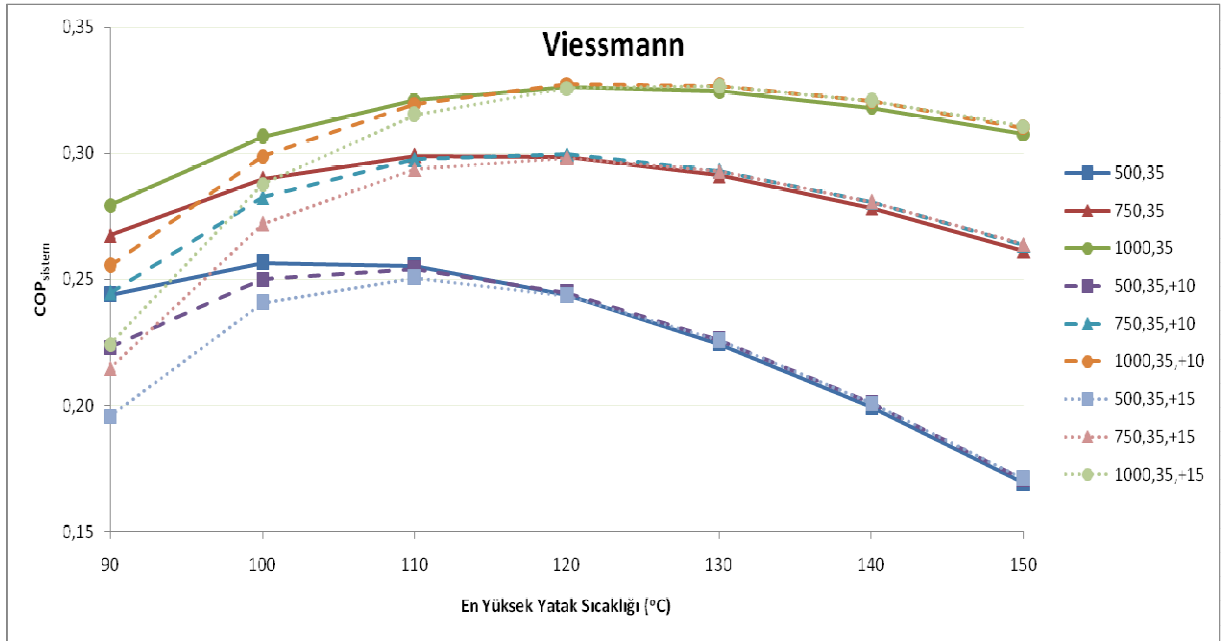


Şekil 8.8 Viessmann kolektörünün kararlı durum benzetim sonuçları (R=10) (Göstergedeki ilk değer  $W/m^2$  cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise  $^{\circ}C$  cinsinden yoğunlaşma sıcaklığını göstermektedir.)

