

## Membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı ve deneysel olarak incelenmesi

### The design and experimental investigation of membrane-based tubular liquid desiccant dehumidification system

Bariş KAVASOĞULLARI<sup>1\*</sup>, Ertuğrul CİHAN<sup>2</sup>, Hasan DEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uzay Mühendisliği, Havaçılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Sivas, Türkiye.

bkavasogullari@sivas.edu.tr

<sup>2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Osmaniye, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye.

ertugrul.cihan@osmaniye.edu.tr

<sup>3</sup>Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye.

demirhasan.hd@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 22.04.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 16.08.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.79413

Kabul Tarihi/Accepted: 14.09.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı yapılmış ve sistemin nem alma performansı incelenmiştir. İmal edilen sistemde suni sosis kılıfı ve Tyvek® Solid olmak üzere iki farklı membran kullanılmış ve bu iki membran ile deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde havanın Reynolds (Re) sayısı değiştirilerek hava hızının sistemin performansına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca deneyler yapılırken ısı kamera ile membrandan görüntü alınarak membrandaki sıcaklık değişimi gözlenmiştir. Elde edilen deneysel verilere göre sistemin nem alma verimi, suni kılıf için 200 Re sayısında %4.5-6 aralığında, Tyvek® Solid için yine 200 Re sayısında yaklaşık %18.5 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Membran, Boru-tipi membran, Sıvı desikant, Nem alma, Verim.

#### Abstract

In this paper, membrane-based tubular liquid desiccant dehumidification system was designed, and its dehumidification performance was investigated. In the manufactured system, two different membranes, synthetic sausage casing and Tyvek® Solid were used. The air Reynolds number (Re) was varied during the experiments to investigate effect of air velocity on the system performance. In addition, temperature changes in the membrane were observed by images taken with thermal camera. According to the experimental data obtained, the dehumidification efficiency of the system was calculated in between 4.5-6% at 200 Re number for synthetic sausage casing and approximately 18.5% at the same Re number for Tyvek® Solid.

**Keywords:** Membrane, Tubular membrane, Liquid desiccant, Dehumidification, Efficiency.

## 1 Giriş

Konvansiyonel iklimlendirme ve soğutma sistemleri ozon tabakasına verdikleri büyük zararlarla ve küresel ısınmadaki önemli rolleriyle göze çarpmaktadırlar. Günümüzde iklimlendirme sistemleriyle ilgili araştırmalar, güneş enerjisi ve atık ısı gibi alternatif enerji kaynaklarıyla çalışabilen daha çevreci iklimlendirme sistemleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Sıvı desikant nem alma sistemleri, güneş enerjisi, jeotermal enerji veya endüstriyel proseslerden kaynaklanan atık ısı gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir ısı enerji kaynaklarından faydalanabildikleri için çevre dostu sistemlerdir. Sıcak ve nemli iklimlerde yaz aylarında, tüketilen enerjinin büyük bir kısmı, nem alma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip sistemlerin iklimlendirme sistemleriyle beraber kullanılarak gizli ısı yükünün sıvı desikant nem alma sistemleriyle, duyulur ısı yükünün iklimlendirme sistemleriyle giderilmesi durumunda, alış-veriş merkezi, konferans salonu ve hastane gibi kalabalık mekanlarda elektrik enerjisi tüketiminin %25-35 azaldığı literatürde hesaplanmıştır [1]. Bu tip sistemlerin en önemli dezavantajı ise sıvı desikant nem alma sistemlerinde, sıvı desikant çözeltisinin havayla doğrudan teması sebebiyle havaya tuz taşınımı ve hava-desikant temas yüzeyinin az olmasıdır [2].

İklimlendirme uygulamalarında, yukarıda sözü geçen olumsuzlukların üstesinden gelinebilmesi için son zamanlarda membranlı sıvı desikant nem alma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Membran, yarı-geçirgen özelliğinden dolayı, havayla desikant çözeltisini ayırarak havada bulunan su buharının çözeltiye geçmesine izin verirken çözeltinin havaya karışmasını engellemektedir. Bu şekilde hem sıvı desikant nem alma sistemlerinin sunduğu yüksek enerji tasarrufu ve yüksek iç hava kalitesi gibi avantajlardan faydalanılabilecek hem de yukarıda sözü geçen olumsuzlukların önüne geçilebilecektir.

Membranlı sıvı desikant nem alma sistemleri, ısı ve kütle geçişinin eş zamanlı gerçekleştiği karmaşık yapılarıdır. Bu tip sistemlerde gerçekleşen kütle geçişi, havadan alınan nem miktarına doğrudan etki ettiğinden araştırmacılar en çok bu konuya yoğunlaşmıştır. Membranlı sıvı desikant nem alma sistemlerinde paralel-plaka, eliptik ve silindirik olmak üzere üç tip tasarım öne çıkmaktadır. Min ve Su [3], paralel-plaka tipi membranlı sistemle yaptıkları çalışmada, membran özelliklerinin (su buharı difüzyonu, ısı iletim, su buharı soğurma sabiti, maksimum nem tutma kapasitesi) sistemin duyulur, gizli ve entalpi etkinliklerine etkisini incelemişlerdir. Zhang ve diğ. [4] yüzey-boru tipi membran kontaktöründe hava akış tipinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Reynolds

