

## Isı Pompalı İnfrared Kurutucuda Dilimlenmiş Limonun Kurutulmasının Performans Analizi

Simge Pelin ALKAÇ<sup>\*,a</sup>, Kurtuluş BORAN<sup>a</sup>, Mustafa AKTAŞ<sup>a</sup>, Meltem TOKDEMİR<sup>a</sup>

<sup>a,\*</sup> Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, ANKARA 06500, TÜRKİYE

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 14.05.2019  
Kabul: 16.07.2019

**Anahtar Kelimeler:**  
Kurutma, Limon,  
Bağıl Nem Kontrolü,  
Isı Pompası, Kızılötesi

<sup>\*</sup>**Sorumlu Yazar:**  
e-posta:  
[simgepelinalkac@gmail.com](mailto:simgepelinalkac@gmail.com)

### ÖZET

Bu çalışmada ısı pompalı infrared bir kurutucuda dilimlenmiş limonun kurutulması deneysel olarak analiz edilmiştir. Deney düzeneği kapalı çevrim ve taze hava girişli olarak iki ayrı şekilde tasarlanmış ve aynı değerlerde deneyler yapılarak taze hava girişi olan ve olmayan sistemin kuruma kinetiğine etkileri karşılaştırılmıştır. 5 mm kalınlığında dilimlenmiş limonlar 6,6804 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 60 °C sabit sıcaklıkta ve 595 m<sup>3</sup>/h giriş hava debisi şartlarında 0,045 g su/g kuru madde miktarına kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi kapalı çevrim sistemde 5 saat, taze hava girişli sistemde 6 saat sürmüştür. Literatürdeki çalışmalarda limon dilimlerinin infrared kurutucuda kurutulması incelenmiş ve kurutma işlemi 8 saat sürmüştür. Yapılan deney sonrasında ortalama COPws değeri taze hava girişli sistem için 2,67, kapalı çevrim sistem için 2,74 olarak bulunmuştur. Yapılan çalışma sonucunda kapalı çevrim sistemin kurutma süresini, taze hava girişli sisteme göre %16,67 azalttığı tespit edilmiştir. Kurutulan limonların gözle analizi yapıldığında ürün kalitesi açısından iki sistem arasında fark olmadığı görülmüştür. Yurtiçi ve yurtdışı pazarda önemli yeri olan limon meyvesinin kurutularak değerlendirilmesinin ülke ekonomisine büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.02.02>

## Experimental Analysis of Sliced Lemon Drying in Infrared Dryer Which is Supported with Heat Pump

### ARTICLE INFO

Received: 14.05.2019  
Accepted: 16.07.2019

**Keywords:**  
Drying, Lemon,  
Relative Humidity  
Control, Heat Pump,  
Infrared.

<sup>\*</sup>**Corresponding  
Authors**  
e-mail:  
[simgepelinalkac@gmail.com](mailto:simgepelinalkac@gmail.com)

### ABSTRACT

In this study, drying sliced lemons with an infrared-heat pump dryer is analyzed. The testing apparatus is designed for two different systems: closed air loop and fresh air inlet. Experiments are compared with same values for both systems and the effects of these systems on drying kinetics are compared. 5mm thick sliced lemons are dried from 6,6804 g water/ g dry matter moisture content to 0,045 g water/ g dry matter moisture content at 60 °C constant temperature and 595 m<sup>3</sup>/h inlet air flow. The drying process completed in 5 hours with closed air loop system and in 6 hours with fresh air inlet system. In the literature studies, drying of the lemon slices in the infrared dryer was examined and drying process completed at 8 hours. The average COPws value calculated as 2,67 for fresh air inlet system and 2,74 for closed air loop system. According to experiments, drying time decreased 16,67% on closed loop system as against fresh air inlet system. Visual analysis of dried lemons showed no difference between the two systems in terms of product quality. It is considered that evaluating of lemon by drying process which has an important place in the domestic and international markets, will contribute greatly to the economy of the country.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2019.02.02>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıda kurutma, gıdaların içerdiği nem miktarının azaltılarak daha uzun süre dayanmalarını sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Kurutma işlemi yapılırken kurutulan ürünün besin değerlerinin ve aromatik özelliklerinin de korunması gerekmektedir. Limon içeriğinde yüksek C vitamini ve antioksidan barındırmaktadır ancak yüksek su ve nemden dolayı uzun süre muhafaza edilememektedir. Aynı zamanda tüm meyve ve sebzelerde olduğu gibi, kurutulmuş limonun da besin/kalori değerleri, aynı miktarda yenilen yaş limonun besin/kalori değerinden daha yüksektir. Limonun kurutularak saklanması, daha uzun süre muhafaza edilmesinde, taşınmasında ve depolanmasında oldukça kolaylık sağlayacak ve bu avantajlar limon ihracatının gelişmesinde olumlu etki yaratacaktır.

International Trade Center verilerine göre Türkiye turunçgil ihracatında ilk 5'te yer almaktadır. Limon meyvesi de Türkiye ekonomisinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır.

