

KIZILÖTESİ IŞINIMLI BİR KURUTUCUDA KURUMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Mustafa AKTAŞ¹, Mustafa İLBAŞ¹, Arif YALÇIN², Murat ŞAHİN²

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar, Ankara.

²Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknikokullar, Ankara.

mustafaaktas@gazi.edu.tr, ilbas@gazi.edu.tr, arif.yalcin@yok.gov.tr, muratsahin4006@gmail.com

(Geliş/Received: 08.02.2012; Kabul/Accepted: 12.09.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, kızılötesi ışınlı bir kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş deneysel olarak analiz edilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı oransal olarak kontrol edilmiştir. Enerji verimliliği bakımından, bir ısı geri kazanım cihazı ile atık havanın ısısından faydalanılmıştır. Ayva dilimleri, 3,89 g su/g kuru madde başlangıç nem miktarından 0,16 g su / g kuru madde son nem miktarına kadar kurutulmuştur. Kurutma sisteminde 4-5 mm kalınlığında dilimlenmiş ayvalar 35 °C ve 40 °C kurutma hava sıcaklığında ve 1,22 m/s, 1,83 m/s ve 2,45 m/s kurutma havası hızlarında kurutulmuştur. Altı deney için kızılötesi ışınlı kurutucunun enerji ve psikrometrik analizi yapılmıştır. Ortalama olarak özgül nem çekme oranı (SMER), kurutma süresi ve ısı geri kazanımı cihazı verimi sırasıyla, 0,082 kg/kWh, 315 dakika ve % 37,5 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, kurutucu, kızılötesi ışınım, ayva.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DRYING BEHAVIOURS IN AN INFRARED RADIATION DRYER

ABSTRACT

In this study, an infrared radiation dryer was designed, manufactured and analyzed experimentally. Drying air temperature was controlled proportionally. The heat of exhaust air was utilized with a heat recovery device in terms of energy efficiency. Quince slices were dried from 3,89 g water/g dry matter initial moisture content to 0,16 g water/g dry matter final moisture content. In the drying system, quinces sliced into 4 mm thickness were dried at 35 °C and 40 °C drying air temperature and 1,22 m/s, 1,83 m/s and 2,45 m/s drying air velocities. Energy and psychrometric analysis of the infrared radiation dryer was performed for six experiments. On average specific moisture extraction rate (SMER), drying time and heat recovery device efficiency were calculated as 0,082 kg/kWh, 315 minutes and 37,5 %, respectively.

Keywords: Drying, dryer, infrared radiation, quince.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Gerçekten bu metot, tabiatta çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve ürün kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Doğada kuruma, güneş enerjisiyle gerçekleşmekte olduğundan, kurumanın her yerde ve her zaman bu yolla olması imkânsızdır. Her ürünün güneşte kurutulması doğru değildir. Bu yüzden birçok ürünün diğer metotlarla kurutulma yolları

geliştirilmiştir [1]. Kurutma; kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine belli bir süreçte indirgenmesi olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de kurutma sistemi denir. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin birçok dalında yaygın olarak uygulanmaktadır [2]. Gıda maddelerinin kurutulmasındaki amaç, ürünlerin depolama sürelerinin artırılmasıdır. Yapısındaki aroma ve gıda değerlerini kaybetmeden kurutulan ürünler muhafaza

edilerek, daha sonraki zamanlarda aynı kalitede tüketilebileceklerdir.

Kurutma ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, Akosman (2003), kızıl ötesi enerji ile küp şeker kurutma deneyleri yapmıştır. Araştırmacı, yaptığı çalışmalarda farklı kurutma havası (60, 70, 80 °C) sıcaklıklarında şekerin katı yapısının kuruma üzerine etkisini incelemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda, kızıl ötesi enerjili kurutucunun kristal ve küp şekerin içerdiği nemin, kısa sürede büyük oranla azaltılması işlemi diğer kurutucularla mukayese edildiğinde süre açısından daha avantajlı olduğunu gözlemlemiştir [3]. Dinçer (2002), kurutma sistemlerini enerji, ekserji ve çevre faktörleri açısından kapsamlı bir şekilde incelemiştir [4].

Ceylan ve Aktaş (2008), ısı pompası destekli kurutma fırınında fındık kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir [5]. Hebbar ve diğerleri (2004), sebzelerin kurutulması için kızıl ötesi ve sıcak havalı kombine olarak çalışan kurutucu tasarımını yapıp deneysel performansını incelemiştir. Yaptıkları deney çalışmaları sonucunda, kombine kurutmada 80 °C kurutma havası sıcaklığında ve 1 m/s kurutma hava hızında diğer yöntemlere göre kurutma süresinin %48 azaldığı ve aynı zamanda enerji tasarrufunun diğer koşullara göre %63 azaldığını tespit etmişlerdir [6].

Dinçer ve Şahin (2004), kurutma prosesi ve ekserji bakımından termodinamik analiz için yeni bir model sunmuştur [7]. Toğrul ve diğerleri (2005), yaptıkları çalışmada, 0,5, 1,0 ve 1,5 cm kalınlığında küp şeklinde kesilmiş mantarların kuruma davranışlarını kızıl ötesi kurutucuda farklı kurutma havası sıcaklığı (50°C, 60°C ve 80°C) değerlerinde incelemiştir. Sıcaklığın 50 °C'den 80 °C'ye çıkarılmasıyla 0,5 cm, 1,0 cm ve 1,5 cm dilim kalınlıklarının kuruma süresinde sırasıyla 170, 140, 104 dakikalık azalma olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca mantar kalınlığının difüzyon katsayısına etkisini araştırmışlar ve bunun sonucunda sıcaklık ve mantarların kalınlıklarındaki artışın difüzyon katsayısı artışına sebep olduğunu belirlemiştir [8].