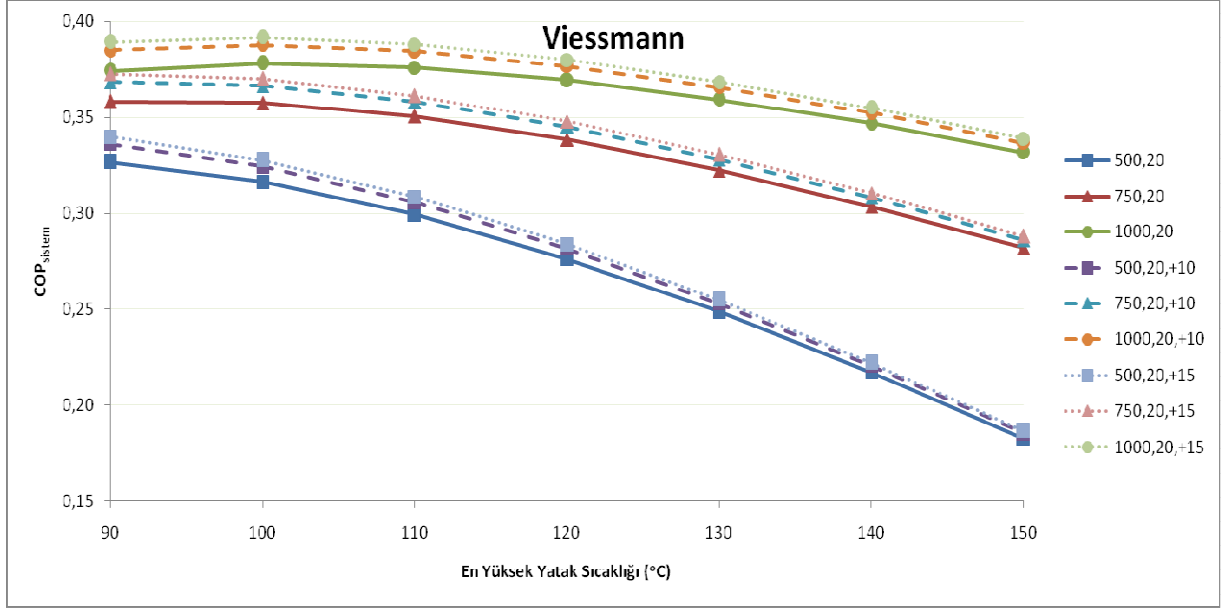




Şekil 8.9 Viessmann kolektörünün kararlı durum benzetim sonuçları ( $R=0$ ) (Göstergedeki ilk değer  $W/m^2$  cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise  $^{\circ}C$  cinsinden yoğunlaşma sıcaklığını göstermektedir.)



Şekil 8.10 Viessmann kolektörünün kararlı durum benzetim sonuçları ( $R=0$ ,  $T_{cond}=35^{\circ}C$ ) (Göstergedeki ilk değer  $W/m^2$  cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise yoğunlaşma sıcaklığına eklenen miktarı  $^{\circ}C$  cinsinden göstermektedir.)



Şekil 8.11 Viessmann kollektörünün kararlı durum benzetim sonuçları ( $R=0$ ,  $T_{\text{cond}}=20$  °C) (Göstergedeki ilk değer  $W/m^2$  cinsinden radyasyon miktarını, ikinci değer ise yoğunlaşma sıcaklığına eklenen miktarı °C cinsinden göstermektedir.)

## 8.2.4 Zamana bağlı yapılan benzetimler

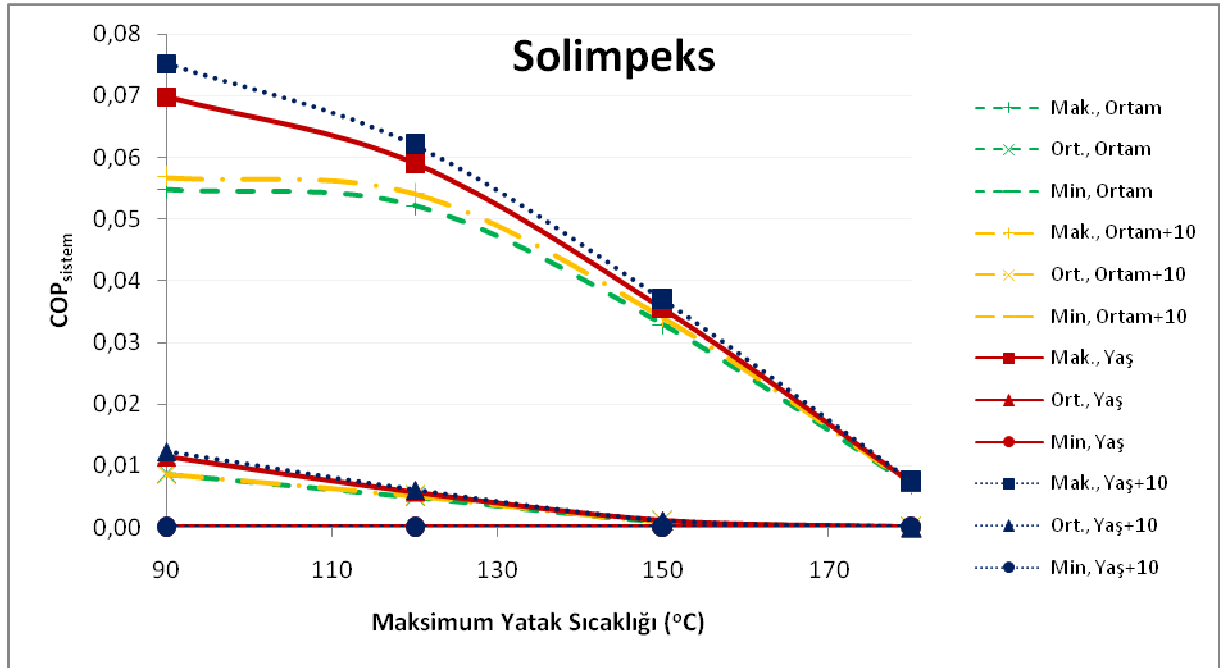
Bir önceki bölümde belirtilen benzetimlerden farklı olarak bu bölümde Tipik Meteorolojik Yıl verileri kullanılarak benzetimler yapılmış ve genel sistem performans eğilimleri çeşitli parametreler değiştirilerek elde edilmeye çalışılmıştır. Bu benzetimler soğutma ihtiyacının en yoğun olduğu yaz döneminde 15 dakikalık aralıklar için yapılmıştır. Zamandan bağımsız yapılan benzetimler ile karşılaştırma yapılabilmesi açısından incelenen durumlar Tablo 8.11’de verilmiştir. Tablo 8.11’deki R değeri ise dış adsorban kabuğunun ve ısı transferi sıvısının termal kapasitelerinin soğutucunun termal kapasitesine olan oranını göstermektedir.

