



Sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı ve performansının geliştirilmesi

Ertuğrul Cihan^{1*}, Barış Kvasoğulları¹, Hasan Demir²

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı
- Absorber ve rejeneratörde polikarbon levha kullanımı
- Sıvı desikant nem alma sisteminin termodinamik analizi

Makale Bilgileri

Geliş: 24.02.2016

Kabul: 20.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337617

Anahtar Kelimeler:

Nem alma sistemi,
polikarbon dolgu malzemesi,
sıvı desikant

ÖZET

Bu çalışmada, mekanik nem alma sistemlerinin yerine kullanılabilecek bir sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı yapılarak termodinamik analizi yapılmıştır. Tasarlanan ve imalatı yapılan açık sıvı nem alma sisteminin ana parçaları absorber, rejeneratör ve ısı değiştiricileridir. Çalışması yapılan açık sıvı nem alma sisteminde dolgu malzemesi daha önce kullanılmamış polikarbon levhalardan hazırlanmıştır. Polikarbon dolgu malzemeleri kanal açıları 30° olacak şekilde hazırlanmıştır. Sistemde sıvı desikant olarak LiBr-Su (Lityum bromür-su) çözeltisi kullanılarak sistemin nem alma verimi, entalpi verimi ve duyulur ısı oranı parametreleri açısından performans incelemesi yapılmıştır. Analiz sonucunda sıvı desikant nem alma sisteminin nem alma verimi yaklaşık %15 olarak bulunmuştur.

The design and performance improvement of liquid desiccant dehumidification system

H I G H L I G H T S

- Design of liquid desiccant dehumidification system
- Use of polycarbonate plates in absorber and regenerator
- Thermodynamic analysis of liquid desiccant dehumidification system

Article Info

Received: 24.02.2016

Accepted: 20.03.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.337617

Keywords:

Dehumidification system,
polycarbonate packing
material,
liquid desiccant

ABSTRACT

In this paper, the design and thermodynamical analysis of a liquid desiccant dehumidification system, which can be used instead of mechanical dehumidification systems, was done. The main parts of the designed and produced system are absorber, regenerator and heat exchangers. In proposed open liquid desiccant system, packing material was prepared from polycarbonate plates, which haven't be used before as packing material. The channel angle of the prepared polycarbonate packing material to be 30°. LiBr-Water (Lithium bromide-water) solution was used in the system as desiccant and the performance of the system was investigated in terms of dehumidification efficiency, enthalpy efficiency and sensible heat ratio parameters. As a result of the analysis, dehumidification efficiency of the liquid desiccant system was found 15%.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan yaşam standartlarıyla beraber mekanlarda insanların iç konfor ihtiyacı da artmaktadır. Bu sebeple gereken iç konforun sağlanmasında, yani ısıtma ve soğutma işleminde, gün geçtikçe daha fazla enerji harcanmakta ve harcanan bu enerji yakın gelecekte tükenmesi beklenen fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Isıtma ve soğutma işlemi günümüzde yaygın olarak konvansiyonel buhar sıkıştırılmalı sistemlerle yapılmasına karşın, bu sistemlerin yüksek oranda elektrik enerjisine bağımlı olması, sınırlı nem kontrolü sağlaması ve iç havayı temizlemede yetersiz olması dikkat çekmektedir [1]. Bunlar ve benzer sebeplerden dolayı sıvı desikant nem alma sistemleri, araştırmacıların gün geçtikçe daha fazla ilgisini çekmektedir [2]. Ters Carnot prensibi ile çalışan mekanik soğutma sistemleri ile bir mahalın soğutulması ve nem alma işlemlerinin yapılması yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Mahal nemli havası evaporatör petekleri üzerinden geçerken havanın çığ noktasının altında bir sıcaklıkta soğutma yapıldığından nemli havadaki nem yoğunlaşarak dışarı atılmaktadır. Soğutma yükünün bir kısmı su buharının gizli ısını çekmek için kullanıldığından duyulur ısı miktarı çekimi nispeten daha az olacaktır. Dolayısıyla yüksek bağıl neme sahip mahallerde (AVM, sinema, tiyatro ve toplantı salonları vb.) kullanılan klima sistemlerinde harcanan elektrik enerjisinin büyük bir kısmı insanlardan kaynaklanan ortam nemini atmak için kullanılmaktadır [4].

Önerilen sıvı desikant nem alma sisteminde kimyasal madde kullanılarak nem alma işlemi gerçekleştirildiğinden mekanik sistemlerle karşılaştırıldığında çok daha az enerji kullanımı ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerin özellikle iklimlendirme santrallerinde kullanılması durumunda nem alma işleminin yani gizli ısının burada bertaraf edilmesi, mekanik sistemdeki soğutma yükünün ise sadece duyulur ısıyı çekmek için kullanmasına yol açacaktır. Evaporatör petekleri üzerinden kuru hava geçeceğinden serpantin peteklerinde enerji kaybına neden olan buzlanma ve defrost problemi de yaşanmayacaktır [5]. Sıvı desikant sisteminin kullanılması ile klima santrallerinin daha küçük kapasite tasarlanmasının önü açılacaktır. Aynı zamanda bu durum hem ilk yatırım maliyetine hem de düşük işletme giderlerine sebep olacaktır [6]. Konvansiyonel buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemlerinde havanın gizli ısını, yani nemi, gidermek için havayı çığ noktasının altına kadar soğutmak gerektiğinden havanın nemi alınırken hem yüksek miktarda elektrik enerjisi harcanmasına, hem de soğutma sisteminin COP değerinin düşmesine sebep olmaktadır [7]. Fakat sıvı desikant nem alma sistemlerinde havanın nemi sıvı desikant çözeltisi yardımıyla soğutulur ve bu şekilde havanın gizli ısı, enerji harcanmadan veya çok az enerji harcanarak duyulur ısıya dönüştürülmüş olur. Sıvı desikant nem alma sistemlerinin konvansiyonel buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemleriyle beraber kullanılması durumunda (hibrit sistemler), Ahmed vd. [8] tarafından sistem veriminin (COP) %50 daha fazla olabileceği ortaya konulmuştur. Sıvı desikant nem alma sistemlerinde rejenerasyon işlemi atık ısı, güneş enerjisi, jeotermal enerji vb. kaynaklarla yapıldığında