Ceylan ve diğerleri (2007), ısı pompalı bir kurutucuda sırasıyla 1,28 kg su/ kg kuru madde ve 0,60 kg su / kg kuru madde nem miktarındaki kavak ve çam kerestelerini 0,15 kg su/ kg kuru madde miktarına kadar kurutmuşlardır. Başlangıç nem miktarı 1,28 kg su/ kg kuru madde olan kavak kerestelerini 0,15 kg su/ kg kuru madde miktarına kadar 70 saatte, 0,60 kg su/ kg kuru madde olan çam kerestelerini 0,15 kg su/ kg kuru madde miktarına kadar 50 saatte indirmişlerdir [9]. Nimmol ve diğerleri (2007), yaptıkları çalışmalarda muz dilimlerinin uzun dalga kızıl ötesi radyasyon ve düşük basınçlı kızıl ötesi radyasyonlu kurutucularda kurularak kuruma kinetiği ile ürünün kalite özelliklerini incelemiştir. Deneyler sonucunda araştırmacılar, ürünleri uzun dalga kızıl

ötesi radyasyon kurutucuda daha kısa sürede kurutmuş, düşük basınçlı kızıl ötesi radyasyon kurutucunun kuruttuğu muz dilimlerinin kalitesinin daha iyi olduğunu bulmuşlardır [10].

Nowak ve Lewicki (2004), elma dilimlerini kızılötesi ışınım ile kurutmuşlardır. Kızılötesi kurutma kinetiğinin ısı ışınlanmış yüzey ile ısı yayan yüzey arasındaki mesafeye ve hava hızına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [11]. Das ve diğerleri (2004), kızılötesi ışınımlı titreşimli bir kurutucu geliştirmişlerdir. Kurutma hızının radyasyon yoğunluğu seviyesine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [12]. Das ve diğerleri (2004), yarı kaynatılmış pirinci kızılötesi ışınımla kurutmuşlardır. Kurutma sistemini enerji tüketimi ve kurutulmuş ürün kalitesi açısından analiz etmişlerdir. Özgül enerji tüketimi değerlerinin 14,7 ve 73,4 MJ/kg arasında olduğunu ifade etmişlerdir [13].

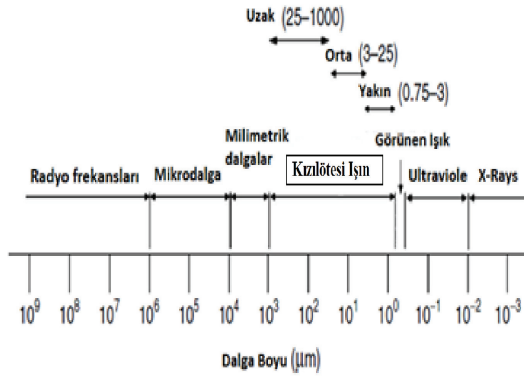
Jaturonglumlert ve Kiatsiriroat (2010), kombine edilmiş konvektif ve kızılötesi ışınımlı kurutucuda ısı ve kütle transferi analizi yapmışlardır [14]. Kızılötesi ışınımlı kurutucularda farklı ürünlerin kuruma karakteristikleri modellenmiştir [15-18]. Nathakaranakule ve diğerleri (2010), kızılötesi ışınımlı kurutucuda longan meyvesini kurutmuşlardır. Kızılötesi ışınımlı ısıtıcıların gücünün artmasıyla toplam tüketilen enerji miktarının azaldığını belirtmişlerdir [19]. Boudhrioua ve diğerleri (2009), kızılötesi ışınım ile kurutulmuş zeytin yapraklarının kalite değerlendirmesini yapmışlardır. Kızılötesi kurutma ile zeytin yapraklarında parlaklığın arttığını belirtmişlerdir [20]. Glouannec ve diğerleri (2002), gözenekli materyallerin kurutulması için kombine edilmiş kızılötesi ve mikrodalga kaynaklı bir kurutucuyu deneysel olarak analiz etmişlerdir [21]. Dessev ve diğerleri (2011), ekmeğin hamurunun kızılötesi ışınım emiciliğini incelemiştir [22].

Gıda ürünlerinin hızlı şekilde kurutulmasında içerdikleri besin ve aroma değerlerinin korunması esastır. Bu deneysel çalışmada diğer kurutma çalışmalarından farklı olarak, ısı geri kazanımlı kızıl ötesi ışınım ile sıcaklığın oransal olarak kontrol edildiği ve farklı hava hızlarında kurutma işlemleri gerçekleştirilerek, ısı geri kazanım cihazı ile kurutma kabineye girecek taze havanın ısıtılması sağlanmıştır. Sistemin enerji ve psikrometrik analizi yapılarak kuruma davranışları analiz edilmiştir.

2. KIZILÖTESİ RADYASYON (INFRARED RADIATION)

Kızılötesi ısıtma 0,5-100 µm dalga boyunda uygulanan birçok gıda maddesinin ısıtılması, kurutulması ve yüzey pastörizasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Kızılötesi ışınım, gıda maddelerinin işlenmesinde yararlanılan 0,5-100 µm dalga boyu arasındaki elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Kızılötesi radyasyonun tıp, plastik ve kâğıt

endüstrisi gibi birçok alanda uygulaması vardır. Kızılötesi radyasyon dalga boyuna göre kısa, orta ve uzak olmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır. Şekil 1'de kızılötesi radyasyonun elektromanyetik özellikleri gösterilmektedir [23].