TÜİK verilerine göre 2013-2016 yılları arasında Türkiye'deki limon üretim miktarları (ton/yıl) aşağıdaki çizelgede verilmiştir:

Tablo 1. Türkiye'deki Yıllık Limon Üretimi (ton/yıl)

	2013	2014	2015	2016
Limon Üretimi	726 283	725 230	750 550	850 600

Akdeniz İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği'nin yayınladığı Ocak-Aralık 2016 "Yaş Meyve ve Sebze Sektörü Türkiye Geneli Değerlendirme Raporu"na göre limon meyvesinin ihracat verileri şöyledir:

Tablo 2. Limon İhracatı Yapılan İlk 5 Ülke

Ülkeler	Ocak-Aralık 2016		Ocak-Aralık 2017	
	Miktar (bin ton)	Değer (M\$)	Miktar (bin ton)	Değer (M\$)
Rusya	106,5	77,03	119,5	82,8
Irak	74,8	37,66	84,7	33,1
S. Arabistan	57,3	34,21	63,0	32,5
Romanya	26,6	25,44	27,9	22,9
Ukrayna	30,3	16,45	30,4	14,9
Toplam	450,3	305,9	475,1	294,7

Yine aynı rapora göre, Türkiye geneli yaş meyve ve sebze ihracat yapılan ilk 20 madde aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Bu çizelgeden de anlaşılacağı

üzere limon meyvesi Türkiye ekonomisi için oldukça önemlidir.

Tablo 3. Türkiye Geneli Yaş Meyve Ve Sebze İhracat Yapılan İlk 20 Madde

	Madde	Ocak-Aralık 2016	
		Miktar (Kg)	Değer (\$)
1	Mandarin	650 721 935	312 785 145
2	Limon	450 458 446	305 900 124
3	Domates	480 070 755	238 314 676
4	Kiraz, Vişne	78 745 640	182 756 958
5	Portakal	387 641 515	173 604 688
6	Üzüm	174 116 369	105 064 494
7	Nar	179 920 284	103 527 784
8	Biber	98 604 580	90 941 816
9	Greyfurt	183 328 807	87 943 472
10	Elma	132 232 866	36 674 818
11	Kabak	60 285 823	34 070 840
12	İncir	14 092 683	31 761 142
13	Hıyar, Kornişon	48 090 935	28 334 334
14	Çay	6 533 820	28 248 123
15	Şeftali	49 625 752	25 511 927
16	Kestane	8 263 114	25 046 141
17	Kayısı	35 113 753	24 041 180
18	Patates	173 825 387	19 776 154
19	Erik	38 948 692	13 915 459
20	Patlıcan	25 108 324	12 432 443
Toplam YMS		3 569 540 012	1 978 209 380

*Not: Maddeler, 2016 Yılı Fob (\$) Değerlerine Göre Sıralanmıştır.*

Endüstriyel kurutma işlemleri yüksek enerji tüketimi gerektiren süreçleri içerdiğinden, kurutma süresinin kısaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar enerji tasarrufu sağlanması açısından oldukça önemlidir. Yapılan bu deney çalışmasında limon meyvesi taze hava girişli ve kapalı çevrim kurutma sistemlerinde aynı şartlarda kurutulmuş ve iki sistemin kurutma süresi üzerindeki belirgin etkileri ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada deney düzeneği olarak iki ayrı ısı pompalı infrared kurutucu tasarlanarak dilimlenmiş limon meyvesinin kurutulması analiz edilmiş ve taze hava girişinin kuruma kinetiği üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Aktaş ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada kızılotesi ışınımlı bir kurutucuda ayva dilimleri 3,89g su/ g kuru madde miktarından 0,16 g su / g kuru madde miktarına kadar kurutulmuştur. Aktaş bu

çalışmasında farklı hız ve sıcaklıklarda deneyler yaparak dilimlenmiş ayvanın kuruma kinetiğini hesaplamıştır. Ayrıca Aktaş çalışmasında her bir deney için kızılötesi ışınımlı kurutucunun da analizini yapmıştır. [1]

Meltem Onin çeşitli meyve ve sebzelerin kızılötesi ışınımlı kurutucuda kurutulmasının deneysel ve teorik incelemesini yaptığı çalışmasında infrared ısıtma gücünün ve ön işlemlerin kuruma karakteristikleri ve kuru ürünlerin kalite parametreleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Onin deneyleri 300, 400 ve 500 W infrared kurutma güçlerinde yapmış ve kuruma hızı ve etkin difüzyonunun infrared gücünün artması ile arttığını tespit etmiştir. [2]

Nurel Arslan konveksiyonel yöntemle kurutulan mantının infrared kurutma yöntemiyle piyasada kurutulabilirliğinin incelenmesi amacıyla farklı infrared güçlerinde deneyler yapmış ve sonuçları geleneksel fırında kurutma yöntemi ile karşılaştırmıştır. Deneyler sonucunda en kısa kurutma süresi 1000W infrared gücü ile yapılan deneyde gerçekleşirken en fazla enerji tüketimi 500 W gücünde, en düşük enerji tüketimi 400 W gücünde gerçekleşmiştir. [3]

Darvishi, Khoshtaghaza ve Minaei mikrodalga-konvektif ısıtmanın limon dilimlerinin kurutma karakteristiklerine ve kuruma sonrası renk değişimlerine etkisini incelemiştir. 180, 360, 540 ve 720 W ve 22°C'de, 1 m/s hava hızında deneyler yapan ekip etkin nem yayılım katsayısını  $1,87 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s ve  $3,95 \cdot 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s arasında, aktivasyon enerjisini ise 10,91 W/s olarak bulmuştur. Deneylerin sonucunda elde edilen kurutma verilerini literatürdeki mevcut matematiksel metotlarla çözümlenmiş ve kurutma karakteristikleri ve renk değişimi bakımından en uygun yolu belirlemiştir. [4]

Chen, Hernandez ve Huang kapalı çevrim güneş enerjili kurutucuda limon dilimlerinin kurutulmasını analiz etmişler ve deneyleri için yüksek geçirgen camdan kabineti olan bir fotovoltaik sistem geliştirmişlerdir. 60 °C sıcak hava ile limon dilimlerini kurutmuşlardır. Deney sonuçları kapalı çevrim sistemde kurutmanın kurutma parametreleri açısından daha verimli olduğunu göstermiştir. [5]