elde edilen sistem verimi ve enerji tasarrufu daha yüksek olmaktadır [9]. Bazı araştırmacılar ise rejenerasyon işlemi için hibrit sistemlerde yoğunlaştırıcuda atılan ısıyı kullanmışlardır [10]. Sıvı desikant nem alma sistemlerinde absorber ve rejeneratör kulelerinde kütle transferi önemli bir sorun olup, bu sebeple kütle transferini arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda bazı araştırmacılar rastgele dolgu kuleleri önerirken bazıları ise biçimlendirilmiş dolgu kuleleri üzerinde çalışmışlardır. Örneğin Longo ve Gasparella [11] yaptıkları çalışmada, sıvı desikant nem alma sisteminde hem biçimlendirilmiş dolgu malzemesi hem de rastgele dolgu malzemesi kullanıp sistemin deneysel analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda rastgele dolgu malzemesinin rejenerasyon performansının biçimlendirilmiş dolgu malzemesine göre %20-%25 daha fazla olduğunu fakat biçimlendirilmiş dolgu malzemesi kullanıldığında kulede hava basınç kaybının %65 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Potnis ve Lenz [12], biçimlendirilmiş ve rastgele dolgu malzemeleriyle sıvı desikant nem alma sisteminde deneysel analiz gerçekleştirmişler ve rastgele dolguların kütle transferi miktarını %50 daha fazla bulmuşlardır. Bunlara benzer birçok çalışmada rastgele dolguların kütle transferi açısından biçimlendirilmiş dolgulara göre daha iyi performans gösterdiği, fakat kulelerde basınç kaybının biçimlendirilmiş dolgu kullanıldığında daha az olduğu ortaya konulmuştur [13].

Bu çalışmada, absorber ve rejeneratör kulelerinde, dolgu malzemesi olarak, biçimlendirilmiş polikarbon levhalar kullanılmış bir sıvı desikant nem alma sistemi tasarlanarak termodinamik analizi deneysel olarak yapılmıştır. Desikant-su çözeltisi konsantrasyon oranı arttıkça, çözeltinin yüzey su buharı kısmi basıncı düşeceğinden, su buharı kısmi basıncı yüksek olan nemli havadan nem çekme oranı da artacaktır. Yüksek konsantrasyon oranlarında yüksek verimler elde edilebilecek olmasına rağmen, konsantrasyon oranının artması beraberinde istenmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Bunlar, öncelikle desikant malzemenin (LiBr) maliyetinin yüksek oluşu ayrıca çözeltinin ısı eşanjörleri ve dar kesitlerde kristalleşmesi gibi problemler sayılabilir. Literatürde en yaygın kullanım olan konsantrasyon oranının %40 ile %45 arasında tutulması optimum olarak kabul edilmektedir [9]. Bu nedenle deneysel çalışmada desikant sıvı karışımının konsantrasyon oranı %43 olarak alınmıştır. Bu çalışmada sıvı desikant olarak, kütleye %43'lük lityum bromür su çözeltisi kullanılarak, absorber ve rejeneratör kulelerinin nem alma/uzaklaştırma verimi ve entalpi verimlerinin yanı sıra kulelerde havanın duyulur ısı oranları hesaplanmıştır.

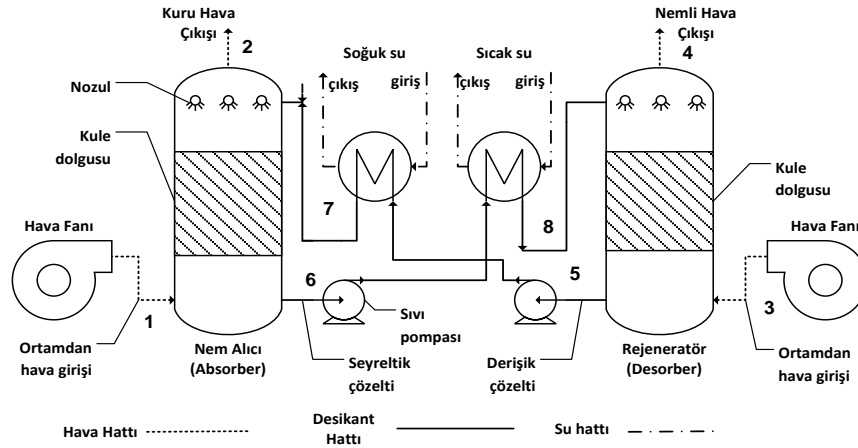
2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada imal edilen sıvı desikant nem alma sistemi, şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi sistem iki adet hava fanından, absorber ve rejeneratör kulelerinden, iki adet ısı eşanjöründen ve iki adet sıvı pompasından oluşmaktadır.

