

ADSORPSİYONLU CHILLERLERDE KULLANILABİLECEK ADSORBENT-ADSORBAT ÇİFTLERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ÇEVİRİM PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Zeynep Elvan YILDIRIM
Gamze GEDİZ İLİŞ
Moghtada MOBEDİ
Semra ÜLKÜ

ÖZET

Bu çalışmada çift ve tek yataklı adsorpsiyonlu chillerlerin çalışma prensibi kısaca açıklanmıştır. Adsorpsiyonlu chillerlerde kullanılan adsorbent-adsorbat çiftleri ele alınmış, değişik çiftlerin yapısı, fizikotermal özellikleri, avantajları ve dezavantajları özetlenmiş ve önemli çiftlerin izoterm diyagramları gösterilmiştir. Adsorpsiyonlu chillerlerin COP değerlerinin hesaplanması için, termodinamik çevrimin her bir işleminde chiller ile ortam arasındaki ısı transferleri açıklanmış ve matematiksel denklemleri verilmiştir. Adsorbent yatağı ve kondenseri üç farklı yöntem ile soğutulan ve iki farklı silika jel tipi kullanan toplam altı chiller için, COP ve evaporatör kapasiteleri incelenmiştir. Maksimum adsorbent yatağı sıcaklığı değiştirilerek, COP ve evaporatör kapasitesi değişimleri iki farklı silika jel için karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyonlu ısı pompası, COP, adsorbent-adsorbat çifti.

ABSTRACT

In this study, working principle of single bed and two bed adsorption chillers are briefly explained. Adsorbent – adsorbate pairs used in adsorption chiller are investigated, the structure of different pairs, thermophysical properties, their advantages and disadvantages are summarized; the related isotherm graphs are given. For the calculation of COP values of the adsorption chiller, the heat transfer between the chiller and the environment for each process of the thermodynamic cycle is explained and mathematical equations are given. COPs and the evaporator capacities of 6 chillers whose adsorbent beds and condensers are cooled by three different methods are investigated for two different types of silica gels. By changing the maximum adsorbent bed temperature, the COPs and the evaporator capacities of the chillers are compared.

Key words: Adsorption chiller, COP, adsorbent-adsorbate pair.

GÖSTERİMLER

w	adsorplanma miktarı (kg/kg)
T	sıcaklık (°C)
P	basınç (Pa)
f	fonksiyon
Q	ısı (kJ/kg)
m	kütle (kg)
c_p	özısı (kJ/kgK)
ΔH_{ads}	ortalama adsorpsiyon ısı (kJ)
Δh_{fg}	buharlaşma entalpisi (kJ/kg)
COP	performans katsayısı

Alt indisler

ads	adsorpsiyon
des	desorpsiyon
kon	kondenser
ev	evaporatör
s	adsorbent
g	giriş
ç	çıkış
sat	doyma
k	katı
soğ	soğutma

1. GİRİŞ

Isıtma ve soğutma sistemleri, yaşam alanlarında konfor şartlarının sağlanması ve endüstriyel uygulamalarda da kullanılması açısından önemlidir. Ancak birincil enerji kaynaklarının giderek azalması ve enerjinin maliyetinin gün geçtikçe yükselmesi nedeni ile ısıtma ve soğutma sistemlerinin enerji ihtiyacını karşılamak aynı paralellikte maliyetli hale gelmektedir. Günümüzde yüksek COP'lerinden dolayı mekanik ısı pompaları ısıtma ve soğutma sistemlerinde tercih edilen cihazlardır. Son zamanlarda, mekanik ısı pompalarında kullanılan soğutucu akışkanların ozon tabakasına verdikleri zararlar nedeni ile alternatif ısı pompaları arayışı artmıştır. Özellikle atık ısı kaynakları, güneş enerjisi, jeotermal enerji veya doğal olan herhangi bir ısı kaynağı doğrudan kullanılarak soğutma işlemini sağlayan adsorpsiyonlu chiller sistemleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Adsorpsiyonlu chillerler, enerji depolama ve daha sonra depolanan enerjiyi değerlendirme imkânı yaratmasından dolayı da uygulama avantajı sağlamaktadır. Sistem basit çalışma prensibine sahip olmasına rağmen, teknik zorluklardan dolayı üretimi henüz istenilen düzeyde yaygınlaşmamıştır. Kesikli bir çalışma prensibine sahip olması, düşük basınçta çalışmasından dolayı kaçak sorunlarının yaşanması, yüksek vakum teknolojisine gereksinim duyulması, daha hacimli ve ağır olması gibi dezavantajlarından dolayı bu tip ısı pompalarının yaygınlaşması için araştırma ve geliştirilme çalışmaları devam etmektedir.

Adsorpsiyonlu chillerde kullanılacak çiftin seçilmesi için ilk önce kullanılacak yüksek ve alçak ısı kaynağının basınç ve sıcaklık değerleri, evaporasyon ve kondenzasyon sıcaklıkları gibi çalışma şartları göz önüne alınmalıdır. Daha sonra, değişik adsorbent-adsorbat çiftlerinin özellikleri değerlendirilerek en uygun adsorbent-adsorbat çifti seçilmelidir. Örneğin, uygulamada aktif karbon – metanol ve silika jel – su çiftinde düşük sıcaklık kaynakları yeterli iken; zeolit – su çiftinde yüksek sıcaklık kaynaklarının daha avantajlı olduğu görülmektedir [1]. San ve Lin [2] yaptıkları çalışmada silika jel – su, aktif karbon – metanol ve zeolit – su çiftlerini karşılaştırmış, aktif karbon – metanol çiftinin yüksek buhar basıncının, ısı transfer katsayısını arttırdığından ve çevrim süresini kısalttığından bahsetmiştir. Yong ve Wang'ın [3] bir çalışmada adsorbent yatağının ve dolayısı ile sistemin verimini arttırmak için yeni nesil adsorbentlerden (modifiye edilmiş adsorbentler) faydalanılabileceği belirtilmiştir. Demir ve çalışma arkadaşları [4] adsorpsiyonlu ısı pompalarında karşılaşılan problemler ve bu problemleri gidermek için değişik üniversite ve kuruluşlarda yapılan çalışmaları detaylı olarak anlatmışlardır. Adsorbent yataklarında ısı ve kütle transferini arttırmak için yapılan tasarımlar detaylı olarak ele alınmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, adsorpsiyonlu chillerler termal enerji depolama özelliğine de sahiptirler. Ülkü ve Mobedi [5] açık ve kapalı adsorpsiyonlu sistemlerin enerji depolama uygulamalarını çalışmışlardır.

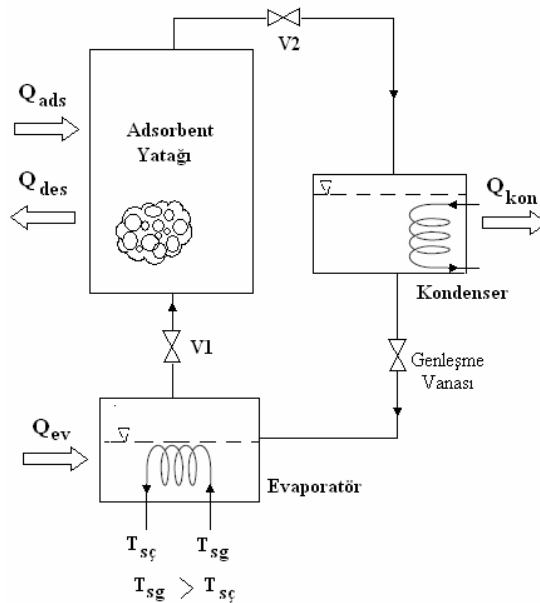
Adsorpsiyonlu chillerde kesikli çalışmayı önlemek ve soğutma çevrimine süreklilik sağlamak için iki veya daha fazla adsorbent yatağı kullanımı öngörülmüştür. Aynı sistemde farklı adsorbent-adsorbat çiftlerinin kullanıldığı durumlarda, sistem performansının yükseldiği çalışmalarca kanıtlanmıştır. Örneğin Liu ve Leong'un [6] çalışmada 3 yataklı bir sistem kullanılmıştır. İki adsorbent yatağında zeolit - su çifti ile çalışılırken üçüncü adsorbent yatağında silika jel – su çifti kullanılmıştır. Böylece, sistemin COP'si artırılmış ve bu değer 0.5'ten 1.3'e yükseltilmiştir.