Kesbi, Sadeghi ve Mireii tarafından yapılan çalışmada limon dilimlerinin mikrodalga-konvektif kurutucuda kurutulmasının modellenmesi ve kalite değerlendirmesi yapılmıştır. Limon dilimlerinin konvektif kurutucuda (50, 55 ve 60°C giriş hava sıcaklıklarında), mikrodalga fırında (0,97 W g<sup>-1</sup> spesifik güç) ve kombine mikrodalga-konvektif kurutucuda (0,97 W g<sup>-1</sup> ve 2,04 W g<sup>-1</sup> spesifik güç

ve 50, 55 ve 60°C giriş hava sıcaklıklarıyla desteklenmiş) kuruma davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda mikrodalga-konvektif kurutucuda kurutulan limonların yüksek kuruma hızına ek olarak ürünün kalite parametreleri de diğer kurutma metodlarına göre yüksek bulunmuştur. [6]

Aktaş ve Kara tarafından yapılan çalışmada Güneş Enerjisi ve Isı Pompalı Kurutucuda Dilimlenmiş Kivi kurutulmuştur. Çalışmada kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve kivi meyvesi kurutularak deneysel olarak incelenmiştir. 5 mm kalınlığında dilimlenen kiviler 6 g/su kuru madde başlangıç nem miktarından 35 °C sıcaklıkta 0,53 g su/g kuru madde, 40 °C sıcaklıkta 0,25 g su/g kuru madde, 45 °C sıcaklıkta 0,14 g su/g kuru madde ve 50 oC sıcaklıkta 0,15 g su/g kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Kiviler, 35 °C, 40 °C, 45 °C ve 50 °C kurutma havası sıcaklığında ve değişken hava hızlarında (0,1-1,0 m/s) ve sırasıyla 8,5 saat, 7,5 saat, 7,5 saat ve 6,5 saatte kurutulmuştur. Isı pompası performans katsayısı (COP<sub>hp,h</sub>) ve tüm sistemin ısı pompası performans katsayısı (COP<sub>ts</sub>) bütün deneyler için ortalama olarak sırasıyla 2,90 ve 2,27 olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber yapılan tüm deneyler için ortalama dalgalı kanatçıklı havalı güneş kolektörünün verimi % 56,7 olarak hesaplanmıştır. Bu deneysel çalışma ile, kivi kurutulması için uygun kurutma havası sıcaklık değeri 50 °C olarak belirlenmiştir. [7]

Tokdemir, ısı pompası destekli kurutucuda toz elma ve elma cipsi üretiminin performans analizini yapmıştır. 40 °C kurutma havası sıcaklığında gerçekleştirdiği deneylerinde kurutma havası hızını 1 m/s olarak belirlemiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda tüm sistem için performans katsayısı değerleri, rendelenmiş elma için 3,02 olarak belirlenirken, elma dilimleri için 2,82 olarak hesaplanmıştır. Rendelenmiş elmaların kurutulması 4 saat sürmüş ve kurutma işlemi sonunda nem içeriği 5,06 g<sub>su</sub>/g<sub>katı madde</sub> nem miktarından 0,17 g<sub>su</sub>/g<sub>katı madde</sub> nem miktarına düşmüştür. Elma dilimleri ise 5,06 g<sub>su</sub>/g<sub>katı madde</sub> nem miktarından 0,17 g<sub>su</sub>/g<sub>katı madde</sub> nem miktarına 9 saat süren kurutma işlemi sonunda ulaşmıştır. [8]

Gürlek ve diğerleri ısı pompalı kurutucuda elma meyvesinin kurutulmasını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında ısı pompası destekli kurutucuların çalışma prensiplerinden ve bu kurutucuların performans kıstaslarından bahsederken, 50°'de kuruttıkları elma dilimlerini incelemiştir. Çalışma neticesinde tercih ettikleri sistemin enerji tüketiminin diğer kurutma sistemlerine göre daha düşük olduğunu buna karşın elde edilen kurutulmuş

elmaların diğer sistemlerde kurutulmuş elmalara göre daha kalitesiz olduğunu belirtmişlerdir [9].

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1 Metot (Method)

Kurutma sistemi tasarlanırken kurutulacak ürünün ve kurutma sisteminin özellikleri göz önünde bulundurulmuş ve sistem buna göre tasarlanmıştır.

Kurutulan limonların nem kontrolünün yapılabilmesi için deneye başlamadan nem kontrolünün yapılması gerekmektedir. Bunun için işlem öncesi limonlar  $100 \pm 2$  °C sabit sıcaklıktaki bir fırında kurutulmuş ve bu kurutma işlemi sırasında periyodik aralıklarla ağırlıkları ölçülmüştür. İki ölçüm arasındaki ağırlığın %1'den az olduğu durumda limonlar kuru kabul edilmiştir.

#### 2.1.1 Nem içeriği (Moisture content)

Limon dilimlerinin kuru esasa göre nem miktarı [10];

$$MC_{db} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \quad (1)$$

Ve limon dilimlerinin yaş esasa göre nem miktarı [10];

$$MC_{ib} = \frac{M_i - M_d}{M_i} \quad (2)$$

#### 2.1.2 Nem oranı (Moisture ratio)

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (3)$$

Bu denklemde M nem içeriğini, Mo başlangıçtaki nem içeriğini, Me ise denge durumundaki nem içeriğini tanımlamaktadır [10].