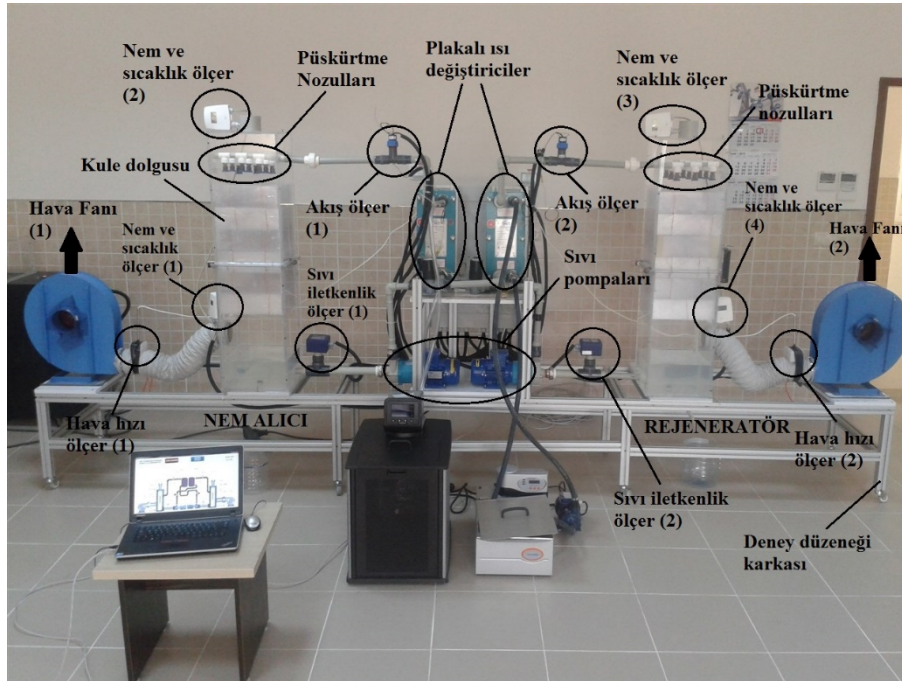
Şekil 1’de, (1) noktasında hava fanı yardımıyla absorbere giren nemli hava, nemi alındıktan sonra kuru bir şekilde (2) noktasından çıkar. Havadan nem alarak seyreltik hale gelen sıvı desikant çözeltisi, (6) noktasındaki sıvı pompası yardımıyla rejeneratöre gönderilir. Seyreltik sıvı desikant, rejeneratöre girmeden önce plakalı ısı değiştiricide ısıtılır (8). Rejeneratörde, hava fanı ile (3) noktasında ortamdaki alınan hava ile temas eden seyreltik çözelti, havaya içerisindeki su buharını bırakır. Çözeltiden nem alan hava ise (4) noktasında nemli olarak rejeneratörü terk eder. Derişik hale gelen fakat yüzey buhar basıncı hala yüksek olan sıvı desikant çözeltisi ise (5) noktasındaki sıvı pompası yardımıyla soğutulmak üzere ısı değiştiriciye gönderilir. Burada soğutulmuş yüzey buhar basıncı düşürülen çözelti, yeniden kullanılmak üzere absorbere gönderilir (7). Deney düzeneği, ölçüm cihazları ve ölçüm noktaları Şekil 2’de

gösterilmiştir. Absorber ve rejeneratör kuleleri, şeffaf pleksiglas levhaların, kule boyutları 30x30x120 cm olacak şekilde, kloroform yapıştırıcısıyla birleştirilmesiyle imal edilmiştir. Pleksiglas levhanın, cam kadar saydam olması, birçok korozyif malzemeye dayanımının olması ve kolay işlenebilirliği sistemde tercih edilme sebepleridir.

Absorberde ve rejeneratörde dolgu malzemesi olarak 30° kanal açılı polikarbon levhalar kullanılmıştır. Polikarbon levhaların hazırlanışı ve kulelerin içindeki görünümü ise sırasıyla Şekil 3’te, sağda ve solda gösterilmiştir. Şekil 3’te görülebildiği gibi levhalar kuleye kanalları birbirine çapraz olacak şekilde yerleştirilmiştir. Burada amaç sıvı desikant ile havanın temas yüzeyini ve temas süresini arttırmaktır. Isı ve kütle transferinin gerçekleştiği kanal yüzey alanının (m^2), bu yüzey alanı oluşturan cismin toplam hacmine (m^3) oranına



Şekil 1. Önerilen Sıvı desikant nem alma sisteminin şematik gösterimi (Schematic representation of purposed liquid desiccant dehumidification system)



Şekil 2. Deney düzeneği ve ölçüm noktaları (Sensors on experimental rig)



Şekil 3. Polikarbon levhaların hazırlanması (solda) ve kulelerin içindeki görünümü (sağda)
(Preparation of polycarbonate plates (left) and appearance of polycarbonate plates in columns (right))

“Yüzey Alanı Yoğunluğu”, Isı ve kütle transferinin gerçekleştiği ve akışkanların (hava-desikant) içinden geçtiği kanal hacmin (m^3), cismin toplam hacmine (m^3) oranı ise “gözeneklilik değeri” olarak tarif edilmektedir. Kullanılan polikarbon levhalardan oluşan kulenin yüzey alanı yoğunluğu $637 \pm 9 \text{ m}^2/m^3$, gözeneklilik değeri ise $\%87,6 \pm 1,3$ olarak hesaplanmıştır.

3. SİSTEM PERFORMANSININ HESAPLANMASI (CALCULATION OF SYSTEM PERFORMANCE)

Nem alma sistemlerinin performansında en önemli kriterlerden bazıları nem alma verimi, entalpi verimi ve havadan alınan gizli ısı miktarı olarak gösterilebilir. Bu sebeple bu bölümde sözü geçen parametrelerle ilgili absorber ve rejeneratör için ortak eşitlikler verilmiştir. Hesaplamalar EES [14] yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sistemde absorberin ve rejeneratörün nem alma / uzaklaştırma verimi Eş. 1 ile tarif edilmiştir [15]:

$$\omega_{verim} = 100 * \frac{\omega_g - \omega_c}{\omega_g - \omega_{ge}} \quad (1)$$

