

ISI POMPASI DESTEKLİ BİR KURUTUCUDA FINDIK KURUTULMASI

İlhan CEYLAN ve Mustafa AKTAŞ

Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük
Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara
ilhancey@gmail.com, mustafaaktas@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 12.06.2007; Kabul/Accepted: 31.10.2007)

ÖZET

Bu çalışmada, ısı pompası destekli kurutma fırınında fındık kurutulması deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma sonrası fındıklar duyusal olarak analiz edilmiş ve nem değişimi kütle ölçüm metodu ile takip edilmiştir. Gerekli ön hazırlık ve son kontrol işlemleri uygulanarak fındıkların kurutma işlemi sonrası kalitelerinin artırılması, üreticilerin ihtiyacı olan ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan bu kurutma fırını ile sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, fındık, fındık kurutma, ısı pompası.

HAZELNUT DRYING IN A DRYER ASSISTED HEAT PUMP

ABSTRACT

In this study, hazelnut drying was examined experimentally at kiln assisted heat pump. After the drying hazelnuts were analyzed emotionally, moisture change was observed with mass measurement method. After the drying increasing of the quality of hazelnuts were provided by applying necessary first preparation and last control operations with this drying kiln which has been required by producers, has low first investment and energy expense.

Keywords: Drying, hazelnut, hazelnut drying, heat pump.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gıdalar için kurutma, içerisindeki nemin değişik metotlarla alınarak, bozulmasına neden olan etkenlerin ortadan kaldırılması olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile gıdadaki nemin uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Gıdadaki serbest nem ve ürün içindeki bağlı nem alınırken en uygun olan kurutma yöntemini seçmek günümüz enerji ve ekoloji dengeleri açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Üründen buharlaştırılan birim miktardaki nem için harcanan enerji miktarı da kurutma sistemlerinde enerji ekonomisi için önemlidir.

Türkiye’de birçok gıda güneşte sergi yöntemi ile kontrolsüz olarak kurutulmakta ve bunun sonucunda da kurutma kalitesi düşük olmaktadır. Günümüzde gıdaların teknik metotlarla kurutularak iç ve dış piyasaya daha kaliteli olarak sürülmesi son derece önemli hale gelmiştir. Bu kalite kriterlerini gıdanın kurutma sonrası su aktivitesi değeri, aflatoxin

miktarı, aroması, rengi ve dayanıklılığı olarak sıralayabiliriz.

Fındık, Türkiye’nin Karadeniz Bölgesi’nde yetişen ve yöre halkının da bir kısmının geçim kaynağı olan bir tarımsal üründür. Fındık ile ilgili işleme unsurlarından en önemlilerinden birisi ve zaman alıcı olanı fındığın kurutulmasıdır. Ağaçtan toplanan yaş fındıklar ön kurutma işlemine daha sonra da son kurutma işlemine tabi tutularak güneşte kurutulmaktadır. Ön kurutma işleminde fındığın soldurulması ve yağsız bir iklim şartında son kurutma işlemi de dahil olmak üzere kurutma işlemi uzun bir periyot olmakta ve bu sürede fındık güneşte serilerek kurutulmaktadır.

Kurutma işlemi gerçekleşirken gıdalardaki serbest nem kısa sürede atılmakta ve kontrollü olmayan kurutma işleminden ve üründeki bağlı nemden dolayı kurutma süresi uzamaktadır. Kurutma süresinin uzaması fındıkta aflatoxin oluşma

potansiyelini arttırmakta eğer kurutma esnasında yağışlı bir hava söz konusu ise bu potansiyel daha da artmaktadır. Ayrıca bu kurutma işlemi de son derece işçilik gerektiren bir yöntemle yapıldığından dolayı zaman alıcı olması da istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada kurutma sırasında ve sonrasında fındıkta oluşabilecek kurutma kusurları araştırılarak ve bu kurutma kusurlarını ortadan kaldıracak bir kurutucunun tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan ve analizi yapılan sistemde ısı pompası içerisinde atık havadan faydalanılması ile kurutma işleminde enerji tasarrufu sağlanabilecektir. Böylece Türkiye’de üretilen fındık, daha az enerji sarfiyatı ile kontrollü olarak yapılan kurutma işlemi sonucunda daha erken ve daha kaliteli olarak iç ve dış piyasaya sunulabilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Bu kısımda, kurutma, kurutma sistemleri ve teknikleri, fındık ve fındık kurutulması ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