Taze üründeki yüksek nemden dolayı eşitlik şu şekilde yazılabilir [10];

$$MR = \frac{M}{M_o} \quad (4)$$

#### 2.1.3 Kuruma hızı (Drying rate)

Kurutma hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [10].

$$DR = \frac{MC_t - dt - MC_t}{dt} \quad (5)$$

#### 2.1.4 Isı pompalı kurutucu (Heat pump dryer)

Analizi yapılan bu kurutma sisteminde sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu en genel halde;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_{ia} \cdot \left( h_{oa} - h_{ia} + \frac{v_{oa}^2 - v_{ia}^2}{2} \right) \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilir [12].

Kurutma odasında kızıl ötesi ışıma ile yapılan kurutma işlemi esnasında, ısı değişimi psikrometrik diyagram yardımıyla;

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ia} \cdot (h_{oa} - h_{ia}) \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanır [12].

Isı geri kazanım cihazıyla atık havadan kazanılan enerji [10].;

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{ia} \cdot \dot{c}_{pia} \cdot (T_{ia} - T_{oa}) \quad (8)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (9)$$

Bir ısı pompası setinde ısıtma tesir katsayısı ( $COP_{hp}$ ) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır [10].

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_C} \quad (10)$$

Tüm deney düzeneği için COP yani ısıtma tesir katsayısının ( $COP_{ws}$ ) bulunmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır [10];

$$COP_{ws} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_C + \dot{W}_f} \quad (11)$$

1 kg nem almak için kullanılması gereken enerji “özgül nem çekme oranı (SMER)” olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [10].;

$$SMER = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_C} \quad (12)$$

Tüm deney düzeneği için ( $SMER_{ws}$ ) ise [10].;

$$SMER_{ws} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_C + \dot{W}_f} \quad (13)$$

#### 2.1.5 Belirsizlik analizi (Uncertainty analysis)

Deneyisel çalışmalarda oluşabilecek hataların analizi için belirsiz analizi yöntemi kullanılır. Oluşan hatalar göz önüne alınarak toplam hata;

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanır [7]. Bu eşitlikte R ölçülmesi gereken büyüklük,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  ise bu büyüklüğe etli eden n tane bağımsız değişkenlerdir.

## 2.2 Materyal (Material)

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde aynı cins ve boyutta limonlar, 5 mm kalınlığında eşit dilimler haline getirilerek kullanılmıştır.

Kurutma analizine başlamadan önce etüv yöntemi ile limonların nem içeriğinin belirlenmiştir. Limon dilimleri 100°C sıcaklıkta kurutulmuş ve ağırlıklarındaki değişim her 20 dakikada bir ölçülmüştür. Son iki ölçüm sonucu arasındaki fark %1 oluncaya kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Bu analiz 3 kere tekrar edilmiştir.

Limonların tartılmasında  $\pm 0,01$ g hassasiyete sahip Mettler Toledo markasının dijital tartısı kullanılmıştır. Deney öncesi yapılan bu analizle limonların nem içeriği yaş bazda 0,8698 gsu/g yaş ağırlık olarak, kuru bazda 6,6804 gsu/g kuru ağırlık olarak hesaplanmıştır.

Deney öncesi limonlar oda sıcaklığına gelmesi için bekletilmiş, ardından 5 mm kalınlığında halkalar halinde dilimlenmiştir. Limon dilimleri deney düzeneğindeki ızgara tepsiye yatay olarak dizilmiştir. Deney öncesi sistem kararlı hale gelene kadar 45 dakika çalıştırılmıştır.

Kızıl ötesi ışınım ile limon dilimlerinin kurutulması için kurutma sistemi analiz edilmiştir. Taze hava girişinin kurutma üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek için hem kapalı çevrim hem de taze hava girişli olmak üzere iki deney düzeneği ayrı ayrı tasarlanmış ve imal edilmiştir.

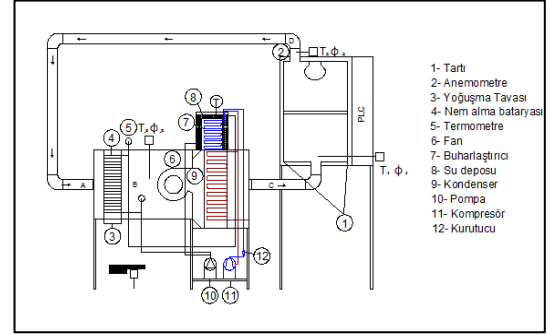
Tasarlanan her iki sistemde de ısı pompası ilavesi ise sistem verimliliği artırılmıştır.

Kurutucu düzenekte kullanılan PLC kontrol sistemi ile deney sırasında elde edilen verilerin bilgisayara aktarılması ve kurutma havasının bağıl neminin, sıcaklığının, hızının kontrolü ve aynı zamanda kurutulan limon dilimlerinin ağırlık değişimlerinin gözlemlenmesi mümkün olmuştur.

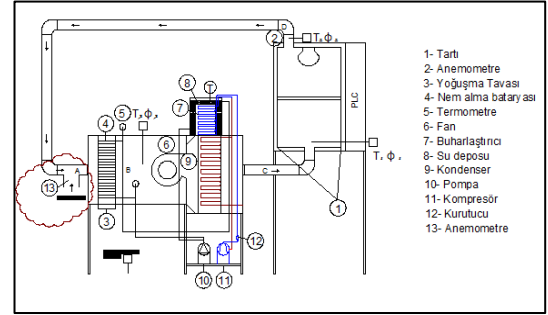
Kullanılan kurutma sistemi 370W'lık kompresör, R-134a soğutucu akışkan, yoğuşurucu, buharlaştırıcı, fan (160 W & 990 m<sup>3</sup>/h), pompa (370 W, 2,4 m<sup>3</sup>/h), su deposu (40 litre), frekans invertörü, anemometre, filtre, kılcal boru, 20 kg ölçme kapasitesine sahip ağırlık ölçer, elektronik elektrik sayacı, kurutma odası ve PLC kontrol cihazından (sıcaklık ve ağırlık ölçümü, 1 MB uygulama hafızası artı 512K font ve 3 MB resim hafızası, LCD LED dokunmatik ekran, operatör paneli) oluşmaktadır. Kullanılan her iki kurutucu sistem de bu ekipmanları içermektedir.