Bu çalışmada tek ve çift yataklı sistemlerin çalışma prensiplerine, literatürde yaygın olarak kullanılan çiftlerin özelliklerine ve sistem performansının hesaplanması için kullanılan bağıntılara yer verilmiştir. Bir adsorbent-adsorbat çifti için denge durumunun tanımı verilmiş ve değişik çiftlerin izotermi karşılaştırılmıştır. Adsorbent yatağı ve kondenseri farklı yöntemler ile soğutulan ve farklı silika jel tipi kullanan 6 adsorpsiyonlu chillerin çevrim verimleri ve evaporatör kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

2. TEK VE ÇİFT YATAKLI ADSORPSİYONLU CHİLLERLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Adsorpsiyon en basit hali ile bir akışkanın katı bir yüzey tarafından tutulması olarak açıklanabilir. Kimyasal ve fiziksel adsorpsiyon olarak ikiye ayrılır. Kimyasal adsorpsiyonda fazlar arasında reaksiyon meydana gelmekte ve etkileşim bu şekilde gerçekleşmektedir. Fiziksel adsorpsiyonda akışkan (adsorpsiyonlu chillerlerde gaz fazındadır) katının iç yüzeyine tutunur. Bu tutunma, katı ile akışkan molekülleri arasındaki farklı mekanizmalara sahip çekim kuvvetleri tarafından meydana gelir. Gaz fazdaki maddeye adsorptiv, tutan katı veya sıvı haldeki maddeye de adsorbent denilmektedir [7]. Adsorbent geniş yüzey alanlı gözeneklere sahip bir yapıdır. Adsorpsiyonlu chillerlerde, tersinir özelliğe sahip fiziksel adsorpsiyon gerçekleşmekte, amaç ve çalışma durumlarına göre farklı çiftler (silika jel-su, aktif karbon - metanol, zeolit - su, aktif karbon - amonyak vb.) kullanılabilir. Adsorpsiyonlu chillerlerin ana elemanları, adsorbent yatağı, kondenser, evaporatör, genişleme vanasıdır. Çevrimin çalışma şartlarına uygun olarak adsorbent-adsorbat çifti seçilir. Bu bölümde tek ve çift yataklı adsorpsiyonlu chillerlerin çalışma prensibi anlatılacaktır.

Tek yataklı adsorpsiyonlu ısı pompası şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Başlangıçta adsorbent yatağında adsorbat konsantrasyonu düşük olup ($w \approx 0$), V1 ve V2 vanaları kapalıdır. Çevrim, evaporatör ile adsorbent yatağı arasında bulunan V1 vanasının açılması ile başlar. Bu durumda, adsorbat evaporatörde dolaşan soğutma suyundan ısı çekerek buharlaşır ve soğutma suyunun sıcaklığı düşürülür. Buharlaşan adsorbat, adsorbent yatağına doğru akmaya başlar ve yatakta bulunan adsorbent tanecikleri tarafından adsorplanır. Adsorplama işlemi sırasında adsorbent yatağında adsorpsiyon ısısı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ısının adsorbent yatağından çevreye transfer edilmesi ve adsorbent yatağının sıcaklığı çevrimin minimum sıcaklığına düşürülmesi gerekmektedir. Adsorpsiyon işlemi sonunda, adsorbent tanecikleri doymuş hale gelmiş ve adsorbat konsantrasyonu artmıştır. Çevrimin bu adımına izobarik adsorpsiyon işlemi adı verilir.



Şekil 1. Tek Yataklı Adsorpsiyonlu Chillerin Şematik Gösterimi

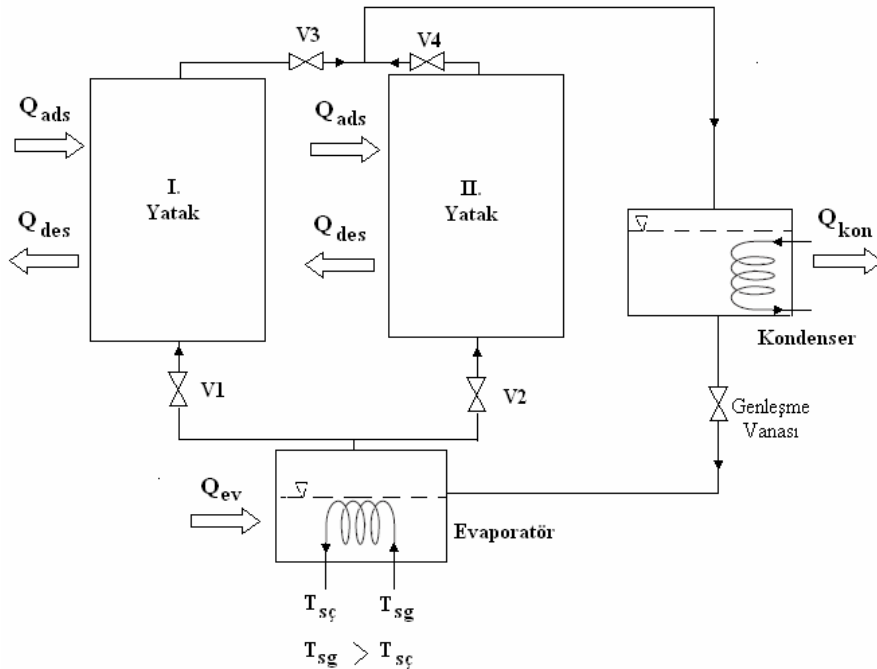
Adsorpsiyon işlemi tamamlandığında V1 vanası kapatılmakta, adsorbent yatağına ısı verilerek sıcaklığı ve basıncı artırılmaktadır. Bu işlem izosterik ısıtma olarak tanımlanır.

Adsorbent yatak basıncı kondenser basıncına ulaştığında V2 vanası açılmakta ve desorpsiyon işlemi başlatılmaktadır. Desorpsiyon işlemi esnasında adsorbent yatağına ısı transfer edilmekte ve sıcaklığı artırılmaktadır. Desorplanan adsorbat kondensere aktarılır ve kondenserde çevreye ısı vererek yoğunlaşmaya başlar. Adsorbent yatağı tekrar başlangıç konsantrasyonuna gelinceye kadar desorpsiyon işlemine devam edilmektedir. Çevrimin bu adımına izobarik desorpsiyon adı verilir.

Desorpsiyon işlemi tamamlandıktan sonra, V2 vanası kapatılarak yatak ile kondenser arasındaki bağlantı kesilir. Yatak ilk konsantrasyon ($w \approx 0$) durumunda olup, adsorbent yatağı soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. Soğutma işlemi, yatak basıncı evaporatör basıncına düşüncüye kadar devam etmektedir. Bu işlem izosterik soğutma olarak tanımlanır.

Kondenserde bulunan sıvı fazındaki adsorbat, genişleme vanasından geçirilerek basıncı evaporatör basınç seviyesine düşürülmekte ve evaporatöre aktarılmaktadır. Çevrimin bitmesi ile tekrar izobarik adsorpsiyon işlemine başlanmaktadır.

Adsorpsiyonlu ısı pompaları kesikli çalışan sistemlerdir. Evaporatörden buharlaşan adsorbat, adsorbent tarafından adsorplanırken kondenserde herhangi bir işlem yapılmamaktadır. Adsorbatın kondenserde yoğunlaşması sırasında ise evaporatörde bir işlem gerçekleşmemektedir. Bu da, soğutma prosesinin sürekliliğini engellemektedir. Soğutma işleminin sürekliliğini sağlamak için, iki veya daha fazla adsorbent yatağı kullanılmaktadır. Şekil 2’de çift yataklı bir adsorpsiyonlu chillerin şematik çizimi gösterilmektedir. Birinci adsorbent yatağında adsorpsiyon işlemi gerçekleşirken ve evaporatörde buharlaşan adsorbat soğutma suyundan ısı çekerken, ikinci adsorbent yatağında desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmekte ve yüksek basınçta buharlaşan adsorbat kondenserde yoğunlaşmaktadır. Birinci adsorbent yatağında adsorplama ve ikinci adsorbent yatağında desorplama işlemi bittikten sonra, birinci adsorbent yatağının evaporatörle olan ilişkisi kesilir, aynı anda da diğer yatağın evaporatörle olan bağlantısı açılır. Birinci yatak desorplama işlemine geçerken, ikinci yatakta adsorbat adsorplanır ve çevrim bu şekilde her iki yatağı kullanarak devamlılık kazanır.



