



Effect of noncondensable gases on the adsorption properties of adsorbent porous media

Orhan Ata Bayman¹ , Ahmet Çağlar^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Middle East Technical University, 06800, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Akdeniz University, 07070, Antalya, Türkiye

Highlights:

- The effect of leaked residual air on system performance
- Degradation in the adsorption properties of silica gel and zeolite 13X
- Comparison of desorption/adsorption capacities

Keywords:

- Adsorption refrigeration
- Noncondensable gas
- Residual air
- Adsorbent
- Adsorption/Desorption performance

Article Info:

Research Article

Received: 10.03.2025

Accepted: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1654873

Correspondence:

Author: Ahmet Çağlar

e-mail:

acaglar@akdeniz.edu.tr

phone: +90 505 656 72 01

Graphical/Tabular Abstract

Noncondensable gases like air can infiltrate adsorption systems operating at negative gauge pressures, significantly impacting performance. This study examines the effects of residual air on the adsorption and desorption behaviors of silica gel-water and zeolite 13X-water pairs. Experiments with controlled air injection revealed that the adsorption dynamics were significantly degraded by residual air. Adsorption capacity decay follows an exponential trend for silica gel and a logarithmic trend for zeolite 13X. Higher evaporator/condenser temperatures reduce performance losses. Even trace air leakage (0.3–0.9% of atmospheric pressure) can significantly reduce efficiency, highlighting the need for airtight system design. Figure A shows the decay of the adsorption capacities of silica gel and zeolite 13X with residual air pressures (at 10 °C and 20 °C evaporator temperatures for silica gel, and at 10 °C evaporator temperature for zeolite 13X). Residual air pressure implies amount of residual air, the higher the pressure, the more residual air.

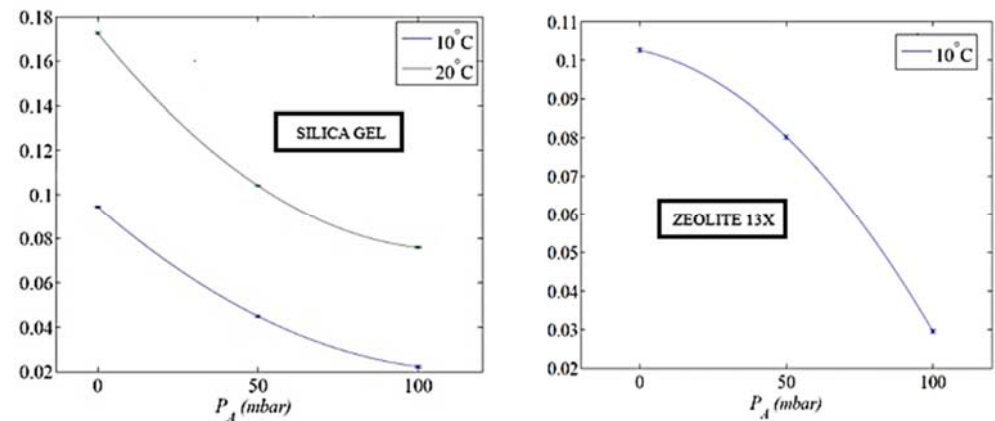


Figure A. Decay in adsorption capacity (kg/kg) of the adsorbents with residual air

Purpose: This study experimentally investigated the detrimental effects of residual air on the adsorption and desorption dynamics of silica gel-water and zeolite 13X-water pairs in adsorption refrigeration systems.

Theory and Methods: The decays in adsorption/desorption capacity for both adsorbents were examined through controlled experiments conducted at varying residual air pressures and evaporator/condenser temperatures in an adsorption cooling cycle. Silica gel was tested for 90/30 °C desorption/adsorption temperatures at 0, 50, and 100 mbar residual air pressures and at 10 °C and 20 °C evaporator/condenser temperatures, while zeolite 13X was tested for 160/40 °C desorption/adsorption temperatures at 0, 50, and 100 mbar residual air pressures and at 10 °C evaporator/condenser temperature.

Results: It was observed that the residual air infiltrating the adsorption system significantly degraded the adsorption properties of the adsorbents. While the adsorption capacity of silica gel exhibited an exponential decrease, that of zeolite 13X showed a logarithmic decrease.

Conclusion: As the residual air pressure increased, significant decreases were observed in the adsorption and desorption capacities of both adsorbents. Even residual air pressures as low as 0.3–0.9% of atmospheric pressure significantly reduce system efficiency, emphasizing the critical need for leak-tight designs in adsorption refrigeration systems.



Yoğuşmayan gazların gözenekli adsorban ortamların adsorpsiyon özelliklerine etkisi

Orhan Ata Bayman^{1*}, Ahmet Çağlar^{2*}

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

²Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 07070, Antalya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Sızan artık havanın sistem performansına etkisi
- Silika jel ve zeolit 13X'in adsorpsiyon özelliklerinde zayıflama
- Desorpsiyon/adsorpsiyon kapasitelerinin karşılaştırması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 10.03.2025

Kabul: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1654873

Anahtar Kelimeler:

Adsorpsiyonlu soğutma,
yoğuşmayan gaz,
artık hava,
adsorban,
adsorpsiyon/desorpsiyon
performansı

ÖZ

Hava gibi yoğuşmayan gazlar negatif manometre basınçlarında çalışan adsorpsiyon sistemlerine sızarak performanslarını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu çalışma, havanın silika jel-su ve Zeolit 13X-su çiftlerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon davranışları üzerindeki etkisini incelemektedir. Kontrollü miktarlarda hava, bir adsorban yatağı ve bir evaporatör/kondenserden oluşan deney düzeneğine enjekte edilerek farklı sıcaklıklarda deneyler gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri, evaporatör/kondenser koşulları sabit tutulurken adsorban sıcaklığının değiştirilmesiyle başlatılmıştır. Havanın etkileri, adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitelerindeki değişimler, basınç dalgalanmaları, gaz ve adsorban sıcaklıkları ile adsorpsiyon/desorpsiyon histeresisi temelinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, artan hava miktarıyla birlikte adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitelerinde önemli düşüşler meydana geldiğini, desorpsiyon proseslerinin adsorpsiyondan daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Adsorpsiyon kapasitesindeki azalma, silika jel için üstel, Zeolit 13X için parabolik bir eğilim sergilemiştir. Daha yüksek evaporatör/kondenser sıcaklıkları performans kayıplarını azaltırken, desorpsiyon-adsorpsiyon sıcaklık farkı daha küçük olan silika jel adsorbanlı sistem daha olumsuz etkilenebilir. Bulgular, adsorpsiyon sistemlerinde hava kaçığının önlenmesinin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Atmosfer basıncının yalnızca %0,3–0,9'u kadar iz miktarlardaki hava bile sistem verimliliğini önemli ölçüde düşürebilmektedir.

Effect of noncondensable gases on the adsorption properties of adsorbent porous media

H I G H L I G H T S

- The effect of leaked residual air on system performance
- Degradation in the adsorption properties of silica gel and zeolite 13X
- Comparison of desorption/adsorption capacities

Article Info

Research Article

Received: 10.03.2025

Accepted: 15.07.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1654873

Keywords:

Adsorption refrigeration,
noncondensable gas,
residual air,
adsorbent,
adsorption/desorption
performance

ABSTRACT

Noncondensable gases, such as air, can infiltrate adsorption systems operating at negative gauge pressures, significantly affecting their performance. This study investigates the impact of air on the adsorption and desorption behaviors of silica gel-water and Zeolite 13X-water pairs. Controlled amounts of air were introduced into an experimental setup comprising an adsorbent bed and an evaporator/condenser, with experiments conducted at varying temperatures. Adsorption and desorption processes were initiated by modulating the adsorbent temperature while maintaining constant evaporator/condenser conditions. The effects of air were assessed based on changes in adsorption and desorption capacities, pressure variations, gas and adsorbent temperatures, and adsorption/desorption hysteresis. Results reveal significant reductions in adsorption and desorption capacities with increasing air content, with desorption processes being more affected. Adsorption capacity decay exhibited an exponential trend for silica gel and a parabolic trend for Zeolite 13X. Higher evaporator/condenser temperatures mitigated performance losses, while systems with smaller desorption-adsorption temperature differences were more adversely affected. The findings emphasize the critical importance of preventing air leakage in adsorption systems. Even trace amounts of air, constituting only about 0.3–0.9% of atmospheric pressure, can significantly reduce system efficiency.

1. Giriş (Introduction)

Küresel enerji talebi, sanayinin büyümesi ve nüfusun artışı nedeniyle giderek artmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, bu talebin 2035 yılına kadar %35 oranında artması beklenmektedir [1]. Bu enerji talebinin bir kısmı, soğutma ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Günümüzde, bu talebin büyük bir bölümü, mekanik olarak çalışan ve genellikle elektrikle tahrik edilen bir kompresöre dayanan buhar sıkıştırma çevrimleri kullanılarak karşılanmaktadır. Buhar sıkıştırma sistemleri, düşük ilk yatırım maliyeti, yüksek performans katsayısı ve güçlü güvenlik geçmişi nedeniyle soğutma pazarına hakimdir. Örneğin, 2005 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde teslim edilen tüm buzdolaplarının %99,9'u buhar sıkıştırma sistemlere dayanmaktaydı. Ancak, elektrikle çalışan buhar sıkıştırma, enerji üretimi üzerinde önemli bir yük oluşturmaktadır. Nitekim, yalnızca mekânsal soğutma amaçlı kullanım, Amerika Birleşik Devletleri'nde toplam elektrik tüketiminin %24,8'ini oluştururken [2], küresel ölçekte soğutma ve iklimlendirme sistemleri toplam elektrik tüketiminin %15'ini tüketmektedir [3].

Alternatif bir yaklaşım olarak, özellikle atık ısının veya güneş enerjisinin bol olduğu bölgelerde adsorpsiyonlu soğutma sistemleri öne çıkmıştır. Adsorpsiyonlu soğutma, bir adsorban malzeme (örneğin, zeolit veya aktif karbon) ile bir adsorbat (adsorplanan soğutucu akışkan; örneğin, su veya amonyak) arasındaki etkileşime dayalı olarak çalışmaktadır. Bu süreç, düşük basınçlı bir ortam oluşturarak adsorbatın buharlaşmasını kolaylaştırır. Buharlaşma sırasında, soğutucu sıvı çevresinden gizli ısıyı çeker ve böylece soğutma etkisi oluşturur. Adsorpsiyonlu soğutma sistemleri, buhar sıkıştırma sistemlerinde kullanılan mekanik enerji yerine termal enerjiyi (güneş enerjisi veya atık ısı) birincil güç kaynağı olarak kullanmaktadır. Ayrıca, ozon tabakasının incelmeye, küresel ısınmaya ve toksisiteye neden olan CFC (kloroflorokarbon) ve HCFC (hidrofloroklorokarbon) gibi zararlı soğutucular yerine su gibi çevreye ve insan sağlığına zarar vermeyen doğal soğutucular kullanmaktadır. Bu özellikleri, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerini enerji verimli ve çevre dostu soğutma uygulamaları için son derece uygun hale getirmektedir. Adsorpsiyon ve termo-mekanik ejektör çevrimleri gibi diğer termal sistemlerden farklı olarak, adsorpsiyon çevrimleri korozyona uğramadan daha düşük rejenerasyon sıcaklıklarında çalışabilir. Bu durum, onları jeotermal ve güneş enerjisi kaynaklarıyla uyumlu hale getirmektedir. Ayrıca, hareketli parçalara sahip olmadıkları için sessiz çalışır, titreşim üretmezler ve daha az bakım gerektirirler. Ancak, düşük COP (performans katsayısı) değerleri, zayıf ısı ve kütle transferi performansı, büyük sistem boyutları ve yüksek ilk yatırım maliyetleri, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinin yaygın olarak benimsenmesinin önündeki en büyük engellerdir [4, 5]. Adsorpsiyon sistemlerinin COP değerlerinin 0,1 ile 1,7 arasında değiştiği rapor edilmiştir [6]. Zeolit-su çalışma çiftleri için COP değerleri 0,10-0,12, silika jel-su çalışma çiftleri için ise 0,2-0,3 olarak elde edilmiştir [7]. Soğutma için kullanılan birincil enerji kaynaklarının maliyetlerinde dramatik bir artış olmadığı sürece, adsorpsiyon sistemlerinin, diğer alternatif soğutma sistemlerinde olduğu gibi, buhar sıkıştırma sistemlerinin yerini alması pek olası görünmemektedir. Ancak, yeni nanoteknolojik adsorbanların geliştirilmesi [8, 9], ileri düzey çevrimlerin tasarlanması [5] hibrit sistemlerin kullanımı [10] ile birlikte, ısı ve kütle transferini iyileştirmeye yönelik Ar-Ge çalışmaları, bu sistemleri özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının ve atık ısının bol olduğu bölgelerde rekabetçi ve tercih edilebilir hale getirebilir.