Şekil 8.12 ve Şekil 8.13’te zamana bağlı benzetimlerin sonuçları sırasıyla düz panel kollektör ve vakum tüplü kollektör için verilmiştir. Bu benzetimlerde incelenen durumlar:

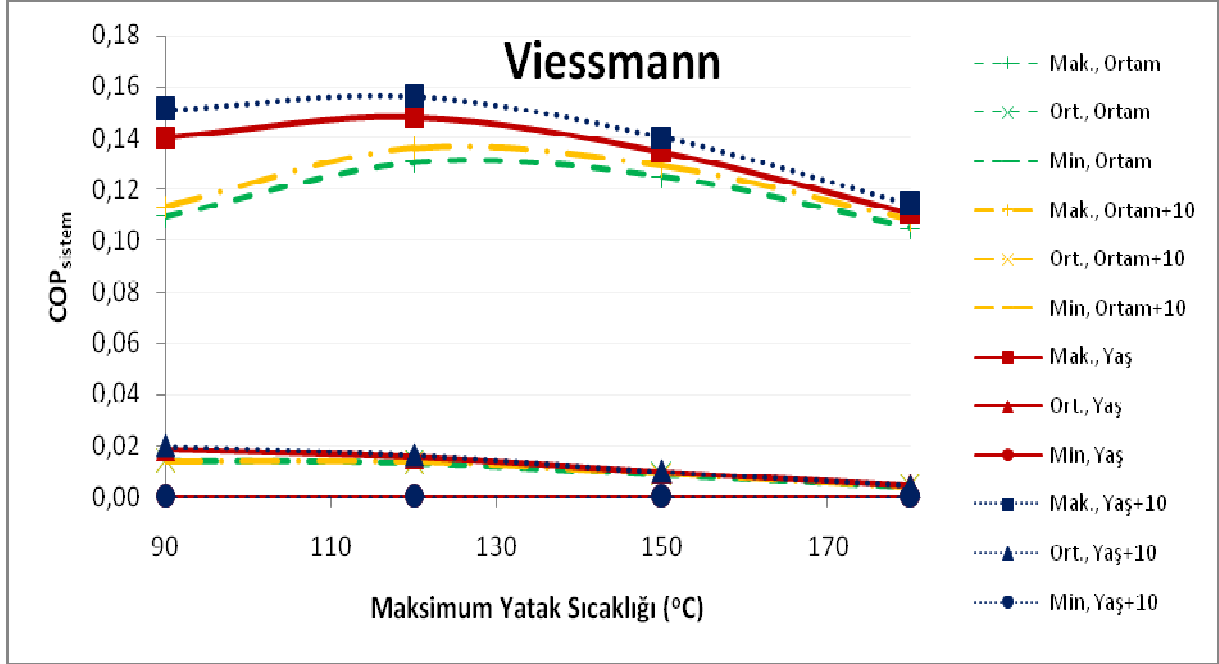
- En yüksek adsorban yatak sıcaklığı: 90–180 °C
- R oranı: 10
- Buharlaşma sıcaklığı: 10 °C