Şekil 1'de ilk deneyin yapıldığı kapalı devre kurutma sistemi, Şekil 2'de ise ikinci deneyin yapıldığı ve sisteme taze hava girişinin sağlandığı

kurutma sistemi ve bu sistemlerdeki değerlerin ölçüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Kapalı devre kurutma sistemi (Closed loop drying unit)



Şekil 2. Taze hava girişli kurutma sistemi (Fresh air-inlet drying unit)

Tablo 4. Ölçüm Cihazının Teknik Özellikleri (Technical Properties of Measurement Equipment)

Sistem elemanı	Teknik özellikler	Doğruluk	Belirsizlik
Hava akışı ölçüm cihazı	Hız 0-20 m/s	$\pm 0,01$ m/s	$\pm 0,031$ m/s
Isıl çift	Skala -200°C ~+850°C 0-70°C, besleme 24V-DC, çıkış 4-20mA	$\pm 0,4$ °C	$\pm 0,648$ °C
Yük Hücresi	2,0mV/V, 5-12V, -35+60°C	$\pm 0,2$ %	$\pm 0,057$ %
Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazı	0-100 % bağıl nem, -40'tan +70°C 'ye	$\pm 2$ % RH $\pm 1$ °C	$\pm 2,236$ % RH $\pm 1,118$ °C
Elektrik ölçer	220 V	$\pm 1$ %	$\pm 1,41$ %
Dijital tartı	Maksimum ölçüm kapasitesi, 6100 g	$\pm 0,01$ g	$\pm 0,052$ g

Kurutma sisteminde enerji kaynağı olarak ısı pompasının yoğuşturucu kısmı, depodaki suyun düşük sıcaklıkta saklanması sağlamak için ise ısı pompasının buharlaştırıcı kısmı kullanılmaktadır.

Sistemde ilk deneyde kapalı devre, ikinci deneyde taze hava ile karışık olarak dolaşan kurutma havası, üründe mevcut olan nemi almakta ve böylece kurutma havasının nemi artmaktadır. Buharlaştırıcıda sağlanan soğuk su, pompa ile ısı değiştiricisine gönderilir ve soğuk yüzeyde kurutma havasının nemini yoğuşturur. Kurutma sisteminde PLC kontrol cihazında ayarlanan sıcaklık, bağıl nem değeri sıcaklık-bağıl nem sensörü ile ve hava hızı anemometre ile ölçülüp set değerlerine göre kontrol edilmektedir. Eğer PLC’de girilen değer ısı çift ile ölçülen sıcaklıktan büyük ise, kompresör devreye girer ve sıcaklık artışı sağlanır.

Buharlaştırıcı tarafından soğutulan suyun istenildiğinde pompa yardımı ile dolaşımı sağlanıp, sistemde kurutma havasının bağıl neminin kontrolü sağlanmaktadır. Deney boyunca kurutma kabindeki ağırlık ölçer ile limonların ağırlık değişimi izlenmiş ve her 10 dakikada bir not edilmiştir. Deney esnasında ortam havası sıcaklığı ortalama 20 °C ve ortam havası bağıl nemi ortalama % 50’dir.

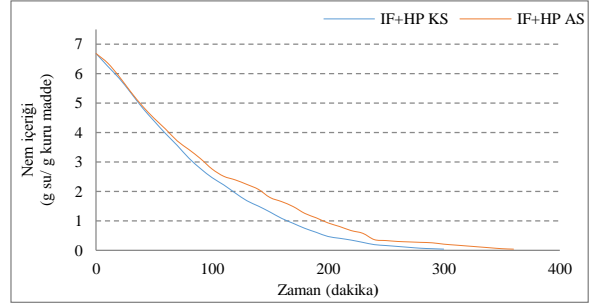


Şekil 3. Kurutma Ünitesi (The Drying Unit)

### 3. DENEY VE ANALİZ SONUÇLARI (EXPERIMENT AND ANALYSIS RESULTS)

Kurutma deneyine başlamadan önce limonların nem içeriği Eş. 1. kullanılarak 6,6804 g su/g kuru madde olarak hesaplanmıştır. Deneyler 60 °C sabit sıcaklıkta ve 1 m/s hava hızında gerçekleştirilmiştir.

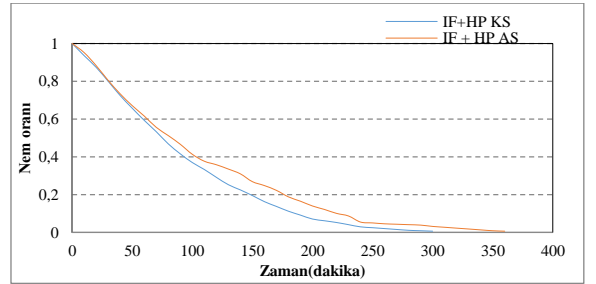
Hazırlanan her iki sistem için de deneyler tamamlandıktan sonra elde edilen veriler ile nem içeriğinin zamana göre değişimi hesaplanmıştır.



Şekil 4. Zamana göre nem içeriğinin değişimi (Change of moisture content according to time)

Şekil 4’de verilen grafikten de görüldüğü üzere, taze hava girişi olan kurutma düzeneğinde kurutma işlemi 6 saat sürerken, kapalı sistemde kurutma işlemi 5 saatte tamamlanmıştır.