Termal olarak tahrik edilen çoğu adsorpsiyonlu soğutma sistemi, su bazlı olanlar da dâhil olmak üzere, atmosfer altı basınçlarda çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde, çeşitli mekanizmalar yoluyla yoğunlaşmayan veya adsorplanamayan gazlar ortaya çıkabilmektedir.

Kısmi vakum uygulamaları, sistem kaçakları veya adsorban yataktan gerçekleşen desorpsiyon süreci, hava gibi yoğunlaşmayan gazların varlığına neden olabilmektedir. Adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde en yaygın karşılaşılan yoğunlaşmayan gaz hava olmakla birlikte, korozyon sonucu hidrojen gazı da oluşabilmektedir [11]. Adsorpsiyon süreci, doğası gereği, kütle ve ısı transferine karşı yüzey ve parçacık içi dirençler içermektedir. Çalışma akışkanı dışındaki gazların varlığı, özellikle bu gazlar adsorplanamıyorsa, ek direnç oluşturmaktadır. Bunun sonucunda, bu gazlar adsorpsiyon hızını ve soğutma gücünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, özellikle atmosfer altı basınçlarda çalışan ve su bazlı sistemler gibi adsorbanları içeren sistemlerde belirginleşmektedir. Bu performans kaybı, adsorban yüzeyinde yoğunlaşmayan gazlardan oluşan durgun bir tabaka oluşturan Stefan akışı (Stefan flow) [12, 13] ile ilişkilendirilmektedir. Bu durumda, adsorpsiyon süreci, adsorbanın bu tabaka içinden yayılma (difüzyon) yoluyla gerçekleşmesi ile sınırlandırılmaktadır. Bu süreç, adsorban üzerindeki kütle ve ısı transfer direncini artırarak, yalnızca yüzey ve parçacık içi etkilerden kaynaklanan dirençten daha büyük bir direnç oluşturmaktadır [11]. Ayrıca, adsorban gözenekleri içinde biriken adsorplanamayan gazlar da ek dirençlere yol açmaktadır. Tüm bu faktörler birlikte, adsorpsiyon hızında önemli bir düşüşe neden olmaktadır.

Yoğunlaşmayan gazların yoğunlaşma ve adsorpsiyon üzerindeki etkileri birçok çalışmada incelenmiştir. Yoğunlaşmayan gazların varlığının yoğunlaşma hızını düşürdüğü, çeşitli araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde belirlenmiş ve iyi bilinen bir olgu olarak kabul edilmiştir [14-16]. Benzer şekilde, adsorplanamayan gazların adsorpsiyon süreçleri üzerindeki etkileri de geniş çapta araştırılmıştır. Bir adsorpsiyonlu ısı pompasında, su buharı içinde %50 oranında hava bulunmasının ısı transfer verimini %50 oranında azalttığı belirlenmiştir [17]. Bunun yanı sıra, yalnızca %5 oranında adsorplanamayan gaz içeriğinin bile adsorpsiyon kapasitesini %300 oranında azaltabileceği tespit edilmiştir [18]. Ayrıca, hesaplamalı modeller, sistemde yalnızca %2 hava bulunmasının bile bir adsorpsiyonlu soğutucunun performans katsayısını (COP) başlangıç değerinin altıda birine düşürebileceğini öngörmektedir. Gaz karışımlarının *adsorpsiyon* üzerindeki etkileri, gaz ayrıştırma uygulamalarında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ancak, adsorpsiyona dayalı soğutma ve ısı pompası uygulamalarındaki etkileri görece daha az araştırılmış olup, literatürün büyük bir kısmı, adsorplanamayan gazların olumsuz etkilerine ilişkin tamamlayıcı raporlara odaklanmıştır. Klor üretimi sırasında hidrojen oluştuğu tespit edilmiş ve bu gazın yoğunlaştırıcı yüzeyinde birikerek klor konsantrasyonunu azalttığı bildirilmiştir ve bu durum Stefan akışı ile açıklanmıştır [19]. [20]'a göre, atmosfer altı basınçlarda çalışan sistemlerde soğutucu devresine sızan hava gibi yoğunlaşmayan gazlar, yalnızca %1-2 gibi düşük konsantrasyonlarda bile evaporatör ve kondenserdeki ısı transfer hızlarını %50'ye kadar azaltabilmektedir. Havanın, SWS-1L (kalsiyum klorür ile modifiye edilmiş KSK silika) adsorbanının su adsorpsiyon kinetiği üzerine etkisi incelenmiştir [10]. Çalışma, 60 °C desorpsiyon ve 35 °C adsorpsiyon sıcaklıklarında, 10,3 mbar su buharı basıncı ve 0 ile 4,7 mbar arasında değişen hava basınçları altında gerçekleştirilmiştir. Düşük (0,06 mbar gibi) hava basınçlarında bile adsorpsiyon hızında azalma gözlemlenmiştir. Hava basıncı 0,4 mbar'ın üzerine çıktığında, kinetik eğrilerin üstel bir forma yaklaştığı tespit edilmiştir. Öte yandan, artık hava, desorpsiyon hızını daha zayıf bir şekilde etkilemiştir. Bu çalışmadan [11] elde edilen deneysel veriler kullanılarak, adsorban katmanında biriken hava ve hidrojen gibi adsorplanamayan gazların varlığında su buharının adsorpsiyon kinetiklerini belirlemek amacıyla, kütle ve ısı transferini birlikte ele alan bir matematiksel model geliştirilmiştir [21]. Küçük miktarlardaki artık gazların bile efektif ısı transfer katsayısını önemli ölçüde azalttığı ve ısı transferi ile adsorpsiyon hızlarını zayıflattığı gözlemlenmiştir. Benzer araştırmalar, SWS-1L adsorbanı ile birlikte

Fuji RD tipi silika ve FAM-Z02 adsorbanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [22]. Adsorpsiyon çevriminin sabit basınç aşamasında su adsorpsiyon hızının ve evaporatörde üretilen soğutma gücünün, artık hava varlığına son derece duyarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artık hava basıncı ile karakteristik adsorpsiyon süresi arasındaki doğrusal bir ilişki incelenmiş olup, 0,4 mbar üzerindeki kısmi basınçlar için bu eğrinin eğiminin adsorbanın doğasına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Bu çalışma, bir adsorpsiyonlu soğutma sistemine kontrollü miktarda hava enjekte edilmesi durumunda, sistem performansı ve adsorpsiyon dinamikleri üzerindeki olası olumsuz etkileri deneysel olarak araştırmayı amaçlamaktadır. Literatür incelemesi, "adsorpsiyon bozulması" olarak da bilinen soğutma sisteminde bulunan adsorplanamayan gazların adsorpsiyon sisteminin performansını düşürdüğü bu olgunun çok sınırlı sayıda çalışmada ele alındığını göstermektedir. Bu olgunun etkilerini daha iyi anlamak için daha fazla deneysel araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, iki farklı adsorban kullanılarak farklı artık hava basınçlarında (hava basıncı ayarlanarak kontrol edilen farklı hava miktarlarında) ve farklı evaporatör sıcaklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Artık hava miktarına bağlı olarak adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitesindeki değişimler analiz edilmiş, ayrıca soğutucu akışkan basıncı ve sıcaklığı ile adsorban sıcaklığındaki geçici (zamana bağlı) değişimler gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemdeki hava miktarının hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

2. Deney Düzenekinin Tanıtımı (Experimental Apparatus Description)

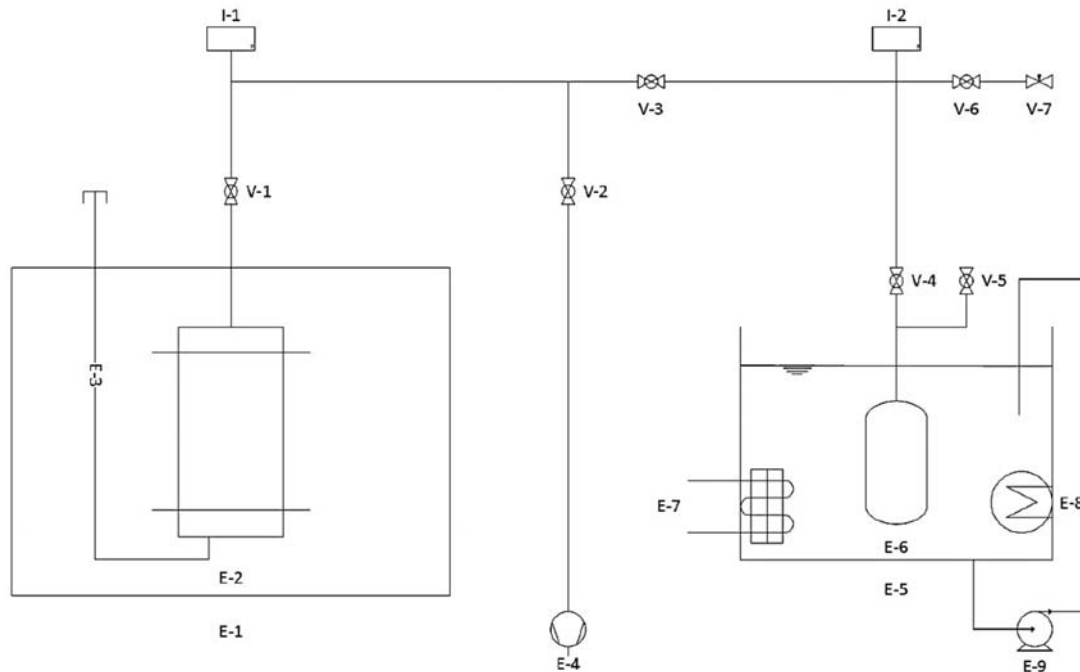
Havanın sistem performansı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla bir adsorpsiyonlu soğutma deney düzenekği tasarlanmıştır. Düzenekğin temel bileşenleri, adsorban malzemenin yerleştirildiği bir adsorban

yatak ile su içeren bir evaporatör/kondenser ünitesinden oluşmaktadır. Her iki bileşen de sabit sıcaklıkta tutulabilmektedir. Düzenekğin şematik gösterimi ve fotoğrafı sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de sunulmuştur.

2.1. Adsorban Yatak (Adsorbent bed)

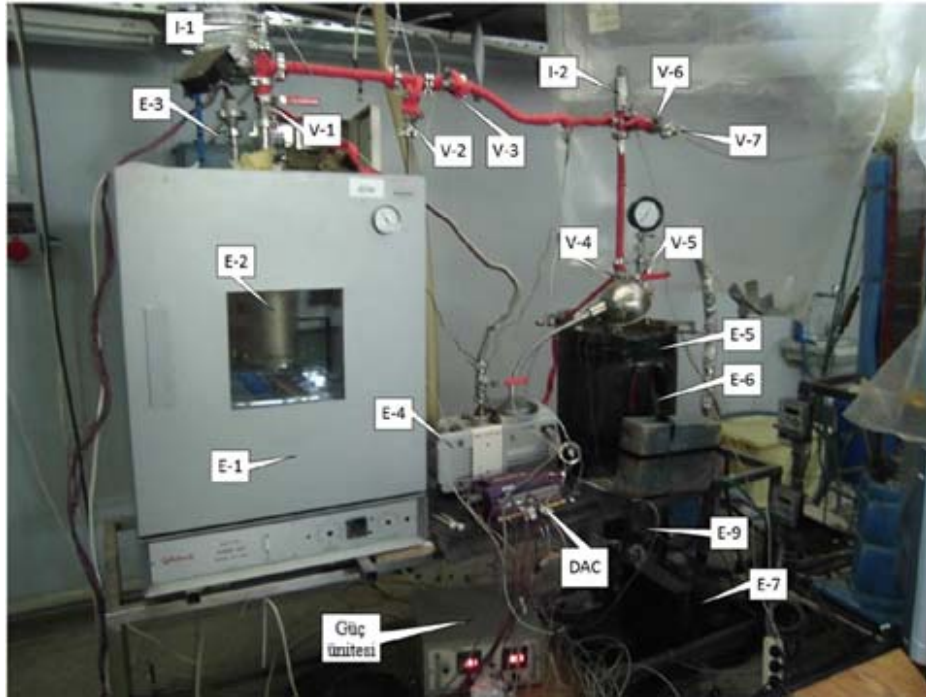
Adsorban yatak, 250 mm uzunluğunda ve 140 mm çapında silindirik paslanmaz çelik bir hazneden oluşmakta olup, üst ve alt kapakları sızdırmaz şekilde kapatılmıştır. Bu haznenin toplam iç hacmi yaklaşık 2,25 litredir ve bunun yaklaşık %60'ı adsorban ile doldurulmuş olup, geri kalan kısım buhar boşluğu olarak işlev görmektedir. Isı transfer verimliliğini artırmak amacıyla hazne içerisine sekiz adet eş boyutlu dikdörtgen kanatçık ilave edilmiştir. Her bir kanatçık 150 mm uzunluğunda, 65 mm genişliğinde ve 5 mm kalınlığında olup, hazne içinde eşit aralıklarla dağıtılmıştır.