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

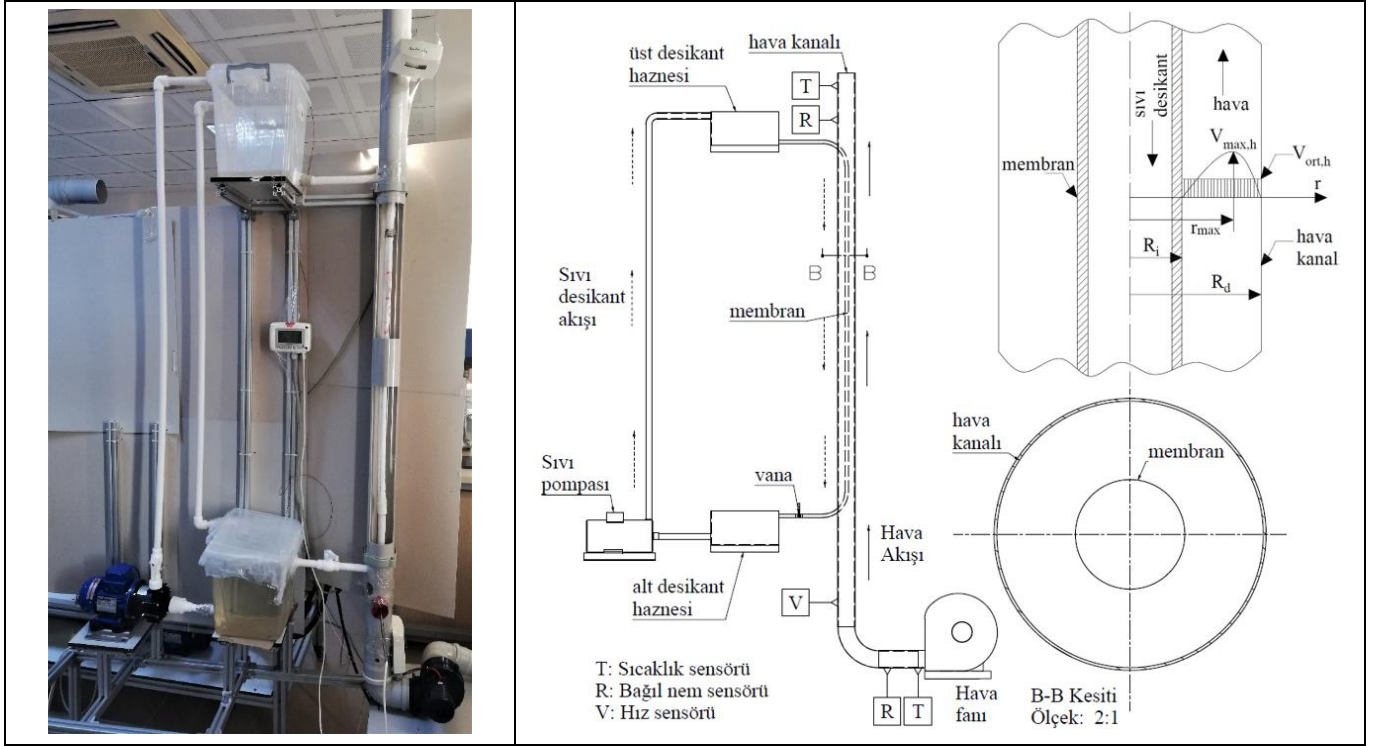
sayısının 35'ten büyük olduğu durumlarda çapraz akışta karşı akışa göre Nusselt ve Sherwood sayısının daha büyük olduğunu ve hava tarafı basınç düşümünün çapraz akışta daha az olduğunu ortaya koymuşlardır. Huang ve diğ. [5] ise diğer bir çalışmada paralel plakalı membranlı sıvı desikant nem alma sisteminde farklı en boy (membran) oranlarında Sherwood ve Nusselt sayılarının değişimini incelemişlerdir. Huang ve Yang [6] hava nemlendirme işlemi için tasarladıkları eliptik yüzey-boru tipi membranlı sistemin ısı geçişi performansını literatürdeki çalışmalara göre %0,15-26 daha düşük bulmuşlardır. Huang ve diğ. [7] bir başka çalışmada kazan-boru tipi nem alma sisteminde kullanılan membran geometrisinin (silindirik veya eliptik) etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, eliptik membranda kütle ve ısı geçişinin daha kötü olduğunu göstermiştir. Huang ve diğ. [8] sıvı desikant nem alma sistemi için geliştirdikleri kazan-boru tipi membranlı sistemin kütle taşımını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada membran olarak geliştirilmiş PVF (polivinil florür) kullanmışlar ve elde ettikleri sayısal analiz sonuçlarını yaptıkları deneylerle doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda, kütle ve ısı geçişini belirleyen Sherwood ve Nusselt sayılarının kademeli sıralamada düz sıralamaya göre daha büyük olduğunu göstermişlerdir. Abdel-Salam ve diğ. [9]-[10] ise TRNSYS simülasyon programını kullanarak paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant iklimlendirme sisteminin performans analizini yapmışlardır. Sistemin tasarım durumundaki Soğutma Tesir Katsayısı (STK) 0.68 olarak hesaplanmış, farklı iklim, çalışma ve tasarım koşullarında havanın duyulur ısı oranı değerleri ise 0.3 ve 0.5 arasında değişmiştir. Abdel-Salam [11] Doktora Tezi çalışmasında paralel-plaka tipi membranlı sıvı desikant nem alma sisteminin modelleyip ısı ve kütle geçişi analizini yapmıştır. Çalışmada, sistem performansının en fazla, transfer birimi sayısından (NTU), çözelti-hava ısı kapasite oranından ve hava giriş sıcaklık ve bağıl neminden etkilendiğini ortaya koymuştur. Das ve Jain [12] çapraz akışlı membranlı sıvı desikant sisteminde membran karakteristiklerinin, kontaktör tasarımının, akışkan hızlarının, ortam koşullarının ve sıvı desikant konsantrasyonunun sistem performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda sistem performansının önemli derecede membran karakteristiklerine, özellikle gözenekliliğine, gözenek çapına ve membran kalınlığına bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Keniar ve diğ. [13] nem kontrolü ve enerji tasarrufu için güneş enerjisi ile rejenere edilen membranlı sıvı desikant nem alma sisteminin çalışmışlardır. İmal ettikleri deney düzeneği ile sistemin geri ödeme süresini 7-8 yıl olarak hesaplamışlardır. Namwar ve diğ. [14] karşı akışlı membranlı sıvı-hava enerji değiştiricide sayısal sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmada sonuçlar, sistem etkinliğinin, NTU ve ısı kapasite hızları oranları (çözelti/hava) ile arttığını göstermiştir. Bai ve diğ. [15] paralel-plaka tipi membranlı nem alma sistemiyle yaptıkları nümerik ve deneysel çalışmada, NTU, çözelti ve hava giriş özelliklerinin sistemin gizli, duyulur ve toplam etkinliğine etkisini incelemişlerdir. Hava giriş sıcaklığı, farklı bağıl nem değerlerinde (%60, %65, %70, %75), 27 ile 36 °C arasında değiştirildiğinde gizli etkinliğin %2.42 değiştiğini belirlemişlerdir. Cihan ve diğ. [16] membranlı sıvı desikant iklimlendirme sistemi için modelledikleri boru tipi membranlı sıvı desikant nem alma sisteminin sayısal olarak analizini yapmışlardır. Yapılan analizde sistem performansı Re sayısına ve membranın en-boy oranına (L/D) göre incelenerek kütle geçişi için Re sayısına, L/D oranına ve Sc (Schmidt) sayısına bağlı eşitlik elde edilmiştir. Englart ve Rajska [17] çapraz akışlı

kazan boru tipi membranlı nem alma sisteminin deneysel ve sayısal olarak analizini gerçekleştirip, hava ve çözelti giriş ve akış şartlarının sistemin duyulur ve gizli etkinliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, duyulur ve gizli etkinliklerin çözelti sıcaklığının ve hava/çözelti kütle oranının artmasıyla azaldığını; duyulur etkinliğin giriş hava nem oranının artmasından olumsuz etkilendiğini tespit etmişlerdir. Wang ve diğ. [18] ise SiO<sub>2</sub> (Silikon dioksit) nanoakışkanlı CaCl<sub>2</sub> çözeltisi kullanılan kazan boru tipi membranlı nem alma sisteminin deneysel olarak enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada optimum nanoakışkan miktarının %1 oranında olduğu belirlenip, bu oranda nanoakışkan kullanımının gizli etkinliği %6 arttırdığı fakat sistemdeki ekserji yıkımının en yüksek değerine ulaştığını gözlemlemişlerdir. Cho ve diğ. [19], vakumlu kazan boru tipi membranlı iklimlendirme sistemiyle yaptıkları teorik çalışmada, sistemin enerji tüketiminin konvansiyonel iklimlendirme sistemine göre %8.2 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanında membranlı nem alma sisteminin, düşük STK değerinden dolayı, duyulur ısı gideriminde konvansiyonel sisteme göre enerji tüketiminin %7.7 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Li ve diğ. [20] oluşturdukları deney düzeneği ile paralel-plaka tipi sistemde dört farklı yoğun membranın hava ve su buharı geçirgenliklerini ve seçiciliklerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda, en yüksek su buharı geçirgenliği değerini  $4.27 \times 10^{-5}$  mol/(m<sup>2</sup>sPa) olarak Nafion 211 tip membran ile elde etmişlerdir. Bui ve diğ. [21] tasarladıkları kompozit membranlı kazan boru tipi nem alma sisteminin maksimum nem alma STK değerini 1.9 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca çalışmada 3-36 m<sup>3</sup>/h aralığındaki giriş hava debisinde sistemin havadaki nemin %86'sını alabildiğini belirlemişlerdir.

Bu çalışmada literatürde ilk defa, membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sisteminin tasarımı ve deneysel olarak performans analizi yapılmıştır. Literatürde çalışılmış olan membran plakalı ve kazan boru tipi membranlı sıvı desikant sistemleri küçük ölçekli sistemlerdir. Örneğin Wang ve diğ. [18] tasarladığı kazan boru tipi sistemde membran modülünün toplam çapı 50 mm olup, modülün içerisindeki membranların çapı 640 µm boyutlarındadır. Bu tip sistemlerin hem üretimi hem de iklimlendirme sistemlerine uygulanması zordur. Bu çalışma, büyük ölçekli membranlı boru tipi sistemlerle ilgili ilk deneysel çalışmadır. Tasarlanan sistemde kolay temin edilebilecek ve membranlı nem alma sistemlerinde daha önce kullanılmamış suni sosis kılıfı ve ticari Tyvek® Solid membranları kullanılmıştır. Yapılan deneysel araştırmada havanın Re sayısı 200 ile 2000 arasında değiştirilerek hava hızının sistemin nem alma verimine etkisi incelenmiştir.