Olgun ve Rzayev (2000), güneş enerjisi ile üç farklı sistemde fındığın kurutulmasını deneysel olarak incelemişler. Kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi olmak üzere üç sistemde fındığı kurutmuşlar. Yaptıkları sistemlerde, açık havada fındığın 82 saat civarında kuruduğu tespit edilerek; kabinet tipli kurutucuda ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte, ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğunu tespit etmişlerdir [1].

Aktaş ve diğerleri (2005), fındık kurutma şartlarını göz önünde bulundurarak ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellemesini yapmışlar. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı olurken, diğer zamanlarda kurutma işleminin devamlılığı ısı pompası yardımı ile sağlanabilecektir [2]. Demirtaş (1996), fındıkta kurutma şartlarını belirlemek amacıyla aynı kurutma şartlarında ince sergideki fındık aromasının, kalın sergideki fındık aromasına göre daha iyi olduğu ve kimyasal analizlerde görülür bir ayrıcalık olmadığını belirlemiştir. İnce sergide çok düşük hızlarda (<0.3 m/s) fındık kurutma sonunda aromada kötüleşme izlenmiş ve kalın sergide ise kurutma havası hızının artmasının, fındık aromasının kötüleşmesine neden olduğu görülmüştür. Kurutma için en ideal hava hızı 0.3 m/s olarak belirlenmiştir [3]. Demirtaş, Ayhan ve Kaygusuz (1998), fındığın kuruma davranışlarını sayısal yöntemlerle de incelemişlerdir [4]. Lopez ve diğerleri (1998a), farklı sıcaklık (30 °C - 70 °C) ve farklı hızlardaki (0.5 m/s – 2 m/s) şartlandırılmış hava

ile farklı yatak yüklerinde (50 kg/m² – 150 kg/m²) deneyler yapmışlardır [5]. Filho ve Strommen (1996), kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucuların düşük sıcaklıklarda çalışan konvansiyonel kurutuculara göre daha verimli çalışma potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir [6]. Baines (1986), ısı pompalı kurutucular kullanıldığında, kurutucularda enerji kayıplarının azaldığını belirtmiştir [7]. Söylemez (2006), kurutma sistemlerinde sistemdeki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Sistemin termo-ekonomik analizi için sistem elemanlarının ısı analizi ile birlikte basit bir ekonomik analiz yapmıştır [8].

Chua ve Chou (2005), iki kademeli ısı pompalı kurutma sistemini deneysel olarak incelemiştir. Tek kademeli sisteme göre bu sistemde % 35’den daha fazla ısı çekildiğini belirtmiştir. Sistemde yüksek ve düşük basınçlı dış evaporatörler kurutma havasını soğutma ve kurutma havasından nem çekme amaçlı olarak kullanmıştır [9]. Hawlader (2003), güneş enerjili, ısı pompalı kurutma fırını ve sıcak su ısıtıcısı yapmıştır [10]. Coşkun (1993), kurutma işlemlerinde ısı pompası ile enerji tasarrufu sağlanmasını deneysel olarak incelemiştir. Kurutma havasının ısı pompasının yoğunlaştırıcısında ısıtılmasının fuel-oil ile ısıtılmasının yanında %25 daha verimli olduğunu saptamıştır [11].

Coşkun (2000), ısı pompası yardımıyla sürekli kurutma sisteminin simülasyon programını oluşturmuştur [12]. Teeboonma ve diğerleri (2002), ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmış. Isı pompalı meyve kurutucularının optimum şartları belirlenirken en önemli faktörlerin dönüş havası oranı, evaporatör by-pass oranı, kütleli debi ve kurutma havası sıcaklığı olduğunu belirtmiş. Sonuç olarak kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri optimum hava debisini ve evaporatör by-pass hava oranını önemli bir biçimde etkilemektedir ifadesini kullanmış [13].