Adsorban yataktaki sıcaklık dağılımı, tek bir kanatçığa yerleştirilmiş on iki adet T-tipi termokupl kullanılarak izlenmektedir. Bu sensörler, yatağın merkezinden 24 mm, 46 mm ve 68 mm radyal mesafelerde ve alt kısımdan itibaren 17 mm, 57 mm, 97 mm ve 135 mm boyuna konumlarda olacak şekilde dört sıra ve üç sütun halinde düzenlenmiştir. Hem termal teması artırmak ve böylece temas direncini azaltmak hem de adsorbanı buhar boşluğundan ayırmak amacıyla Şekil 3'te gösterildiği gibi yay yüklemeli bir sıkıştırma disk kullanılmaktadır. Buhar penetrasyonunu sağlamak için, her biri 167 mm uzunluğunda ve 10 mm çapında olan sekiz adet kütle transfer tüpü kanatçıklar arasına yerleştirilmiştir. Bu tüpler, adsorbanın içeri girmesini önlemek için ince gözenekli bir ağ ile kaplanmış olup, verimli buhar difüzyonu sağlamak amacıyla 3 mm çapında çok sayıda delik içermektedir. Tüm adsorban yatak, çalışma sıcaklığını düzenleyen dijital kontrollü bir fırın içerisinde muhafaza edilmektedir. Adsorban yatağın görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



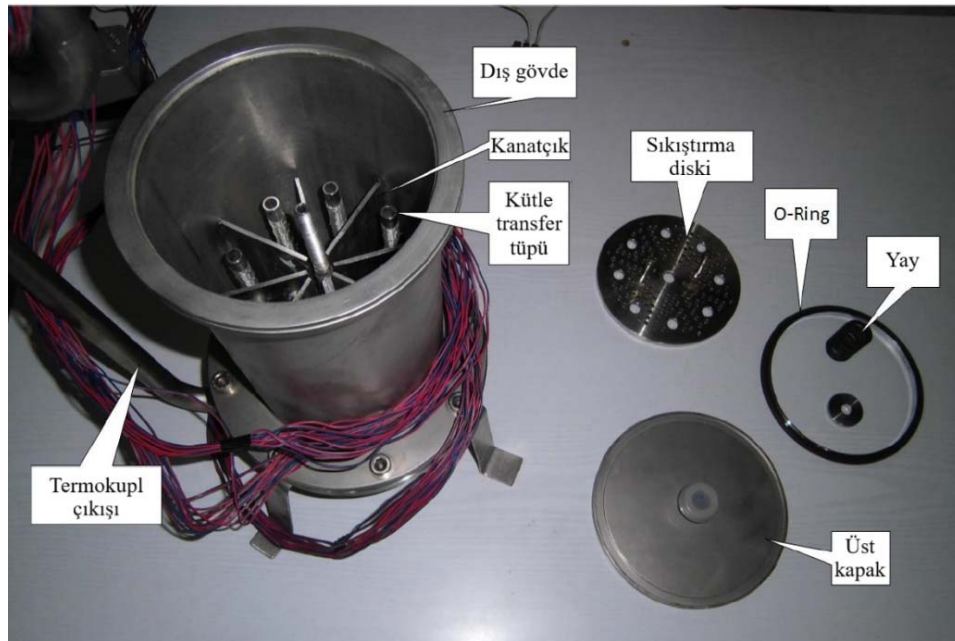
Şekil 1. Deney düzenekinin şematik görünümü (E-1 Fırın; E-2 Adsorban yatak; E-3 Termokupl çıkışı; E-4 Vakum pompası; E-5 Su banyosu; E-6 Evaporatör/Kondenser; E-7 Buhar sıkıştırma soğutma ünitesi; E-8 Elektrikli ısıtıcı; E-9 Su pompası; I-1,2 Basınç transdüserleri; V-1 ... 6 Vakum küresel vanaları; V-7 Hassas vana)

(A schematic view of the experimental set-up (E-1 Oven; E-2 Adsorbent bed; E-3 Thermocouple output; E-4 Vacuum pump; E-5 Water bath; E-6 Evaporator/Condenser; E-7 Vapor compression refrigeration unit; E-8 Electrical heater; E-9 Water pump; I-1,2 Pressure transducers; V-1 ... 6 Vacuum ball valves; V-7 Fine valve))



Şekil 2. Deney düzeneğinin fotoğrafı (E-1 Fırın; E-2 Adsorban yatak; E-3 Termokupl çıkışı; E-4 Vakum pompası; E-5 Su banyosu; E-6 Evaporatör/Kondenser; E-7 Buhar sıkıştırma soğutma ünitesi; E-9 Su pompası; I-1,2 Basınç transdüserleri; V-1 ... 6 Vakum küresel vanaları; V-7 Hassas vana; DAC Veri toplama ve kontrol)

(A photograph of the experimental set-up (E-1 Oven; E-2 Adsorbent bed; E-3 Thermocouple output; E-4 Vacuum pump; E-5 Water bath; E-6 Evaporator/Condenser; E-7 Vapor compression refrigeration unit; E-9 Water pump; I-1,2 Pressure transducers; V-1 ... 6 Vacuum ball valves; V-7 Fine valve; DAC Data acquisition and control))



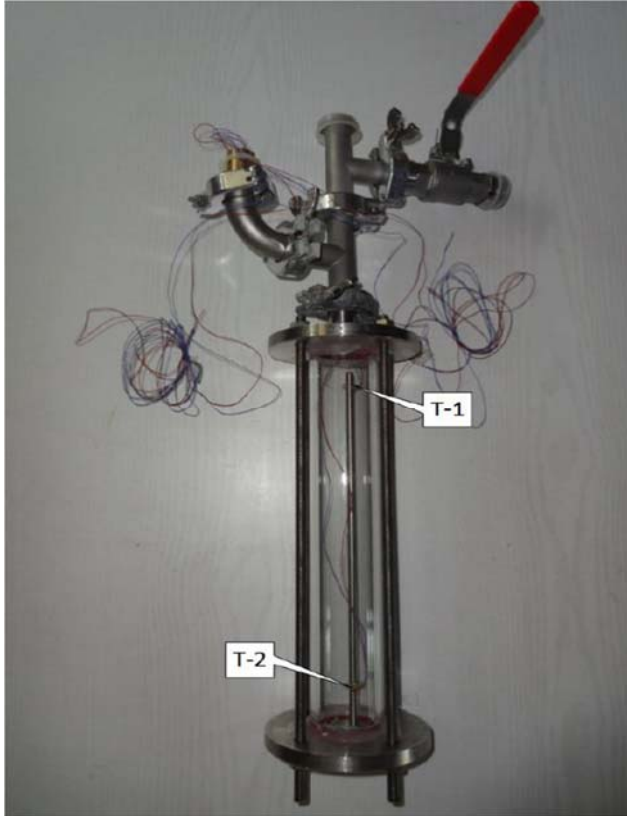
Şekil 3. Paslanmaz çelik adsorban yatak ve bileşenlerinin bir fotoğrafı (A photograph of stainless steel adsorbent bed and its components)

2.2. Evaporatör/Kondenser (Evaporator/Condenser)

Evaporatör/kondenser, her iki ucu paslanmaz çelik kapaklarla kapatılmış, 300 mm uzunluğunda ve 50 mm çapında bir cam tüpten oluşmaktadır. Gaz sızıntısını önlemek amacıyla bu kapaklar, dış

yüzeyden epoksi yapıştırıcı ile sızdırmaz hale getirilmiş olup, ayrıca dört eşit aralıklı delikten geçirilen cıvata ve somunlarla mekanik olarak sabitlenmiştir. İç tüp çapı 40 mm'dir. Buhar ve sıvı sıcaklıklarını izlemek için Şekil 4'te gösterildiği gibi yatay konumda iki adet T-tipi termokupl kullanılmaktadır. Bu termokupllar, merkeze

yerleştirilen paslanmaz çelikten bir çubuk ile sabit tutulmaktadır. Buhar sıcaklık sensörü üst kapağın yaklaşık 30 mm altında, sıvı sıcaklık sensörü ise alt kapağın 30 mm üzerinde konumlandırılmıştır. Üst kapak, evaporatör/kondenser sistemin geri kalanına bağlayan, 16 mm iç çapa sahip kaynaklı bir boru bağlantısı içermektedir. Bu ünite, sıcaklık kontrollü bir su banyosuna tamamen daldırılmış durumdadır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitelerinin belirlenmesi için su seviyesi değişimleri, şeffaf dikey ölçekli bir cetvel aracılığıyla ölçülmektedir. Evaporatör/kondenserin görünümü Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Evaporatör/Kondenserin bir fotoğrafı (T-1 Üst termokupl (buhar); T-2 Alt termokupl (sıvı))
(A photograph of evaporator/condenser (T-1 Top Thermocouple (Vapor); T-2 Bottom Thermocouple (Liquid)))

2.3. Fırın ve Su Banyosu (Oven and Water Bath)

Fırın, ısı transferini artırmak amacıyla hava sirkülasyon fanı ile donatılmış, elektrikle ısıtılan ve dijital olarak kontrol edilen bir ünitelerdir. Evaporatör/kondenser sıcaklığını düzenlemekten sorumlu olan su banyosu, geleneksel bir buhar sıkıştırma soğutma sistemine ait bir evaporatör serpantini, üç adet 1,5 kW elektrikli ısıtıcı ve banyo içinde sıcaklığın homojen dağılımını temin etmek için dolaşım sağlayan ve türbülans oluşturan bir su pompası içermektedir.

2.4. Boru Sistemi (Piping system)

Adsorban yatağını evaporatör/kondenser ile bağlayan boru ağı; borular, vanalar, contalar ve geçiş bağlantılarından oluşmakta olup, boruların iç çapı 16 mm'dir. Film tipi yoğunlaşmayı önlemek amacıyla boruların etrafına esnek elektrikli ısıtıcılar sarılmıştır. Sistemden hava ve artık buharı tahliye etmek için bir Edwards RV-3 döner kanatlı vakum pompası kullanılmaktadır. Boru hattının toplam uzunluğu yaklaşık 2,13 metre olup, Şekil 2'deki V-7 hassas vanası kullanılarak hava basıncı ayarlanabilmektedir. Bu kontrollü hava girişi, dış ortamdan belirli miktarda havanın sisteme dahil edilmesini sağlayarak, havanın adsorpsiyon dinamikleri üzerindeki etkisinin incelenmesine olanak tanımaktadır.

2.5. Veri Toplama ve Kontrol (Data Acquisition and control)

Veri kaydı ve proses kontrolü için Datataker DT800 sistemi kullanılmakta olup, bu sistem DeLogger yazılımıyla bir COMM kablosu aracılığıyla bilgisayara bağlanmaktadır. Adsorban yatak, evaporatör/kondenser, su banyosu ve boru hattı sistemi gibi önemli noktalardaki sıcaklık ölçümleri T-tipi termokupllarla yapılmaktadır. Basınç değerleri, gazdan bağımsız piezo sensörlü bir Kurt J. Lesker serisi 910 Piezo/Pirani transdüseri ile kaydedilmektedir. Yatak tarafındaki basınç ise Edwards ASG1000 (Aktif Gerilme Ölçer) ile ölçülmektedir. Veri her 5 saniyede bir toplanmaktadır.

3. Adsorban Malzemeler (Adsorbent Materials)

Bu çalışmada, farklı adsorpsiyon kapasitelerine, çalışma sıcaklıklarına ve porozitelere sahip Silika Jel ve Zeolit 13X adsorbanları incelenmiştir. Deiyonize su, adsorbat olarak kullanılarak Silika Jel-Su ve Zeolit 13X-Su çalışma çiftlerini oluşturmuştur. Bu çiftler, adsorpsiyonlu soğutma ve güneş soğutma uygulamalarında yaygın olarak tanınan ve kullanılan malzemelerdir. Mevcut literatürde, havanın bu adsorpsiyon çiftleri üzerindeki etkisini inceleyen özel bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan silika jel, ince gözenekli, yarı saydam, cam benzeri granüler yapıya sahip yüksek saflıkta beyaz bir çeşit olup, düşük bağıl nem altında mükemmel adsorpsiyon özellikleri sergilemektedir. Bu özellikleri onu kurutma, nem kontrolü ve katalitik destek gibi uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Çok iyi adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle, beyaz silika jel hem dinamik adsorpsiyon (sürekli akan gaz veya sıvı sistemlerinden nemin uzaklaştırılması) hem de statik adsorpsiyon (hava akışı olmayan kapalı alanlarda nemin giderilmesi) için kullanılmaktadır. Ayrıca, verimlilik kaybı olmadan rejenere edilebilmektedir.