## 2 Deneysel yöntem

Çalışmada tasarlanan membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sistemi deney düzeneği ve şematik çizimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem, hava fanından, sıvı pompasından, alt ve üst olmak üzere iki adet desikant haznesinden, PVC hava kanalından, boru tipi membrandan, PPRC boru ve boru elemanlarından oluşmaktadır. Bunlara ek olarak deney düzeneğine, havanın giriş/çıkış bağıl nem ve sıcaklık değerlerinin ölçülebilmesi için iki adet nem sensörü [22], hava hızı ölçümü için hız sensörü [23] ve desikantın sıcaklığının belirlenebilmesi için alt ve üst haznelere K-tipi ısı çifti [24] yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sistemi deney düzeneği ve şematik gösterimi.

Figure 1. Membrane-based tubular liquid desiccant dehumidification system experimental rig and schematical view.

LiCl-su çözeltisinin su buharı absorpsiyonu ekzotermik bir reaksiyon olduğundan nem alma işleminde membranın sıcaklığının artması beklenmektedir. Membrandaki bu sıcaklık değişiminin gözlemlenmesi için Testo 881 ısı kamera [25] ile membrandan görüntüler alınmıştır. Kullanılan ölçüm aletlerinin teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm aletlerinin teknik özellikleri.

Table 1. Technical detail of measurement devices.

| Ölçüm Aleti     | Ölçülen Parametre | Ölçüm Aralığı   | Hassasiyet |
|-----------------|-------------------|-----------------|------------|
| VAISALA         | Bağıl Nem         | 0-100 %         | ±%1.5      |
| HMT120          | Sıcaklık          | (-40)-(+80) °C  | ±0.2 °C    |
| KIMO-CTV210     | Hız               | 0-30 m/s        | ±%0.3      |
| K-tipi ısı çift | Sıcaklık          | 0-1100 °C       | ±%2.2      |
| Testo 881       | Sıcaklık          | (-30)-(+100) °C | ±2 °C      |

Deney düzeneğinde hava kanalı olarak dış çapı 75 mm olan PVC boru kullanılmıştır. Sıvı desikant çözeltisi ise 20 mm’lik PPRC borulardan akmaktadır. Sıvı pompası olarak korozyona dayanıklı “Gemecotti HTM 4 PP” marka manyetik kaplinli santrifüj pompa kullanılırken hava fanı olarak “TMC Salyangoz Blower (24V, 3679 L/dk.)” kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada giriş havası nemlendirilerek şartlandırılmıştır. Membranlı boru tipi nem alma deney düzeneği, Şekil 1’de görüldüğü gibi, karşıt akışa göre tasarlanmış olup, sıvı desikant, yerçekimi kuvvetinin etkisiyle, üst sıvı desikant haznesinden alt sıvı desikant haznesine doğru akarken hava, hava fanı yardımıyla, aşağıdan yukarıya doğru akmaktadır. Hava hızı, hava fanına bağlı DC motor sürücüsü ile kontrol edilirken, sıvı desikant akışı ise boruya yerleştirilen küresel vana ile kontrol edilmektedir. Uygulanan diğer deneysel prosedürler aşağıda listelenmiştir.

- Hava hızı, belirlenen Re sayısına karşılık gelen hız değerine ayarlanıp, sistemin nem ve sıcaklık olarak dengeye ulaşması için, yaklaşık 10 dk. süreyle sistemden sadece hava geçirilir,
- Sistemden sadece hava geçirilirken ısı kamera ile hava kanalının görüntüleri alınır,
- Sistem nem ve sıcaklık olarak dengeye ulaştığında sıvı pompası çalıştırılıp alt hazneden üst hazneye sıvı desikant çözeltisi gönderilir,
- Boruda bulunan vana kapatılarak üst haznede bir miktar sıvı desikant birikmesi sağlanır ve daha sonra vana bir miktar açılarak çözeltinin yukarıdan aşağıya doğru akması sağlanır. Bu şekilde deneye başlandıktan sonra belirli zamanlarda hava kanalının belirli noktasından ısı kamera yardımıyla görüntüler alınır. Bu işlemde, kamera, membranlı hava kanalının yaklaşık orta noktasına konumlandırılmış ve aynı zaman dilimi için çok sayıda görüntü alınmıştır. Alınan görüntüler daha sonra bilgisayar ortamında incelenmiş ve sonuçlarda en iyi çözünürlükteki görüntüler kullanılmıştır,
- Yaklaşık 60 dk. süreyle deney yapıldıktan sonra, SCADA merkezi denetim ve veri toplama sistemi yardımıyla, elde edilen deneysel veriler bilgisayara kaydedilip, sıvı pompası ve hava fanı kapatılarak hava ve sıvı desikant akışı kesilir. Vana tamamen açılarak üst haznede bulunan sıvı desikantın tamamen alt hazneye dönmesi sağlanır,
- Sıvı desikantın yoğunluğu deneye başlamadan önce ve sonrasında Rudolph 2910 [26] model yoğunluk ölçer ile ölçülmektedir.

## 2.1 Malzemeler

Yapılan çalışmada, %41-43 konsantrasyonunda LiCl (Acros organics, %99 saflıkta) çözeltisi kullanılmıştır. Deneylerde suni kılıf ve Tyvek® Solid olmak üzere iki farklı membran kullanılmıştır. Suni kılıf; gıda sektöründe, sosis, sucuk, salam vb. üretiminde doğal bağırsak yerine kullanılmaktadır. Kullanıldığı uygulamadan ötürü, üründe ağırlık kaybının azaltılması ve bozulmanın önlenmesi için, su buharı ve oksijen geçirgenliği düşüktür [27]. Deneyde kullanılan suni kılıf Şekil 2(a)'da gösterilmiştir. Suni kılıf silindirik şekilde temin edildiğinden herhangi bir müdahalede bulunulmadan deney düzeneğinde kullanılmıştır.

Tyvek® Solid ise Dupont markasının ürettiği membranın ticari adıdır. Genellikle yapı sektöründe su yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır. Bu membran, yüksek yoğunluklu polietilen malzemeden üretilmiş olup birim alanda 82 g kütle ve 220 µm kalınlığa sahiptir [28]. Tyvek® Solid Şekil 2(b)'de gösterilmiştir. Kullanılan membran, düz yaprak şeklinde temin edildiğinden, belirlenen çap ve uzunlukta, dikilip yapıştirılarak silindir haline getirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2(a): Suni kılıf ve (b): Tyvek solid membran.

Figure 2(a): Synthetic sausage casing and (b): Tyvek solid membrane.

## 2.2 Sistem performansının hesaplanması

Deneysel analizde, belirli  $Re$  sayılarında sistem performansı incelendiğinden, öncelikle söz konusu  $Re$  sayılarında kanaldaki ortalama hava hızının bulunması gerekmektedir.  $Re$  sayısı Eşitlik (1)'de eş değer çap kullanılarak tarif edilmiştir:

$$Re_h = \frac{\rho_h V_{ort} d_e}{\mu_h} \quad (1)$$

Burada,  $\rho_h$  ve  $\mu_h$  sırasıyla havanın yoğunluğu ve dinamik viskozitesidir. Eşitlik (1)'deki  $d_e$  değişkeni ise Eşitlik (2)'de verilmiştir:

$$d_e = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de  $S$  ifadesi, nemli havanın geçtiği kanalın kesit alanı olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$S = \pi(R_d^2 - R_i^2) \quad (3)$$

Verilen bir  $Re$  sayısında ortalama hız Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) kullanılarak bulunur. Deney düzeneğinde hız sensörü dairesel kanalın kesitine yerleştirildiğinden maksimum hız, yani  $V_{max}$  ölçülmektedir. Buna göre seçilen  $Re$  sayılarında, Eşitlik (1) kullanılarak, öncelikle ortalama hız hesaplanmış, daha sonra ortalama hız değeri kullanılarak maksimum hız bulunmuştur. Bu sebeple, maksimum hızın bulunabilmesi için, kanaldaki hız profilinin tanımlanması gerekmektedir. Laminar akış için, kanaldaki havanın hız profili Eşitlik (4)'te verilmiştir [29].

$$V_{z,h} = \frac{2V_{ort,h}}{M} \left[ 1 + \left( \frac{r}{R_d} \right)^2 + b \ln(r/R_d) \right] \quad (4a)$$

$$M = \left[ 1 + \left( \frac{R_i}{R_d} \right)^2 - b \right] \quad (4b)$$

$$b = \frac{\left( \frac{R_i}{R_d} \right)^2 - 1}{\ln(R_i/R_d)} \quad (4c)$$

Eşitlik (4a)'da elde edilen hız profilinin  $r$  değişkenine göre türevi alınarak sıfıra eşitlenmesi durumunda kanaldaki maksimum hızın yeri,  $r_{max}$ , hesaplanabilir.  $r_{max}$  değeri kullanılarak Eşitlik 4(a) ile havanın kanaldaki maksimum hızı,  $V_{max,h}$ , bulunur.