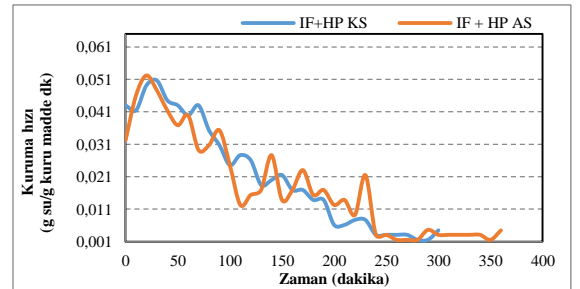
Her iki sistem için ayrı olarak MR değerleri hesaplanmış ve Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Zamana göre nem oranının değişimi (Change of moisture ratio according to time)

Yapılan deneylerde nem oranı 1’den başlayarak 0,06’ya kadar düşmüştür.

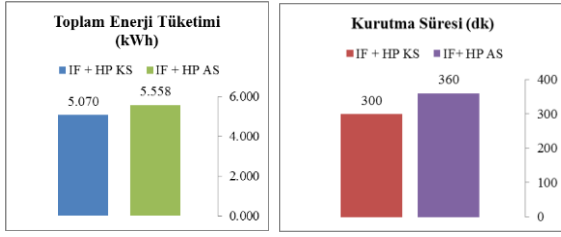
Her 10 dakikada bir yapılan ağırlık ölçümlerine ilave olarak yine aynı periyotta diğer tüm veriler not edilmiştir.



Şekil 6. Zamana göre kurutma hızının değişimi (Change of drying rate according to time)

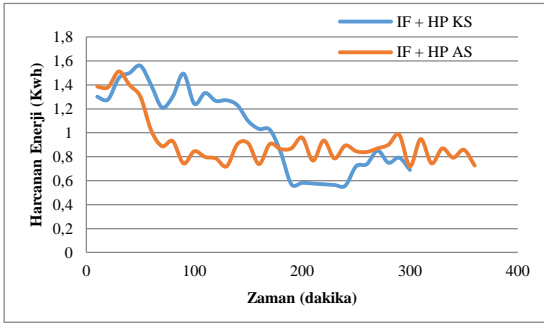
Deneyler aynı şartlarda gerçekleştirilmiş ve her iki sistemde de aynı şartlarda ve aynı miktarda limonun kurutulması için geçen süre ölçülmüştür. Kurutma işlemi kapalı çevrim kurutma sisteminde

taze hava girişli kurutma sistemine göre daha kısa sürede tamamlanmıştır.



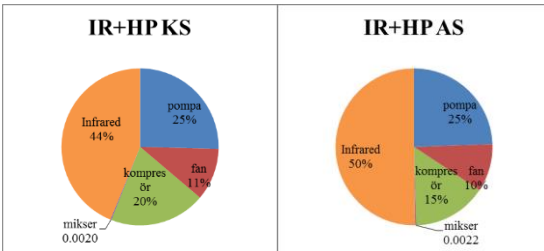
Şekil 7. Enerji tüketimi ve kurutma süresi (Energy consumption and drying time)

İki deneydeki enerji tüketimi sistemdeki sayacıdan okunmuş ve Şekil 8'deki grafikte gösterilmiştir.



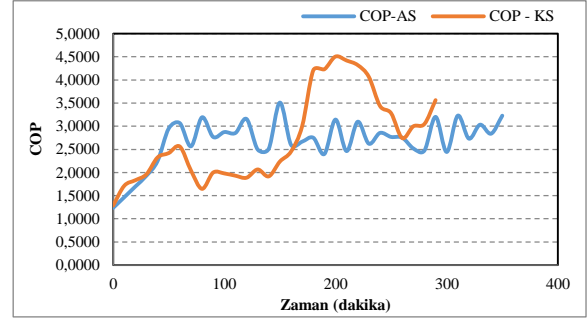
Şekil 8. Zamana göre harcanan enerji değişimi (Energy exchange by time)

Tüketilen toplam enerjinin büyük kısmı her iki sistemde de infrared lambada kullanılmıştır. Kapalı sistemde infrared lambanın kullandığı enerji açık sisteme göre yaklaşık %6 oranında düşerken, kompresörde tüketilen enerji oranı artmıştır.



Şekil 9. Toplam enerji tüketiminin dağılımı (Evaluation of total energy consumption ratios)

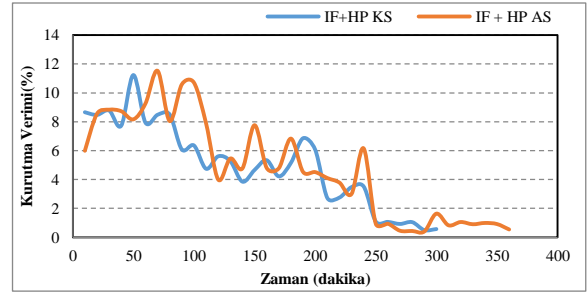
İki deneyde de ısıtma tesir katsayısı ( $COP_{ws}$ ) hesaplanmış ve zamana göre değişimi aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 10. Zamana göre COPws'nin değişimi (Change of COPws by time)

Hesaplanan ortalama COPws değeri taze hava girişli sistem için 2,67, kapalı çevrim sistem için 2,74 olarak bulunmuştur.

Her iki sistemin kurutma verimi aşağıdaki grafikte karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. Kurutma verimi (Efficiency of drying)

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu deneyler sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Limon dilimlerinin 6,6804 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 0,045 g su/g kuru madde nem miktarına düşmesi taze hava girişli sistemde 360 dakika, kapalı çevrim sistemde 300 dakika sürmüştür.