Oktay ve Hepbaşlı (2003), mekanik ısı pompalı bir kurutucunun performans değerlendirmesini yapmıştır. Kondenser ve evaporatör sıcaklıklarına bağlı olarak ısıtma tesir katsayısı 2.47 ile 3.95 arasında değişmiştir. Kurutucuda özgül nem çekme oranı 0.65 ile 1.75 kg/kWh arasında değişmiştir [14].

3. ISI POMPASI SİSTEMLERİ (HEAT PUMP SYSTEMS)

Çevrimde kompresör, kondenser, (yoğusturucu) genişletici (genleşme vanası veya kılcal boru) ve evaporatör (buharlaştırıcı) bulunur. Isı pompaları hava, su ve toprak kaynaklı olarak üç gruba ayrılırlar. Bu çalışmada, havadan havaya bir ısı pompası sistemi ile fındık kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kurutma sisteminde gerekli toplam ısı miktarını ısı pompasının kondenseri sağlamalıdır. Kullanılan soğutucu akışkanın log P-h diyagramında; h_1 - h_2 :kompresör giriş-çıkış, h_2 - h_3 :kondenser giriş-çıkış ve h_3 = h_4 :kılcal boru giriş-çıkış entalpi değerleridir ve kondenser kapasitesi kurutma sistemi için gerekli toplam enerjinin kompresörün dinlenmesi için %25 fazlası kadar alınarak, sistemde kullanılacak soğutucu akışkan debisi:

$$Q_K = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (1)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanmaktadır. Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı:

$$Q_{ve} = Q_k \cdot F_h \quad (2)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanır. Fırın çalıştığı sürece ısı pompası sistemi de devrede kalacağından, fırın çalışma süresi (F_h), aynı zamanda ısı pompası çalışma süresidir. Kurutma sistemindeki gerekli toplam enerji miktarı kondenser kapasitesi kabul edilerek soğutucu akışkan debisi bulunan sistemde, kompresör gücü için de;

$$Q_C = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (3)$$

eşitliğinden faydalanılır.

Sistemdeki evaporatör kapasitesi:

$$Q_E = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır.

4. ENERJİNİN VE KÜTLENİN KORUNUMU (ENERGY AND MASS CONSERVATION)

Fındıkların kurutulmasında kullanılan sistem ısıtma ve soğutma uygulamalarını içermektedir. Sürekli akışlı açık sistem için enerjinin ve kütle korunumu kanunu uygulanarak aşağıdaki eşitlikler verilmiştir.

Kütlenin korunumu kanununun genel eşitliği kurutma sistemine uygulandığında:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (5)$$

Su buharı için kütle korunumunun genel eşitliği:

$$\sum (\dot{m}_{wi} + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{wo} \quad (6)$$

yada

$$\sum (\dot{m}_{ia} \cdot \omega_i + \dot{m}_{mp}) = \sum \dot{m}_{oa} \cdot \omega_o \quad (7)$$

Enerjinin korunumunun genel eşitliği:

$$\dot{Q}_K - \dot{W} = \sum \dot{m}_{ia} \cdot \left(h_{oa} - h_{ia} + \frac{V_o^2 - V_i^2}{2} \right) \quad (8)$$

Sistemdeki fındaki kinetik enerji değişimi ve sistemin diğer kısımlarındaki kinetik enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Kurutma esnasında enerji çözümlenmeleri için kurutma havasının bağıl nemi:

$$\phi = \frac{w P}{(0.622 + w) P_{satT}} \quad (9)$$

Kurutma havasının entalpisi:

$$h = c_p T + w h_{satT} \quad (10)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır [15].