Tablo 8.11 İncelenen durumlar

En yüksek adsorban yatak sıcaklığı (°C)	90 120 150 180
Işınım miktarı	Tipik Meteorolojik Yıl Verileri
Yoğunlaşma sıcaklığı	Dış Ortam Sıcaklığı Yaş Termometre Sıcaklığı (Tipik Meteorolojik Yıl Verileri)
En düşük adsorban yatak sıcaklığı	Yoğuşma sıcaklığı Yoğuşma sıcaklığı + 10 °C Yoğuşma sıcaklığı + 15 °C
Dış ortam sıcaklığı	Tipik Meteorolojik Yıl Verileri
R değeri	0 10
Buharlaşma sıcaklığı (°C)	10



Şekil 8.12 Solimpeks kolektörünün zamana bağlı benzetim sonuçları (R=10) (Göstergedeki ilk değişken maksimum, ortalama ya da minimum sistem verimini, ikinci değer ise yoğuşma sıcaklığının eşit olduğu değeri göstermektedir.)



Şekil 8.13 Viessmann kollektörünün zamana bağlı benzetim sonuçları (R=10) (Göstergedeki ilk değişken maksimum, ortalama ya da minimum sistem verimini, ikinci değer ise yoğuşma sıcaklığının eşit olduğu değeri göstermektedir.)

Bu raporda sunulan zamana bağlı benzetim şekillerinin göstergelerindeki ilk kısaltma maksimum, ortalama ya da minimum sistem verimini, ikinci değer ise yoğuşma sıcaklığının eşit olduğu değeri göstermektedir.

Sonuçlardan da belli olduğu üzere en iyi toplam sistem verimini vakum tüplü kollektör ile yapılan benzetimler vermiştir. Ayrıca yoğuşma sıcaklığının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu durumlarda yoğuşma sıcaklığının dış ortam sıcaklığına eşit olduğu durumlardan daha yüksek toplam sistem verimi elde edilmiştir. En düşük yatak sıcaklıklarını karşılaştığımızda ise yoğuşma sıcaklığının 10 °C üzerindeki yatak sıcaklıkları, yoğuşma sıcaklığına eşit yatak sıcaklığından daha yüksek sistem verimi sağlamıştır. Bu benzetimlerde sistemin tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olan R değeri düşürüldüğünde yine daha yüksek verimler elde edilebilmektedir fakat daha gerçekçi sonuçlar almak için R değeri belli bir sınırın altına düşürülmemelidir.

## BÖLÜM 9

### GELECEK ÇALIŞMALAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma sonucunda elde edilen deneysel tecrübe ve sonuçlar, güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri ile ilgili olarak ileride yapılması planlanan teorik ve deneysel çalışmalara olumlu yönde büyük katkı sağlayacaktır. Aşağıda güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu soğutma sistemleri ile ilgili olarak ileride yapılması planlanan teorik ve deneysel çalışmalara ile bu çalışmalar sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar ve öneriler dört ana alt başlık altında ifade edilmiştir.

#### *Adsorpsiyon deney düzeneği*

- Zeolit-su çalışma çiftinin dışında farklı adsorban-adsorplanan çiftlerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon özellikleri incelenecektir.
- Vakum problemleri, termoelemanların sistem elemanları dışına alınmasında termoeleman girişi kullanılması, buharlaştırıcı/yoğuşturucu kutusundaki gözlemeleme camının kaldırılması ve viton o-ring yerine bakır conta kullanılması ile ortadan kaldırılabilir.
- Buharlaştırıcı/yoğuşturucu kutusundaki soğutucu akışkanın seviye değişiminin gözlemlenmesi sırasında oluşan hata elektronik yerdeğiştirme sensörü kullanılarak daha düşük seviyelere indirgenebilir.
- Yoğuşturucu yüzey alanının yeteri kadar büyük olmaması sebebiyle yoğuşma işlemi oldukça uzun sürmektedir. Dolayısıyla yoğuşturucu yüzey alanının artırılması gerekmektedir.

#### *Örnek soğutma grubu*

- Üzerinde deneyler yaptığımız örnek soğutma grubunun bir benzeri olacak endüstriyel prototip tarafımızdan tasarlandıktan sonra ATAÇ firması tarafından üretilecektir. Endüstriyel prototipde ölçü aletleri asgari düzeyde kullanılacak ve sistem basit bir

“pik” kontrolü ile kontrol edilecektir. Ayrıca, sistem mümkün olduğu kadar kaynaklı yapılacak ve böylece sistemde kullanılan contalar ve vanalar asgari seviyeye indirilecektir. ATAÇ firmasının üreteceği endüstriyel prototip için tasarlanan sistemin şematik gösterimi Şekil 9.1’ de verilmiştir.