Şekil 2. Çift Yataklı Adsorpsiyonlu Chillerin Şematik Gösterimi

3. ADSORPSİYONLU CHİLLERLERDE KULLANILAN DEĞİŞİK ÇİFTLERİN ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, adsorpsiyonlu chillerlerde yaygın olarak kullanılan adsorbent-adsorbat çiftlerinin yapısı, kullanım avantajları ve dezavantajları genel olarak incelenmiştir. Adsorpsiyonlu ısı pompalarında çoğunlukla aşağıdaki çiftler üzerine çalışmalar yapılmıştır:

- a) silika jel – su
- b) zeolit – su
- c) aktif karbon – metanol
- d) aktif karbon – amonyak

Silika jel Si-O bazlı, amorf yapıda, gözenekli bir maddedir. Çeşitli gözenek özelliklerinde silikajel üretilmekte olup, mikro (gözenek çapı ~ 0.1 nm) ve mezopor (gözenek çapı ~2-3 nm) boyutlarındadır ve yaklaşık 600 m²/g yüzey alanına sahiptir [1]. Silika jel yapay bir malzeme olup, farklı tiplerde üretilmektedir. Adsorpsiyonlu chillerlerde, en sıklıkla kullanılan tipleri Tip RD ve Tip A'dır. Yüksek su buharı adsorplama kabiliyetine sahiptir. Son zamanlarda, silika jelin gözeneklerine tuz bileşiklerinin tutturulması ile su buharı adsorplama kabiliyeti artırılarak, yeni nesil silika jel ürünleri üretilmektedir. Bu tip adsorbentlerin su buharı adsorplama kapasitesi geleneksel silika jel tiplerine göre oldukça yüksektir. Silika jel-su çifti, desorpsiyon sıcaklığının düşük olması sebebi ile (~120°C), adsorpsiyonlu chillerlerin düşük sıcaklıktaki termal kaynakları ile (jeotermal enerji, güneş enerjisi, atık ısı vb.) çalışmasına olanak sağlamaktadır.

Zeolitler kristal yapıda alumino silikatlardır. Mikro boyutta gözeneklere sahip olup (gözenek çapı ~ 0.1 nm), zincirli veya halkalı yapılarda bulunabilirler. Doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılırlar. Yapay zeolitlerde 13X ve NaX zeolitler, adsorpsiyonlu chillerlerde en sık kullanılan tiplerdir. Zeolit - su çiftinin adsorpsiyon ısısı yüksektir. Yapay zeolitlerin su buharı adsorplama kabiliyeti %35'e kadar çıkabilmektedir [8]. Zeolit – su çiftinin dezavantajı ise silika jel – su ve aktif karbon metanol çiftlerine göre daha yüksek desorpsiyon sıcaklığına sahip olması ve dolayısı ile düşük enerji kaynakları ile (örn. güneş enerjisi) verimli bir şekilde çalışamamasıdır.

Aktif karbon, odun, kömür veya yüksek polimerlerin aktivasyonu ile üretilen gözenekli bir maddedir. Çoğunlukla mikropor yapıda olup, yaklaşık 1000 m²/g yüzey alanına sahiptir [9]. Çalışmalarda çoğunlukla aktif karbon - metanol çifti denenmiştir. Aktif karbon – metanol çifti 0 °C'nin altında çalışma özelliği ile farklılık göstermektedir. 150°C'nin üstünde metanolün bozunması sebebi ile aktif karbon-metanol çiftini kullanan adsorpsiyonlu chillerler yüksek sıcaklıklarda çalışma imkânına sahip değildirler.

Aktif karbon – amonyak çifti (atmosfer basıncına yakın) çalışma basıncı özelliği ile diğer çiftlerden farklılık gösterir. Diğer çiftlerde kullanılan adsorbatların buharlaşma basınçları düşük olduğu için sistem vakum altında çalışır. Ancak amonyağın yüksek buharlaşma basıncına sahip olması sistemin atmosfer basıncına yakın değerlerde çalışmasına izin verir [10]. Düşük vakum değerlerinde çalışan sistemlerde, özel tasarım ve ekipmanların kullanımına gerek duyulduğu için, bu tip sistemlerin maliyeti yüksektir. Ayrıca, aktif karbon – amonyak çiftinin nispeten yüksek basınçlarda çalışması, buhar ile katı yüzeyler arasında ısı transfer katsayısını arttırdığı için, çevrim süresinin kısalmasına neden olmakta ve soğutma gücü artmaktadır. Ancak amonyağın korozif ve zehirli etkisi, bu çiftin kullanımını sağlık ve çevresel etkenler açısından kısıtlandırmaktadır.

3.1 Adsorbent-Adsorbat Çiftlerinin Denge Durumu

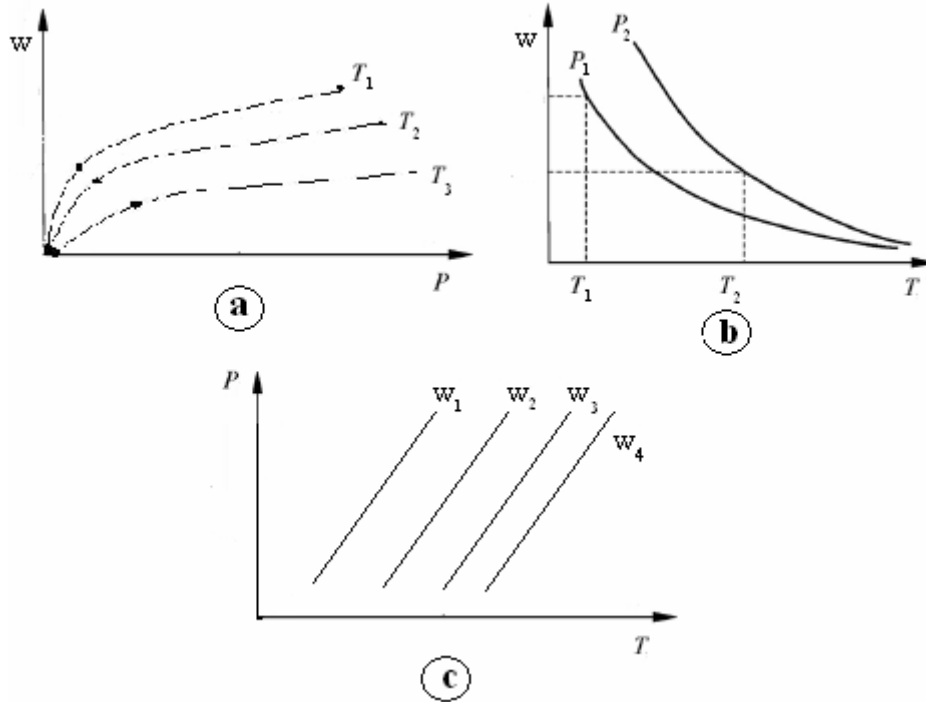
Belirli basınç ve sıcaklık değerinde maksimum adsorplanmanın gerçekleştiği duruma denge durumu adı verilir. Bu koşullarda adsorbent, gözeneklerinin içine daha fazla adsorbatı kabul etmemektedir, bir başka deyişle doyumluk durumundadır. Adsorpsiyonda denge durumu adsorbent yüzey karakteristiği, gözenek yapısı ve boyutu, adsorbatın özellikleri ve molekül boyutu, ortam sıcaklığı ve basıncı gibi parametrelere bağlıdır. Adsorbent – adsorbat çiftlerinin denge durumu, sistem koşullarını belirlemek adına büyük önem taşımaktadır. Adsorpsiyonlu chillerin, hangi basınç ve sıcaklık koşullarında çalışacağına, ancak adsorbent-adsorbat çiftinin denge durumunun bilinmesi ile karar verilebilir.

Adsorbent-adsorbat çiftinin denge durumu izoterm, izobar ve izoster grafikleri ile tanımlanmaktadır. Ayrıca, bu grafiklerin matematiksel denklemleri ile de ifade edilebilmektedir. Şekil 3'te izoterm, izobar ve izoster grafikleri şematik olarak gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, izoterm bir çiftin, sabit sıcaklıkta, basınca bağlı değişen adsorplama kabiliyetini ($w=f(P)_T$), izobarlar sabit basınçta sıcaklıkla değişen adsorplama kabiliyetini ($w=f(T)_P$), izosterler ise sabit adsorplama kapasitesinde, sıcaklığa bağlı basıncın değişimini gösteren ($P=f(T)_w$) grafiklerdir.