Moleküler Elek 13X olarak da adlandırılan Zeolit 13X, doğal zeolitin sentetik olarak elde edilen bir analogudur ve üstün adsorpsiyon performansı sunmaktadır. Bu araştırmada kullanılan malzeme ZEOCHEM® Z10-01, yaklaşık 0,9 nm'lik efektif gözenek boyutuna sahip sodyum alüminosilikattan oluşan genel amaçlı 13X tipi moleküler elek adsorbandır. Bu zeolit, su buharı, karbondioksit, hidrojen sülfür ve çeşitli organik bileşikler gibi polar moleküller için yüksek selektiviteye sahiptir. Tipik uygulamaları arasında; hava ve

Tablo 1. Adsorban malzemelerin özellikleri (Properties of the adsorbent materials)

Silika jel		Zeolite 13X	
Granül çapı	1 – 3 mm	Nominal boncuk boyutu	1,6-2,6 mm
Yığın yoğunluğu	720 g/l	Sıkıştırılmış yığın yoğunluğu	650 kg/m ³
Rejenerasyon sıcaklığı	maks. 200 °C	Adsorpsiyon ısısı	maks. 4400 kJ/kg su
Su buharı adsorpsiyon kapasitesi (25 °C ve %40 bağıl nemde)	24%	Denge su adsorpsiyon kapasitesi (20 °C ve %50 bağıl nemde)	26%

gaz akımlarından nem ve CO₂'nin eş zamanlı olarak giderilmesi, hidrojen ve hidrokarbon akımlarının sülfür bileşenlerinden arındırılması, hidrokarbon arıtımı ve katalizör koruması yer almaktadır. Deneyisel çalışmada kullanılan adsorban malzemelerinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

4. Deney Prosedürü (Experimental Procedure)

Bu çalışma, Zeolit 13X ve silika jel kullanılarak, artık havanın adsorpsiyon-desorpsiyon dinamikleri üzerindeki etkisini kontrol edilen sıcaklık ve basınç koşulları altında incelemektedir. Metodoloji; adsorban hazırlama, vakum ve sızdırmazlık protokolleri, kontrollü hava enjeksiyonu ve döngüsel termal işlemleri kapsamaktadır.

Adsorbanlar, yabancı maddelerden arındırılarak adsorpsiyon bölgelerinin aktif hale getirilmesi için ön işleme tabi tutulmuştur. Adsorbanlar elek ile elenerek yabancı partiküllerden ayrıldıktan sonra deiyonize su ile durulanmıştır. Islak adsorbanlar, maksimum rejenerasyon sıcaklıklarına (silika jel için 175 °C, Zeolit 13X için 250 °C) yakın bir değere kadar ısıtılmıştır. Isıtma işlemi sırasında adsorban kütlesi sürekli olarak izlenmiş ve ardışık ölçümler arasındaki fark 1 gram olduğunda ısıtma durdurulmuştur. Son ölçüm değeri kuru kütle olarak kaydedilmiş ve adsorpsiyon kapasitesinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Hazırlanan adsorban, hava geçirmez bir şekilde adsorban yatağına yerleştirilmiştir.

Deneylerin başlangıç aşamasında, adsorban yatağı vakumlanmıştır. Şekil 2'de gösterilen V-3 vanası kapalı konumda bırakılarak, V-1 vanası açık bırakılmış ve vakum pompasını aktif hale getirmek için V-2 vanası açılmıştır. Vakumlama işlemi, yatağın iç basıncı deneyde kullanılan su banyosunun doyma basıncına ulaşana kadar sürdürülmüştür. Bu işlemin amacı, sistemin, adsorbanın desorpsiyon sıcaklığının ve deneyin mevcut su banyosu sıcaklığının dengede olmalarını sağlamaktır. Adsorbanın bir miktar su tutacağı göz önünde bulundurulurken, su buharının vakum pompasına ulaşması engellenmiş ve sistemde hava kalmadığı varsayılmıştır. İkinci aşamada, evaporatör/kondenser ünitesi vakumlanmıştır. V-3 ve V-4 vanaları açılmış, sabit su banyosu sıcaklığı korunurken vakum uygulanmıştır. İç basınç sıvı suyun doyma basıncına ulaştığında V-4 vanası kapatılmıştır. Son olarak, boru hattı vakumlanmıştır. V-1 ve V-4 vanaları kapalı konumda bırakılarak, V-3 ve V-6 vanaları açılmıştır. Boru yüzeylerinde yoğunlaşan suyun buharlaştırılması için boru ısıtıcıları daha yüksek bir sıcaklığa ayarlanmıştır. Ardından, V-2 vanası açılarak vakum pompası çalıştırılmıştır. Borulardaki basınç 3 mbar'ın altına düştüğünde, V-2 kapatılmış ve vakum pompası durdurulmuştur. Deney düzeneğinde çok sayıda conta ve bağlantı elemanı bulunduğu, deneylerden önce sızdırmazlık testi gerçekleştirilmiştir. V-2, V-3 ve V-6 vanaları kapalı; V-1 ve V-4 vanaları açık konumda tutulmuş, basınç ölçerler 24 saat boyunca izlenmiştir. Su banyosu sıcaklığı sabit tutularak sistemin kararlı bir doyma basıncına ulaşması sağlanmıştır. Her iki taraftaki basınç değerleri 3 mbar'ın altında kaldığında, sistemin sızdırmaz olduğu kabul edilmiştir.

Artık hava içermeyen deneylerde (0 mbar), V-6 vanası her zaman kapalı tutulmuştur. Ancak, artık hava içeren deneylerde, V-6 açılarak, hassas kontrol vanası V-7 aracılığıyla sisteme kontrollü miktarda hava enjekte edilmiştir. Enjekte edilen hava miktarı basınca bağlı olarak düzenlenmiştir. Boru sıcaklığının sabit kalması veya en azından sıcaklık gradyanlarının kararlı olması ve boru hacminin sabit olması nedeniyle, içeri alınan havanın kütlesi basınçla doğrusal olarak artmıştır.

Silika jel, 90 °C (desorpsiyon) ile 30 °C (adsorpsiyon) arasında değişen çalışma sıcaklıklarında test edilmiştir. Sorpsiyon çevrimleri bu adsorbanla, 10 °C ve 20 °C olarak iki farklı sabit

evaporatör/kondenser sıcaklığı için ve 0, 50 mbar, 100 mbar olarak üç farklı artık hava basıncı için sistematik şekilde gerçekleştirilmiştir. Zeolit 13X için deneyler 160 °C (desorpsiyon) ile 40 °C (adsorpsiyon) sıcaklık aralıklarında, aynı hava basınçları (0, 50 mbar, 100 mbar) altında ve sabit 10 °C evaporatör/kondenser sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik çalışma, basınca bağlı adsorpsiyon kinetiklerinin termal gradyanlar boyunca karşılaştırmalı analizini sağlamış ve evaporatör/kondenser sıcaklıkları değişikçe artık havanın performans üzerindeki etkisini ortaya koymuştur.

Adsorpsiyon dengesi, iç basıncın sabitlenmesi, adsorban sıcaklığının desorpsiyon hedef sıcaklığına ± 5 °C yakın olması ve hem buhar hem de sıvı sıcaklıklarının su banyosu sıcaklığına ± 1 °C yakın olması durumunda sağlanmış kabul edildi. Dengeye ulaşıldığında, V-1 ve V-4 vanaları kapatıldı. Desorpsiyon aşamasında, adsorban sıcaklığı hedeflenen desorpsiyon seviyesine kadar yükseltildi ve bu süreçte V-1 vanası kapalı tutuldu. Sıcaklık dengeye ulaşınca V-4 vanası açık bırakılıp V-1 vanası da açılarak desorpsiyon prosesi başlatıldı. Adsorpsiyonun aksine, desorpsiyon dengesi histerezis etkisiyle değişime uğrayarak tam yoğunlaşmayı engelledi ve basıncın su banyosu doyma seviyesinin üzerinde kalmasına neden oldu. Tüm deneyler için aynı prosedür tekrarlandı.

5. Hesaplamalar ve Belirsizlikler (Calculations and Uncertainties)

Adsorpsiyon/desorpsiyon kapasiteleri, su seviyesi farkları kullanılarak Eş. 1 yardımıyla belirlendi.

$$X_{ads} = X_{des} = \frac{|\Delta L| \rho_{su} \frac{\pi(D^2 - D_{cubuk}^2)}{4}}{m_{ads}} \quad (1)$$

Eş. 1'de $D = 0,04$ m, $D_{cubuk} = 0,005$ m olup ve ΔL su seviyesi farkıdır.

Deney öncesinde sistemde kalan artık su veya hava, deney sırasında meydana gelebilecek küçük sızıntılar, evaporatör/kondenserdeki su seviyesi okuma hassasiyeti, film tipi yoğunlaşma ve fırın ile su banyosu arasındaki küçük sıcaklık farklılıkları gibi çeşitli faktörlerden kaynaklanabilecek niteliksel hatalar oluşabilir. Bu faktörler, deney sonuçlarının tekrarlanabilirliğini ve hassasiyetini etkileyebilir. Bu etkileri en aza indirmek için adsorbanın çalışma sıcaklıkları ve artık hava aralıkları mümkün olduğunca geniş tutulmuştur. Bu nedenle, deney sırasında karşılaşılan niteliksel hataların, deneylerin genel sonuçlarını önemli ölçüde değiştirmesi olası değildir.

Evaporatör/kondenser üzerindeki su seviyesi farklarını ölçmek ve adsorplanan/desorplanan su miktarını hesaplamak amacıyla milimetre ölçekli bir cetvel kullanılmıştır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasiteleri için okuma hatası şu şekilde hesaplanmıştır:

$$E = \frac{\pm 0.5 \text{ mm} \cdot 10^{-3} \rho_{su} \frac{\pi(D^2 - D_{cubuk}^2)}{4}}{m_{ads}} \quad (2)$$

Desorpsiyonun adsorpsiyon kapasitesine oranına ilişkin üst ve alt okuma hataları yüzde cinsinden sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\%E_{d/a \text{ üst}} = \left(\frac{X_{des} + E}{X_{ads} - E} - \frac{X_{des}}{X_{ads}} \right) 100 \quad (3)$$

$$\%E_{d/a \text{ alt}} = \left(\frac{X_{des} - E}{X_{ads} + E} - \frac{X_{des}}{X_{ads}} \right) 100 \quad (4)$$

Adsorbanın kütlesi, hassas bir terazi kullanılarak ölçüldü. Kütle, basınç ve sıcaklık ölçümlerine ait hata değerleri ile veri kaydedici (datalogger) kayıtlarından kaynaklanan hata değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

6. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Sonuçlar, her adsorban için ayrı ayrı iki ana bölümde sunulmaktadır. İlk bölüm, denge özelliklerine olan etkiler üzerine odaklanmakta olup, adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasiteleriyle ilgili grafikler içermektedir. Desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranı da tablolarla sunulmuştur. Bu bölümde, grafiklerdeki verilere ikinci dereceden polinom regresyonu uygulanmıştır. Adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasiteleri, adsorbanın kuru kütlesine normalize edilmiş olarak adsorplanan veya desorplanan suyun kütlesini ifade eder. Desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranı, bu iki değerin oranı olarak tanımlanır. Sürecin teorik olarak tamamen geri döndürülebilir olması beklenmesine rağmen, tüm deneylerde histerezis etkileri gözlemlenmiştir. Yoğuşan su miktarı, boru hattındaki buhar yoğunlaşması nedeniyle sürekli olarak buharlaşan sudan daha düşük olmuştur.

İkinci bölüm, adsorpsiyon ve desorpsiyona yönelik geçici (zamanla değişen) etkileri incelemektedir. Bu bölüm, gaz basıncı, gaz sıcaklığı ve ortalama adsorban sıcaklığındaki zamanla değişimleri grafiksel olarak sunmaktadır. Gaz basıncı verileri, Şekil 2'de I-2 olarak gösterilen Kurt J. Lesker serisi 910 Piezo/Pirani transdüseri ile elde edilmiştir. Gaz sıcaklığı ölçümleri, evaporatör/kondenserde üstteki termokupl ile kaydedilmiştir. Ortalama adsorban sıcaklığı, adsorban yatağına yerleştirilen on iki termokuplun ortalaması olarak belirlenmiştir. Veri kaydedicinin hafıza sınırlamaları nedeniyle veriler yaklaşık 20,5 saat boyunca kaydedilmiştir. Ancak, bazı deneylerin

dengeye ulaşmasının daha uzun sürdüğü not edilmelidir. Gaz basıncı ve sıcaklık değerleri, hava içeren deneylerde buhar-hava karışımının özelliklerini temsil ederken, hava içermeyen deneylerde yalnızca buharı temsil etmektedir.

Her bir adsorban için, kuru adsorban kütleleri ile adsorban yataktaki ve V-1, V-2, V-4 ve V-6 vanaları arasında yer alan boru hattındaki kısmi hava basınçları Tablo 3'te sunulmuştur.