Şekil 1. Kızılötesi radyasyonun elektromanyetik özellikleri (Electromagnetic properties of infrared radiation)

Kızılötesi ışınım ısı transfer özelliği, ürüne direkt nüfuz etme ve hızlı proses kontrolü özellikleri sayesinde diğer kurutuculardan ayrılarak ideal enerji kaynağı olduğunu göstermektedir. İlk kurulum ve işletme maliyetinin düşük olması çevreye zarar vermeyişi ve kullanımında mevsim değişikliklerinden etkilenmemesi özellikleri sayesinde kurutma alanında tercih edilebilir.

3. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Ayva dilimlerindeki ağırlık değişimine göre nem kontrolünün yapılabilmesi için kurutma işlemine başlanmadan önce ayva dilimleri, 103 ± 2 °C'de sabit tutulan bir etüv fırınında kurutulur. Kurutma sonucunda meydana gelen kütle değişimi ile ayvanın başlangıç nem miktarı belirlenir.

Ayva dilimlerindeki kuru esasa göre hesaplanan nem miktarı için;

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (1)$$

Ayva dilimlerindeki yaş esasa göre hesaplanan nem miktarı için;

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (2)$$

eşitlikleri kullanılır [24].

Kurutma fırınlarında en önemli verim etkinliği 1 kg nem kaldırmak için harcanması gereken enerjidir. Özgöl nem çekme oranı (SMER) olarak tanımlanan bu ifade tüm sistem için Eşitlik 3 ile verilmiştir [2].

$$SMER_{ws} = \frac{\dot{m}_{su}}{\dot{W}_f + \dot{W}_i} \quad (3)$$

Kurutma prosesinde sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu en genel halde Eşitlik 4 ile ifade edilir [25].

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{ia} \left(h_{oa} - h_{ia} + \frac{V_{oa}^2 - V_{ia}^2}{2} \right) \quad (4)$$

Kurutma odasında kızılötesi ışınım ile yapılan kurutma işlemi sırasında, ısı değişimi psikrometrik diyagram kullanılarak Eşitlik 5 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ia} \cdot (h_{oa} - h_{ia}) \quad (5)$$

Isı geri kazanım cihazı ile atık havadan kazanılan enerji Eş. 6 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ia} \cdot c_{pia} (T_{ia} - T_{oa}) \quad (6)$$

Belirsizlik analizi, deneysel çalışmalarda hata analizi için kullanılan bir yöntemdir. Veriler için ölçülen değerlerin doğruluğunu etkileyen en önemli etken ise deneyler sırasında oluşabilecek hatalardır. Ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

eşitliđi ile hesaplanabilir [26-27].

Eşitlik 7'de R ölçülmesi gereken büyüklük, bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ şeklindedir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün toplam belirsizliği W_R olarak ifade edilmiştir.

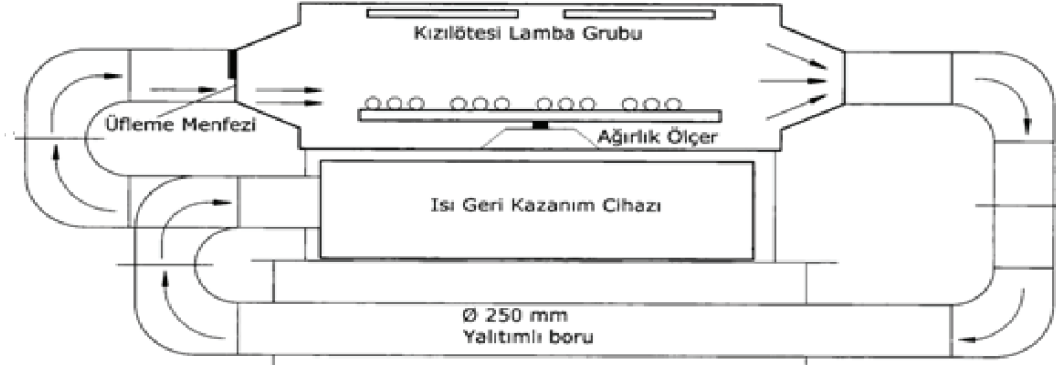
4. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Kızıl ötesi ışınım ile ayva kurutulması için kurutma sistemi analiz edilmiş ve sisteme yönelik otomatik kontrol mekanizması bu çalışma ile geliştirilmiştir. Kurutma havası sıcaklığı oransal olarak kontrol edilen, ısı geri kazanımlı kurutma fırını tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 2). Sistemde kurutma kabininden çıkan hava ısı geri kazanım cihazına girmiş ve burada ısısının bir miktarı taze havaya aktarılmıştır. Bu sistem farklı şartlarda denenerek analizi yapılmıştır. Deneylerde, geliştirilen kontrol kartı ile 0,5 Hz aralıkla frekans kontrolü yapılarak hava debisi istenilen değere ayarlanmıştır.

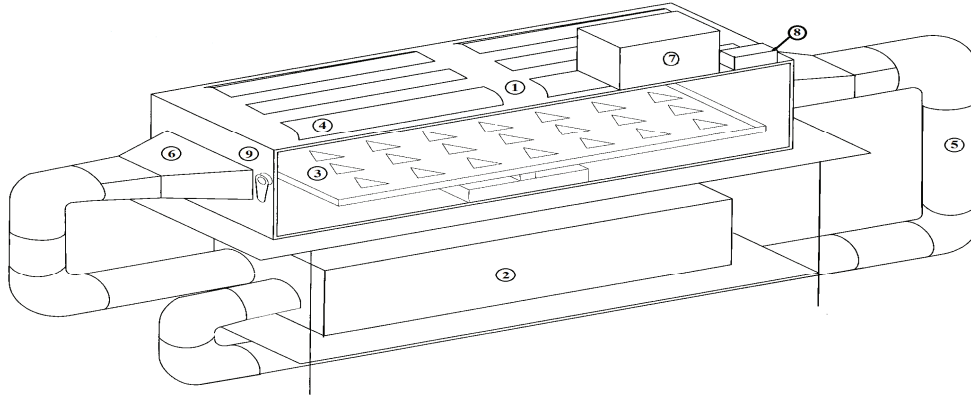
Bu çalışma için tasarımı ve imalatı yapılan kurutma kabini 600x1150x600 mm ebatlarında olup, kabin içerisinde üst kısma eşit aralıklarla 6 adet 500 W'lık çubuk tip kızılötesi lamba montajı yapılmıştır. Işık