Adsorbent-adsorbat çiftlerinde, denge durumunu deneysel olarak belirlemek için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar;

- hacimsel yöntem,
- ağırlık ölçümü yöntemi
- gaz kromatografisi vb

şeklinde. Hacimsel yöntemde, adsorbent ve adsorbat kapalı hacimlerde sabit sıcaklıkta bulunmaktadır. Adsorbent tankında gerçekleşen adsorpsiyon işlemi öncesi ve sonrası basınç değişiminden faydalanarak, adsorplanan miktar hesaplanmaktadır. Ağırlık ölçüm yönteminde, sabit sıcaklıkta bulunan adsorbent kuru durumu ile adsorpsiyon gerçekleştikten sonraki durumu arasındaki



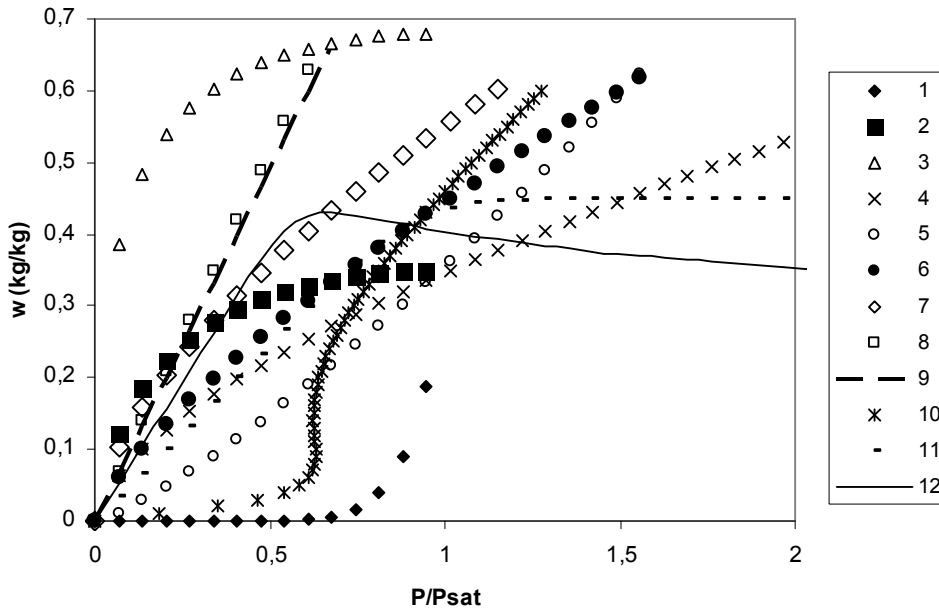
a) İzoterm grafik örneği, b) İzobar grafik örneği, c) İzoster grafik örneği
Şekil 3. Denge Durumunu Tanımlayan Grafik Çeşitleri

kütleli fark adsorplanma miktarını belirler. Gaz kromatografisi denge durumu için diğerlerine göre daha karmaşık bir yöntemdir. Adsorpsiyon sırasında, adsorbent değişen ısı iletimine bağlı olarak ölçümler yapılır [11]. Ayrıca, kalorimetre cihazı ile farklı şartlarda çiftin adsorpsiyon ısısı ve kinetik verileri elde edilebilir.

Bu bölümde, adsorpsiyonlu chillerlerde sıklıkla kullanılan adsorbent-adsorbat çiftlerinin izoterm grafikleri verilecektir. Çiftler, tiplerine göre değişik izoterm eğrileri verebilirler. Şekil 4,5 ve 6'da gösterilen grafiklerde çeşitli adsorbent-adsorbat çiftlerinin izoterm eğrileri verilmiştir. En yaygın kullanılan adsorbent-adsorbat çiftlerinin izoterm denklemleri literatürde yer almıştır. Burada, sunulan izoterm eğrileri, literatürde bulunan denklemlerden faydalanılarak çizilmiştir. Adsorbent-adsorbat çiftleri üzerine deneysel çalışma yapılmakta ve elde edilen verilere farklı matematiksel modellerle

(Freundlich, Dubinin-Astakhov, Toth, Henry vb.) ifade edilmektedir. Bu denklemler, literatürde mevcut olup, bu makalede verilmemiştir. Şüphesiz elde edilen deneysel sonuçların ve ona bağlı olarak izoterm denklemlerinin belirli basınç ve sıcaklık aralıklarında geçerli olması gerekir. Ancak, yaptığımız literatür araştırmasında sadece birkaç tip için çalışma aralığına değinilmiştir. Aşağıda verilen izoterm eğrileri 40 °C sıcaklık ve maksimum 14 kPa basınç değerleri için geçerlidir.

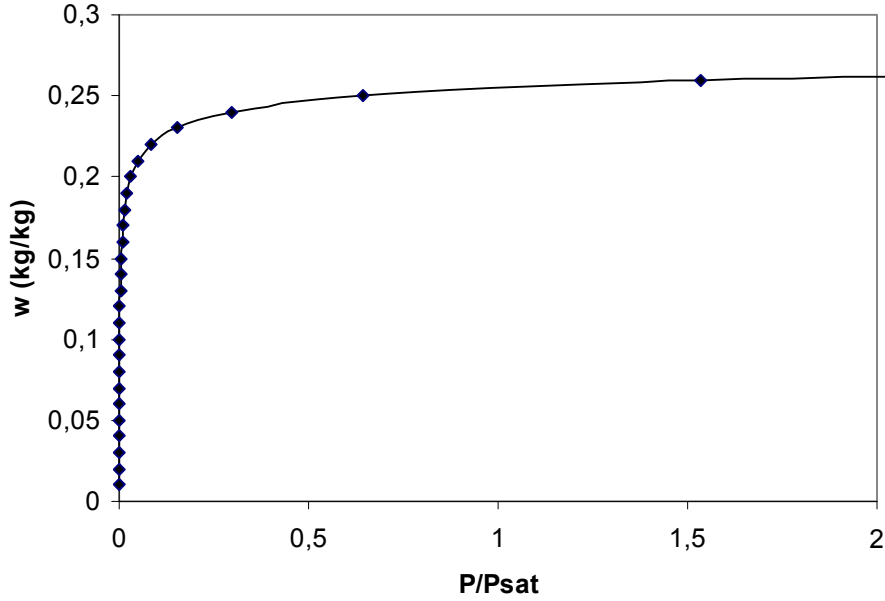
Şekil 4'te farklı tip silika jel – su çiftleri ve bu tiplere ait izoterm denklemleri kullanılarak elde edilmiş izoterm eğrileri gösterilmektedir. Literatür araştırması silika jel-su ile ilgili oldukça veri bulunduğunu göstermektedir. Dolayısı ile adsorpsiyonlu soğutma ve ısıtma cihazlarında araştırmacılar tarafından yoğunlukla silika jel - su çiftinin kullanıldığı sonucuna varılabilir. Birbirinden farklı denge eğrileri bulunan oldukça farklı silika jel tipi bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, bu silika jel tipleri değişik izoterm eğrileri vermektedir ve kapasiteleri oldukça değişim göstermektedir. Örneğin $P/P_{sat} = 1$ durumu için tipi raporlanmamış 1 nolu çiftin maksimum su buharı adsorplama kabiliyeti %20 civarında iken silika jel S40 olarak adlandırılan tipte su buharı adsorplama kapasitesinin %70 civarında olduğu belirtilmektedir. Eğri davranışları, adsorbentlerin yapısı hakkında da bilgi verebilir. İzotermeler IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) tarafından 6 grupta sınıflandırılmıştır. Şekil 4'teki 2 ve 3 nolu silika jel tiplerinde, IUPAC'in adlandırdığı TIP I izoterm şekli gözlemlenmektedir. Bu da, bu silika jel tipinde mikrogözenekli bir yapının hakim olduğunu belirtir. 1 nolu silika jelde IUPAC'in adlandırdığı TIP III izoterm şekli gözlenmektedir. Buradan, çok katmanlı adsorpsiyon gerçekleştiği ve makro boyutta gözeneklerin çoğunlukta olduğu tahmin edilebilir ve düşük basınçlarda adsorbent – adsorbat çiftinin etkileşiminin zayıf olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Ancak, izoterm eğrileri elde edilirken deneylerin başlangıcında numunelerin yüzeylerinin adsorbattan tamamen arındırılmış olması, düşük basınç ve yüksek desorplama sıcaklığında işleme tabi tutulmuş olması izotermelerin doğruluğu açısından özel önem taşımaktadır.