Nemin çekilmesi için kurutma odasında kullanılan ısı miktarı:

$$\dot{Q}_{Dc} = \dot{m}_{ia} (h_{ia} - h_{oa}) \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sistemde kondenserden atılan ısı miktarı (\dot{Q}_K) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{ia} \cdot c_p \cdot (T_{ia} - T_{aa}) \quad (12)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (13)$$

Kondenser sıcaklığı (T_K) ile evaporatör sıcaklığı (T_E) arasında ideal bir soğutma çevrimi için maksimum ısıtma tesir katsayısı ($COP_{c,h}$) Carnot çevrimi ile saptanır [16].

$$COP_{c,h} = \frac{T_K}{T_K - T_E} \quad (14)$$

Normal bir uygulama için, enerji tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Sistemde enerji tüketimi diğer ekipmanlarda da söz konusu olabilir örneğin fan vb.

Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı ($COP_{hp,h}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$COP_{hp,h} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c} \quad (15)$$

Bütün sistem için ısıtma tesir katsayısının (COP_{wh}) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır .

$$COP_{wh} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + F_1 + F_2} \quad (16)$$

Kurutma esnasında kurutma prosesinde kurutma odasında enerjinin kullanılma oranı (EUR_{dc}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [17].

$$EUR_{dc} = \frac{\dot{m}_{ia} \cdot (h_{ia} - h_{oa})}{\dot{m}_{ia} \cdot c_p \cdot (T_{ia} - T_{aai})} \quad (17)$$

5. NEM MİKTARININ BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT)

Fındıktaki nem tayini iç fındığın sıcaklığı kontrol edilebilen bir etüvde (103 ± 2) °C'da, atmosfer basıncında 6 saat süre ile kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak nem miktarının belirlenmesidir.

Fındıklardaki kuru esasa göre hesaplanan nem miktarı için:

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (18)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Fındıklardaki yaş esasa göre hesaplanan nem miktarı için:

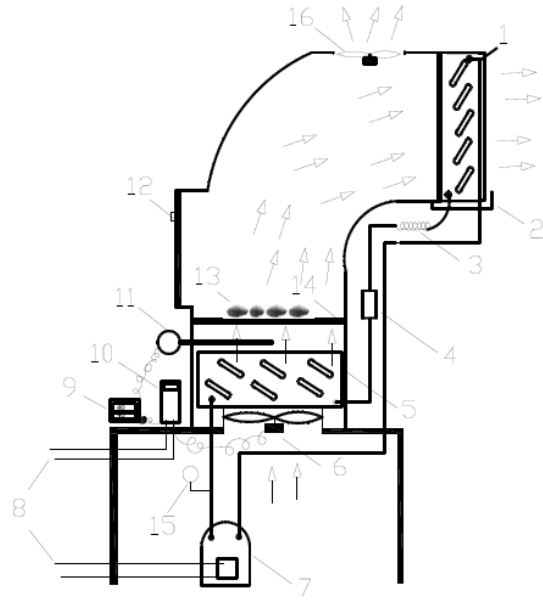
$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (19)$$

eşitliği kullanılmıştır [18].

6. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı fındık kurutma sistemi kompresör, yoğuşturucu (kondenser), buharlaştırıcı (evaporatör), kurutucu filtre (dryer), kılcal boru, eksenel fanlar, proses kontrol ekipmanı ve invertörden oluşmaktadır. Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı kurutucu Şekil 1'de verilmiştir. Deneysel sistem, ısı pompası sisteminin yoğuşturucusunu enerji kaynağı olarak kullanacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Kurutucu %100 dış havalı ve atmosfere açıktır. Dış hava, ısı pompası sisteminin yoğuşturucusundan aldığı ısı ile birlikte ürün üzerine gönderilir. Kurutma fırını içerisindeki ürünlerin nemi ısı pompası sisteminin yoğuşturucusundan aldığı ısı ile buharlaşarak kurutma havasına karışacaktır. Sistemde kurutma havası sıcaklığı proses kontrol ekipmanından set edilen değerde PID kontrol sistemi ile tutulur. Böylece kurutma havası sıcaklığının kontrolü kurutma havası hızının değişimi ile sağlanır. Set edilen değer termokupl ile okunan değerden büyük olduğunda fan daha az debide havayı üfler. Set edilen değer termokupl ile okunan değerden küçük olduğunda ise fan daha fazla debide havayı üflecektir. Tasarım aşamasında sistemde kondenser sıcaklığı 50 °C ve evaporatör sıcaklığı da 0 °C olarak belirlenmiş ve bu değerlere göre kapasite hesaplamaları yapılmıştır.