- Örnek soğutma grubundan kullanılan adsorban yatağın metal kütesinin fazla olması sebebiyle ısı kapasitesi yüksektir. Dolayısıyla desorpsiyon prosesi sırasında tüketilen enerjinin büyük bir kısmı söz konusu metal kütle tarafından depo edilmektedir ve depo edilen bu enerji adsorpsiyon prosesi sırasında yatağın soğutulması ile birlikte dış ortama atık ısı olarak atılmaktadır. Bu nedenden dolayı endüstriyel prototipin tasarımı sırasında adsorban yatağın ısı kapasitesi göz önünde bulundurulacaktır.
- Endüstriyel prototipde adsorban yatak bir vakum kabının içine konulacak ve dış yüzeyi izole edilecektir. Böylece vakum kabı termal çevrime maruz kalmayacak ve böylece vakum açısından sorun yaratmayacaktır.
- Örnek soğutma grubunda çevrim zamanının uzun olması sebebiyle endüstriyel prototipin adsorban yatağının tasarımı sırasında yatak içerisindeki kütle ve ısı transferi koşullarının dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için ilk düşünülen adsorban malzemenin, alt yüzeylerine ısı transfer sıvısının dolaştırıldığı boruların kaynak edildiği levha plakalar üzerine belirli bir kalınlıkta serilmesi ve plakalar arasındada kütle transferi için boşluklar bırakılmasıdır. Endüstriyel prototip için düşünülen adsorban yatağın şematik çizimi Şekil 9.2’ de verilmiştir.
- Endüstriyel prototipde adsorpsiyon prosesi sırasında adsorban yatakta açığa çıkacak olan adsorpsiyon ısısının sistem içinde değerlendirilmesi düşünülmektedir.