1. Dubinin – Astakhov denklemi (tip bilinmiyor) [12], 2. Dubinin – Astakhov denklemi (silika jel S0) [13], 3. Dubinin – Astakhov denklemi (silika jel S40) [13], 4. Freundlich denklemi (tip RD, tip A) [14], 5. Freundlich denklemi (tip bilinmiyor) [12], 6. Freundlich denklemi (tip bilinmiyor) [15], 7. Freundlich denklemi (tip RD) [14], 8. Henry denklemi (tip 3A) [16], 9. Henry (tip RD) [16], 10. Empirik denklem (tip bilinmiyor) [2], 11. Toth denklemi (tip A) [17], 12. Toth denklemi (tip RD) [17]

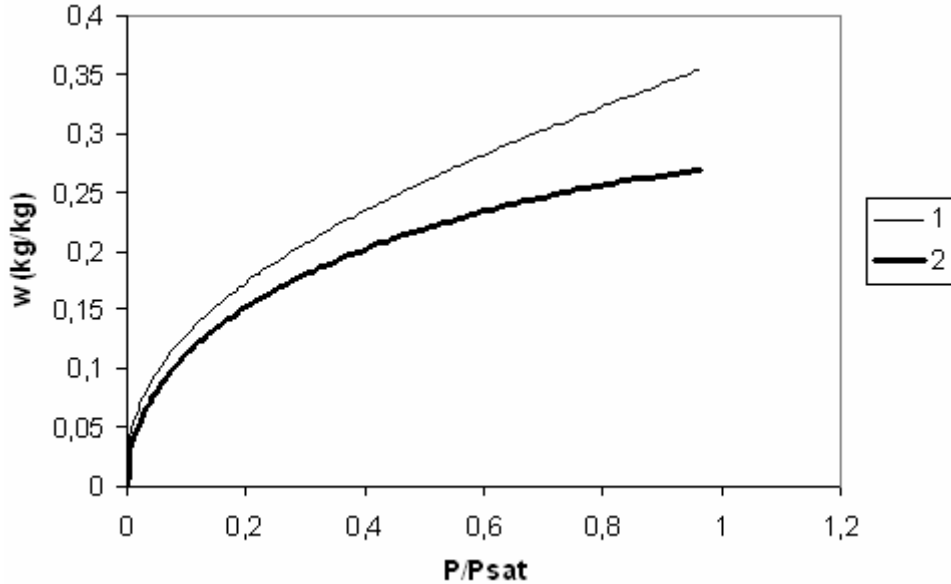
Şekil 4. Silika Jel – Su Çifti İçin İzoterm Eğrileri

Şekil 5'te zeolit 13X - su çiftinin izoterm eğrisi gösterilmiştir. Zeolit 13X – su çifti için adsorplama işleminin çoğunun düşük basınçlarda tamamlandığı ve yaklaşık $P/P_{sat} = 0.5$ değerinde adsorplama işleminin dengeye ulaştığı gözlemlenmektedir. Bu çift için, IUPAC'in adlandırdığı TIP I izotermine söz konusu olduğu görülmektedir. Bu da, parçacık içerisinde mikrogözeneklerin çoğunlukta olduğunu belirtir.



Şekil 5. Zeolit 13X– Su Çifti İçin İzoterm Eğrileri

Şekil 6'da aktif karbon - amonyak çiftinin iki farklı tipi için izoterm eğrileri verilmektedir. Eğri davranışları IUPAC adlandırdığı TİP I izotermi ile uyum sağlamaktadır. Bu da aktif karbonun mikrogözenekli yapıda olduğu bilgisini vermektedir. Eğri davranışları birbirine benzerlik göstermektedir fakat, aynı basınç değerlerinde farklı adsorplama kapasitesine sahip oldukları görülmektedir. Örneğin, P/Psat = 0,6 değerinde 1 nolu aktif karbon % 28 adsorplama kabiliyetine sahip iken, 2 nolu aktif karbon yaklaşık % 22 adsorplama kabiliyetine sahiptir. Aktif karbon – amonyak çiftinin grafiği diğer adsorbent – adsorbat çiftlerinin grafiği ile karşılaştırılacak olursa, düşük basınçlarda adsorplama kabiliyetinin oldukça düşük olduğu anlaşılabilir. Aktif karbon – amonyak çifti, amonyağın yüksek doyma basıncı özelliğinden dolayı nispeten yüksek basınç aralıklarında çalışmaya elverişlidir.



1. Dubinin – Radushkevich denklemi (monolitik karbon LM127), 2. Dubinin – Raduskevich denklemi (monolitik karbon LM001) [19]

Şekil 6. Aktif Karbon - Amonyak Çiftleri İçin İzoterm Eğrisi

4. ADSORPSİYONLU CHILLERLERİN COP DEĞERİNİN HESAPLANMASI

Adsorpsiyonlu soğutmada adsorbent yatağında gerçekleşen işlemler, izobarik adsorpsiyon, izosterik ısıtma, izobarik desorpsiyon ve izosterik soğutma olarak dört basamakta incelenebilir. Şekil 8 adsorbent yatağında gerçekleşen işlemlerin izoster grafiğinde çizimini göstermektedir.

- İzobarik adsorpsiyon (d-a): Evaporatörde çevreden ısı çekerek buharlaşan adsorbat, adsorbent yatağında bulunan adsorbent partikülleri tarafından adsorbe edilmektedir. Yatak sıcaklığı sabit basınçta T_a sıcaklığından T_d sıcaklığına düşürülmektedir. İzobarik adsorpsiyon işlemi sırasında adsorbent yatağından çevreye verilen ısı aşağıdaki denklik yardımı ile bulunabilir:

$$Q_{da} = m_k c_{pk} (T_d - T_a) + m_k \left(\frac{w_d + w_a}{2} \right) c_{ps} (T_d - T_a) + m_k (w_{max} - w_{min}) \Delta H_{ads} \quad (1)$$

- İzosterik ısıtma (a-b): Adsorbent yatak sıcaklığı dışarıdan ısı girişi ile T_a 'dan T_b 'ye yükseltilmektedir. İşlem sırasında adsorbent yatağından adsorbat miktarı değişmemektedir. Adsorbent yatağı ile çevre arasındaki ısı alışverişi aşağıda denklem ile bulunabilir:

$$Q_{ab} = m_k c_{pk} (T_b - T_a) + m_k w_{max} c_{ps} (T_b - T_a) \quad (2)$$

- İzobarik desorpsiyon (b-c): Bu aşamada da adsorbent yatağına ısı girişi devam etmektedir. Ancak desorpsiyon başlamakta; desorpsiyonla açığa çıkan buhar, kondensere akmakta ve sabit basınçta yoğunlaşmaktadır. İzobarik desorpsiyon sırasında yatağa verilmesi gereken ısı miktarı aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$Q_{bc} = m_k c_{pk} (T_c - T_b) + m_k \left(\frac{w_b + w_c}{2} \right) c_{ps} (T_c - T_b) + m_k (w_{max} - w_{min}) \Delta H_{ads} \quad (3)$$

- İzosterik soğutma (c-d): Yatak sıcaklığı T_c 'ye ulaştıktan sonra T_d sıcaklığına soğutulurken, basıncı kondenser basıncından evaporatör basıncına düşmektedir. İzosterik soğutma işleminde yataktan çekilmesi gereken ısı aşağıdaki denklik ile hesaplanabilir:

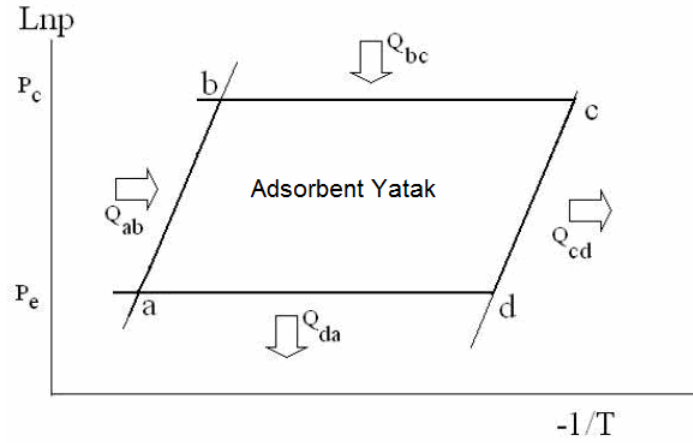
$$Q_{cd} = m_k c_{pk} (T_c - T_d) + m_k w_{min} c_{ps} (T_c - T_d) \quad (4)$$

Evaporatörün çevreden çektiği ve kondenserin çevreye verdiği ısı miktarları;

$$Q_{ev} = m_k (w_{max} - w_{min}) \Delta h_{fg(ev)} \quad (5)$$

$$Q_{kon} = m_k (w_{max} - w_{min}) \Delta h_{fg(kon)} \quad (6)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.