Eş. 1’deki ω_{ge} değeri, sıvı desikantın (LiBr-Su) absorberdeki veya rejeneratördeki eş değer nem oranı olup Eş. 2 ile hesaplanmıştır:

$$\omega_{ge} = 0.622 \frac{P_{w,s}}{P_{atm} - P_{w,s}} \quad (2)$$

Eş. 2’deki $P_{w,s}$ değeri ise, absorberde veya rejeneratörde sıvı desikant (LiBr-Su) çözeltisinin kısmi buhar basıncı olup, EES programı kütüphane arşivi kullanılmıştır. Sistemde absorberin ve rejeneratörün entalpi verimleri ise Eş. 3 ile hesaplanmıştır:

$$h_{verim} = 100 * \frac{h_g - h_c}{h_g - h_s} \quad (3)$$

h_s değeri, sıvı desikant (LiBr-Su) çözelti sıcaklığındaki doymuş havanın entalpisi olup, hesaplamalarda yine EES programından faydalanılmıştır. Absorberdeki ve rejeneratördeki havanın duyulur ısı oranı ise Eş. 4 ile tarif edilmiştir:

$$SHR = c_p * \frac{T_c - T_g}{h_c - h_g} \quad (4)$$

c_p değeri ise absorber/rejeneratör kulesindeki havanın ortalama özgül ısı olup Eş. 5 ile hesaplanmıştır:

$$c_p = \frac{c_{p,g} + c_{p,\xi}}{2} \quad (5)$$

4. DENEYSEL HATA ANALİZİ (EXPERIMENTAL ERROR ANALYSIS)

Deneysel verileri kullanarak yapılan hesaplamalarda deney ölçüm cihazlarından kaynaklanan hatalar mevcuttur. Ölçülen her bir büyüklüğün (sıcaklık, hız, nem vb.) ölçümde kullanılan ölçüm cihazlarının hatası üretici firma tarafından verilmektedir. Ölçüm aletleri ile ölçülen büyüklükleri kullanarak hesaplanan değerlerdeki toplam hata hesaplanabilmektedir [16].

Deney düzeneği sisteminde havanın hızını KIMO-CTV210 ($\pm\%0,3$ hassasiyet) sensörü ile, sıvı hızları GF Signet Capteur 515 ($\pm\%0,5$ hassasiyet) sensörü ile, havanın kulelere giriş-çıkış nem ve sıcaklıkları Vaisala HMT120 ($\pm\%1,5$ RH ve $\pm 0,2^\circ\text{C}$ hassasiyet) sensörü ile ölçülmektedir. Isı değiştiricilere giren/çıkan soğutma ve ısıtma suyunun sıcaklıkları ise K tipi ($\pm\%2,2^\circ\text{C}$ hassasiyet) ısı çifti ile ölçülmektedir. Herhangi bir deneyde birden çok ölçülen deneysel büyüklük ile hesaplanan değer R ise, $R=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde olup, burada x_i ölçülen bağımsız değişkenleri göstermektedir. Bu durumda, R büyüklüğünün ölçüm cihazlarından kaynaklanan toplam hatası Eş. 6 ile hesaplanmıştır.

$$U_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} u_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

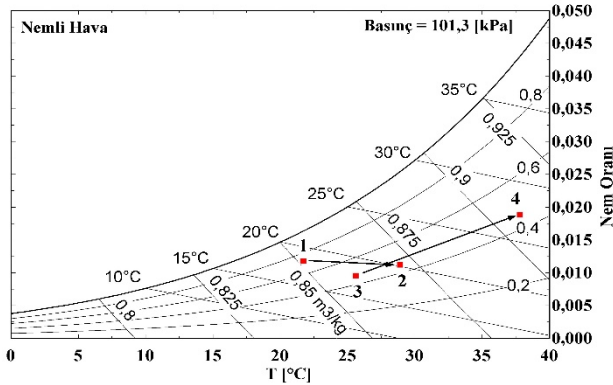
Burada, u_i değerleri ölçüm cihazlarının hatasını yani cihazların ölçüm hassasiyetini göstermektedir. Hesaplanan R büyüklüğünün yüzde bağıl hatası (belirsizlik değeri) ise Eş. 7 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_R(\%) = 100 * \left(\frac{U_R}{R} \right) \quad (7)$$

Bu çalışmada, ölçülen büyüklüklerle hesaplanan tüm değerlerin deneysel bağıl hataları, EES programı belirsizlik modülü kullanılarak hesaplanmıştır.

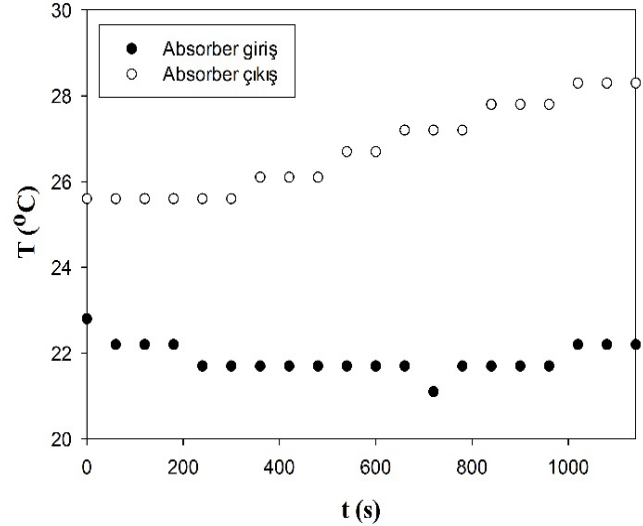
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Sistemin performansı daha önce belirtilen nem alma / uzaklaştırma verimi, entalpi verimi ve duyulur ısı oranları açısından absorber ve rejeneratör için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Deneyde belirlenen ve ölçülen diğer parametreler ise Tablo 1’de gösterilmiştir. Sistemde gerçekleşen nem alma ve nem uzaklaştırma işlemleri Şekil 4’teki psikrometrik diyagramda gösterilmiştir. Diyagramda, yatay eksen hava sıcaklığını dikey eksen ise nem oranını göstermektedir. (1) ve (2) noktaları arasında nem alma işlemi (3) ve (4) noktaları arasında ise nem uzaklaştırma işlemi gerçekleşmektedir. Bu sebeple (1) noktası absorber kule girişini, (2) noktası absorber kule çıkışını, (3) noktası rejeneratör girişini ve (4) noktası rejeneratör çıkışını göstermektedir.