yansıtılmasına yardımcı olması için kabin içi üst kısma 1150x600 mm ölçülerinde yansıtıcı alüminyum levha yerleştirilmiştir. Kurutma havasının ürünler üzerine etki etmesi için kurutma fırını giriş kapak kısmına hava yönlendirici menfez takılmıştır. Şekil 3’de kızılötesi ışınımlı sıcaklığı oransal olarak kontrol edilen kurutma fırınının 3 boyutlu görünüşü verilmiştir. Şekil 4’de sistemde kullanılan ağırlık ölçer ve kurutma tepsisine ait görüntüler verilmiştir. Ağırlık

ölçerin üzerine kurutma tepsi monte edilmiş ve böylece üründeki kütle değişimi deneylerde gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde ağırlık ölçer kalibre edilmiştir. Kurutma esnasında hava akımı ağırlık ölçeri etkilemiştir fakat bu etkilenme ağırlık ölçer göstergesinde 1-2 gramlık bir sapmaya sebep olmuştur. Kurutma fırınında kullanılan ekipmanların özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 2. Kızılötesi ışınımlı kurutucu (Infrared radiation dryer)



- | | | |
|--------------------------|----------------------------|------------------|
| 1. Kurutma kabini | 2. Isı geri kazanım cihazı | 3. Kurutma tepsi |
| 4. Kızılötesi lamba | 5. Yalıtımlı hava kanalı | 6. Davlumbaz |
| 7. Sıcaklık ölçüm cihazı | 8. Ağırlık ölçüm cihazı | 9. Kapak |

Şekil 3. Kızılötesi ışınımlı kurutucunun 3 boyutlu görünüşü (3 dimension view of infrared radiation dryer)



a) Ağırlık ölçer (load-cell)

b) Kurutma tepsi (drying tray)

Şekil 4. Ağırlık ölçer ve kurutma tepsi (Load-cell and drying tray)

Çizelge 1. Kızılötesi ışınımlı kurutucuda kullanılan ekipmanların özellikleri (Properties of equipments used in infrared radiation dryer)

Kullanılan cihaz	Özellikleri
Isı Geri Kazanım Cihazı	Vantila Reco 1000, 230 V 50 Hz, Max. hava debisi 1000 m ³ /h, fan motor gücü 265 W
Ağırlık Ölçüm Cihazı	Opkon OP-WE1 Model, 220 V 50 Hz
Sıcaklık Ölçüm Cihazı	Ordel PI 440 Model, 220 V 50 Hz
Kızılötesi Lamba	Çubuk tip 235V, 6x500W, 410 mm uzunluk
Elektronik Akıllı Sayaç	220 V, 50 Hz, Tek fazlı TS EN 62052-11 TS EN 62053-21 -40 °C ~ +85 °C çalışabilme 8 Haneli LCD gösterge.
Kontrol Kartı	Bode Teknoloji, 220 V AC, 0–80°C çalışma aralığı, ölçüm hassasiyeti 0,1°C, Rs485-modbus protokolü ve fanların 0,5 Hz aralıkla frekans kontrolü.

Sistemde kurutulan üründeki nem kontrolünün yapılabilmesi için kuru ağırlığın bulunması gerekir. Kurutma işlemine başlanmadan önce ayvalar, 103±2° C’de sabit tutulan bir fırında belirli aralıklarla tartılarak kurutulmuş, birbirini takip eden iki ölçüm sonunda ağırlığın %1’den az olması durumunda ayvalar kuru sayılmıştır.

Ayvaların üzerlerindeki lifler temizlenip tohum ve tohum evleri alındıktan sonra geriye kalan etli kısımlar, ortalama olarak 4-5 mm kalınlıkta dilimlenmiştir.

Ayvannın bünyesinde ihtiva ettiği nemin tayin edilebilmesi için, çevre basıncında kurutulmasıyla meydana gelen kütle kaybından yola çıkarak her iki ölçüm arasındaki fark %1’den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir.

Ayva dilimlerinin kuru baza göre başlangıç nem miktarı Eş. 1 kullanılarak 3,89 g su/g kuru madde olarak belirlenmiştir. Başlangıç nem miktarları bilinen ve ortalama olarak 4-5 mm boyutlarında boyuna kesilmiş ayva dilimleri sistemin kurutma fırını tepesine yerleştirilmiştir. Kurutma işlemi 35 °C ve 40 °C sıcaklıklarında 1,22 m/s, 1,83 m/s ve 2,45 m/s hava hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ürünlerdeki ağırlık değişimleri her yarım saatte bir kaydedilmiş, ölçümler sistem bünyesinde sabit montajlı olan ağırlık ölçer ile yapılmıştır.

Ayvalar kurutulurken ortam havası sıcaklığı ve bağıl nemi, egzoz havası sıcaklığı, kurutma fırını giriş havası sıcaklığı ve bağıl nemi, kurutma fırını çıkış havası sıcaklığı ve bağıl nemi, sistemde harcanan enerji (kWh), sistemde ölçülen hava hızı değeri (m/s) kayıt altına alınmıştır. Ürün yüzey sıcaklıkları Pt-100, 6 mm çapında ve hassasiyetinin ±0,4 ° C olduğu bir ısıl çift ile ölçülmüştür. Deneylerde, ısıl çiftin hissedicisinin, ürün yüzeyine çok iyi temas etmesi sağlanmıştır.