Şekil 7. Adsorbent Yatağındaki İşlemlerin İzoster Grafiğinde Gösterimi [5]

Soğutma etkisi, izobarik adsorpsiyon işlemi (d-a) sırasında evaporatördeki soğutma suyundan ısı çekmesi ile gerçekleşmektedir. Çevrimin soğutma COP'si (Coefficient of Performance) aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$COP_{soğ} = \frac{Q_{ev}}{Q_{ab} + Q_{bc}} \quad (7)$$

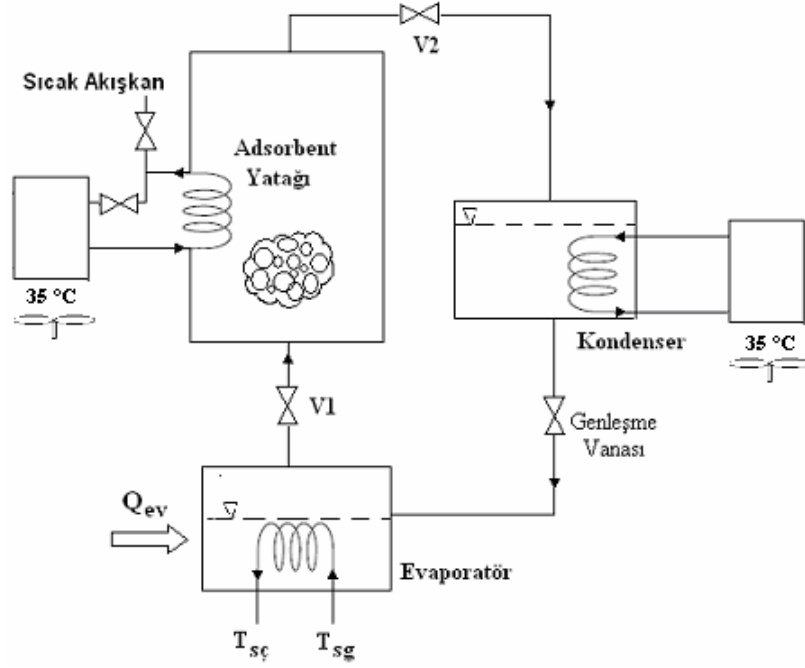
4.1 İzmir Şartları İçin Üç Farklı Adsorpsiyonlu Chillerin Çevrim Analizi

Daha önce de değinildiği gibi, adsorpsiyonlu ısı pompaları dört işlemde (izobarik adsorpsiyon, izosterik ısıtma, izobarik desorpsiyon ve izosterik soğutma) oluşmaktadır. Adsorbent yatağının maksimum ve minimum sıcaklık değerleri çok önemlidir. Pratikte, yüksek sıcaklık ısı kaynağının (örn. güneş ve jeotermal enerjileri) sıcaklığı T_c sıcaklığından (Şekil 7) daha yüksek olması gerekir. Örneğin düzlemsel bir güneş kolektöründe maksimum elde edilebilecek sıcaklık 90°C olursa, adsorbent yatağının maksimum sıcaklık değeri (T_c) 85°C civarında olması gerekir.

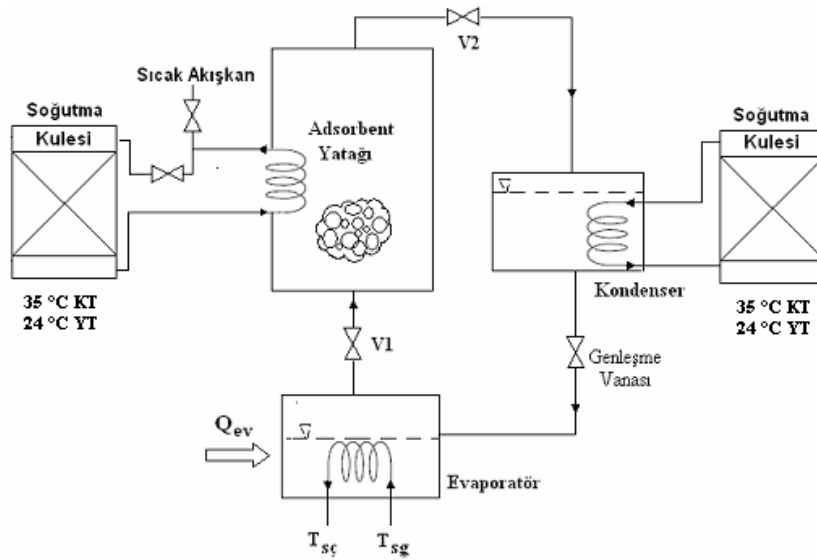
Adsorbent yatağının minimum sıcaklığı çevrim verimi açısından önem taşımaktadır. Adsorbent yatağının minimum sıcaklığı düşük sıcaklık ısı kaynağının tipine bağlıdır. Örneğin İzmir'de yaz mevsimi ortalama sıcaklığı 35°C olarak kabul edilirse, hava ile soğutulan adsorbent yatağının minimum sıcaklık değeri 40°C olabilir. Ancak, eğer soğutma kulesi kullanılarak adsorbent yatağı soğutuluyorsa minimum sıcaklık değeri 35°C 'ye kadar düşebilmektedir. Düşük sıcaklıklı bir ısı kaynağı kullanılarak (örn. 25°C civarında) soğutuluyorsa, adsorbent yatağı sıcaklığı 30°C 'ye kadar düşürülebilir.

Evaporasyon sıcaklığı adsorpsiyonlu chillerlerin tasarımında göz önüne alınması gereken diğer bir parametredir. Chillerlerin soğuk su giriş ve çıkış sıcaklıklarının pratikte 12°C ve 8°C olduğunu düşünürsek, evaporasyon sıcaklığı 3°C civarında olabilir, bu da su için $P_{ev} = 0.767 \text{ kPa}$ 'a karşı gelmektedir.

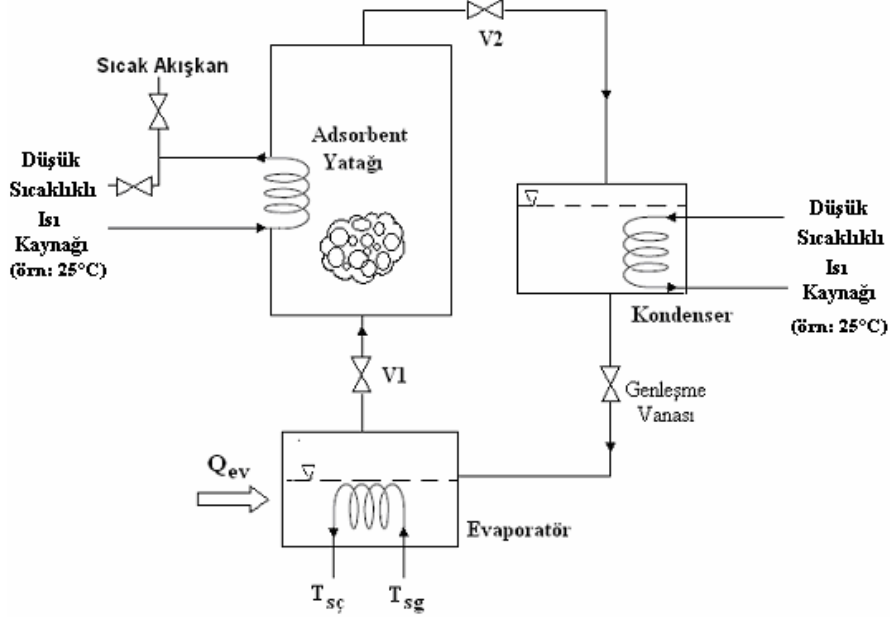
Çevrim veriminde ve uygulamada kondenser sıcaklığı da büyük önem taşımaktadır. Adsorbent yatağın minimum sıcaklığına benzer şekilde, İzmir şartlarında, kondenser sıcaklığı hava ile soğutulduğunda 40°C , soğutma kulesi kullanılarak soğutulduğunda 35°C ve düşük sıcaklık ısı kaynağı vasıtası ile soğutulduğunda 30°C civarında varsayılabilir. Kondenser sıcaklığı ayrıca adsorbent yatağının yüksek çalışma basıncını belirlemektedir.