Şekil 4. Nem alma ve rejenerasyon işlemlerinin psikrometrik diyagramda gösterimi
(Presentation of dehumidification and regeneration processes in psychrometric diagram)

McNevin vd. [17] yapmış oldukları deneysel çalışmada, absorber nem alma verim değerlerinde %28-32 arasında sonuçlar elde etmişlerdir. Jain vd. [18] sıvı desikant çözeltisi ile yaptıkları deneylerde nem alma verimini %25-44 arasında değiştiğini belirtmektedirler. Koronaki vd. [15] ise yaptığı teorik çalışmada sıvı desikant çözeltisi ile absorber nem alma verimini yaklaşık %15-30 arasında olacağını bulmuşlardır. Yapılan bu deneysel çalışma, deneysel ve teorik sonuçları ile karşılaştırıldığında literatür ile uyumlu olduğunu görülmektedir.



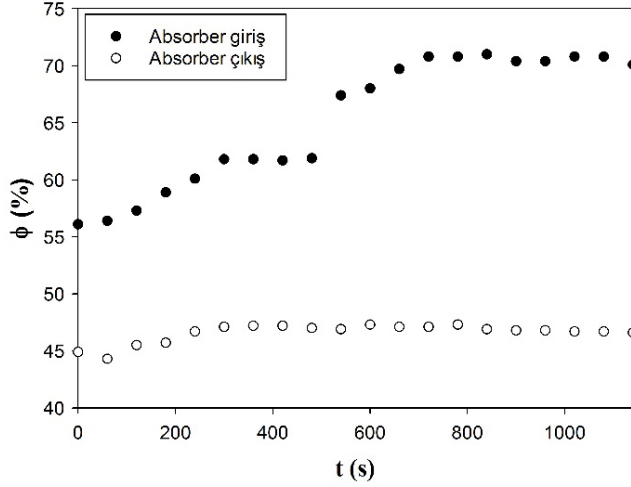
Şekil 5. Absorberde hava sıcaklığının zamanla değişimi
(Variation of air temperature in absorber with time)

Şekil 5’te absorber girişindeki ve çıkışındaki hava sıcaklıklarının zamanla değişimi gösterilmiştir. Absorber girişinde (T_1) hava sıcaklığı ortalama 22°C olarak ölçülmüştür. Fakat kule boyunca hava, kendisinden sıcak olan çözeltiyle temas ettiğinden ve LiBr çözeltisinin havadan nem almasıyla bir miktar daha ısınması sonucu çıkış sıcaklığı (T_2) artmaktadır. Kule çıkışındaki hava sıcaklığı 26-28°C aralığında ölçülmüştür.

Tablo 1. Deneysel parametreler (Experimental parameters)

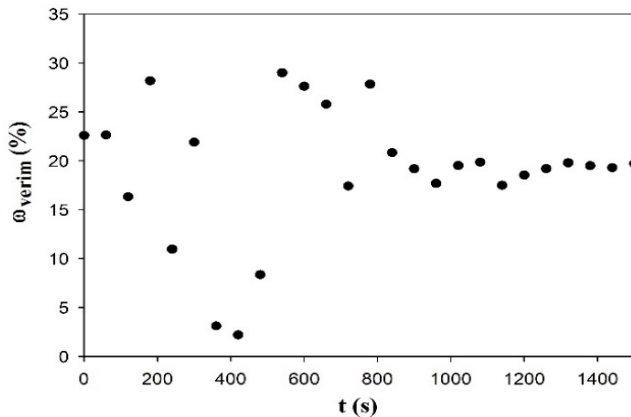
Parametre adı	Ölçülen/Belirlenen Değer
Sıvı desikant	Kütlece %43 LiBr Çözeltisi
Kule dolgu malzemesi	30°'lik 100x300x6 mm Polikarbon Levhalar
Dolgu yüksekliği	60 cm
Ortalama hava hızı (absorber)	4,6 m/s
Ortalama hava hızı (rejeneratör)	4,6 m/s
Ortalama hava kütleli debisi	0,128 kg/s
Ortalama desikant kütleli debisi	1,979 kg/s
Hava fanı dönme frekansı	20 Hz
Sıvı pompası dönme frekansı	20 Hz
Soğutma suyu ortalama giriş/çıkış sıcaklıkları	22,8/32,2°C
Isıtma suyu ortalama giriş/çıkış sıcaklıkları	59,1/50,2°C
Ortalama çözelti sıcaklığı (absorber)	31,2°C
Ortalama çözelti sıcaklığı (rejeneratör)	45,8°C

Şekil 6'da ise havanın absorber kule girişteki bağıl nemi ile çıkıştaki bağıl neminin zamanla değişim grafiği gösterilmiştir. Deney başlangıcında giriş ve çıkış havasının bağıl nemi, sistem dengeye ulaşmaya kadar bir miktar değişmiştir. Deney başladıktan sonra havanın girişteki bağıl nemi yaklaşık %55'ten %70 seviyelerine çıkmasına rağmen, kuledeki nem alma işlemi %45 seviyelerinde sabit kalmıştır. Bu olay absorberin havanın giriş nem değerinden etkilenmeden dengeli durumda çalıştığını göstermektedir.