Sistemde havanın herhangi bir durumda mutlak nemi Eşitlik (5) ile hesaplanacaktır [30]:

$$\omega = 0.622 \frac{\phi P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te  $\phi$  ve  $P$  sırasıyla havanın bağıl nem ve basınç değeridir.  $P_{sat}$  ise nemli havanın doyma basıncı olup Antoine denkleminde bulunabilir:

$$P_{sat} = e^{A - \frac{B}{T+C}} \quad (6)$$

Burada  $A = 16.3872$ ,  $B = 3885.7$  ve  $C = 230.15$  olup su buharı için Antoine parametreleridir. Havadan çözeltiliye su buharı geçişi, çözeltilinin buhar basıncının havanın buhar basıncından düşük olması durumunda gerçekleşeceğinden, çözeltilinin buhar basıncı da önemli bir parametredir. Çözeltilinin buhar basıncı Conde [31] tarafından Eşitlik (7)'deki gibi verilmiştir:

$$P_{des} = P_{sat} * \alpha \left( \beta + \kappa \frac{T}{647.096} \right) \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitlikteki  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\kappa$  değerleri ise Eşitlik (8)'de tanımlanmıştır:

$$\beta = 2 - \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} \quad (8a)$$

$$\kappa = \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \quad (8b)$$



$$\alpha = 1 - \left[ 1 + \left( \frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{\frac{-(\xi-0.1)^2}{0.005}} \quad (8c)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki  $\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9$  değerleri Tablo 2'de verilmiştir [31].  $\xi$  ise sıvı desikant çözeltisinin konsantrasyonu olup Eşitlik (9) ile tanımlanmıştır.

$$\xi = \frac{m_{LiCl}}{m_{LiCl} + m_{su}} \quad (9)$$

Sistemde nem alma verimi Eşitlik (10) ile hesaplanacaktır:

$$\eta(\%) = 100 \frac{\omega_g - \omega_c}{\omega_g - \omega^{sat}} \quad (10)$$

Eşitlik (10)'da  $\omega_g$  ve  $\omega_c$  sırasıyla havanın kanal girişindeki ve çıkışındaki nem oranıdır.  $\omega^{sat}$  ise sıvı desikant ile dengede olan havanın nem oranı olup, çözelti sıcaklığındaki buhar basıncı,  $P_{des}$ , kullanılarak Eşitlik (5) ile hesaplanmaktadır. Eşitlik (10)'un fiziksel anlamı, havadan desikant çözeltisine olan gerçek nem aktarım hızının sistemde olabilecek maksimum nem aktarma hızına oranıdır [32]-[33]. Eşitlik (10) ifadesi, sıvı desikant sıcaklığına bir şekilde bağlıdır. Bunun nedeni ise  $\omega^{sat}$  değerinin sıvı desikantın girişteki konsantrasyon ve sıcaklığına bağlı su buharı kısmi basıncının fonksiyonudur [34]. Eşitlik (10)'da verimin çözelti sıcaklığına oranlanması sıcaklığa bağlı olmasının yanında, değerlerin normalize edilmesini de sağlamaktadır.

Tablo 2. LiCl-su çözeltisi için buhar basıncı sabitleri.

Table 2. Vapor pressure constants for LiCl-aq solution.

| Sabitler | LiCl-su |
|----------|---------|
| $\pi_0$  | 0.28    |
| $\pi_1$  | 4.30    |
| $\pi_2$  | 0.60    |
| $\pi_3$  | 0.21    |
| $\pi_4$  | 5.10    |
| $\pi_5$  | 0.49    |
| $\pi_6$  | 0.362   |
| $\pi_7$  | -4.75   |
| $\pi_8$  | -0.40   |
| $\pi_9$  | 0.03    |

Çalışmada nem alma verimi deneysel olarak hesaplandığından belirsizlik analizinin yapılması gerekmektedir. Nem alma veriminin toplam belirsizliği Eşitlik (11)'de verilmiştir [35].

$$\delta\eta = \sqrt{\left( \frac{\partial\eta}{\partial\omega_g} \delta\omega_g \right)^2 + \left( \frac{\partial\eta}{\partial\omega_c} \delta\omega_c \right)^2 + \left( \frac{\partial\eta}{\partial\omega_{sat}} \delta\omega_{sat} \right)^2} \quad (11)$$

Belirsizlik analizine göre nem alma verimliliği  $\pm\%2.8$  seviyelerinde değişim göstermektedir. Böylece deneysel belirsizliğin kabul edilebilir seviyede olduğu anlaşılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

Suni kılıf ve Tyvek® Solid ile  $Re=200$ 'den başlanarak  $Re=2000$ 'e kadar deneyler yapılmıştır. Sistemde belirlenen  $Re$  sayılarına göre hesaplanan maksimum kanal hava hızları Tablo 3'te verilmiştir. Deney düzeneğinde hava fanı tipi DC (doğru akım) olup, devri lineer olarak kontrol edilebilmektedir. Devir kontrolü ile Tablo 3'te verilen maksimum hava hızı değerleri hız sensörü ekranında elde edilmiş ve o değerlerde sabit tutulmuştur.

Tablo 3. Sistemde belirlenen  $Re$  sayılarına göre hesaplanan ortalama ve maksimum hava hızı değerleri.

Table 3. Calculated average and maximum air velocity values due to specified  $Re$  numbers.

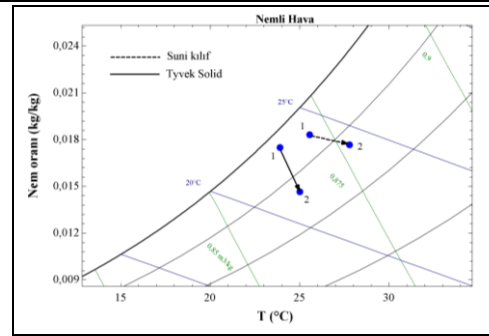
| Re   | $V_{max,h}$ (m/s) | $V_{ort,h}$ (m/s) |
|------|-------------------|-------------------|
| 200  | 0.07              | 0.05              |
| 400  | 0.14              | 0.09              |
| 600  | 0.2               | 0.14              |
| 800  | 0.27              | 0.18              |
| 1000 | 0.34              | 0.23              |
| 1200 | 0.41              | 0.27              |
| 1400 | 0.47              | 0.32              |
| 1600 | 0.54              | 0.36              |
| 1800 | 0.61              | 0.41              |
| 2000 | 0.68              | 0.45              |

Çalışmada deneylerdeki diğer parametreler ise Tablo 4'te gösterilmiştir. Sıvı pompasının frekansı SCADA yazılımı yardımıyla kontrol edilmiş olup sıvı desikantın üst haznedeki taşmasını önlemek için 26 Hz frekansta ve 30 l/dk. debide çalıştırılmıştır. Sıvı pompasının 50 Hz frekansındaki debisi ise 58.3 l/dk.'dır. Sistemde yapılan deneylerde  $Re=200$  için her iki membranda elde edilen belirli bir andaki giriş/çıkış sıcaklık ve bağıl nem değerlerine göre psikrometrik diyagramdaki nem değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Her iki membranda havanın girişteki mutlak nemi birbirine çok yakın iken ( $\sim 0.018$  kg/kg) Tyvek® Solid ile havanın çıkıştaki mutlak nemi daha düşüktür. Belirlenen şartlarda Tyvek® Solid membranının suni kılıfa göre havadan daha iyi nem aldığı görülebilmektedir.

Tablo 4. Deneysel parametreler.