(a)



(b)

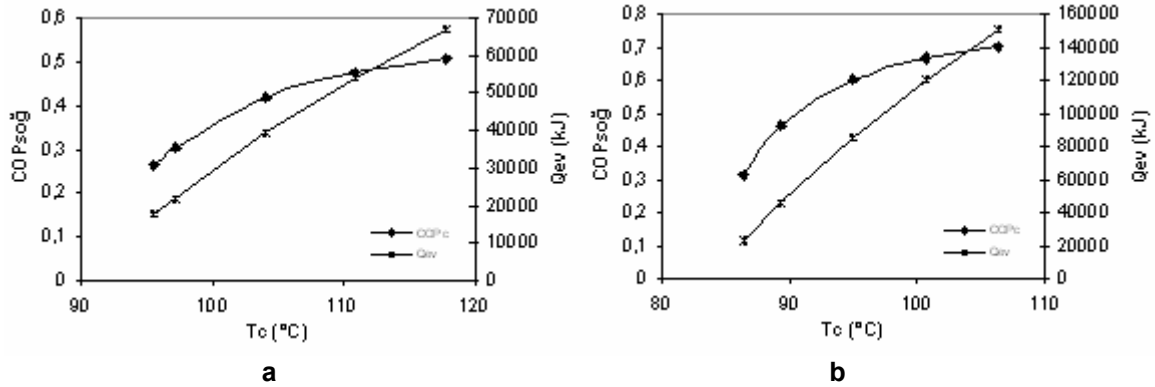


(c)

Şekil 8. İzmir Şartları İçin Verim Analizinin Yapıldığı Chillerler; a) hava ile soğutulan chiller, b) Soğutma kulesi ile soğutulan chiller, c) düşük sıcaklıklı ısı kaynağı ile soğutulan chiller

Bu çalışmada, Şekil 8a, 8b ve 8c'de gösterilen 3 farklı adsorpsiyonlu chiller için çevrim analizi yapılmıştır. Yapılan analizde maksimum sıcaklığa göre çevrimin verimi ve soğutma kapasitesinin değişimi İzmir şartları için incelenmiştir. Bu incelemede evaporatör sıcaklığı ve basıncı sırası ile 3°C ve 0.767 kPa olarak kabul edilmiştir. İnceleme iki tip silika jel – su çifti için yapılmıştır, ancak şüphesiz diğer tip adsorbent-adsorbat çiftlerine de uygulanabilir. Çalışması yapılan silika jeller Tip RD ve S0'dır. Bu tiplerin izotermi Şekil 4'te verilmiştir.

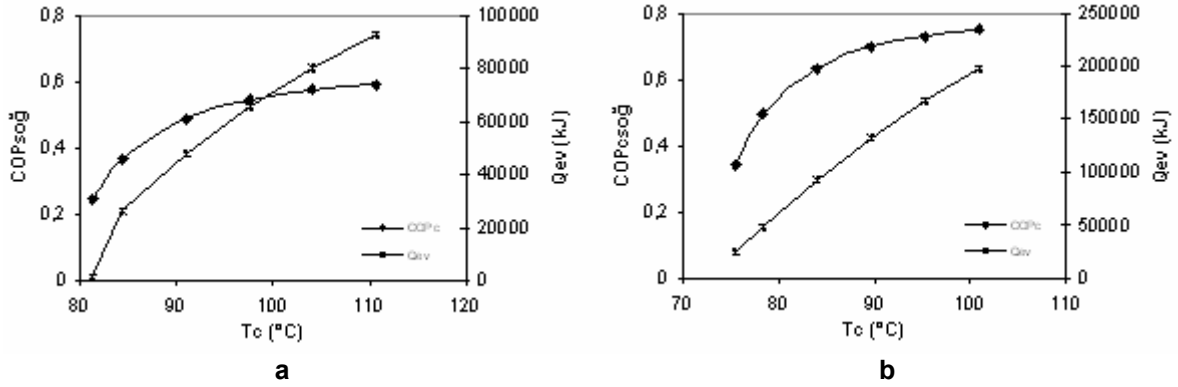
Chiller 1'de adsorbent yatağı ve kondenser hava ile soğutulmaktadır. Bu nedenle adsorbent yatağının minimum sıcaklık değeri ve kondenser sıcaklığı 40°C olarak kabul edilmiştir. Bu durumda çevrimin yüksek basınç değeri ise 7.3 kPa'dır. Chiller 2'de ise adsorbent yatağı ve kondenser, soğutma kulesi ile soğutulmaktadır. Bu nedenle, kondenser ve adsorbent yatağının minimum sıcaklığı 35°C olarak kabul edilmiştir. Çevrimin kondenser basıncı ise 5.81 kPa'dır. Chiller 3'te ise 25°C ısı kaynağı kullanılarak adsorbent yatağı ve kondenserin soğutulması düşünülmüş, bu durumda kondenser ve adsorbent yatağının minimum sıcaklığı 30°C olarak belirlenmiştir ve çevrimin yüksek basıncı 4.2 kPa'dır.



a) Silika jel tip RD b) Silika jel S0

Şekil 9. Chiller 1 İçin T_c'ye Göre Evaporatör Kapasitesi ve COP Değişimleri

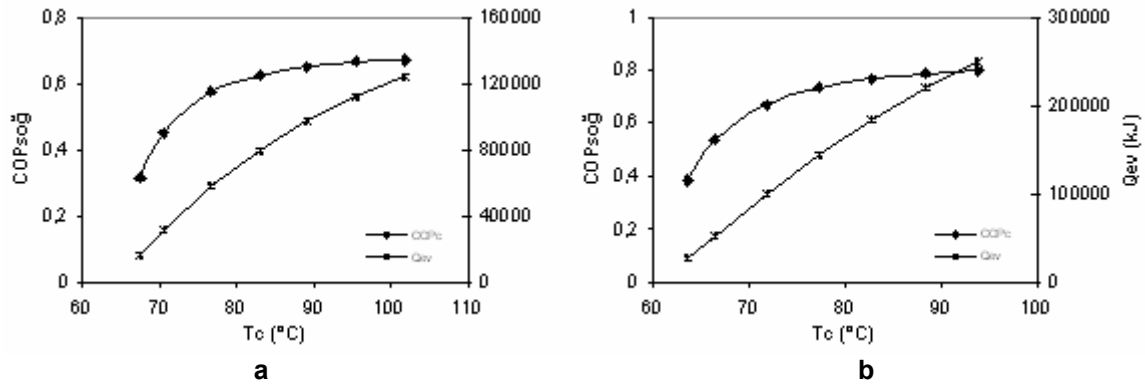
Şekil 9, hava soğutmalı chillerde (Chiller 1), çevrim verimini ve evaporatör soğutma kapasitesini iki farklı tip silika jel – su çifti kullanımı için göstermektedir. Şekilde, T_c sıcaklığının artması ile her iki tip silika jelde de evaporatör soğutma kapasitesinin arttığı gözlemlenmektedir. T_c sıcaklığı arttıkça soğutma COP'si de artmakta, ancak 110°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda artış azalarak COP değeri 0.5 civarında sabit kalmaktadır. Silika jel S0 ile tip RD arasında bir kıyaslama yapmak gerekirse, S0'ın aynı T_c sıcaklığında, daha yüksek evaporatör kapasitesi ve COP değerine sahip olduğu gözlenebilir. Örneğin, T_c sıcaklığı 100°C seçilirse, tip RD silika jel – su çifti ile çalışan chiller 30000 kJ civarında evaporatör kapasitesine ve 0.35 COP değerine sahip iken, S0 silika jel – su çifti ile çalışan chiller 120000 kJ evaporatör kapasitesine ve 0.665 COP değerine sahiptir.



a) Silika jel tip RD b) Silika jel S0

Şekil 10. Chiller 2 İçin T_c 'ye Göre Evaporatör Kapasitesi ve COP Değişimleri

Şekil 10, soğutma kulesi kullanılan chillerde (Chiller 2) çevrim verimini ve evaporatör soğutma kapasitesini tip RD ve S0 silika jeller için göstermektedir. Bir önceki örnekte olduğu gibi, T_c sıcaklığının artması ile her iki tip silika jelde de evaporatör soğutma kapasitesinin arttığı gözlemlenebilir. COP'ler iki tip silika jel için de $T_c = 95^\circ\text{C}$ sıcaklığının üstünde sabit kalma eğilimindedir. Soğutma kulesi kullanılan chillerde de Silika jel S0, tip RD'ye göre daha yüksek evaporatör kapasitesi ve daha yüksek COP değerine sahiptir.



a) Silika jel tip RD b) Silika jel S0

Şekil 11. Chiller 3 İçin T_c 'ye Göre Evaporatör Kapasitesi ve COP Değişimleri

Şekil 11, düşük sıcaklıklı ısı kaynağı kullanılarak soğutulan chillerin (Chiller 3) çevrim verimini ve evaporatör soğutma kapasitesini göstermektedir. Diğer iki chillerde gözlemlendiği gibi, Chiller 3'te de T_c sıcaklığı ile evaporatör kapasiteleri doğru orantılı; COP değeri ise $T_c = 80^\circ\text{C}$ sıcaklığına kadar doğru orantılı artmaktadır. Bu grafiklerden de, S0 silika jel'in tip RD silika jele göre daha yüksek evaporatör kapasitesi ve COP değerlerine sahip olduğu sonucu çıkarılabilir.