6.1. Silika Jel (Silica Gel)

Silika jel, Zeolit 13X'e kıyasla daha düşük rejenerasyon sıcaklıklarında daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi sergilemekte ve daha dar bir sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Silika jel ile gerçekleştirilen deneylerde, desorpsiyon ve adsorpsiyon sıcaklıkları sırasıyla 90 °C ve 30 °C olarak belirlenmiş olup, üç farklı artık hava basıncı (0, 50 ve 100 mbar; burada 0 mbar artık hava bulunmadığını ifade etmektedir) ve iki farklı evaporatör/kondenser sıcaklığı (10 °C ve 20 °C) altında testler gerçekleştirilmiştir.

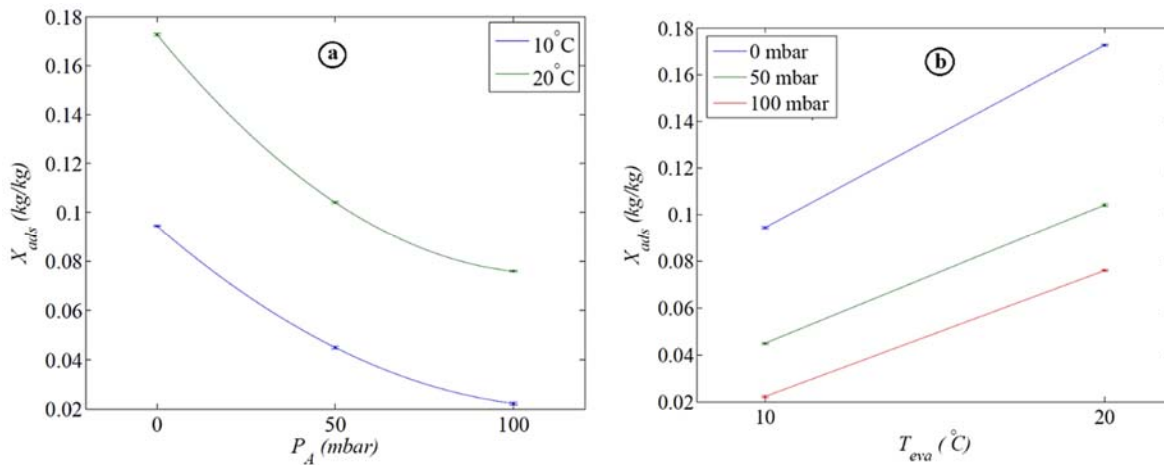
Artık hava basıncının ve evaporatör/kondenser sıcaklığının artışıyla adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitelerindeki değişimler sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Artık hava basıncı arttıkça (yani sistemdeki artık hava miktarı arttıkça) hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon kapasiteleri azalmaktadır. Şekil 5(a) ve Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi, her iki proseste de gözlemlenen düşüş eğilimleri artık

Tablo 2. Ölçümlerdeki belirsizlikler (Uncertainty in measurements)

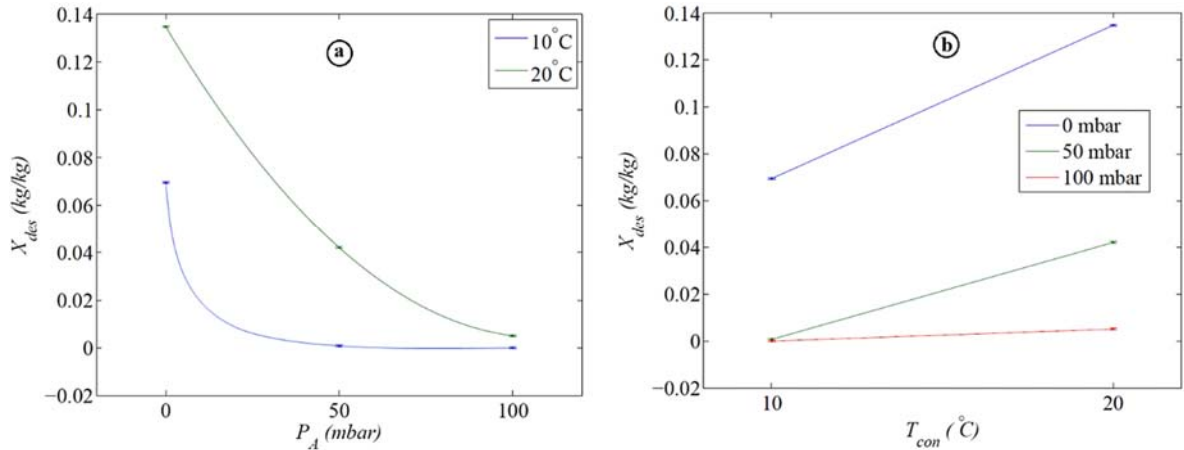
Parametre	Ölçüm cihazı	Belirsizlik (Hata)
Sıcaklık	T-tipi termokupl	$\pm 0,25$ °C
Adsorban kütlesi	Hassas terazi (tartarak)	$\pm 0,1$ g
Soğutucu basıncı	Piezo/Pirani transdüser	1% (okunan değerin)
Adsorban yatak basıncı	ASG1000	$\pm 0,2$ (tam skalanın)
Sıcaklık ve basınç kayıtları	Veri toplayıcı (Data logger)	$\pm 0,2$

Tablo 3. Adsorbanlar için kuru kütleler ve kısmi hava basınçları (Dry masses and partial air pressures for the adsorbents)

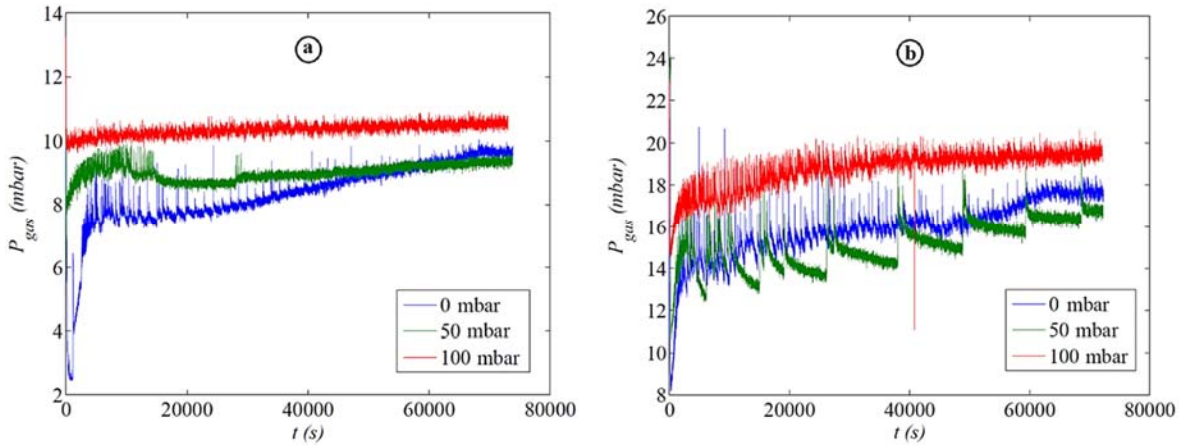
	Silika Jel	Zeolit 13X
Kuru kütle (kg)	1,691 $\pm$ 0,0001	1,380 $\pm$ 0,0001
Yataktaki ve boru hattındaki kısmi hava basıncı (mbar)	7,3 $\pm$ 0,9	9,0 $\pm$ 0,9



Şekil 5. Silika jel adsorpsiyon kapasitesinin (a) 10 °C ve 20 °C evaporatör sıcaklıkları için artık hava basıncı ile, (b) 0, 50 ve 100 mbar artık hava basınçları için evaporatör sıcaklığı ile değişimi
(Variation in the adsorption capacity of silica gel with (a) residual air pressure for 10 °C and 20 °C evaporator temperatures, (b) evaporator temperature for 0, 50 and 100 mbar residual air pressures)



Şekil 6. Silika jel desorpsiyon kapasitesinin (a) 10 °C ve 20 °C kondenser sıcaklıkları için artık hava basıncı ile, (b) 0, 50 ve 100 mbar artık hava basınçları için kondenser sıcaklığı ile değişimi
(Variation in the desorption capacity of silica gel with (a) residual air pressure for 10 °C and 20 °C condenser temperatures, (b) condenser temperature for 0, 50 and 100 mbar residual air pressures)



Şekil 7. Silika jelin adsorpsiyon süreci için gaz basıncının (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporatör sıcaklığında zamanla değişimi
(Variation of gas pressure with time for adsorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporator temperature)

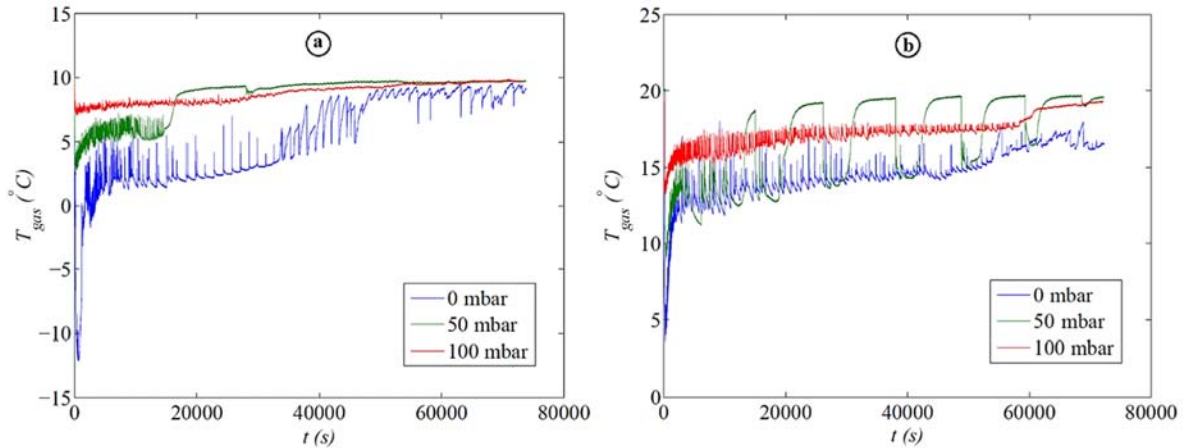
hava basıncına karşı üstel bir bağımlılık sergilemektedir. Özellikle desorpsiyon kapasitesi, artık hava miktarındaki artışa karşı adsorpsiyon kapasitesine kıyasla daha keskin bir düşüş göstermektedir. Şekil 5(b)'de görüldüğü üzere, adsorpsiyon kapasitesi evaporatör sıcaklığı arttıkça önemli ölçüde artmaktadır. Hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon kapasitelerindeki azalma, 10 °C evaporatör/kondenser sıcaklığında 20 °C'ye kıyasla daha büyüktür. Adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitesindeki bu azalma, kısmi hava basıncının toplam basınca oranı ile ilişkilidir. Adsorpsiyon/desorpsiyon dengesi sağlandığında, sistem basıncı doyma basıncına eşit hale gelir. Daha yüksek doyma basıncı, toplam basınç içindeki kısmi hava basıncı oranını düşürmektedir. Örneğin, doyma basıncının 10 °C'de 12 mbar ve 20 °C'de 23 mbar olduğu düşünüldüğünde, 7 mbar'lık bir kısmi hava basıncı, 10 °C'de toplam basıncın %58'ine, 20 °C'de ise %30'una denk gelmektedir. Sonuç olarak, daha düşük evaporatör sıcaklıklarında adsorbe edilen veya desorbe edilen soğutucu miktarındaki azalma daha belirgin hale gelmektedir. Tablo 4, farklı evaporatör/kondenser sıcaklıklarında desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranının artık hava basıncı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. 0 mbar artık hava basıncında (artık hava bulunmadığında), her iki sıcaklıkta da desorpsiyon-adsorpsiyon kapasite oranları benzerdir. Ancak, artık hava basıncı arttıkça bu oran azalmaktadır, bu da desorpsiyon sürecinin adsorpsiyona kıyasla daha

fazla olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Şekillerde sunulan her bir veri noktasında çift çizgili işaretleyiciler, adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasite ölçümlerindeki belirsizlikleri ifade etmektedir.