Table 4. Experimental parameters.

| Parametre                                | Suni Kılıf                              | Tyvek Solid                             |
|--|---|---|
| Membran yarıçapı, $R_i$                  | 10 mm                                   | $\sim 10$ mm                            |
| Hava kanalı yarıçapı, $R_d$              | 36 mm                                   | 36 mm                                   |
| Çözelti başlangıç konsantrasyonu, $\xi$  | 0.42                                    | 0.42                                    |
| Membran su buharı difüzyon katsayısı     | $1.71 \times 10^{-8}$ m <sup>2</sup> /s | $7.27 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s |
| Membran su buharı geçirgenlik katsayısı  | $8.99 \times 10^{-6}$ kmol/s            | $5.63 \times 10^{-4}$ kmol/s            |
| Sıvı pompası frekansı                    | 26 Hz                                   | 26 Hz                                   |
| Sıvı desikant giriş sıcaklığı, $T_{s,g}$ | 30-32 °C                                | 27-28.5 °C                              |
| Sıvı desikant çıkış sıcaklığı, $T_{s,c}$ | 30-32.5 °C                              | 27-29 °C                                |
| Hava giriş sıcaklığı, $T_{h,g}$          | 24.4-26.1 °C                            | 20.6-25 °C                              |
| Hava çıkış sıcaklığı, $T_{h,c}$          | 25.6-27.8 °C                            | 24.4-25 °C                              |

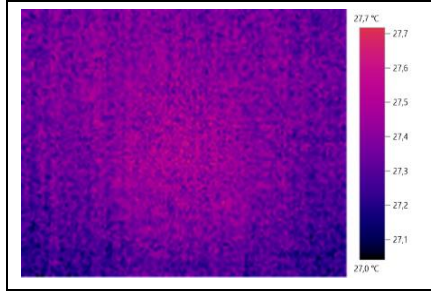


Şekil 3.  $Re=200$  için deneylerde belirli bir anda psikrometrik diyagramda havadaki nem değişimi.

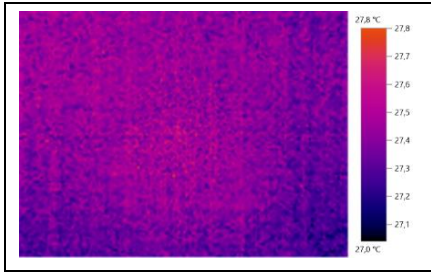
Figure 3. Humidity change in the air in the psychrometric diagram at a given moment in experiments for  $Re=200$ .

### 3.1 Suni kılıf ile elde edilen sonuçlar

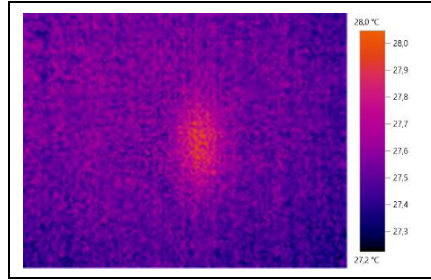
Membranlı boru tipi nem alma deney düzeneğinde ilk olarak suni kılıf ile deneyler yapılmıştır. Söz konusu membran ile, daha önce söz edildiği gibi,  $Re=200-2000$  aralığında toplam on deney yapılmıştır. Hava hızının yüksek olduğu deneylerde hava-membran temas süresinin kısa olmasından dolayı yalnız  $Re = 200$  ve  $Re=400$  değerlerinde havadan nem alınabilmektedir. Deneyler yapılırken, desikant akışı olmadığı ve desikant akışı olduğu sürelerde ısı kamera ile görüntü alınmıştır.  $Re=200$  için deney sırasında elde edilen ısı kamera görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir.



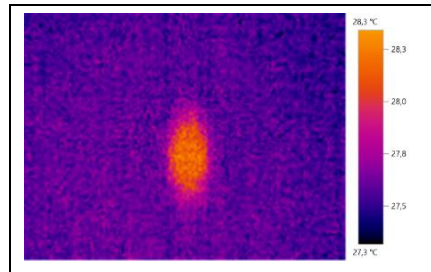
(a): Sadece hava.



(b): 21. dk.



(c): 31 dk.



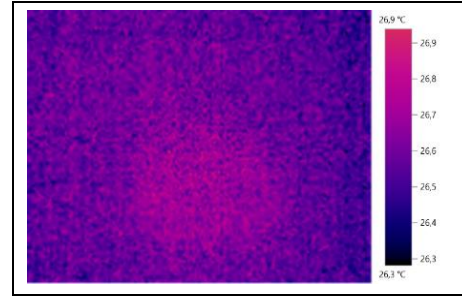
(d): 32 dk.

Şekil 4. Suni kılıfla  $Re=200$ 'de elde edilen ısı kamera görüntüleri. (a): Sadece hava, (b): 21. dk, (c): 31. dk. ve (d): 32. dk.

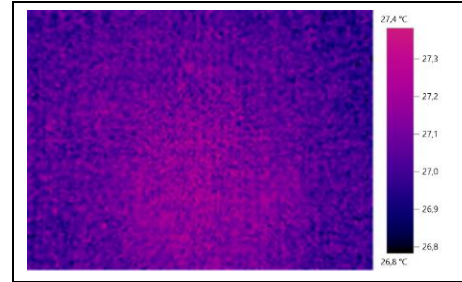
Figure 4. Obtained thermal camera images with synthetic sausage casing at  $Re=200$ . (a): Only air. (b): 21<sup>st</sup> min., (b): 31<sup>st</sup> min. and (c): 32<sup>nd</sup> min.

Şekil 4'te de görülebildiği gibi, sistemde desikantın akmadığı zamanda ısı kamera görüntüsünde herhangi bir sıcaklık değeri gözlenmemektedir. Deneyin ilk zamanlarında nem absorpsiyonunun düşüklüğünden dolayı ısı kamera görüntülerinin de sıcaklık dağılımı tespit edilememiş, deneyin ilerleyen zamanlarında ısı görüntülerinde sıcaklık dağılımı gözlenebilmektedir. Nem absorpsiyonunun devam etmesi ve sistemde kapalı çevrim yapan LiCl çözeltisinin zamanla sıcaklığının artması bu duruma neden olmaktadır. 31 ve 32. dakikalarda suni kılıfın sıcaklığının arttığı Şekil 4'te açıkça gözlenmektedir. Söz konusu zamanlarda membran ile kanal yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı  $1^\circ\text{C}$ 'ye kadar ulaşmıştır.

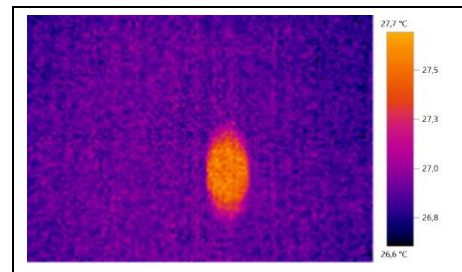
$Re=400$  için yapılan deneyde elde edilen ısı kamera görüntüleri ise Şekil 5'te verilmiştir.  $Re=400$  için yapılan deneyde de desikantın akmadığı ilk zamanlarda ve desikantın aktığı ilk zamanlarda nem alma işleminin yeni başlamasından dolayı membran sıcaklığında önemli bir artış olmadığından ısı kamerada sıcaklık farkı belirgin değildir. Fakat sistem nem aldıkça, desikant sıcaklığı, dolayısıyla membran sıcaklığı arttığından 62. dk.'daki görüntüde membran ile hava kanalı yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı daha belirgin hale gelip  $1,1^\circ\text{C}$  seviyesine çıkmıştır.



a): Sadece hava.



(b): 14. dk.

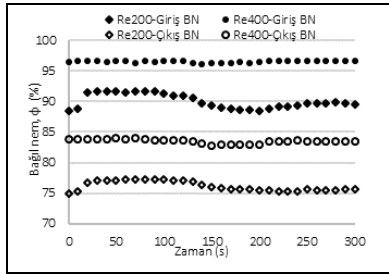


(c): 62 dk.

Şekil 5. Suni kılıfla  $Re=400$ 'de elde edilen ısı kamera görüntüleri. (a): Sadece hava. (b): 14. dk. ve (c): 62. dk.

Figure 5. Obtained thermal camera images with synthetic sausage casing at  $Re=400$ . (a): only air, (b): 14<sup>th</sup> min., (b): 62<sup>nd</sup> min. and (c): 62<sup>nd</sup> min.