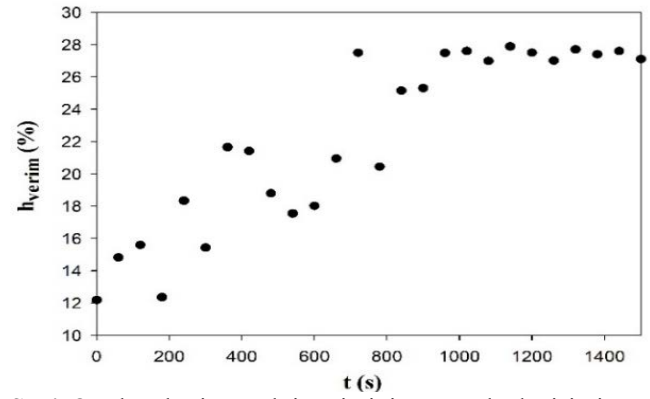


Şekil 6. Absorberde bağıl nemin zamanla değişimi
(Variation of relative humidity in absorber with time)

Şekil 7'de ise absorberin nem alma veriminin zamanla değişimi gösterilmiştir. Nem alma verimi Eşitlik (1) ile hesaplandığından giriş ve çıkış havasının mutlak nem miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Kuleye giren havanın nem miktarının değişimi absorberin nem alma veriminin düzensiz olmasına sebep olmuştur. Kuleye giren havanın nemi 800-1000 saniye sonra dengeye ulaştığında nem alma verimi de diğer parametreler gibi dengeye ulaşmış ve küçük dalgalanmalarla %15-20 arasında olduğu tespit edilmiştir. Absorberin, Eşitlik (3) ile tarif edilen, entalpi veriminin zamanla değişimi grafiği ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Entalpi verimi, diğer parametrelerde olduğu gibi, ilk başlarda kararsız olarak seyretmiş daha sonra %26-28 aralığında küçük değişimlerle dengeye ulaşmıştır.

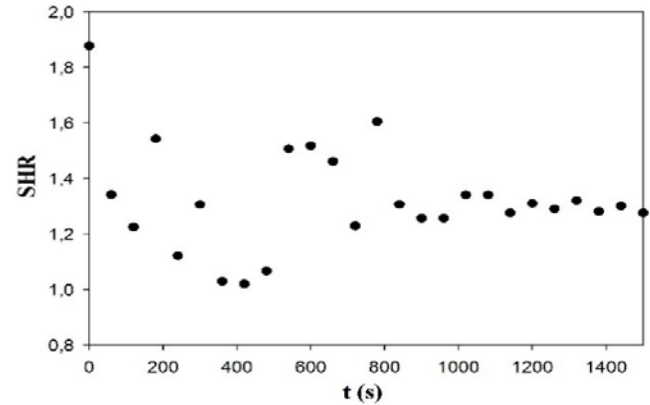


Şekil 7. Absorberin nem alma veriminin zamanla değişimi
(Variation of dehumidification efficiency of absorber with time)

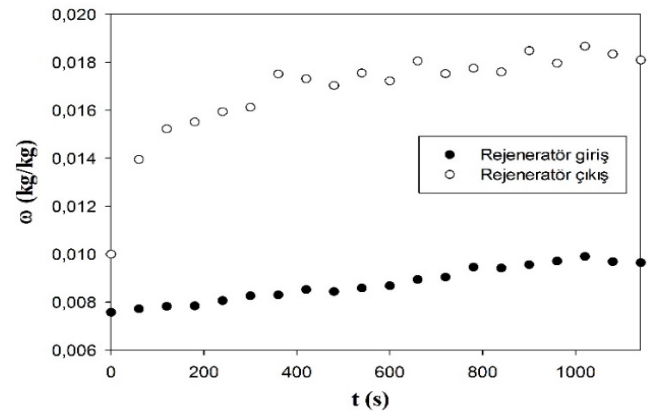


Şekil 8. Absorberin entalpi veriminin zamanla değişimi
(Variation of enthalpy efficiency of absorber with time)

Şekil 9'da absorberde duyulur ısı oranının zamanla değişim grafiği gösterilmiştir. Duyulur ısı oranı, absorber kulesinde sistem dengeye ulaştığında 1,2-1,3 arasında değişim göstermektedir. Duyulur ısı oranının birden büyük değerler alması, LiBr çözeltisi havadan nem alırken ortama ısı vermesi ve havanın nem miktarının azalması ile gizli ısının düşmesi neden gösterilebilir. Rejenere edildikten sonra soğutulmak üzere ısı değiştiricisine gönderilen sıvı desikantın, ısı değiştiricide daha düşük sıcaklıklara soğutulabilmesiyle bu durumun önüne geçilebilecektir.

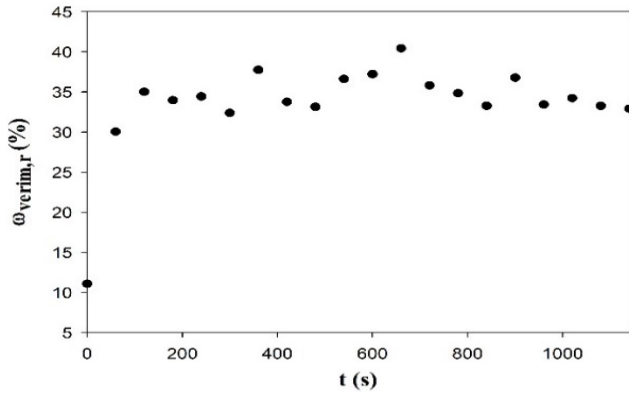


Şekil 9. Absorberde havanın duyulur ısı oranının zamanla değişimi
(Variation of sensible heat ratio in absorber with time)



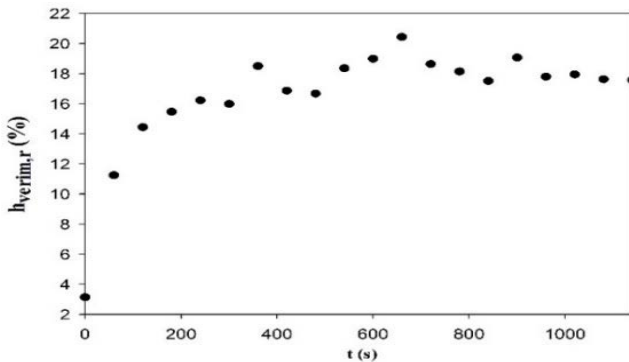
Şekil 10. Rejenaratörde havanın mutlak neminin zamanla değişimi
(Variation of absolute humidity in regenerator with time)