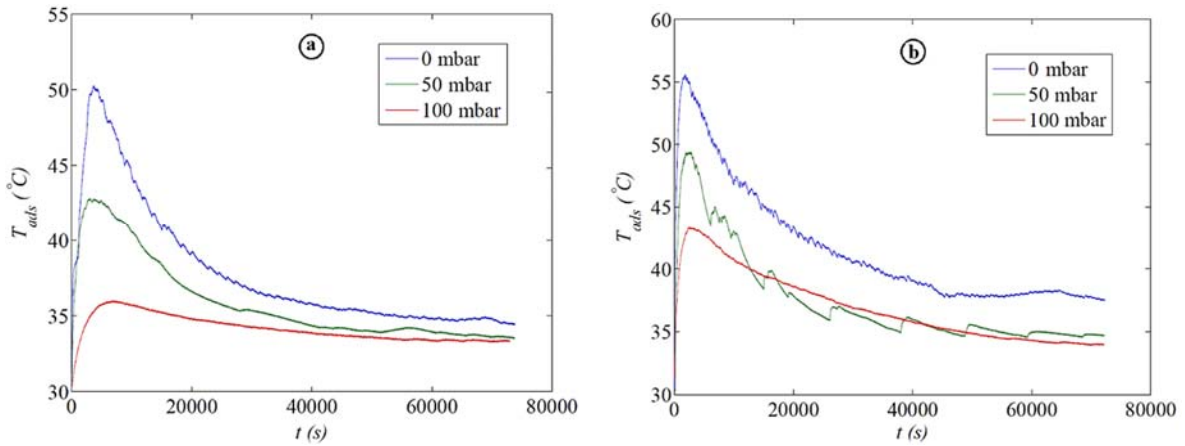
Tablo 4. Silika jelin 10 °C ve 20 °C evaporatör/kondenser sıcaklıklarında farklı artık hava basınçları için desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranı
(Desorption-to-adsorption capacity ratio of silica gel for different residual air pressures at evaporator/condenser temperatures of 10 °C and 20 °C)

Artık hava	10 °C	20 °C
0 mbar	%74	%78
50 mbar	%2	%40
100 mbar	%0	%7

Gaz basıncındaki zamanla değişimler Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü gibi, her iki evaporatör sıcaklığında da başlangıçta keskin bir düşüş gözlemlenmiş, ardından basınç artarak denge basıncına doğru kademeli olarak sabitlenmiştir. Daha düşük artık hava içeriği, daha belirgin bir basınç düşüşüne neden olmuştur. Bu bulgular, adsorpsiyonun büyük ölçüde deneylerin erken aşamalarında gerçekleştiğini göstermektedir. Özellikle 20 °C ve 50 mbar koşulunda, basınç daha düzensiz dalgalanmalar sergileyerek,



Şekil 8. Silika jelin adsorpsiyon süreci için gaz sıcaklığının (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporatör sıcaklığında zamanla değişimi (Variation of gas temperature with time for adsorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporator temperature)



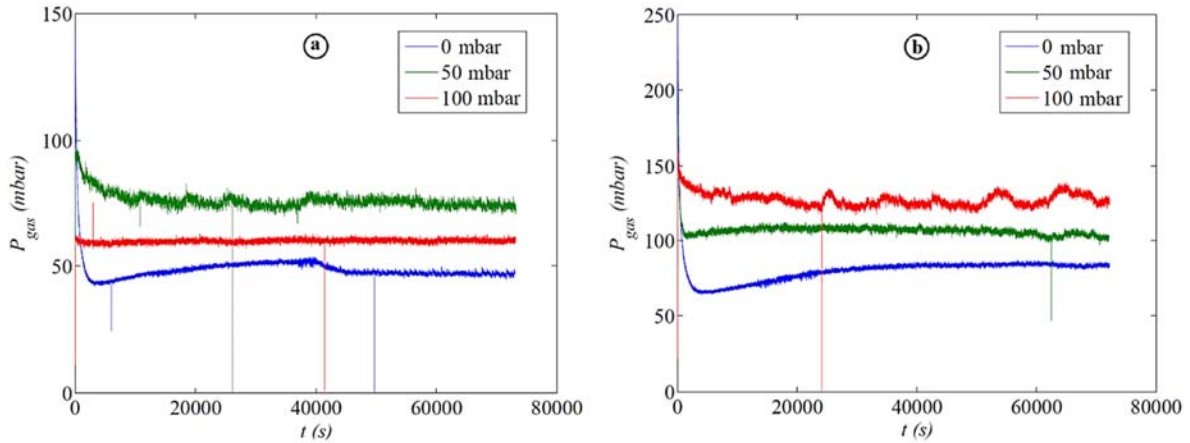
Şekil 9. Silika jelin adsorpsiyon süreci için adsorban sıcaklığının (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporatör sıcaklığında zamanla değişimi (Variation of adsorbent temperature with time for adsorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C evaporator temperature)

dalgalı (pulsatif) bir buharlaşma/adsorpsiyon davranışına işaret etmiştir. Benzer eğilimler gaz sıcaklığındaki değişimlerde de gözlemlenmiştir ve bu durum Şekil 8'de gösterilmektedir. Burada, başlangıçtaki ani sıcaklık düşüşünü, su banyosu sıcaklığına doğru kademeli bir artış takip etmiştir. 20 °C, 50 mbar durumu diğerlerine kıyasla belirgin bir farklılık göstermiş ve kesintisiz bir prosesten ziyade aralıklı adsorpsiyonun varlığını desteklemiştir. Şekil 9, adsorban sıcaklığındaki zamanla değişimleri sunmaktadır ve daha düşük artık hava basınçlarının, daha yüksek adsorban sıcaklıkları ile sonuçlandığını, bunun da daha fazla su adsorbe edilmesiyle ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Maksimum sıcaklıklar tüm durumlarda benzer zaman aralıklarında gerçekleşmiştir. Daha yüksek artık hava içeriğine sahip deneyler, adsorbe edilen su miktarının azalması nedeniyle daha hızlı dengeye ulaşmıştır. Şekil 9 (b)'de görüldüğü gibi 20 °C, 50 mbar koşulunda gözlemlenen dalgalı adsorpsiyon davranışı, 20 °C, 0 mbar koşulu için de benzer ancak daha düşük genlikli ve daha hızlı darbelerle kendini göstermiştir.

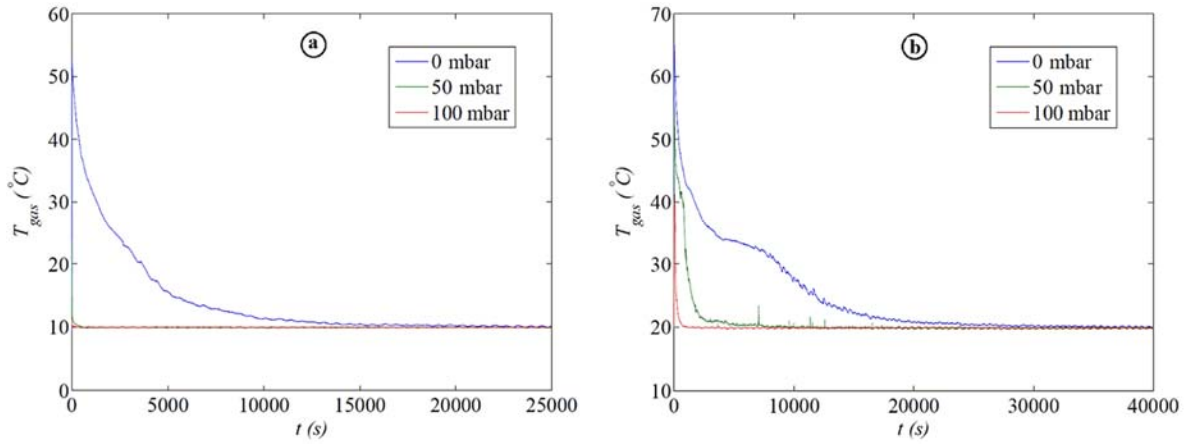
Şekil 10'da sunulan gaz basınç değerleri, genleşme ve yoğunlaşma nedeniyle başlangıçta keskin bir düşüş sergilemiş ve ardından neredeyse sabit bir eğilim izlemiştir. Gözlemlenen basınç değerleri, kondenserin doyma basıncından önemli ölçüde daha yüksekti. İçerideki hava tek başına bu kadar yüksek basınçları açıklayamayacağından, su buharının bir kısmının yoğunlaşmadan kaldığını göstermektedir. Daha düşük artık hava basınçlarında gerçekleştirilen deneyler, başlangıçta daha büyük basınç farkları

göstermiş olup, bu da yoğunlaşmanın daha büyük ölçüde gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 6'da gösterildiği gibi, 10 °C kondenser sıcaklığında ve 50 mbar hava basıncında desorbe olan su miktarı neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir. Bu gözlem, Şekil 11(a)'da verilen gaz sıcaklığı değişimleri ile de desteklenmektedir; sıcaklık değişimleri 100 mbar durumundakiyle büyük ölçüde benzerlik göstermiş, yalnızca prosenin başlangıcında küçük bir fark gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yoğunlaşma minimum seviyede kalmıştır. Aynı kondenser sıcaklığında gerçekleştirilen 100 mbar deneyinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiş olup, bu da yoğunlaşmanın gerçekleşmediğini doğrulamaktadır. Şekil 11(b)'de, 20 °C kondenser sıcaklığı için gaz sıcaklığı, 10 °C durumuna kıyasla kondenser sıcaklığına daha yavaş bir düşüş sergilemiştir. 20 °C kondenser sıcaklığı için 50 mbar ve 100 mbar basınçlarında bile yoğunlaşmanın meydana geldiği görülmektedir.

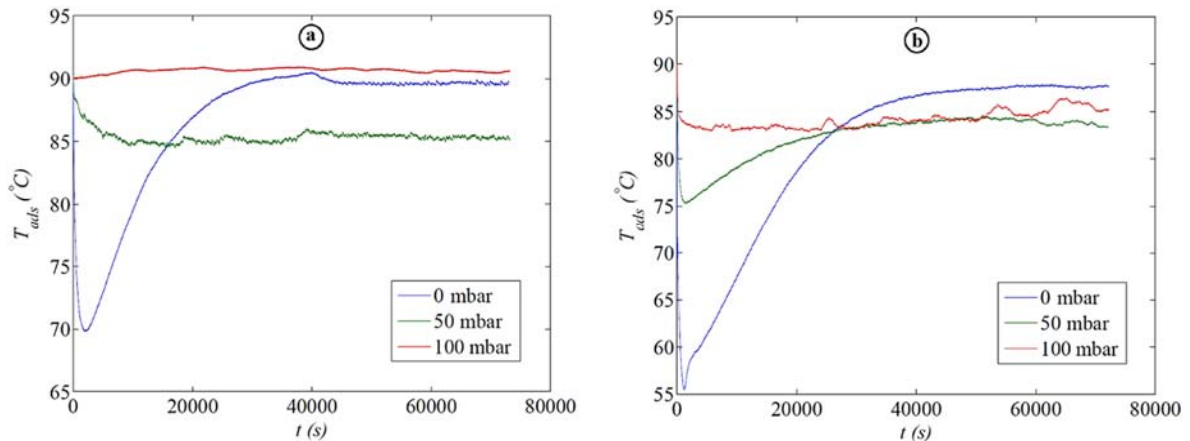
Adsorban sıcaklığının desorpsiyon sürecindeki zamana bağlı değişimi Şekil 12'de gösterilmektedir. Şekil 12'de gösterildiği gibi, 10 °C kondenser sıcaklığı ve 100 mbar hava basıncında adsorban sıcaklığı değişmeden kalmıştır, bu da kondenser içinde yoğunlaşmanın gerçekleşmemesi nedeniyle beklenen bir durumdur. Her iki yoğunlaşma sıcaklığında da, 100 mbar basıncında adsorban sıcaklığı, rejenerasyon (desorpsiyon) sıcaklığı olan 90 °C civarında dengelenmiştir. 50 mbar durumlarında ise, deneylerin ilerleyen aşamalarında sıcaklık neredeyse sabit kalmış ancak kondenser sıcaklığından bağımsız olarak desorpsiyon sıcaklığının altında seyretmiştir.