Yapılan hesaplama sonucunda limon dilimlerinin kapalı çevrim sistemde kurutulmasındaki ortalama COPws 2,74 olarak, taze hava girişli sistemde kurutulmasındaki COPws ise 2,67 olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalar sonucunda kapalı çevrim sistemde kurutmanın taze hava girişli sisteme göre daha verimli olduğu görülmüştür.

Taze hava girişli sistemde limon dilimlerinin kurutulması işlemi, kapalı çevrim olarak çalışan sisteme göre 60 dakika daha uzun sürmüştür. Bunun nedeni sisteme alınan taze havanın kurutma havasının sıcaklığını düşürmesidir.

Enerji tüketimi ve kurutma verimi açısından incelendiğinde kapalı çevrim kurutma sisteminin daha avantajlı olduğu görülmüştür.

Kurutulmuş limon dilimlerinin saklanması, taşınması ve kullanımı taze limona göre çok daha kolaydır.

Isı pompalı kurutucu, infrared ile desteklendiğinde kurutma süresinin ve enerji tüketiminin azaldığı belirlenmiştir. Yapılan bu çalışma literatürdeki benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, taze hava girişinin olmadığı sistemlerde kurutma havasının sıcaklığı ve nemi daha iyi korunduğu için daha kısa sürede ve daha az enerji tüketerek kurutma işleminin gerçekleştiği görülmüştür.

Yapılan bu çalışma neticesinde limon meyvesinin kurutulmasına dair aşağıdaki önerilerde bulunulabilir.

Kurutucu düzenekte limon haricinde başka gıda maddelerinin de kurutulması mümkündür.

Kurutucu düzeneğe güneş enerjisi desteği ilave edilebilir. Bu sayede enerji tüketimi azaltılabilir.

Kurutulan limon dilimlerinin gözle analizi yapıldığında limon dilimlerinde kurutma işlemi sonrası kararırma olduğu gözlenmiştir. Bu durumun ürünün pazarlanmasında dezavantaj yaratabileceği öngörülmektedir. Limonların kararırmasını önlemek için kurutma işleminden önce bir limon dilimlerine bir ön işlem yapılabilir.

## SİMGELER (SYMBOLS)

$c$ : Havanın özgül ısısı, kJ/kg°C  
 $COP_{hp}$ : Isı pompasının performans katsayısı  
 $COP_{ws}$ : Bütün sistemin performans katsayısı  
 $\varphi_{BN}$ : Çevre havası bağıl nemi  
 $DR$ : Kurutma hızı, g su/ g kuru madde dakika  
 $MC_{ab}$ : Nem içeriği, g su/ g kuru madde  
 $M_i$ : Başlangıçtaki yaş ağırlık, g  
 $\dot{m}_a$ : Buharlaştırılan su miktarı, kg/h  
 $M_d$ : Kuru ağırlık, g  
 $MC_t$ : t anına göre nem içeriği, g su/g kuru madde  
 $MC_{t+dt}$ : t+dt anına göre nem içeriği, g su/g kuru madde  
 $MR$ : Nem oranı  
 $M$ : Ürünün herhangi bir seviyede ve zamandaki nem içeriği, g su/ g kuru madde  
 $M_e$ : Denge nem içeriği, g su/ g kuru madde  
 $M_o$ : Başlangıçtaki nem içeriği, g su/ g kuru madde  
 $\dot{m}_{ia}$ : Havanın kütleli debisi, kg/s  
 $\rho$ : Havanın yoğunluğu, kg/m<sup>3</sup>  
 $SMER_{hp}$ : Isı pompasının özgül nem çekme oranı, kg/kWh  
 $SMER_{ws}$ : Tüm sistemin özgül nem çekme oranı, kg/kWh

$T_{ia}$ : Giriş havası sıcaklığı, °C

$T_{oa}$ : Çıkış havası sıcaklığı, °C

$\dot{V}$ : Hava debisi, m<sup>3</sup>/h

$\dot{Q}_K$ : Yoğuşturucudan kurutma havasına verilen ısı gücü, kW

$\dot{W}_C$ : Kompresör gücü, kW

$\dot{W}_f$ : Fan gücü, kW

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Aktaş, M. İlbaş, A. Yalçın ve M. Şahin. "Kızılötesi Işınımlı Bir Kurutucuda Kuruma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi" *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, vol. 28, no. 4, pp. 767-775, 2013.
- [2] M. Onin, "Bazı Meyve ve Sebzelerin İnfrared Kurutucuda Kurutulmasının Deneysel ve Teorik İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2012.
- [3] N. Arslan. "İnfrared Kurutma Yönteminin Kurutulmuş Manti Kalitesi Üzerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, 2012.
- [4] H. Darvishi, M. Khoshtaghaza, S. Minaei, "Drying kinetics and colour change of lemon slices", *International Agrophys*, vol. 28, no. 1, pp. 1-6, 2014.
- [5] H. Chen, C. E. Hernandez and T. Huang, "A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer", *Solar Energy*, vol. 78, no. 1, pp. 97-103, 2005.
- [6] M. Sadeghi, O. Mirzabeigi Kesbi and S.A. Mireei, "Mass transfer characteristics during convective, microwave and combined microwave-convective drying of lemon slices", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 93, no. 3, pp. 471-8, 2013.
- [7] M. Aktaş, Ç. Kara, "Güneş Enerjisi Ve Isı Pompalı Kurutucuda Dilimlenmiş Kivi Kurutulması", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, vol. 28, no. 4, pp. 733-741, 2013.
- [8] M. Tokdemir, "Isı pompası destekli kurutucuda toz elma ve elma cipsi üretiminin performans analizi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2018.
- [9] G. Gürlek, Ö. Akdemir ve A. Güngör, "Gıda kurutulmasında ısı pompalı kurutucuların kullanımı ve elma kurutmada uygulanması", *Pamukkale*



*Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 21, no. 9, pp. 398-403, 2015.