Deneylerde kurutma havası hızı kurutulan ürüne üflenen hava hızıdır. Çizelge 2’de verilen TESTO 435 marka cihaz ile ölçülmüştür. Ayrıca sistemde kullanılan fan debisi 1000 m³/h olduğundan Çizelge 1’de özellikleri verilen kontrol kartı ile 0,5 Hz aralıkla fan kontrol edilerek sistemde istenilen hava debisi ayarlanabilmektedir. Böylece ilgili kesit alanında hava hızları da hesaplanmış ve ayrıca ölçülerek doğrulanmıştır. Deneyler esnasında kullanılan cihazlar, özellikleri ve belirsizlikleri Eş. 7’den hesaplanarak Çizelge 2’de verilmiştir.

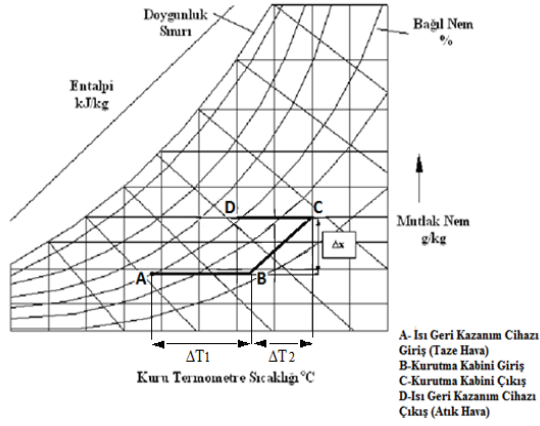
Yapılan nem miktarı analizleri neticesinde deneyler sonlandırılmıştır. Ayva dilimlerinde yapılan duyu analiz, beş duyu organları ile olmaktadır. El ile yapılan duyu analizde kurutulan dilimler ikiye katlandığında esnek hale geldiği ve iç kısımlarında nem olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kurutulan ayva dilimlerinin tadında, rengine ve kokusunda bir bozulma görülmemiştir.

Çizelge 2. Deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve özellikleri (Properties of equipments used during experiments)

Kullanılan cihaz	Özellikleri	Hassasiyet	Toplam belirsizlik
Isıl çift	ORDEL Pt-100 6 mm çap, OR07-B1E06-5ÜÖ3K Model, 400 °C duyarlılık	±0,4 °C	± 0,648 °C
Dijital tartı	Mettler Toledo, Excellence XS6002S model, 6100 g.	±0,01 g	±0,017 g
Ağırlık Ölçer	Zemic 5 Kg Kapasite, 40~+80 °C, 5~12 (DC).	± % 0,02	% ± 0,0346
Hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazı	Testo 435, sıcaklık -20,+70 °C, aralık 0-20 m/s	± 0,01 m/s, ± 0,1 °C,	± 0,02 m/s ± 0,14 °C
Sıcaklık ve nem ölçüm cihazı	Testo, 625 model, 5-95% bağıl nem, ölçüm aralığı 0-50 °C	± 3 % RH ± 0,5 °C	± 0,042 RH ± 0,7 °C

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSIONS)

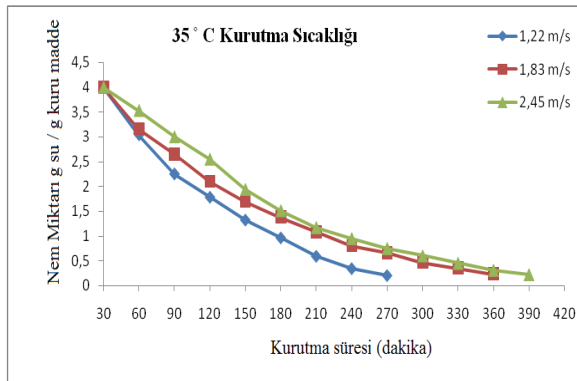
Kuru ağırlıkları tespit edilen ayva dilimleri farklı şartlarda kurutulmuştur. Şekil 5’de ürünlerin kurutulma süresi boyunca kurutma havasının akış şeması görülmektedir.



Şekil 5. Kurutma sisteminin psikrometrik analizi (Psychrometric analysis of drying system)

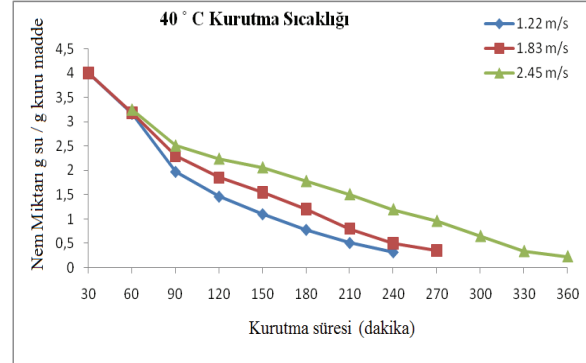
Sistemde atık hava egzoz edilmeden önce ısı geri kazanım cihazından geçirilmiş, sisteme alınacak kurutma havasının sıcaklığının artırılması düşünülmüştür. A şartlarında ısı geri kazanım cihazına giren taze hava, ısı geri kazanım cihazında sıcaklığı artarak B konumuna gelir. B konumunda kurutma kabine giren havaya kızılötesi lambalar ile ısıtma yapılarak sıcaklığı artırılır. Kurutma kabini içinde ürünlerdeki Δx kadar nemi bünyesine alırken ΔT_2 kadar da sıcaklığı artarak kurutma kabiniinden C konumunda dışarıya çıkmaktadır. C konumunda ısı geri kazanım cihazına giren hava, dışarıdan gelen taze havaya üzerindeki ısıyı bırakarak D konumunda cihazın egzoz kanalından çevreye atılmıştır.