Şekil 10. Silika jelin desorpsiyon süreci için gaz basıncının (a) 10 °C, (b) 20 °C kondenser sıcaklığında zamanla değişimi
(Variation of gas pressure with time for desorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C condenser temperature)



Şekil 11. Silika jelin desorpsiyon süreci için gaz sıcaklığının (a) 10 °C, (b) 20 °C kondenser sıcaklığında zamanla değişimi
(Variation of gas temperature with time for desorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C condenser temperature)

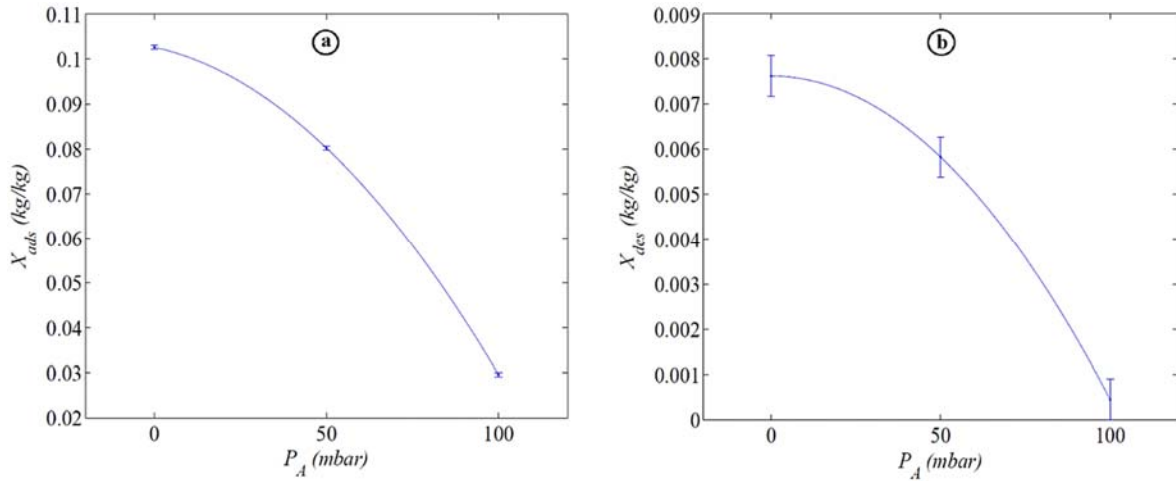


Şekil 12. Silika jelin desorpsiyon süreci için adsorban sıcaklığının (a) 10 °C, (b) 20 °C kondenser sıcaklığında zamanla değişimi
(Variation of adsorbent temperature with time for desorption process of silica gel at (a) 10 °C, (b) 20 °C condenser temperature)

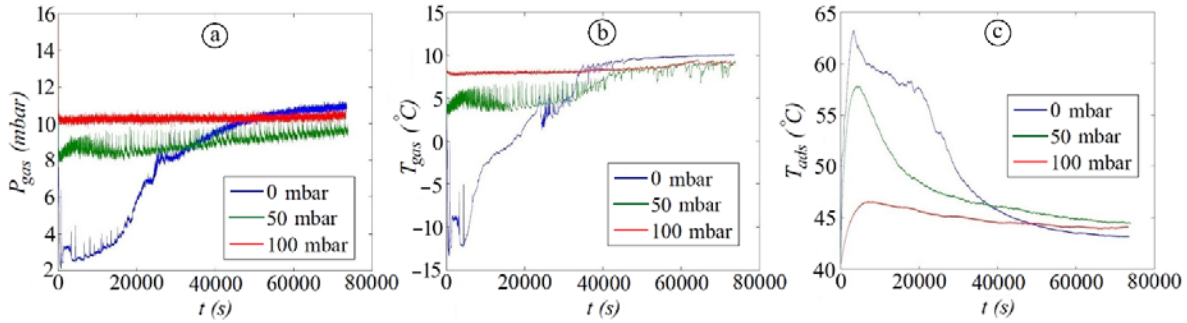
Bu durum, bazı su moleküllerinin adsorbe halde kaldığını ve fırından ısı çekerek kademeli olarak desorbe olmaya devam ettiğini göstermektedir. Bu moleküller desorbe oldukça ısıyı uzaklaştırmış ve gözlemlenen kararlı sıcaklık profillerine yol açmış olabilir. Benzer bir olgu Zeolit 13X için de gözlemlenmiştir.

6.2. Zeolit 13X (Zeolite 13X)

Zeolit 13X deneyleri için 160 °C–40 °C çalışma sıcaklık döngüsü kullanılmıştır (160 °C desorpsiyon sıcaklığı, 40 °C adsorpsiyon sıcaklığı). Deneyler, sırasıyla 0, 50 mbar ve 100 mbar olmak üzere üç



Şekil 13. Zeolit 13X'in (a) adsorpsiyon kapasitesinin 10 °C evaporatör sıcaklığı için, (b) desorpsiyon kapasitesinin 10 °C kondenser sıcaklığı için artık hava basıncı ile değişimi (Variation in Zeolite 13x's (a) adsorption capacity for 10 °C evaporator temperature, (b) desorption capacity for 10 °C condenser temperature with residual air pressure)



Şekil 14. Zeolit 13X'in 10 °C evaporatör sıcaklığındaki adsorpsiyon süreci için (a) gaz basıncının, (b) gaz sıcaklığının, (c) adsorban sıcaklığının zamanla değişimi (Variation of (a) gas pressure, (b) gas temperature, (c) adsorbent temperature with time for adsorption process of zeolite 13X at 10 °C evaporator temperature)

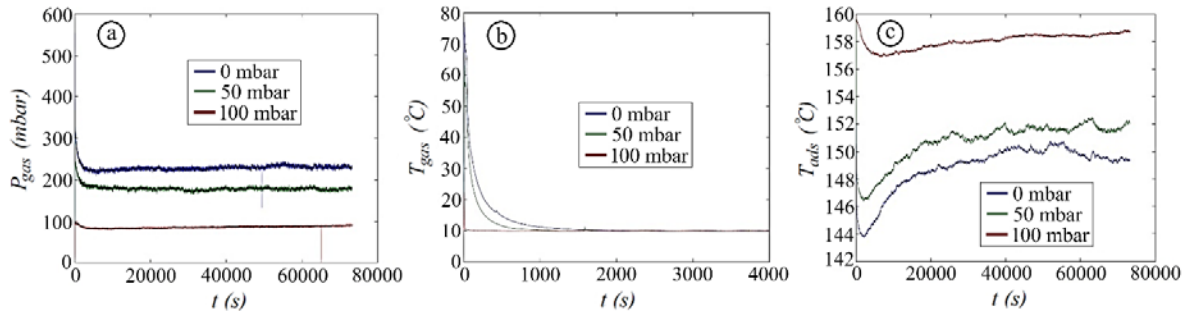
farklı hava basıncı ve yalnızca 10 °C evaporatör/kondenser sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 13'te görüldüğü gibi hem adsorpsiyon hem de desorpsiyon kapasiteleri, artık hava içeriğinin artmasıyla parabolik bir azalma göstermektedir. Desorbe olan su miktarı, silika jele kıyasla belirgin şekilde daha düşüktür. Desorpsiyon kapasiteleri oldukça düşük seviyelerde kalmakta ve adsorpsiyon kapasiteleriyle karşılaştırıldığında neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir. Ayrıca, Tablo 5'te gösterildiği gibi, desorpsiyon kapasitesindeki azalma, özellikle 100 mbar artık hava basıncında, adsorpsiyon kapasitesine kıyasla daha belirgindir. Bununla birlikte, 50 mbar durumu ile 0 mbar durumunun neredeyse aynı kapasite oranına sahip olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5. Zeolit 13X'in 10 °C evaporatör/kondenser sıcaklığında farklı artık hava basınçları için desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranı
(Desorption-to-adsorption capacity ratio of zeolite 13X for different residual air pressures at evaporator/condenser temperature of 10 °C)

Artık hava	10 °C
0 mbar	%7,4
50 mbar	%7,3
100 mbar	%1,5

0 mbar artık hava basıncındaki deneyde, deneyin erken aşamalarında su yüzeyinde bir buz tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu oluşum adsorpsiyon sürecini geciktirmiştir, dolayısıyla ilgili veriler bu durum göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir. Şekil 14, 10 °C evaporatör sıcaklığında Zeolit 13X'in adsorpsiyon süreci için gaz basıncı ile sıcaklığının ve adsorban sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 14(a)'da, 50 mbar ve 100 mbar durumlarında gaz basıncında doğrusal bir artış gözlenmiş olup, 50 mbar eğiminin daha büyük olduğu görülmüştür. 0 mbar durumunda buz tabakası adsorpsiyon sürecini geciktirse de en yüksek basınca en hızlı ulaşarak dengeye daha erken yaklaşmıştır. Şekil 14(b)'de, daha yüksek artık hava basınçlarında yapılan deneylerde sıcaklık dalgalanmalarının daha küçük olduğu görülmüştür. Bu durum, adsorpsiyon bazlı soğutma sistemlerinin soğutma verimliliğinde bir azalmaya işaret etmektedir. Ancak 0 mbar durumunda, suyun donma noktasının çok altında sıcaklıklar gözlemlenmiş ve bu da su yüzeyinde bir buz tabakasının oluşmasına neden olarak buharlaşmayı geçici olarak durdurmuştur. Tüm durumlarda ani sıcaklık dalgalanmaları gözlemlenmiş olup, adsorpsiyon sürecinin küçük darbeler halinde gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, artık hava basıncı azaldıkça sıcaklık verilerinin daha düzensiz hale geldiği görülmüştür. Şekil 14(c)'de, düşük artık hava basınçlarında artan adsorpsiyon kapasitesine bağlı olarak, beklendiği gibi daha yüksek adsorban sıcaklıkları gözlemlenmiştir. 0 mbar durumu en hızlı şekilde en düşük sıcaklığa ulaşarak dengeye en hızlı erişen deney koşulu olmuştur. Hava basıncı azaldıkça veriler daha düzensiz hale gelmiş olup, bunun



Şekil 15. Zeolit 13X'in 10 °C kondenser sıcaklığındaki desorpsiyon süreci için (a) gaz basıncının, (b) gaz sıcaklığının, (c) adsorban sıcaklığının zamanla değişimi

(Variation of (a) gas pressure, (b) gas temperature, (c) adsorbent temperature with time for desorption process of zeolite 13X at 10 °C condenser temperature)

Tablo 6. Adsorpsiyon/Desorpsiyon kapasitesi-Hava Basıncı ($X_{ads}/X_{des}-P_A$) datasının fit (regresyon) denklemleri ve R^2 değerleri
(Regression results for Adsorption/Desorption Capacity vs. Air Pressure ($X_{ads}/X_{des}-P_A$) data)

Adsorban	Proses	Evap./Kond. sıcaklığı	Fit Denklemi	R^2
Silika jel	Adsorpsiyon (Şekil 5(a))	10 °C	$y = 0,0937e^{-0,014x}$	0,9998
	Adsorpsiyon (Şekil 5(a))	20 °C	$y = 0,1673e^{-0,008x}$	0,9857
	Desorpsiyon (Şekil 6(a))	10 °C	$y = 0,0695e^{-0,092x}$	0,9999
	Desorpsiyon (Şekil 6(a))	20 °C	$y = 0,1576e^{-0,033x}$	0,9838
Zeolit 13X	Adsorpsiyon (Şekil 13(a))	10 °C	$y = -6.10^{-6}x^2 - 2.10^{-4}x + 0,1026$	0,9999
	Desorpsiyon (Şekil 13(b))	10 °C	$y = -7.10^{-7}x^2 - 2.10^{-16}x + 0,0076$	0,9998

adsorpsiyon sürecinin daha yavaş gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 15, 10 °C kondenser sıcaklığında zeolit 13X'in desorpsiyon süreci için gaz basıncı ile sıcaklığının ve adsorban sıcaklığının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 15(a)'da görüldüğü gibi, gaz basıncı başlangıçta yoğunlaşma/genleşme nedeniyle azalmış ve ardından neredeyse sabit bir değere ulaşmıştır. Artık hava basıncı ne kadar düşüğe, başlangıç ve son basınçlar arasındaki fark o kadar büyük olmuştur. Yoğuşma basıncından daha yüksek basınç değerleri, soğutucu akışkan buharının bir kısmının fırın ve borular içinde kaldığını ve kondenserde yoğunlaşmadığını göstermektedir. Şekil 15(b)'de, gaz sıcaklıklarının silika jele kıyasla zeolit 13X'te daha hızlı dengeye ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum, zeolit 13X'in daha düşük desorpsiyon kapasitesine sahip olmasıyla açıklanabilir. Gaz sıcaklığı, yaklaşık 2000 saniye içinde su banyosu sıcaklığına yakın bir değere ulaşarak, silika jele kıyasla çok daha hızlı bir denge süreci göstermiştir.

Şekil 15(c)'de gösterildiği gibi, adsorban sıcaklıkları daha düşük artık hava basınçlarında daha düşük olmuştur. Bu durum, düşük artık hava basınçlarında gerçekleştirilen deneylerin diğerlerine kıyasla daha fazla suyu desorbe ettiğini göstermektedir. 100 mbar durumunda, sıcaklık başlangıçta düşmüş ve ardından desorpsiyon sıcaklığına doğru tekrar yükselmiştir. Ancak, 0 mbar ve 50 mbar durumlarında sıcaklık aniden düşmüş, ardından belirli bir sınıra kadar yükselmiş ancak desorpsiyon sıcaklığının oldukça altında kalmıştır. Bu durum, adsorban üzerinde bir miktar suyun desorbe olmadan kaldığını ve desorbe olan suyun soğurmuş olduğu ısıнын bir süre boyunca fırından aktarılan ısıya yaklaşık olarak eşit olduğunu, dolayısıyla bir sabit sıcaklık rejiminin oluştuğunu gösterir. 100 mbar durumunda ise, daha düşük adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle desorbe olmamış bu tür bir suyun bulunmaması mümkündür. Bu olgunun birkaç olası nedeni olabilir. Bir olasılık, V-1 valfi açıldıktan sonra gazın genleşmesinin adsorbanı daha düşük bir sıcaklığa soğutması ve bunun sonucunda

bazı desorbe olmuş su buharının tekrar adsorbe olmasıdır. Yeniden adsorpsiyonun ardından, bu su moleküllerinin desorpsiyonu, fırından ısı transferi ile yavaş bir şekilde devam edebilir. Sonuç olarak, suyun desorpsiyonu ve buna bağlı ısı transferi gerçekleşir. Ancak eğer durum buyusa, adsorpsiyon ısısı nedeniyle başlangıçtaki sıcaklık düşüşünden hemen sonra adsorban sıcaklığında belirgin bir artış gözlenmelidir. Ancak, tüm deneylerde valf açıldıktan sonra sıcaklık bir süre daha düşmeye devam etmiştir. Bu nedenle daha gerçekçi bir açıklama, valf açıldığında adsorban üzerinde desorbe olmamış suyun kalmış olmasıdır. Valf açılıp basınç düştükten sonra bu su desorbe olmaya başlamış ve bu süreçte ısı taşımıştır. Ayrıca, hava varlığının da bu süreci etkileyebileceği düşünülmektedir.