[10] M. Aktaş, T. Menlik, K. Boran, B. Aktekeli ve Z. Aktekeli, “Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 2, no. 2, pp. 229-238, 2014.

[11] D. Shofinita, S. Feng and T. A. G. Langrish, “Comparing yields from the extraction of different citrus peels and spray drying of the extracts”, *Advanced Powder Technology*, vol. 26, no. 6, pp. 1633-1638, November 2015.

[12] M. Aktaş ve E. Gönen, “Isı pompalı nem kontrollü bir kurutucuda defneyaprağı kurutulması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no. 2, pp. 433-441, 2014.

[13] H. Günerhan, “Endüstriyel Kurutma Sistemleri”, *Türk Tesizat Mühendisleri Dergisi*, vol. 36, no. 13, pp. 1-10, 2005.

[14] B. Erbay ve E. Küçüköner, “Gıda Endüstrisinde Kullanılan Farklı Kurutma Sistemleri”, *Türkiye 10. Gıda Kongresi*, May 21-23, 2008, Erzurum.

[15] M. Aktaş, İ. Ceylan ve H. Doğan, “Güneş Enerjili Kurutma Fırınında Elma Kurutulması”, *Journal of Polytechnic*, vol. 9, no. 4, pp. 289-294 2006.

[16] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition, Boca Raton, FL: CRC, 2015.

[17] S. Wannapakhe, T. Chaiwong, M. Dandee and S. Prompakdee, “Hot Air Dryer with Closed – Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves for Reducing Energy in Drying Process”, *Procedia Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 77-82, 2012.

[18] Z. Lataoui, C. Romestant, Y. Bertin, A. Jemni and D. Petit, “Inverse thermal analysis of the drying zone of the evaporator of an axially grooved heat pipe”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, no. 5, pp. 562-574, July 2010.

[19] H. Abbasi, A. Seidavi, W. Liu and L. Asadpour, “Investigation on the effect of different levels of dried sweet orange (*Citrus sinensis*) pulp on performance, carcass characteristics and physiological and biochemical parameters in broiler chicken”, *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 22, no. 2, pp. 139-146, March 2015.

[20] M. Aktaş, İ. Ceylan ve H. Doğan, “Isı Pompalı Endüstriyel Fındık Kurutma Fırınının Modellenmesi”, *Journal of Polytechnic*, vol. 8, no. 4, pp. 329-336, 2005.

[21] M. Aktaş ve B. Aktekeli, “Isı Pompalı Kurutucuda Atık Isı Kullanımının Performansa Etkisi ve Deneysel Analizi”, *Tarım Bilimleri Dergisi*, vol. 21, no. 2, pp. 220-235, March 2015.

[22] İ. Ceylan, “Programlanabilir (PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı Ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.

[23] B. Fox, G. Bellini and L. Pellegrini, “Fermentation and Biochemical Engineering Handbook”, Third Edition, Waltham, MA: William Andrew, 2014.

[24] H. Doğan, “Kurutmada Kullanılan Hava Isıtma Kollektörlerinin Deneysel Karşılaştırılması”, *Teknoloji Dergisi*, vol. 4, no. 1-2, pp. 75-82, 2001.

[25] M. Abuşka ve H. Doğan, “Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucuda çekirdeksiz üzümün kurutulması”, *Politeknik Dergisi*, vol. 13, no. 4, pp. 271-279, 2010.

[26] P. Meena, S. Rittidech and N. Poomsa-ad, “Application of closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CV) air-preheater for reduced relative-humidity in drying systems”, *Applied Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 553-564, 2007.

[27] M. Aktaş, S. Şevik, B. Özdemir and E. Gönen, “Performance analysis and modeling of a closed-loop heat pump dryer for bay leaves using artificial neural network”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 87, no. 1, pp. 714-723, August 2015.

**Simge Pelin ALKAÇ**

Simge Pelin Alkaç, 1987 yılında Amasya'da doğmuştur. 2012 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2019 yılında Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde yüksek lisans derecesini almıştır. İlgili alanları arasında endüstriyel kurutma sistemleri, enerji verimliliği, termodinamik ve ısı transferi konuları bulunmaktadır.

**Kurtuluş BORAN**

Kurtuluş Boran 1956 yılında Niğde'de doğmuştur. Eskişehir Devlet Mühendislik ve Mimarlık Akademisi Makina Mühendisliği bölümünde eğitimini tamamladıktan sonra Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi bölümünden yüksek lisans derecesini almıştır. 1993 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği bölümünde doktora eğitimini tamamlamıştır. Halen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliğinde Profesör Doktor unvanıyla görevini sürdürmektedir. İlgili alanları arasında termodinamik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, soğutma uygulamaları ve ısı ekonomisi konuları bulunmaktadır.

**Mustafa AKTAŞ**

Mustafa Aktaş 2000 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi bölümünü tamamlamıştır. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünden yüksek lisans ve doktora derecelerini almıştır. Halen Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliğinde Profesör Doktor unvanıyla görevini sürdürmektedir. İlgili alanları arasında endüstriyel kurutma sistemleri, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, ısı ekonomisi ve ölçme tekniği konuları bulunmaktadır.

**Meltem TOKDEMİR**

Meltem Tokdemir, 1989 yılında Ankara'da doğmuştur. 2013 yılında Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamlamıştır. 2018 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünden yüksek lisans derecesini almıştır. İlgili alanları arasında endüstriyel kurutma sistemleri, enerji verimliliği, termodinamik ve ısı transferi konuları bulunmaktadır.