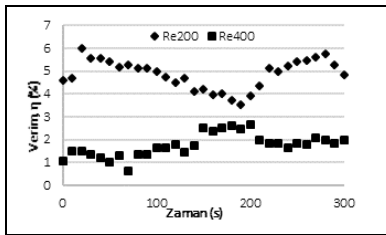
Sistemde performansın belirlenmesinde nem alma verimi hesaplandığından havanın giriş ve çıkış bağıl nem değerleri büyük önem taşımaktadır. Re=200 ve Re=400 için havanın girişte ve çıkışta ölçülen bağıl nem değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde, ısı kamera görüntüleri de dikkate alınarak, Re=200 ve Re=400 için sistemin dengeye ulaştığı kabul edilen sırasıyla 50-55 dk. ve 54-59 dk. arasındaki 300 sn.'lik ölçüm değerlerine yer verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, Re=200 için havanın sisteme giriş ve çıkışındaki bağıl nem oranları sırasıyla yaklaşık %96 ve %84 olarak ölçülmüştür. Re=400 için havanın ölçülen bağıl nem değerleri ise girişte %89-91 aralığında, çıkışta ise %75-77 aralığında değişmektedir. Sistemin her iki Re sayısında da nem aldığı gözlenmektedir.



Şekil 6. Suni kılıf deneylerinde havanın giriş/çıkış bağıl nem değerleri.

Figure 6. Inlet/outlet relative humidity values of air in synthetic sausage casing experiments.

Ayrıca sistemin değişen giriş bağıl nem oranlarına göre tepki verdiği gözlemlenmektedir. Hesaplanan nem alma verimi değerlerinin ise aynı zaman aralığındaki değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Sistemde, düşük Re sayılarında hava hızının düşüklüğü ile hava-sıvı desikant temas süresinin artması kütle geçişini dolayısıyla alınan nem miktarını arttırdığından dolayı Re=200 için elde edilen verim değerleri daha yüksek bulunmuştur. Söz konusu Re sayısında verim değerleri genel olarak %4.5-6 aralığında değişirken Re=400 için %1-2.5 aralığında değişmiştir.

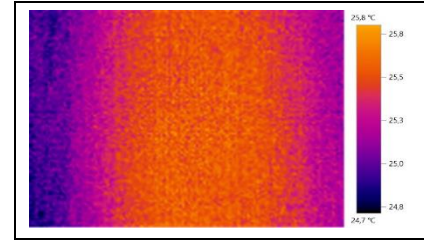


Şekil 7. Suni kılıf deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri.

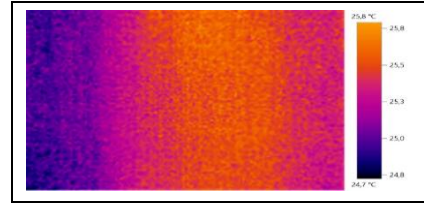
Figure 7. Dehumidification efficiency values of air in synthetic sausage casing experiments.

### 3.2 Tyvek solid ile elde edilen sonuçlar

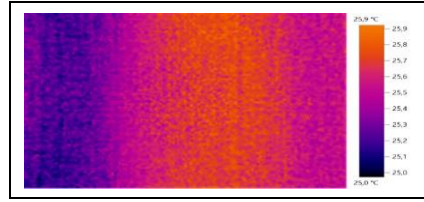
Membranlı silindirik sıvı desikant nem alma deney düzeneğinde ikinci membran olarak Tyvek® Solid kullanılmıştır. Söz konusu membran ile suni kılıfta olduğu gibi, Re=200-2000 aralığında on tane deney yapılmış ve Re=200, Re=400 ve Re=600 değerlerinde sistemin nem alabildiği gözlemlenmiştir. Sistemde belirli zamanlarda Şekil 8 ve 9'da, Re=200 ve 400 değerinde yapılan deneylerde elde edilen ısı kamera görüntüleri verilmektedir. Re=400 değerinde yapılan deneylerde sıcaklık dağılımı daha net görülebilmektedir (Şekil 9).



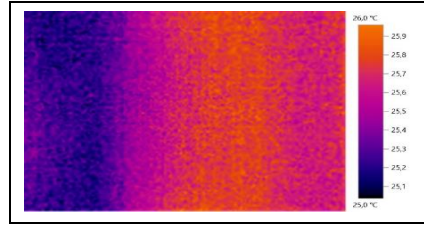
(a): Sadece hava.



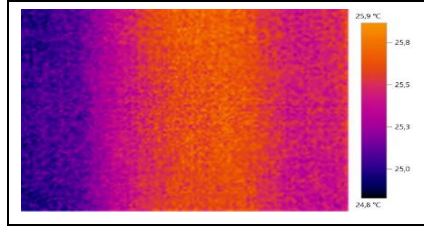
(b): 3. dk.



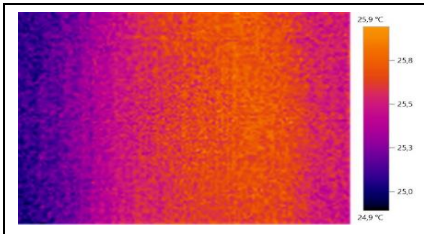
(c): 15. dk.



(d): 26. dk.



(e): 36. dk.

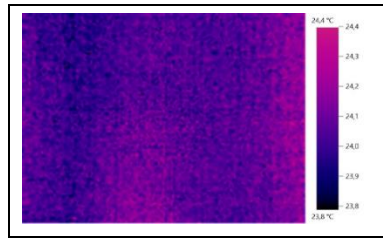


(f): 46. dk.

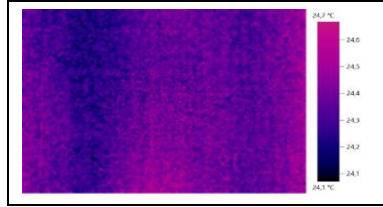
Şekil 8. Tyvek® Solid ile Re=200'de elde edilen ısı kamera görüntüleri. (a): Sadece hava, (b): 3. dk, (c): 15. dk, (d): 26. dk, (e): 36. Dk. ve (f): 46. dk.

Figure 8. Obtained thermal camera images with Tyvek Solid at Re=200. (a): Only air, (b): 3<sup>rd</sup> min. (c): 15<sup>th</sup> min., (d): 26<sup>th</sup> min., (e): 36<sup>th</sup> min. and (f): 46<sup>th</sup> min.

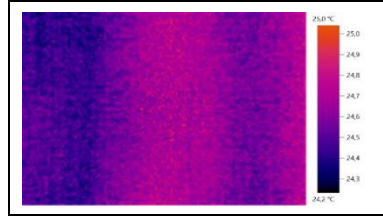




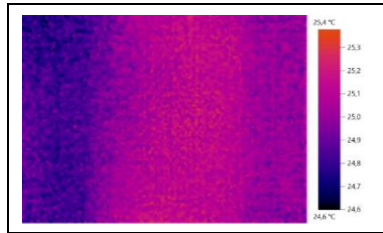
(a): Sadece hava.



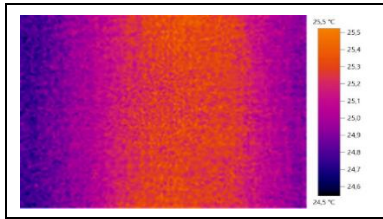
(b): 5. dk.



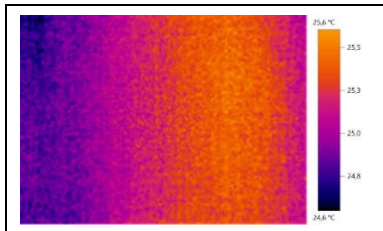
(c): 16. dk.



(d): 25. dk.



(e): 38. dk.



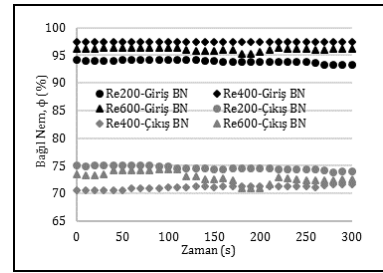
(f): 48. dk.

Şekil 9. Tyvek® Solid ile Re=400'de elde edilen ısıl kamera görüntüleri. (a): Sadece hava, (b): 5. dk, (c): 16. dk, (d): 25. dk, (e): 38. dk. ve (f) 48. dk.