Şekiller 5(a), 6(a) ve 13'te verilen grafiklerde basınca karşılık adsorpsiyon/desorpsiyon kapasiteleri verilmiş ve 3 farklı basınç için bulunan noktalardan geçen uygun eğriler fit edilerek eğilimler gösterilmiştir. Silika jel için üstel zeolit 13X için parabolik olduğu daha önce de vurgulanan bu eğrilerin denklemleri ve fit edilme doğruluğunu gösteren R^2 değerleri aşağıda Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da verilen denklemlerde x ifadesi P_A 'ya, y ifadesi ise X_{ads} veya X_{des} 'a karşılık gelmektedir.

7. Literatürle Karşılaştırma ve Doğrulama (Comparison with the Literature and Validation)

Yapılan deneysel çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için bulunan sonuçlar literatürde yapılmış benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Adsorpsiyonlu soğutma/ısı pompası sistemine yoğunlaşmayan (veya adsorplanmayan) gaz sızması halinde adsorban malzemelerin adsorpsiyon kinetiklerinin nasıl etkilendiğine dair çok sınırlı sayıda çalışmanın sonuçları aşağıda Tablo 7'de verilmiş ve bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma parametresi olarak sadeleştirme açısından en önemli parametrelerden biri olan adsorpsiyon kapasitesindeki düşüş değerleri dikkate alınmıştır. Tablo 7'de, yapılmış farklı çalışmalarda kullanılan farklı

Tablo 7. Literatürdeki benzer çalışmalarda yoğunlaşmayan/adsorplanmayan gazlar nedeniyle adsorban malzemenin adsorpsiyon kapasitesindeki düşüşün bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılması

(Comparison of the reduction in the adsorption capacity of adsorbent materials due to noncondensable/nonadsorbable gases in similar studies in the literature with the results of this study)

Referans	Adsorban	Yoğunlaşmayan (Adsorplanmayan) gaz	Basınç mbar	Adsorpsiyon kapasitesindeki düşüş
[23]	FAM-Z02	Hava	5	%60
	FAM-Z02	Hava	2	%29
[24]	AQSOA™-FAM-Z02	Hava	2,1	%32
	AQSOA™-FAM-Z02	Hidrojen	1,65	%58
[11]	SWS-1L	Hava	4,7	%37
[22]	Fuji-RD	Hava	14,3	%20
[21]	SWS-1L	Hidrojen	14,3	%42
<i>Bu çalışma</i>	<i>Silika jel</i>	<i>Hava</i>	<i>50</i>	<i>%40</i>
	<i>Zeolit 13X</i>	<i>Hava</i>	<i>50</i>	<i>%22</i>

adsorbanların yoğunlaşmayan/adsorplanmayan farklı atık gaz (hava veya hidrojen) içeriklerinde (farklı basınçlarda) 0 mbar basınçtaki yani yoğunlaşmayan/adsorplanmayan gaz içermediği durumdakine göre adsorpsiyon kapasitelerindeki düşüş gösterilmektedir.

Görüldüğü gibi, literatürde yoğunlaşmayan/adsorplanmayan gazlar olan hava ve hidrojen için farklı sızma oranlarında çalışmalar yapılmıştır, ancak artık havanın bu çalışmada kullanılan silika jel ve zeolit 13X adsorbanlarının adsorpsiyon kapasitesine etkisi üzerine çalışma yapılmamıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda genellikle düşük basınçların test edildiği görülmüş, 50-100 mbar mertebelerindeki artık gaz basınçları için çalışma yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışma, geleneksel adsorban malzemelerin adsorpsiyon kinetiklerinin yoğunlaşmayan gazlarla nasıl değişebileceğine dair özgünlük içermekte olup literatürde önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde literatürdeki benzerlerine kıyasla düşüşlerin gerçekçi seviyelerde olduğu ve artık gaz (hava) basıncı ile düşüşlerin daha da artacağına beklentiler dahilinde olduğu görülmektedir.

8. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada artık havanın adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde silika jel-su ve zeolit 13X-su çiftlerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon dinamikleri üzerindeki zararlı etkileri sistematik şekilde deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı artık hava basınçları ve evaporatör/kondenser sıcaklıklarında gerçekleştirilen kontrollü deneyler sonucunda şu önemli sonuçlar elde edilmiştir:

- Artık hava basıncı arttıkça her iki adsorbanın adsorpsiyon ve desorpsiyon kapasitelerinde önemli düşüşler görülmüştür. Silika jelin adsorpsiyon kapasitesi üstel bir azalma gösterirken, zeolit 13X'in parabolik bir azalma göstermiştir.
- Desorpsiyon süreçleri, adsorpsiyon süreçlerine göre daha fazla etkilenmiş, desorpsiyon/adsorpsiyon kapasite oranları silika jel için 100 mbar hava basıncında neredeyse sıfıra düşmüştür. Zeolit 13X için ise desorpsiyon kapasiteleri daha yüksek hava basınçlarında ihmal edilebilir seviyelere inmiştir. Bu da zeolit 13X'in desorpsiyon kinetiklerinin artık hava gibi yoğunlaşmayan gazlara karşı duyarlılığını vurgulamaktadır.
- Daha yüksek evaporatör/kondenser sıcaklıkları artık havanın kısmi basıncının doyma basıncına oranını azaltarak performans kayıplarını hafifletmiştir. Bu, artık hava kaynaklı verimsizlikleri dengelemek için işletme sıcaklıklarının optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.
- Daha küçük desorpsiyon-adsorpsiyon sıcaklık farklarına sahip sistemler (silika jel gibi adsorbanlar) artık hava kaynaklı

bozulmalara daha duyarlıdır, bu da adsorpsiyon döngülerinde hassas ısıl yönetimin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

- Artık hava, adsorpsiyon ve desorpsiyon prosesleri sırasında geçici basınç ve sıcaklık profillerini değiştirmiştir. Daha düşük artık hava basınçlarında, daha hızlı adsorpsiyonu işaret eden keskin başlangıç basıncı düşüşleri ve sıcaklık dalgalanmaları gözlenirken, daha yüksek hava basınçlarında daha yumuşak ve daha yavaş dengeleme süreçleri gözlenmiştir.
- İz miktarda (atmosferik basıncın %0,3–0,9'u) artık havanın bile sistem verimliliğini ciddi şekilde azalttığı gözlemlenmiştir, bu da adsorpsiyon soğutma sistemlerinde sızıntı geçirmez tasarımların kritik önemini göstermektedir.
- Bulgular Stefan akışı ve difüzyon direnci üzerine yapılan önceki çalışmalara paralel olmakla birlikte, adsorpsiyonlu soğutma sistemlerinde adsorpsiyon bozulmasını ele almakta ve silika jel ve zeolit 13X gibi farklı adsorbanlara özgü farklı bozulma eğilimlerini (üstel vs. parabolik) yansıtan yenilikçi bilgiler sunmaktadır.

Özetle bu çalışma, yoğunlaşmayan gazların adsorpsiyonlu soğutma sistemleri üzerindeki zararlı etkilerini ortaya koymakta ve sağlam, hava geçirmez sistemler tasarlamının önemini vurgulamaktadır. Yeni adsorbanlar geliştirme ve sistem iyileştirme çözümleri ile birlikte hava sızıntılarıyla da başa çıkarak adsorpsiyonlu soğutma çevrimleri ile geleneksel buhar sıkıştırma çevrimleri arasındaki performans farkları daraltılabilir ve bu sistemlerin sürdürülebilir ve yenilenebilir kaynaklı soğutma teknolojileri için uygulanabilirliği artırılabilir. Sonraki çalışmalarda farklı gözenek yapısına, yüzey alanına ve kimyasal bileşime sahip yeni nesil adsorban malzemeler (örneğin metal-organik kafes yapılar veya hibrit nanokompozitler) kullanılarak yoğunlaşmayan gazların etkisi araştırılabilir. Bu tür malzemelerin hem hava sızıntılarına karşı daha dayanıklı olup olmadığı hem de desorpsiyon performanslarını koruyup koruyamadıkları değerlendirilebilir.

Kaynaklar (References)

1. Al-Alili A., Hwang Y., Radermacher R., Review of solar thermal air conditioning technologies, International Journal of Refrigeration 39, 4-22, 2014.
2. Brown J.S., Domanski P.A., Review of alternative cooling technologies, Applied Thermal Engineering, 64 (1-2), 252-262, 2014.
3. Choudhury B., Saha B.B., Chatterjee P.K., Sarkar J.P., An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling, Applied Energy, 104, 554-567, 2013.
4. Wang D., Zhang J., Tian X., Liu D., Sumathy K., Progress in silica gel-water adsorption refrigeration technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 85-104, 2014.
5. Wang D.C., Li Y.H., Li D., Xia Y.Z., Zhang J.P., A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical

- adsorption systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 344-353, 2010.
6. Deng J., Wang R.Z., Han G.Y., A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems, *Progress in Energy and Combustion Science*, 37 (2), 172-203, 2011.
7. Sarbu I., Sebarchievici C., Review of solar refrigeration and cooling systems, *Energy and Buildings*, 67, 286-297, 2013.
8. Söğüt E.G., Çelebi M., Removal of Thioflavin T and Co(II) ions from aqueous solution using GO and GO-EDTA; adsorption parameters and mechanism, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 371–383, 2024.
9. Aristov Y.I., Challenging offers of material science for adsorption heat transformation: A review, *Applied Thermal Engineering*, 50 (2), 1610-1618, 2013.
10. Askalany A.A., Saha B.B., Kariya K., Ismail I.M., Salem M., Ali A.H.H., Morsy M.G., Hybrid adsorption cooling systems-An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (8), 5787-5801, 2012.
11. Glaznev I.S., Aristov Y.I., Kinetics of water adsorption on loose grains of SWS-1L under isobaric stages of adsorption heat pumps: The effect of residual air, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (25-26), 5823-5827, 2008.
12. Nusselt W., Die oberflächenkondensation des wasserdampfes, *VDI-Zs*, 60, 541–546, 1916.
13. Frank-Kamenetskii D.A., *Diffusion and Heat Exchange in Chemical Kinetics*, Princeton University Press, 2015.
14. Mazzarotta B., Sebastiani E., Process design of condensers for vapor mixtures in the presence of non-condensable gases, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73 (4), 456-461, 1995.
15. Oh S., Revankar S.T., Experimental and theoretical investigation of film condensation with noncondensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (15-16), 2523-2534, 2006.
16. Li J.D., Saraireh M., Thorpe G., Condensation of vapor in the presence of non-condensable gas in condensers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (17-18), 4078-4089, 2011.
17. Burdukov A.P., Bufetov N.S., Deriy N.P., Dorokhov A.R., Kazakov V.I., Experimental study of the absorption of water vapor by thin films of aqueous lithium bromide, *Heat Transfer - Soviet Research*, 12 (3), 118-123, 1980.
18. Cosenza F., Vliet G.C., Absorption in falling water/LiBr films on horizontal tubes, *ASHRAE Trans.*, 96, 693-701, 1990.
19. Vorotilin V.P., Heifets L.I., Calculation of chlorine condensation process in inert admixture presence, *Khimicheskaya Promyshlennost*, 8, 502-506, 1987.
20. Lambert M.A., Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage, *Applied Thermal Engineering*, 27 (8-9), 1612-1628, 2007.
21. Okunev B.N., Gromov A.P., Zelenko V.L., Glaznev I.S., Ovoshchnikov D.S., Heifets L.I., Aristov Y.I., Effect of residual gas on the dynamics of water adsorption under isobaric stages of adsorption heat pumps: Mathematical modelling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (7-8), 1283-1289, 2010.
22. Glaznev I., Ovoshchnikov D., Aristov Y., Effect of residual gas on water adsorption dynamics under typical conditions of an adsorption chiller, *Heat Transfer Engineering*, 31 (11), 924-930, 2010.
23. Girmik I.S., Aristov Y.I., Effect of residual air on dynamics of temperature- and pressure-initiated adsorption cycles for heat transformation, *Applied Thermal Engineering*, 200, 117629, 2022.
24. Sapienza A., Frazzica A., Freni A., Aristov Y., Dramatic effect of residual gas on dynamics of isobaric adsorption stage of an adsorptive chiller, *Applied Thermal Engineering*, 96, 385-390, 2016.