Rejeneratöre giren ve çıkan havanın mutlak neminin zamanla değişimi grafiği Şekil 10'da gösterilmiştir. Giriş havası mutlak neminde, ω_3 , sıcaklık, basınç ve bağıl nem miktarı değişmediğinden beklenildiği gibi, sistem kararlı hale geldikten sonra, çok büyük bir değişiklik olmamıştır. Buna karşın sıcak desikant çözeltisiyle temas ederek çözülden bir miktar su buharı olarak çıkan havanın mutlak nemi giriş havasına göre yüksek olmuştur. Rejeneratöre giren havanın mutlak nem değeri yaklaşık 0,009 kg/kg iken, rejeneratörden çıkan havanın mutlak nem değeri ise yaklaşık 0,018 kg/kg olarak hesaplanmıştır. Şekil 11'de ise rejeneratörün nem uzaklaştırma veriminin zamanla değişim grafiği gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi sistem kararlı hale geldiğinde rejeneratörün nem uzaklaştırma verimi %35 civarında bulunmuştur.



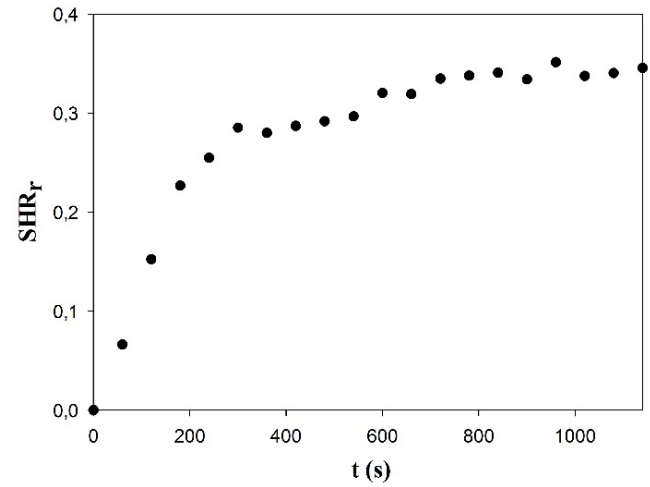
Şekil 11. Rejeneratörün nem uzaklaştırma veriminin zamanla değişimi
(Variation of humidification efficiency of regenerator with time)

Rejeneratörün entalpi veriminin zamanla değişim grafiği ise Şekil 12'de gösterilmiştir. Entalpi verimi ifadesi Eşitlik (3) ile hesaplanıp, rejeneratörde çıkan havanın entalpisi (h_c) ve havanın sıvı desikant çözeltisi sıcaklığındaki entalpisi (h_s), giren havanın entalpisinden (h_g) büyük olduğundan entalpi verimi düşük değerler almıştır. Burada sözü geçen h_s değeri, h_c değerine yaklaştıkça doğal olarak entalpi verimi de artacaktır. Sıvı desikantın rejeneratöre girmeden önce ısı değiştiricide daha yüksek sıcaklıklara çıkarılması yani daha yüksek sıcaklıklarda rejeneratöre edilmesi rejeneratör için h_s değerini h_c değerine yaklaştıracaktır. Bu deney için entalpi verimi değeri sistem dengeye ulaştığında yaklaşık %18 bulunmuştur.



Şekil 12. Rejeneratörün entalpi veriminin zamanla değişimi
(Variation of enthalpy efficiency of regenerator with time)

Şekil 13'te rejeneratörde havanın duyulur ısı oranının zamanla değişimi gösterilmiştir. Sıvı desikant çözeltisinin rejeneratöre girdiğinde sıcak olması ve havanın bu sıvı desikanttan su buharı ve ısı alması ile havanın gizli ısını arttırmıştır. Bu sebeple duyulur ısı oranı rejeneratör için bu deneyde düşük değerler almış, sistemin kararlı hale gelmesiyle yaklaşık 0,35 olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanan büyüklüklerin deneysel hata analizi Eşitlik (6) ve (7) kullanılarak EES programı yardımı ile yapılmıştır. Buna göre, hesaplamalarda en yüksek bağıl hata (belirsizlik) %5 değerinin altında olup, şu şekildedir. Absorber ve rejeneratörde nem alma verimi (ω_{verim}) bağıl hatası sırasıyla %3,8 ve %5,0; entalpi verimi (h_{verim}) bağıl hatası sırasıyla %1,3 ve %2,7; duyulur ısı oranı (SHR) bağıl hatası sırasıyla %4,1 ve %4,9 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 13. Rejeneratörde havanın duyulur ısı oranının zamanla değişimi
(Variation of sensible heat ratio in regenerator with time)

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, bir sıvı desikant nem alma sistemi tasarlanarak sistemdeki absorber ve rejeneratör için, nem alma/uzaklaştırma verimi, entalpi verimi ve duyulur ısı parametrelerine göre ayrı ayrı performans göre analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır: Absorber ve rejeneratör kulelerinin nem alma/uzaklaştırma verimleri aynı sınır şartlarında sırasıyla yaklaşık %15 ve %35 bulunmuş olup, rejeneratör kulesi bu parametre açısından daha iyi performans göstermiştir. Buna neden olarak çözeltinin rejeneratöre girmeden önce yüksek sıcaklıklara çıkarılabilmesi fakat absorbere girmeden önce çok düşük sıcaklıklara soğutulmaması gösterilebilir. Çözeltinin absorbere girmeden önce daha düşük sıcaklıklara soğutulabilmesi halinde absorberin nem alma verimi arttırılabilecektir. Absorber ve rejeneratör kuleleri, entalpi verimi için göz önüne alındıklarında ise, absorber kulesinin daha iyi olduğu görülebilmektedir. Entalpi verimleri absorber ve rejeneratör kuleleri için sırasıyla %28 ve %18 dolaylarında bulunmuştur. Çözeltinin düşük sıcaklıklarda rejeneratöre edilmesi rejeneratörün entalpi verimini arttıracaktır.