Figure 9. Obtained thermal camera images with Tyvek Solid at Re=400. (a): Only air. (b): 5<sup>th</sup> min. (c): 16<sup>th</sup> min. (d): 25<sup>th</sup> min., (e): 38<sup>th</sup> min. and (f): 48<sup>th</sup> min.

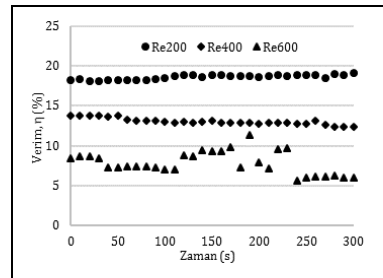
Re=400 için başlangıçta membranda önemli bir sıcaklık değişimi gözlemlenmezken, kapalı döngü yapan LiCl çözeltisi nem absorpsiyonunun devamı sıcaklığı artırmaktadır. Bu durum, özellikle deneyin 16. dk.'sından sonra ısıl kamera görüntülerinde sıcaklık dağılımından açık bir şekilde görülebilmektedir. Çözelti sıcaklığının artmasıyla membran ile hava kanalı yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı, 38. dk.'dan sonra, 1°C civarına ulaşmıştır.

Sistemde Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde belirlenen zaman aralığında havanın giriş/çıkış bağıl nem değerlerindeki değişim ise Şekil 10'da gösterilmiştir. Bağıl nem ölçümlerinde ve verim hesabında, sistemin dengede olduğu ve ölçülen verilerin daha dengeli olduğu kabul edilen, Re = 200, Re=400 ve Re=600 için sırasıyla 26-31 dk. 36-41 dk. ve 29-34 dk. aralığındaki 300 saniyelik ölçüm verileri kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılabilir olduğu gibi belirlenen zaman aralıklarında ölçülen hem giriş hem de çıkış bağıl nem değerleri dengede olduğu görülmektedir. Sisteme giren hava nemlendirme düzeneği ile şartlandırıldığından kanal girişinde yüksek bağıl nem değerleri elde edilmiştir. Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde Re=200, 400 ve 600 için hava kanalı girişinde bağıl nem değerleri sırasıyla %94.9, %97.5 ve %95.5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 10. Tyvek® Solid deneylerinde havanın sisteme giriş/çıkış bağıl nem değerleri.

Figure 10. Inlet/outlet relative humidity values of air in Tyvek Solid experiments.



Şekil 11. Tyvek® Solid deneylerinde sistemin nem alma verimi değerleri.

Figure 11. Dehumidification efficiency values of air in Tyvek Solid experiments.

Şekil 11'de ise Tyvek® Solid ile elde edilen nem alma verimi değerleri gösterilmiştir. Hesaplanan nem alma verimi değerleri de özellikle Re=200 ve Re=400 için oldukça kararlı olup Re=600'de, çıkış bağıl nem değerlerindeki sapmalardan ötürü, küçük sapmalar meydana gelmiştir. Sistemde Re=200 ve Re=400 için nem alma verimi değerleri sırasıyla yaklaşık %18.5 ve %13 olarak hesaplanırken Re=600'de nem alma verimi değerleri %5-10 aralığında değişmiştir. Bilindiği gibi, hava-sıvı desikant temas süresi ve temas yüzeyi alanı, kütle geçişi gerçekleşen bu tip sistemler için çok önemli bir parametre olup havadan sıvı desikant çözeltisine geçen su buharı miktarına,



dolayısıyla nem alma verimine doğrudan etki etmektedir. Nem alma veriminin hem suni kılıf deneylerinde hem de Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde, Re sayısı büyüdükçe temas süresinin düşmesinden ötürü bu doğrultuda azalması ve deneysel belirsizliklerin düşük olması sonuçların tutarlı, tekrarlanabilir ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, tek bir membranlı boru kullanılarak 0.046 m<sup>2</sup> civarında yüzey alanına sahip nem alma sistemi elde edilmiştir. Literatürdeki bir çalışmada Abdel-Salam ve diğ. [36], yaklaşık 1 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip paralel-plaka tipi membranlı nem alma sistemi veriminin, yüksek çözelti ve hava kanalı genişliğinde %37 civarına düştüğünü bildirmişlerdir. Diğer bir çalışmada, Bai ve diğ. [37], 0.95 m<sup>2</sup> hava-çözelti temas yüzeyine sahip paralel-plaka tipi membranlı nem alma sisteminde, düşük NTU sayısında sistemin nem alma veriminin %17 ile %26 arasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Das ve Jain [38] ise, 0.25 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip paralel-plaka tipi sistemde, düşük çözelti/hava debi oranlarında sistem veriminin %17.4-%41.9 aralığında değiştiğini bildirmişlerdir. Söz konusu çalışmalar göz önüne alındığında, bu çalışmada tasarlanan sistemin yüzey alanının düşük olmasına karşın oldukça tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde ilk defa membranlı boru tipi sıvı desikant nem alma sistemi deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizde, suni kılıf ve Tyvek® Solid olmak üzere iki farklı membran kullanılmış ve giren havanın Re sayısının sistemin nem alma verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Re sayısının dolayısıyla hava hızının artması ile her iki membranlı sistemde de verimler düşmektedir. Suni kılıf ile yapılan deneylerde en yüksek nem alma verimi değerleri %4.5-6 aralığında Re=200 için elde edilirken, Tyvek® Solid ile yapılan deneylerde en yüksek nem alma verimi değeri yine Re = 200 için yaklaşık %18.5 olarak elde edilmiştir.

Çalışmada, gerçek hava hızlarında ve boyutlarda boru tipi membranlı desikant sistem başarılı bir şekilde denenmiştir. Kullanılan boru tipi membranın yüzey alanı yaklaşık 0.05 m<sup>2</sup> olmasına rağmen %18.5'lik verim ile literatür ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir. İleriki çalışmalarda yüzey alanının daha fazla artırılarak daha yüksek nem alma verimlerine ulaşılabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, sistemin sayısal modellemesi yapılarak yüksek verimli bir sistemin geliştirilmesi elde edilen sonuçların yardımıyla yapılacaktır.

#### 5 Conclusions

In this study, experimental analysis of a membrane-based tubular liquid desiccant dehumidification system was carried out for the first time in the literature. In the analysis, two different membranes, synthetic sausage casing and Tyvek® Solid, were used and the effect of Re number of inlet air on the dehumidification efficiency of the system was investigated. With the increase of the Re number and thus the air velocity, the efficiency of both membrane systems decreases. While the highest dehumidification efficiency values were obtained for Re=200 in the range of 4.5-6% in the experiments performed with synthetic sausage casing, the highest dehumidification efficiency value was obtained for Re=200, approximately 18.5% in the experiments performed with Tyvek® Solid.

In the study, a tubular membrane-based desiccant system was successfully tested at real air velocities and dimensions. Although the surface area of the tubular membrane used was approximately 0.05 m<sup>2</sup>, 18.5% efficiency value was obtained,

which is comparable with literature. In future studies, it has been understood that higher dehumidification efficiencies can be achieved by increasing the surface area more. In addition, the numerical modeling of the system will be made with the help of the results obtained to develop a high-efficiency system.