Aynı silika jel tipleri için, chillerler kıyaslanacak olursa; Chiller 3'ün (düşük sıcaklıklı ısı kaynağı ile soğutulan, kondenser sıcaklığı 30°C , basıncı ise 4.2 kPa) en yüksek evaporasyon kapasitesi ve COP

değerine sahip olduğu yorumu yapılabilir. Örneğin, silika jel tip RD – su çifti kullanılan chillerlerde, T_c sıcaklığı 100°C olduğunda; Chiller 1’de evaporatör kapasitesi yaklaşık 30000 kJ, Chiller 2’de yaklaşık 73000 kJ, Chiller 3’te ise yaklaşık 122000 kJ değerlerinde olacaktır. Bu çevrimlerin COP’leri karşılaştırılacak olursa, T_c sıcaklığı 95°C seçildiğinde; Chiller 1’de COP = 0.264, Chiller 2’de COP = 0.532, Chiller 3’te ise COP = 0.665 olacaktır.

Görüldüğü gibi, aynı adsorbent – adsorbat çiftinin kullanımında dahi, adsorbent tipi değiştiğinde chillerin çalışma aralıkları, evaporasyon kapasitesi ve verimi değişmektedir. Aynı zamanda chillerlerin soğutma sıcaklıkları da verimi etkilemektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, adsorpsiyonlu chillerlerde kullanılacak çiftlerin özellikleri ve çevrim performansları incelenmiştir. Tasarlanan chillerlerin evaporatör kapasitesi ve COP’leri sadece farklı çiftlerin (silika jel-su, aktif karbon - metanol v.s.) kullanımında değil, aynı zamanda her çiftte kullanılan adsorbentlerin tiplerine göre de oldukça değişim göstermektedir. Farklı tipte adsorbentler farklı izoterm eğrileri verebilmekte ve buna bağlı olarak termodinamik çevrimin verimini değiştirmektedir.

3 farklı adsorpsiyonlu chiller için çevrim analizi yapılmış, çevrimin maksimum sıcaklığına göre chillerin verimi ve soğutma kapasitesinin değişimi İzmir şartları için incelenmiştir. Adsorbent yatağı ve kondenserin soğutma yönteminin, çevrim performansını oldukça etkilediği görülmüştür. Adsorbent yatağının minimum sıcaklığı düştükçe, çevrimin minimum ve maksimum adsorbat konsantrasyonları arasındaki fark artmakta, buna bağlı olarak adsorbatın buharlaşma miktarı artmaktadır.

Her bir chiller çeşidi için iki farklı tip silika jel ile çalışma yapılmış, silika jel S0 ile çalışıldığında, tip RD’ye göre evaporasyon kapasitesi ve sistem performansının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Her iki tip silika jel kullanımında da T_c sıcaklığı ile evaporasyon kapasitesinin doğru orantılı olduğu bulunmuştur. COP değeri ise belirli bir sıcaklığa kadar artmakta, daha sonra değişimi azalmaktadır.

Bu çalışmadan anlaşılacağı üzere, adsorbent-adsorbat çiftleri farklı davranışlar göstermekte ve bu davranışlar sistem performansını etkilemektedir. Adsorpsiyonlu chiller’de kullanılacak uygun çiftin seçilmesi için, çiftin adsorpsiyon davranışı iyi tespit edilmeli, çalışma basınç ve sıcaklık aralıkları değerlendirilmelidir. Ayrıca, chillerde adsorbent yatağı ve kondenserin soğutma koşulları ve buna bağlı minimum sıcaklık değerleri göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] WANG D. C., LI Y. H., XIA Y. Z., ZHANG J. P., “A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009
- [2] SAN J., LIN W., “Comparison among three adsorption pairs for using as the working substances in a multi-bed adsorption heat pump”, Applied Thermal Engineering, 28, pp. 988–997, 2008
- [3] YONG L., WANG R. Z., “Adsorption Refrigeration: A Survey of Novel Technologies”, Recent Patents on Engineering, 1, 1-21, 2007,
- [4] DEMİR H., MOBEDİ M., ÜLKÜ S., “A review on adsorption heat pump: problems and solutions”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2381-2403, 2008
- [5] ÜLKÜ S., NİKNAM S., DEĞİRMEN E., “Güneş enerjisinden faydalanarak doğal zeolitlerin kullanımı ile ısıtma ve soğutma”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 8, 13-20, 1986
- [6] LIU Y., LEONG K. C., “Numerical study of a novel cascading adsorption cycle”, International Journal of Refrigeration, 29, pp. 250–259, 2006
- [7] DEMİR H., MOBEDİ M., ÜLKÜ S., “Adsorpsiyonlu ısı pompaları”, VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 535-545, 2008

- [8] GOTTARDI G., GALLI E., “Natural Zeolites”, Springer-Verlag, 1985.
- [9] CRITOPH R. E., ZHONG Y., “Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology”, Proc. ImechE, 219, pp. 285–300, 2006
- [10] SUMATHY K., YEUNG K.H., YONG L., “Technology development in the solar adsorption refrigeration systems”, Progress in Energy and Combustion Science, 29-4, pp. 301–327, 2003
- [11] WANG L. W., WANG R.Z., OLIVEIRA R. G., “A review on adsorption working pairs for refrigeration”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 518–534, 2009
- [12] AFONSO M. R. A., SILVEIRA J. V., “Characterization of equilibrium conditions of adsorbed silica gel-water bed according to Dubinin-Astakhov and Freundlich”, Thermal Engineering, 4, pp. 3-7, 2005
- [13] DAWOUD B., ARISTOV Y., “Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, pp. 273–281, 2003
- [14] SAHA B. B., CHAKRABORTY A., KOYAMA S., ARISTOV Y. I., “A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel – water system”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 516–524, 2009
- [15] XIA Z. Z., CHEN C. J., KIPLAGAT J. K., WANG R. Z., HU J. Q., “Adsorption Equilibrium of Water on Silica Gel”, J. Chem. Eng. Data, 53–10, 2462–2465, 2008
- [16] NG K. C., CHUA H. T., CHUNG C. Y., LOKE C. H., KASHASIWAGI T., AKISAWA A., SAHA B. B., “Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics”, Applied Thermal Engineering, 21, pp. 1631–1642, 2001
- [17] CHUA H. T., NG K. C., CHAKRABORTY A., OO N. M., OTHMAN M. A., “Adsorption characteristics of silica gel - water systems”, J. Chem. Eng. Data, 47, pp. 1177–1181, 2002
- [18] AMAR N. B., SUN L. M., MEUNIE F., “Numerical analysis of adsorptive temperature wave regenerative heat pump”, Applied Thermal Engineering, 16, pp. 405–418, 1996
- [19] TAMAINOT-TELTO Z., METCALF S. J., CRITOPH R. E., ZHONG Y., THORPE R., “Carbon–ammonia pairs for adsorption refrigeration applications: ice making, air conditioning and heat pumping”, International Journal of Refrigeration, 32, 1212-1229, 2009

ÖZGEÇMİŞ

Zeynep Elvan YILDIRIM

1986 yılı İzmir doğumludur. 2008 yılında Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği Lisans programından mezun olmuştur. 2008 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Mühendisliği programında yüksek lisansa başlamıştır. 2009 yılından bu yana aynı programda Araştırma Görevliliğini sürdürmektedir.

Gamze GEDİZ İLİŞ

1978 İzmir doğumludur. 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Lisans programından mezun olmuştur. 2004 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Yüksek Lisans programını, ardından 2006 yılında aynı üniversitenin Mühendislik İşletmeciliği Yüksek Lisans programını bitirmiştir. 2004–2007 yılları arasında Koç Holding’e bağlı DemirDöküm Şirketinde Pazarlama Ürün Sorumlusu olarak görev yapmıştır. Şu anda, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümü’nde Doktora programına devam etmekte ve aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev almaktadır.

Moghtada MOBEDİ

Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nde 1985 ve 1987 yıllarında lisans ve yüksek lisan eğitimlerini bitirmiş, 1994 yılında ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü’nde Doktora eğitimini tamamlamıştır. 1995–1998 yılları arasında Orumieh Üniversitesi’nde öğretim üyesi olarak ve 1998–2005 yılları arasında da ısıtma, klima ve havalandırma sektöründe çalışmıştır. Halen İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde, Makina Mühendisliği Bölümü’nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

Semra ÜLKÜ

ODTÜ, Kimya Mühendisliği'nden 1969 yılında mezun olmuş, ısı transfer alanındaki çalışmaları ile aynı üniversitede Yüksek Mühendis (1971) ve Doktora (1975) ünvanlarını almıştır. AZOT işletmelerinde çalışmasına takiben Dokuz Eylül ve EGE Üniversiteleri, Makina ve Kimya Mühendisleri Bölümleri'nde Doçent ve Profesör olarak çalışmıştır. Enerji Depolama, Isı Pompaları, Isı Transferi alanında çeşitli çalışmaları mevcuttur. 1998–2006 yılları arasında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde rektör olarak görev yapmış, halen İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde, Kimya Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.