35 °C sıcaklıkta yapılan kurutma işleminde her yarım saatte bir kayıt altına alınan nem miktarlarındaki değişimler Şekil 6’da verilmiştir.



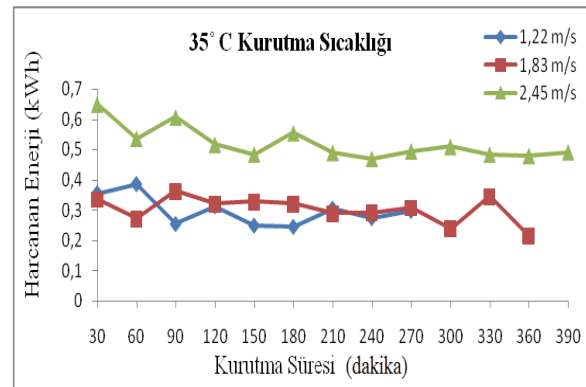
Şekil 6. 35 °C kurutma havası sıcaklığında ayva dilimlerinin nem miktarı değerleri (Moisture content values of quince slices at 35 °C drying air temperature)

Kurutma hızı başlangıçta yüksek iken belli bir noktadan sonra yavaşlamıştır. Şekil 6’da da görüldüğü gibi aynı sıcaklıkta kurutulmuş ayva dilimlerinin kuruma süresi, kurutma havası hızı artırıldıkça uzamıştır. 40 °C sıcaklıkta kurutma işleminde her yarım saatte bir kayıt altına alınan nem miktarlarındaki değişimler Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. 40 °C kurutma sıcaklığında ayva dilimlerinin nem miktarı değerleri (Moisture content values of quince slices at 40 °C drying air temperature)

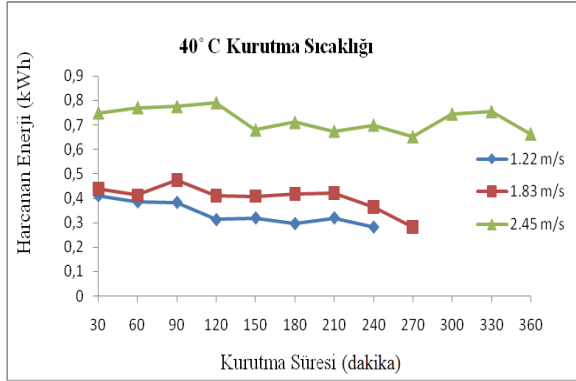
35 °C sıcaklıkta olduğu gibi 40 °C sıcaklıkta kurutulmuş ayva dilimlerinin kuruma süresi, kurutma hava hızı artırıldıkça uzamıştır. Bunun sebebi kızılötesi ışınım ile yapılan kurutmada yüksek hava hızının kabinde soğutma etkisi yaratarak kütle geçişini azaltmasıdır. Sistemde doğal taşınım ile de kurutma yapılabilir fakat üründen havaya olacak kütle geçişi ile kısa sürede hava doyumluk sınırına ulaşacak ve zorlanmış hava dolaşımı zorlu hale gelecektir. Şekil 8 ve Şekil 9’da sırasıyla 35 °C ve 40 °C sıcaklıkta yapılan kurutma çalışmalarında tüketilen enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 8. 35 °C kurutma sıcaklığında harcanan enerji miktarı (Consumed energy at 35 °C drying air temperature)

Şekil 8’den de görüleceği gibi, aynı sıcaklıkta kurutulmuş ürünlerin harcadığı enerji miktarı hava hızının artırılmasıyla artmıştır. Bunun sebebi olması gerekenden daha yüksek hava hızında fazla olan havayı ısıtmak için enerji tüketiminin artmasıdır. Bu deney sonuçlarında açıkça görülmektedir. 40 °C için bu durumda enerji tüketimi daha yüksektir. Burada 1,22 m/s hava hızında 40 °C’de enerji tüketiminin 35 °C’ye göre düşmesinin sebebi kurutma süresidir. Aynı

hava hızında kurutma süresinin kısılmasına etki eden parametre sıcaklıktır.



Şekil 9. 40 °C kurutma sıcaklığında harcanan enerji miktarı (Consumed energy at 40 °C drying air temperature)

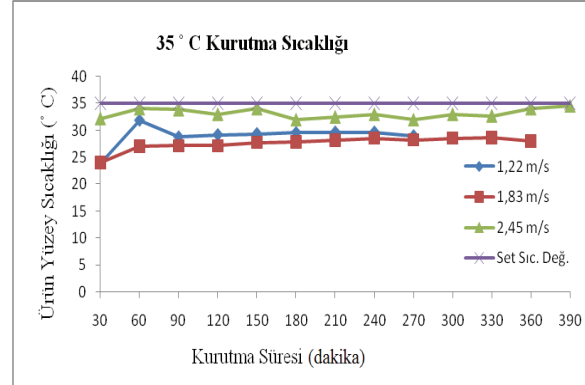
Şekil 9'dan da görüleceği gibi, 40 °C kurutma havası sıcaklığında, 35°C kurutma havası sıcaklığında olduğu gibi, sistemde harcanan enerji miktarı hava hızının artırılmasıyla artmıştır. Kurutma deneyleri süresince kontrol sisteminde set edilen değer ile ürün yüzey sıcaklığı her yarım saatte bir kayıt altına alınmış, her iki sıcaklık deneyinde 1,22 m/s, 1,83 m/s ve 2,45 m/s kurutma hızlarındaki sıcaklık değişimleri Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir.

Kızılötesi ışınlama ile yapılan kurutmada yüksek hava hızı kabinde soğutma etkisi yaratarak kütle geçişini azaltmaktadır. Ürün yüzey sıcaklığının yüksek hava hızında daha yüksek olmasının sebebi ürün yüzeyinde buharlaşmanın düşük hava hızına göre daha az olmasıdır. Buharlaşma azaldığı için ürün yüzey sıcaklığı deneylerde yüksek olarak görülmüştür.