#### 6 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Barış KAVASOĞULLARI fikrin oluşması, tasarımın yapılması, bilimsel yazın taraması, sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Ertuğrul CİHAN fikrin oluşması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; Hasan DEMİR fikrin oluşması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

#### 7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### 8 Semboller

|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| A, B, C | : Antonie denklemi parametreleri, |
| b       | : Bknz. Eşitlik (3),              |
| d       | : Çap (m),                        |
| M       | : Bknz. Eşitlik (3),              |
| P       | : Basınç (kPa),                   |
| r       | : Radyal yönde mesafe, m,         |
| R       | : Yarı çap (m),                   |
| Re      | : Reynolds sayısı,                |
| S       | : Kesit alanı (m <sup>2</sup> ),  |
| STK     | : Soğutma tesir katsayısı,        |
| T       | : Sıcaklık, K,                    |
| V       | : Hız (m/s).                      |

#### Alt indisler

|     |                  |
|-----|------------------|
| ç   | : Çıkış,         |
| d   | : Dış,           |
| des | : Sıvı desikant, |
| e   | : Eş değer,      |
| g   | : Giriş,         |
| h   | : Hava,          |
| i   | : İç,            |
| sat | : Doyma.         |

#### Üst indisler

|     |          |
|-----|----------|
| sat | : Doyma. |
|-----|----------|

#### Yunan harfleri

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| α | : Bknz. Eşitlik (6),              |
| β | : Bknz. Eşitlik (6),              |
| δ | : Belirsizlik,                    |
| η | : Verim (%),                      |
| κ | : Bknz. Eşitlik (6),              |
| μ | : Dinamik viskozite (Pa.s),       |
| ξ | : Çözelti konsantrasyonu (kg/kg), |
| π | : Bağlı basınç,                   |
| ρ | : Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ),  |
| φ | : Bağlı nem,                      |
| ω | : Havadaki nem oranı (kg/kg).     |

#### 9 Kaynaklar

- [1] Ahmed YS, Gandhidasan P, Al-Farayedhi AA. "Thermodynamic analysis of liquid desiccants". *Solar Energy*, 62, 11-18, 1998.
- [2] Isetti C, Nannei E, Magrini A. "On the application of a membrane air-liquid contactor for air dehumidification". *Energy and Buildings*, 25, 185-193, 1997.

- [3] Min J, Su M. "Performance analysis of a membrane-based enthalpy exchanger: Effects of the membrane properties on the exchanger performance". *Journal of Membrane Science*, 348, 376-382, 2010.
- [4] Zhang LZ, Huang SM, Pei LX. "Conjugate heat and mass transfer in a cross-flow hollow fiber membrane contactor for liquid desiccant air dehumidification". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 8061-8072, 2012.
- [5] Huang S, Zhang L, Tang K, Pei L. "Fluid flow and heat mass transfer in membrane parallel-plates channels used for liquid desiccant air dehumidification". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2571-2580, 2012.
- [6] Huang SM, Yang M. "Longitudinal fluid flow and heat transfer between an elliptical hollow fiber membrane tube bank used for air humidification". *Applied Energy*, 112, 75-82, 2013.
- [7] Huang SM, Qin FGF, Yang M, Yang X, Zhong WF. "Heat and mass transfer deteriorations in an elliptical hollow fiber membrane tube bank for liquid desiccant air dehumidification". *Applied Thermal Engineering*, 57, 90-98, 2013.
- [8] Huang SM, Zhang LZ, Pei LX. "Transport phenomena in a cross-flow hollow fibre membrane bundle used for liquid desiccant air dehumidification". *Indoor and Built Environment*, 22, 559-574, 2013.
- [9] Abdel-Salam AH, Ge G, Simonson CJ. "Performance analysis of a membrane liquid desiccant air-conditioning system". *Energy and Buildings*, 62, 559-569, 2013.
- [10] Abdel-Salam AH, Ge G, Simonson CJ. "Thermo-economic performance of a solar membrane liquid desiccant air conditioning system". *Solar Energy*, 102, 56-73, 2014.
- [11] Abdel-Salam AH, A novel liquid desiccant air conditioning system with membrane exchangers and various heat sources. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Ontario, Canada, 2015.
- [12] Das RS, Jain S. "Experimental performance of indirect air-liquid membrane contactors for liquid desiccant cooling systems". *Energy*, 57, 319-325, 2013.
- [13] Keniar K, Ghali K, Ghaddar N. "Study of solar regenerated membrane desiccant system to control humidity and decrease energy consumption in office spaces". *Applied Energy*, 138, 121-132, 2015.
- [14] Namwar R, Ge G, Simonson CJ, Besant RW. "Transient heat and moisture transfer characteristics of a liquid-to-air membrane energy exchanger (LAMEE) model verification and extrapolation". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 66, 757-771, 2013.
- [15] Bai H, Zhu J, Chen Z, Chu J. "Parametric analysis of a cross-flow membrane-based parallel-plate liquid desiccant dehumidification system: Numerical and experimental data". *Energy and Buildings*, 158, 494-508, 2018.
- [16] Cihan E, Kavasogullari B, Demir H. "Mass transfer correlation for tubular membrane-based liquid desiccant air-conditioning system". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 519-529, 2020.
- [17] Englart S, Rajski K. "Performance investigation of a hollow fiber membrane-based desiccant liquid air dehumidification system". *Energies*, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113320>
- [18] Wang Y, Ruhani B, Fazilati MA, Sajadi SM, Alizadeh A, Toghraie D. "Experimental analysis of hollow fiber membrane dehumidifier system with SiO<sub>2</sub>/CaCl<sub>2</sub> aqueous desiccant solution". *Energy Reports*, 7, 2821-2835, 2021.
- [19] Cho H, Cheon S, Jeong J. "Energy impact of vacuum-based membrane dehumidification in building air-conditioning applications". *Applied Thermal Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116094>
- [20] Li C, Yang T, Jhang J, Li W, Yan W. "Physical characteristics analysis and performance comparison of membranes for vacuum membrane dehumidifiers". *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101213>
- [21] Bui DT, Vivekh P, Islam MR, Chua KJ. "Studying the characteristics and energy performance of a composite hollow membrane for air dehumidification". *Applied Energy*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118161>
- [22] Vaisala. "Humidity and Temperature Transmitters". <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/hmt120-130> (19.04.2022).
- [23] Sauer mann. "Kimo Instruments". <https://sauer mann group.com/en-GB/measuring-instruments/transmitters/air-velocity-transmitters/ctv-210-r> (19.04.2022).
- [24] Thermometrics-Precision Temperature Sensors. "Type K Thermocouple". <https://www.thermometricscorp.com/thertypk.html> (19.04.2022).
- [25] Çağdaş Otomasyon. "Sıcaklık ve Nem Ölçerler". <http://www.cagdasltd.com.tr/images/uploads/0226312001337421066.PDF> (19.04.2022).
- [26] Rudolph Research Analytical. "Density Meter DDM 2910". <https://rudolphresearch.com/tr/products/density-meters/ddm-2910/> (19.04.2022).
- [27] Yıldız Gıda A.Ş. <https://www.yildiz-as.com/urun-plastik-sunil-kilif-1613.html>. (19.04.2022).
- [28] Dupont. "Tyvek® Nefes Alan Su Yalıtım Örtüsü Çözümleri". <https://www.dupont.com.tr/urunler-ve-hizmetler/construction-materials/tyvek-building-envelope/brands/tyvek-breather-membrane/products/tyvek-solid.html>. (19.04.2022).
- [29] Rosen A. "Transport Phenomena I". Tutts: Wordpress Blogs and Websites, 2013.
- [30] Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP. *The properties of gases and liquids*. 5<sup>th</sup> ed. New York, USA, McGraw-Hill, 2001.
- [31] Conde MR. "Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design". *International Journal of Thermal Sciences*, 43, 367-382, 2004.
- [32] Abdel-Salam AH, Besant RW, Simonson CJ. "Performance Definitions for Three-Fluid Heat and Moisture Exchangers". *ASME Journal of Heat Transfer*, 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4034756>
- [33] Cihan E, Kavasogullari B, Demir H. "Enhancement of performance of open liquid desiccant system with surface additive". *Renewable Energy*, 114, 1101-1112, 2017.
- [34] Gandhidasan P. "A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant". *Solar Energy*, 76, 409-416, 2004.
- [35] Zhang N, Zhang LZ, Xu JC. "A heat pump driven and hollow fiber membrane-based liquid desiccant air dehumidification system: A transient performance study". *International Journal of Refrigeration*, 67, 143-156, 2016.

- [36] Abdel-Salam AH, Besant RW, Simonson CJ. "Sensitivity of the performance of a flat-plate liquid-to-air membrane energy exchanger (LAMEE) to the air and solution channel widths and flow maldistribution". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84, 1082-1100, 2015.
- [37] Bai H, Zhu J, Chen Z, Ma L, Wang R, Li T. "Performance testing of a cross-flow membrane-based liquid desiccant dehumidification system". *Applied Thermal Engineering*, 119, 119-131, 2017.
- [38] Das RS, Jain S. "Performance characteristics of cross-flow membrane contactors for liquid desiccant systems". *Applied Energy*, 141, 1-11, 2015.