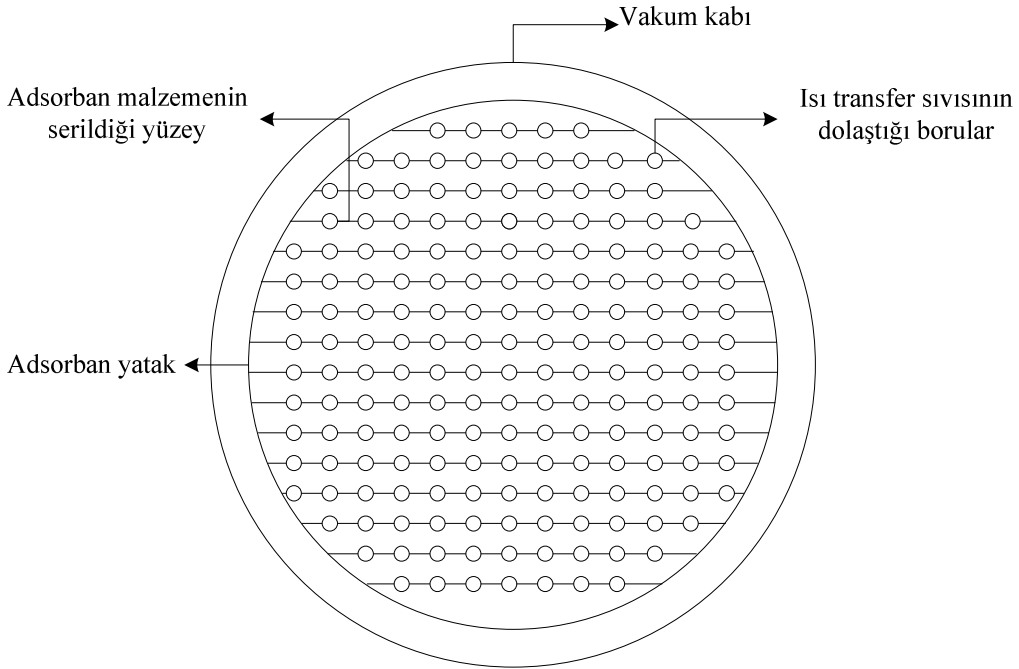
### *Güneş kolektörleri*

- Parabolik kolektörlerin güneş ışınımını bir bölgeye odaklayarak yüksek sıcaklıkta yüksek verimle enerji depoladıkları bilinmektedir. Deney düzeneğimizi bir parabolik kolektörü test edebilecek şekilde modifiye edip, bu tip bir kolektörle çıkılabilecek en yüksek sıcaklıkların ve alanabilecek enerji miktarlarının tespit edilmesi düşünülmektedir.
- Deneylerimizde kolektörleri güneşin hareketi yönünde kendimiz çevirdiğimiz için kolektörlerin sürekli olarak güneşi takip etmesi mümkün olmadı. 10–15 dakikada bir çevirmek mümkün oldu. Bu nedenle hem verim açısından hem de temin edilen faydalı

enerji açısından sınırlı kayıplar oldu. Bu sınırlı kayıpların azaltılması ve hatta yok edilmesi açısından sistemin yeniden tasarlanması ve sürekli güneş takibi yapılmasının sağlanması düşünülmektedir.

### *Modelleme çalışmaları*

- Güneş enerjisi ile adsorpsiyonlu soğutma sisteminin benzetim çalışmalarında basit adsorpsiyon döngü modeli tamamlanmış olup sırasıyla ısıl kazanımlı, ısıl ve kütle kazanımlı ve termal dalga içeren döngü modellemeleri MatLab yazılımı aracılığıyla yapılacaktır. Daha sonra TRNSYS yazılımında bu modellerin tamamlanma sırasına göre daha önceden modellenmiş güneş kolektör sistemi ile bütünleşmesi sağlanacaktır. Bu bütünleşik sistemde gerçek meteorolojik veriler kullanılarak zamana bağlı benzetimler gerçekleştirilecektir. Sonuç olarak toplam sistemin soğutma katsayısına bakılarak en uygun çalışma koşulları elde edilecek ve mümkün olursa sistemi geliştirme önerileri sunulacaktır.



Şekil 9.2 Endüstriyel prototip için düşünülen adsorban yatağın şematik çizimi





## Yararlanılan kaynak;

1. ANYANWU E.E., Review of solid adsorption solar refrigeration II: An overview of the principles and theory, *Energy Conversion and Management*, 45, 1279–1295, (2004).
2. BAKER D. K., Kaftanoğlu B., Güneş enerjisi ile çalışan adsorplanma soğutma sisteminde maksimum teorik başarımların sağlanması, *Proceedings of VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES)*, Isparta, Turkey, (2006).
3. DIENG A.O., Wang R.Z., Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and airconditioning purposes and recent developments in solar technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, 313–342, (2001).
4. GRENIER P., Guillemint J.J., Meunier F., Pons M., Solar powered solid adsorption cold store, *J Sol Energy-Trans ASME*, 110(3):192–7, (1988).
5. HILDBRAND C., Dind P., Pons M., Buchter F., A new solar powered adsorption refrigerator with high performance, *Solar Energy*, 77, 311–318, (2004).
6. JIANGZHOU S., Wang R.Z., Lu Y.Z., Xu Y.X., Wu J.Y., Li Z.H., Locomotive driver cabin adsorption air-conditioner, *Renewable Energy*, 28, 1659–1670, (2003).
7. KAFTANOĞLU B., Ulaş A., Baker D., Başeşme E., Büyükdıyıcıoğlu A., Development of a solar powered zeolite cooling system for Turkey, *Research notes*, (2005).
8. LEONG K.C., Liu Y., Numerical modeling of combined heat and mass transfer in the adsorbent bed of a zeolite/water cooling system, *Applied Thermal Engineering*, 24, 2359–2374, (2004).
9. LI M., Wang R.Z., Xu Y.X., Wu J.Y., Dieng A.O., Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker, *Renewable Energy*, 27, 211–221, (2002).
10. LIU Y., Leong K.C., The effect of operating conditions on the performance of zeolite/water adsorption cooling systems, *Applied Thermal Engineering*, 25, 1403–1418, (2005).
11. LU Y.Z., Wang R.Z., Jianzhou S., Zhang M., Xu Y.X., Wu J.Y., Performance of a Diesel Locomotive Waste-Heat-Powered Adsorption Air Conditioning System, *Adsorption*, 10, 57–68, (2004).
12. PAPADOPOULOS A.M., Oxizidis S., Kyriakis N., Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector, *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 7, 419–438, (2003).
13. QU T.F., Wang R.Z., Wang W., Study on heat and mass recovery in adsorption refrigeration cycles, *Applied Thermal Engineering*, 21, 439-452, (2001).
  14. RAMOS M., Espinoza R.L., Horn M.J., Evaluation of a zeolite-water solar adsorption refrigerator, *ISES Solar World Congress*, Göteborg, Sweden, (2003).
  15. SAHA B.B., Akisawa A., Kashiwagi T., Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype, *Renewable Energy*, 23, 93–101, (2001).
  16. SCHAWÉ D., Theoretical and Experimental Investigations of an Adsorption Heat Pump with Heat Transfer between two Adsorbers, PhD, *Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart*, (2000).
  17. SHELTON S.V., Wepfer W.J., Solid-vapor heat pump technology, *IEA Heat Pump Conference*. 525–35, Tokyo, Japan, (1990).
  18. SUMATHY K., Yeung K.H., Yong L., Technology development in the solar adsorption refrigeration systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 301–327, (2003).
  19. WANG R.Z., Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, 1–37, (2001).
  20. WANG D.C., Xia Z.Z., Wu J.Y., Wang R.Z., Zhai H., Do W.D., Study of a novel silica gel–water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction, *International Journal of Refrigeration*, 28, 1073–1083, (2005).
  21. 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, 590–610, (2006).
  22. WANG L.W., Wang R.Z., Lu Z.S., Chen C.J., Wang K., Wu J.Y., The performance of two adsorption ice making test units using activated carbon and a carbon composite as adsorbents, *Carbon*, 44, 2671–2680, (2006).
  23. ZEHENYAN L., Yunzhuang L., Jiabin Z., Zeolite-active carbon compound adsorbent and its use in adsorption solar cooling tube, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 52, 45-53, (1998).
  24. ZHU D., Wang S., Experimental investigation of contact resistance in adsorber of solar adsorption refrigeration, *Solar Energy*, 73, 177-185, (2002).
  25. <http://www.energyagency.at>

**TUBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 105M244
<b>Proje Başlığı:</b> Güneş Enerjisi Destekli Zeolit İklimlendirme Sistemi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Bilgin Kaftanoğlu, Doç. Dr. Cemil Yamalı, Yrd. Doç. Dr. Derek K. Baker, Arş. Gör. İsmail Solmuş, Arş. Gör. Ahmet Çağlar, Arş. Gör. Onur Taylan
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06531 Ankara/Türkiye
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> 1. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK), Tunus Caddesi No:80 06100 Kavaklıdere / Ankara 2. ATAÇ Şirketler Gurubu, Cinnah Cad. Ahenk Sokak No:5 06390 Çankaya/Ankara
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 1.10.2006 – 1.01.2009
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> Bu projede, zeolit-su çalışma çiftine ait eş sıcaklık eğrileri deneysel olarak elde edildikten sonra, zeolit-su çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu örnek soğutma grubu tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bir yıl boyunca düzlemsel ve vakumlu boru tipi güneş toplaçlarının performansı Ankara ili iklim koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Son olarak, adsorpsiyonlu soğutma sisteminin yıllık analizlerini yapmak üzere TRNSYS programı yardımıyla sayısal bir model tasarlanmıştır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Güneş enerjisi; Adsorpsiyonlu soğutma; Zeolit
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> 1- Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B., "Thermoeconomic Model for a Solar-Powered Zeolite Cooling System", ASME Solar World Congress, Orlando, Florida USA, July 2005. 2. Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B., "Comparing the performance of natural and synthetic zeolites in a solar-powered adsorption cooling system" HEFAT2005, 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Cairo, Egypt, 19-22 September 2005. 3- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, "Güneş Enerjisi ile Çalışan Adsorplanma Soğutma Sisteminden Maksimum Teorik Başarım Sağlanması", Proceedings of VI Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, pp:105-114, 25-27 Mayıs 2006, Isparta, Turkey. 4- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, Güneş enerjisi ile çalışan adsorplanmalı bir soğutma sisteminde zeolit ve silika jel kullanımında termodinamik ve ekonomik başarımın karşılaştırılması, Türkiye 10. Enerji Kongresi ve Uluslararası 5. Enerji Fuarı Kongre Kitabı, sayfalar: 423-431, Kasım 27-30, 2006; İstanbul, Türkiye 5- Baker, D.K. and B. Kaftanoğlu, "Predicted Impact of Collector and Zeolite Choice on the Thermodynamic and Economic Performance of a Solar Powered Adsorption Cooling System", Experimental Heat Transfer journal, 20:2, pp. 103-122, 2007 6- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, "Limits to the Thermodynamic Performance of a Thermal Wave

Adsorption Cooling Cycle”, HEFAT2007, 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Sun City, South Africa, 1-4 July 2007.