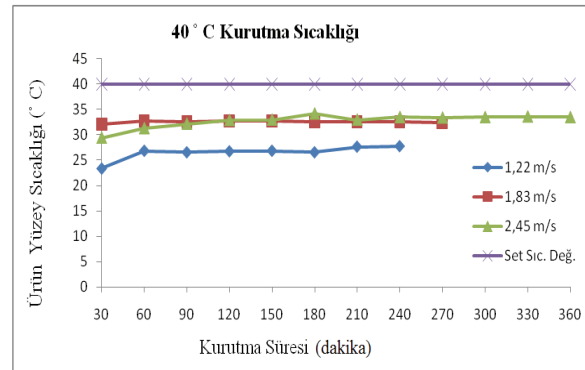
Hava hızının daha yüksek olduğu deneylerde kurutma süresi azalan kütle geçişinden dolayı uzamıştır. Daha düşük hava hızında buharlaşmadan dolayı ürün yüzey sıcaklığı azalmış ve kurutma süresi de kısalmıştır. Deneysel sonuçlar ve her bir deney için ısı geri kazanım cihazının verimi Çizelge 3'de görülmektedir.

Çalışmada daha yüksek sıcaklıklarda kurutma yapılabilir bu da kurutma süresini kısaltır fakat yüksek sıcaklıklarda kurutulan ayva, kivi elma, domates vb. ürünlerin ısı hasarlarına maruz kaldığı bilinen bir gerçektir. Bu ısı hasarları askorbik asit azalması, ürün

renginde esmerleşme, likopen azalması vb. şekilde sayılabilir.



Şekil 10. 35 °C kurutma havası sıcaklığında ürün yüzey sıcaklığı (Product surface temperature at 35 °C drying air temperature)



Şekil 11. 40 °C kurutma havası sıcaklığında ürün yüzey sıcaklığı (Product surface temperature at 40 °C drying air temperature)

Her bir deney sonucu için analizler yapılmış ve ısı geri kazanım cihazının verimi Eşitlik 4-6'dan faydalanılarak hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarına göre Eş. 3 kullanılarak, SMER 35 °C için 0,113 kg/kWh (1,22 m/s), 0,084 kg/kWh (1,83 m/s), 0,045 kg/kWh (2,45 m/s) ve 40 °C için 0,138 kg/kWh (1,22 m/s), 0,079 kg/kWh (1,83 m/s), 0,034 kg/kWh (2,45 m/s) olarak hesaplanmıştır. Deneylerde hava hızı arttıkça tüketilen enerji miktarı artmış, kütle transferi hızlanmamış ve bu faktörlerde SMER değerini düşürmüştür.

Isı ve kütle geçişi açısından kızılötesi ışınlı

Çizelge 3. Deneysel sonuçlar (Experimental results)

Deneyler	Toplam kurutma süresi (dakika)	Toplam tüketilen enerji (kWh)	Kazanılan enerji (kWh)	Isı geri kazanımı verimi (%)
35 °C – 1,22 m/s	270	2,689	1,511	0,359
35 °C – 1,83 m/s	360	3,628	2,394	0,397
35 °C – 2,45 m/s	390	6,743	6,627	0,495
40 °C – 1,22 m/s	240	2,208	0,884	0,285
40 °C – 1,83 m/s	270	3,845	2,6	0,403
40 °C – 2,45 m/s	360	8,901	4,064	0,313

kurutucuda hava hızı azaldıkça lambalardan kurutulan ürüne ısı transferi hızlanmış dolayısıyla ürünün daha kısa sürede kuruması ile de enerji tüketimi azalmıştır. 35 °C'den 40 °C'ye çıktığında SMER değerinin artmasının nedeni 40 °C'de yapılan deneyde kurutma süresinin kısalmasıdır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sistemde ayva dilimleri kurutulmuş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- En kısa kurutma süresi 40 °C kurutma hava sıcaklığı, 1,22 m/s hava hızında 240 dakikada gerçekleşirken en uzun kurutma 35 °C kurutma hava sıcaklığında, 2,45 m/s hava hızında 390 dakikada gerçekleşmiştir.
- Ayva dilimleri 3,89 g su/g kuru madde nem miktarından 0,16 g su/g kuru madde son nem miktarına ortalama 315 dakikada indirilmiştir. Bu süre diğer çalışmalar ile kıyaslandığında oldukça kısadır.
- Ortalama olarak SMER ve ısı geri kazanımı cihazı verimi sırasıyla, 0,082 kg/kWh ve % 37,5 olarak hesaplanmıştır.
- SMER değeri aynı sıcaklıkta yapılan tüm kurutma deneylerinde örneğin 35 °C sıcaklıkta kurutma havası hızının artmasıyla azalmıştır.
- Tüm kurutma denemelerinde, ürün kuruma süresi kurutma havası hızının artmasıyla artmış, kurutma havası sıcaklığının artırılmasıyla azalmıştır.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

c_p	Özgül ısı [kJ/kg°C]
h	Entalpi [kJ/kg]
KA	Kurutma sonrası numune kütlesi, [g]
\dot{m}_{su}	Birim zamanda buharlaşan su kütlesi [kg/h]
\dot{m}	Kütlesel debi [kg/s]
\dot{Q}	Birim zamanda harcanan enerji [kJ/s]
R	Ölçülmesi gereken büyüklük
SMER _{ws}	Kurutma fırını tüm sistemin özgül nem çekme oranı [kg/kWh]
SO _{KA}	Kuru maddeye göre ürün içerisindeki su miktarı [g su/g kuru madde]
SO _{YA}	Yaş maddeye göre ürün içerisindeki su miktarı [g su/g yaş madde]
T	Sıcaklık [°C]
V	Hız [m/s]
w	Hata oranı
\dot{W}	Birim zamanda yapılan iş [kJ/s]
\dot{W}_f	Fan gücü [kW]