Fakat bu uygulama rejeneratörün nem uzaklaştırma verimince ve nem uzaklaştırma miktarında negatif etki yaratacaktır. Rejeneratör kulesinde ise hava, yüksek sıcaklıktaki sıvı desikanttan hem bir miktar nem hem de ısı almıştır. Bu sebeple havanın gizli ısısı yükselmiş ve duyulur ısı oranı 0,35 dolaylarında bulunmuştur. Rejeneratör kulesinin absorber kulesine göre duyulur ısı oranı açısından daha performanslı çalıştığı söylenebilir. Bu sonuçlar, sistemin biraz daha geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Nem alma sistemlerinde, sistem performansına birçok parametre etki etmektedir. Tasarlanan sistemde kulelerde sıvı desikant-hava temas alanını arttırmak, çözeltiyi absorbere girmeden önce daha düşük sıcaklıklara soğutmak, kulelerdeki hava hızını ve sıvı desikant debisini optimum seviyeye getirmek, sistem performansını arttıracaktır.

7. SİMGELER (SYMBOLS)

cp	Özgül ısı, (kJ/kg K)
h	Entalpi, (kJ/kg)
P	Basınç, (kPa)
SHR	Duyulur ısı oranı
T	Sıcaklık, (°C)

Alt İndis (Subscript)

atm	Atmosfer
ç	Absorber/rejeneratör çıkan
g	Absorber/rejeneratör giren
r	Rejeneratör
1	Absorber girişi
2	Absorber çıkışı
3	Rejeneratör girişi
4	Rejeneratör çıkışı

Yunan Harfleri (Greek Letters)

ω	Mutlak nem, (kg su/ kg kuru hava)
ϕ	Bağıl nem, (%)
ε_R	Bağıl hata, (%)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında TÜBİTAK tarafından 114M151 no'lu proje ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Luo Y., Yang H., Lu L., Qi R., A review of the mathematical models for predicting the heat and mass transfer process in the liquid desiccant dehumidifier, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 587-599, 2014.
2. Mei L., Dai Y.J., A technical review on use of liquid-desiccant dehumidification for air-conditioning application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 662-689, 2008.
3. Demir V., Gunhan T., Sencan S.A., Ekren O., Bilgen H., Erek A., Experimental investigation of cooling

- performance of milk cooling tank with the vapor compressed and solar absorption (LiCl-H₂O) cooling system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (1), 29-37, 2016.
4. Aktaş M., Gönen E., Bay leaves drying in a humidity controlled heat pump dryer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (2), 433-441, 2014.
5. Atılğan A.İ., Türkmen U., Comparison of exergy and thermoeconomic analysis for variable refrigerant flow (vrf) system with different refrigerants, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2), 343-353, 2017.
6. Ünal Ş., Erdiñç M.T., Kutlu Ç., Thermodynamic analysis of a refrigeration system with double evaporators and ejector, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 1039-1047, 2016.
7. Oruç V., Devecioğlu A.G., Effect on the thermodynamic performance using N20 and R444B refrigerants instead of R22 in a vapor compression refrigeration system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31 (4), 859-869, 2016.
8. Ronghui Qi., Lin L., Yu H., Energy performance of solar-assisted liquid desiccant air-conditioning system for commercial building in main climate zones, *Energy Conversion and Management*, 88, 749-757, 2014.
9. Liu J., Zhang T., Liu X., Jiang J., Experimental analysis of an internally-cooled/heated liquid desiccant dehumidifier/regenerator made of thermally conductive plastic, *Energy and Buildings*, 88, 75-86, 2015.
10. Cheng Q., Zhang X., Review of solar regeneration methods for liquid desiccant air-conditioning system, *Energy and Buildings*, 67, 426-433, 2013.
11. Mohan B.S., Tiwari S., Maiya M. P., Experimental investigations on performance of liquid desiccant-vapor compression hybrid air conditioner, *Applied Thermal Engineering*, 77, 153-162, 2015.
12. Khalid Ahmed C.S., Gandhidasan P., Al-Farayedhi A.A., Simulation of a hybrid liquid desiccant based air-conditioning system, *Applied Thermal Engineering*, 17 (2), 125-134, 1997.
13. Gommed K., Grossman G., Experimental investigation of a liquid desiccant system for solar cooling and dehumidification, *Solar Energy*, 81, 131-138, 2007.
14. She X., Yin Y., Zhang X., Thermodynamic analysis of a novel energy-efficient refrigeration system subcooled by liquid desiccant dehumidification and evaporation, *Energy Conversion and Management*, 78, 286-296, 2014.
15. Longo G.A., Gasparella A., Experimental analysis on desiccant regeneration in a packed column with structured and random packing, *Solar Energy*, 83, 511-521, 2009.
16. Potnis S. V., Lenz T. G., Dimensionless mass transfer correlations for packed-bed liquid desiccant contactors, *Industrial and Engineering Chemistry*, 35, 4185-4193, 1996.

17. Jain S., Bansal P.K., Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems, *International Journal of Refrigeration*, 30, 861-872, 2007.
18. Klein S.A., *Engineering Equation Solver*, Academic Version 9.901, F-Chart Software, 2015.
19. Koronaki I.P., Christodoulaki R.I., Papaefthimiou V.D., Rogdakis E.D., Thermodynamic analysis of a counter flow adiabatic dehumidifier with different liquid desiccant materials, *Applied Thermal Engineering*, 50, 361-373, 2013.
20. ASME PTC 19.1-2013, *Test Uncertainty: performance test codes*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014.
21. McNevin C., Harrison S.J., Multi-stage air conditioner: Experimental performance and model development, *Building and Environment*, 114, 45-55, 2017.
22. Jain S., Tripathi S., Das R.S., Experimental performance of a liquid desiccant dehumidification system under tropical climates, *Energy Conversion and Management*, 52, 2461-2466, 2011.