7- Baker D.K. “Thermodynamic limits to thermal regeneration in adsorption cooling cycles”, Elsevier, International Journal of Refrigeration, 31:1 ( 2008 ) 55 – 64

8- Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B., ”Trends In COP for Adsorption Cooling Cycles with Thermal Regeneration and Finite Number Of Beds” Conference Proceedings of ASME Energy Sustainability 2008, Jacksonville, Florida, 10-14 August 2008.

**TUBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 105M244
<b>Proje Başlığı:</b> Güneş Enerjisi Destekli Zeolit İklimlendirme Sistemi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Bilgin Kaftanoğlu, Doç. Dr. Cemil Yamalı, Yrd. Doç. Dr. Derek K. Baker, Arş. Gör. İsmail Solmuş, Arş. Gör. Ahmet Çağlar, Arş. Gör. Onur Taylan
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06531 Ankara/Türkiye
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> 1. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK), Tunus Caddesi No:80 06100 Kavaklıdere / Ankara 2. ATAÇ Şirketler Gurubu, Cinnah Cad. Ahenk Sokak No:5 06390 Çankaya/Ankara
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 1.10.2006 – 1.01.2009
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> Bu projede, zeolit-su çalışma çiftine ait eş sıcaklık eğrileri deneysel olarak elde edildikten sonra, zeolit-su çalışma çiftini kullanan güneş enerjisi destekli adsorpsiyonlu örnek soğutma grubu tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bir yıl boyunca düzlemsel ve vakumlu boru tipi güneş toplaçlarının performansı Ankara ili iklim koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Son olarak, adsorpsiyonlu soğutma sisteminin yıllık analizlerini yapmak üzere TRNSYS programı yardımıyla sayısal bir model tasarlanmıştır.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Güneş enerjisi; Adsorpsiyonlu soğutma; Zeolit
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> 1- Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B, "Thermoeconomic Model for a Solar-Powered Zeolite Cooling System", ASME Solar World Congress, Orlando, Florida USA, July 2005. 2. Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B., "Comparing the performance of natural and synthetic zeolites in a solar-powered adsorption cooling system" HEFAT2005, 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Cairo, Egypt, 19-22 September 2005. 3- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, "Güneş Enerjisi ile Çalışan Adsorplanma Soğutma Sisteminden Maksimum Teorik Başarım Sağlanması", Proceedings of VI Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, pp:105-114, 25-27 Mayıs 2006, Isparta, Turkey. 4- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, Güneş enerjisi ile çalışan adsorplanmalı bir soğutma sisteminde zeolit ve silika jel kullanımında termodinamik ve ekonomik başarımın karşılaştırılması, Türkiye 10. Enerji Kongresi ve Uluslararası 5. Enerji Fuarı Kongre Kitabı, sayfalar: 423-431, Kasım 27-30, 2006; İstanbul, Türkiye 5- Baker, D.K. and B. Kaftanoğlu, "Predicted Impact of Collector and Zeolite Choice on the Thermodynamic and Economic Performance of a Solar Powered Adsorption Cooling System", Experimental Heat Transfer journal, 20:2, pp. 103-122, 2007 6- Baker D.K. and B. Kaftanoğlu, "Limits to the Thermodynamic Performance of a Thermal Wave Adsorption Cooling Cycle", HEFAT2007, 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics

and Thermodynamics, Sun City, South Africa, 1-4 July 2007.

7- Baker D.K. "Thermodynamic limits to thermal regeneration in adsorption cooling cycles", Elsevier, International Journal of Refrigeration, 31:1 ( 2008 ) 55 – 64

8- Baker, D.K. and Kaftanoğlu, B., "Trends In COP for Adsorption Cooling Cycles with Thermal Regeneration and Finite Number Of Beds" Conference Proceedings of ASME Energy Sustainability 2008, Jacksonville, Florida, 10-14 August 2008.