\dot{W}_i	Isıtıcı gücü [kW]
W _R	R büyüklüğünün toplam belirsizliği
x	Bağımsız değişken
YA	Kurutma öncesi numune kütlesi, [g]

KISALTMALAR (SUBSCRIPTS)

ia	Giriş havası
oa	Çıkış havası
ws	Tüm sistem

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

07/2011-39 ve 07/2011-41 kodlu projelere vermiş oldukları desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Cemeroglu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., "Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi" Gıda Teknolojisi Derneği, 28, 541 – 542, 544-570, Ankara, 2003.
2. Ceylan, İ., "Programlanabilir (PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi" Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 45-80, Mayıs 2007.
3. Akosman, C., "Küp Şekerin İnfrared Enerji İle Kurutulması" Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 15(4), 561-568, 2003.
4. Dinçer İ., "On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems", *Int. J. of Energy Research*, 26, 717-727, (2002).
5. Ceylan, İ., Aktaş, M., "Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 23, No 1, 215-222, 2008.
6. Hebbbar, H., Vishwanathan, K.H., Ramesh, M.N., "Development of Combined İnfrared and Hot Air Dryer for Vegetables", *J. of Food Eng.* 65,557-563, 2004.
7. Dinçer, İ., Şahin, A., Z., "A new model for thermodynamic analysis of a drying process", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 47, 645 - 652, 2004.
8. Toğrul, H., Toğrul, İ., İspir, A., "Mantarların İnce Tabaka Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi", *III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı*, Antalya, 2005.
9. Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., "Isı Pompalı Bir Kurutucuda Kerestelerin Kurutma Süresinin Belirlenmesi", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 22, No 4, 847-854, 2007.

10. Nimmol, C., Devahastin, S., Swasdisevi, T., Soponronnarit, S., “Drying of Banana Slices Using Combined Low-Pressure Superheated Steam and Far-Infrared Radiation”, **Journal of Food Engineering**, 81, 624-633, 2007.
11. Nowak, D. and Lewicki, P. P., “Infrared Drying of Apple Slices”, **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 5, 353-360, 2004.
12. Das, I., Das, S. K. and Bal, S., “Specific Energy and Quality Aspects of Infrared (IR) Dried Parboiled Rice”, **Journal of Food Engineering**, 62, 9-14, 2004.
13. Das, I., Das, S., K. and Bal, S., “Drying Performance of a Batch Type Vibration Aided Infrared Dryer”, **Journal of Food Engineering**, 64, 129-133, 2004.
14. Jaturonglumlert, S. and Kiatsiriroat, T., “Heat and Mass Transfer in Combined Convective and Far-infrared Drying of Fruit Leather”, **Journal of Food Engineering**, 100, 254-260, 2010.
15. Celma, A. R., Rojas, S. and Lopez-Rodríguez, F., “Mathematical Modelling of Thin-layer Infrared Drying of Wet Olive Husk”, **Chemical Engineering and Processing**, 47, 1810-1818, 2008.
16. Toğrul, H., “Suitable Drying Model for Infrared Drying of Carrot”, **Journal of Food Engineering**, 77, 610-619, 2006.
17. Schmidt, F. M., Le Maout, Y. and Monteix, S., “Modelling of Infrared Heating of Thermoplastic Sheet Used in Thermoforming Process”, **Journal of Materials Processing Technology**, 143-144, 225-231, 2003.
18. Sharma, G. P., Verma, R. C. and Pathare, P., “Mathematical Modeling of Infrared Radiation Thin Layer Drying of Onion Slices”, **Journal of Food Engineering**, 71, 282-286, 2005.
19. Nathakaranakule, A., Jaiboon, P., and Soponronnarit, S., “Far-infrared Radiation Assisted Drying of Longan Fruit”, **Journal of Food Engineering**, 100, 662-668, 2010.
20. Boudhrioua, N., Bahloul N., Slimen I., B., Kechaou, N., “Comparison on the Total Phenol Contents and the Color of Fresh and Infrared Dried Olive Leaves”, **Industrial Crops and Products**, 29, 412-419, 2009.
21. Glouannec, P., Lecharpentier, D. and Noel H., “Experimental Survey on the Combination of Radiating Infrared and Microwave Sources for the Drying of Porous Material”, **Applied Thermal Engineering**, 22, 1689-1703, 2002.
22. Dessev, T., Jury, V., Le-Bail, A., “The Effect of Moisture Content on Short Infrared Absorptivity of Bread Dough”, **Journal of Food Engineering**, 104, 571-576, 2011.
23. İnternet: Hacettepe Üniversitesi Gıda Mühendisliği “İnfrared Enerjinin Gıdalar Üzerine Etkisi” <http://www.food.hacettepe.edu.tr/turkish/ouyeleri/gmu809/kizilotesi%20isitma.pdf> 2009.
24. Ashrae Temel El Kitabı Bölüm 10, “Tarım Ürünlerinin Kurutulmasında ve Depolanmasında Göz Önüne Alınacak Fizyolojik Etkiler”, Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınlar, 10, 5, 1993.
25. Çengel, Y., A., Boles, M., A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, Güven Bilimsel Yayınları, 230-232, 2008.
26. Holman JP. “Experimental Methods for Engineers”, Singapore: McGraw-Hill; 1994.
27. Kavak Akpınar E., “Drying of Mint Leaves in a Solar Dryer and Under Open Sun: Modelling, Performance Analyses”, **Energy Conversion and Management**, 51, 2407-2418, 2010.