Kondenserden kurutma havasına aktarılan enerjinin bir kısmının, kurutma odasının çıkışında tekrar



1. Evaporatör, 2. Yoğuşan su 3. Kılcal boru
4. Kurutucu filtre 5. Kondenser 6. Eksenel fan (F₁)
7. Kompresör 8. Besleme
9. Proses kontrol ekipmanı
10. Invertor (AC farklı hız sürücülü)
11. Termokupl (T, Pt-100) 12. Kapak
13. Kurutulacak ürün 14. Raf
15. Manometre 16. Eksenel Fan (F₂)

Şekil 1. Isı pompalı PID kontrollü kurutucu (PID)

Çizelge 1. Isı pompalı kurutucuda kullanılan ekipmanların özellikleri (Properties of equipments used in heat pump dryer)

Kullanılan Ekipman	Teknik Özellikleri
Kompresör	Danfoss, 1/3 HP
Kondenser	½ HP
Evaporatör	1/3 HP
Eksenel Fan (F ₁)	40 W
Eksenel Fan (F ₂)	40 W
Proses kontrol ekipmanı	Ordell, PC440, 4 W, 100-240V AC, Transmitter kaynağı 24 V DC, Auto-Tuning, PID kontrol.
Invertor (driver)	Commander SK, 3 fazlı indüksiyon motorları için, AC değişken hız sürücüsü, Güç aralığı 0.25 kW - 4 kW, 0.33 HP - 5 HP
Termokupl (T, Pt-100)	Elimko, Giriş Pt-100, R/T Tip, Skala 0-70 oC, Besleme 24 V - DC, Çıkış 4-20 mA

evaporatörden çekilmesi ile ısı pompası sisteminin ısı dengesi sağlanmış olunacaktır. Bu çalışmada ısı pompalı bir kurutma fırınında egzoz havasının bir kısmı evaporatör üzerinden geçirilmiş ve böylece egzoz havasının ısısından yararlanılarak sistemdeki soğutucu akışkan buharlaştırılmıştır. Böylece sistemde ısı atımı kondenserde daha rahat gerçekleştirilmiştir. Isı pompalarında en önemli husus buharlaşma gizli ısısının çekileceği ortamda bir ısı kaynağının olabilmesidir. Bu da sistemin performansını arttıracaktır. Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanların özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Isı pompası sisteminde soğutucu akışkan olarak R-134a gazı kullanılmıştır.

PID kontrollü ısı pompalı kurutucu proses control cihazında set edilen sıcaklık değerine göre eksenel fanın devrini ayarlayacaktır. Set edilen değer termokupl ile ölçülen sıcaklıktan büyükse eksenel fanın üflenen havanın debisi azalmaktadır. Böylelikle daha az debideki dış hava kondenserden geçirilerek sıcaklığın, set edilen değere ulaşması sağlanmaktadır. Set edilen değer termokupl ile ölçülen sıcaklıktan küçükse eksenel fanın üflenen havanın hızı artmaktadır. Dolayısı ile daha fazla debideki dış hava kondenserden geçirilerek termokupl ile ölçülen sıcaklığın set edilen değere ulaşmasını sağlamaktadır.

7. DENEYSEL PROSEDÜR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

7.1. Tam Kuru Ağırlığın Belirlenmesi (Determination of exact dry weight)

Deneylere başlamadan önce temin edilen fındıkların tam kuru ağırlığının belirlenmesi için ön hazırlık işlemleri yapılmıştır. Tam kuru ağırlığın belirlenmesindeki prensip, iç fındığın sıcaklığı kontrol edilebilen bir etüvde (103 ± 2)°C’da, çevre basıncında 6 saat süre ile kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak rutubet muhtevasının belirlenmesidir.

Deneylerden önce toplanan yaş fındıklar zuruflarından ayrılmış ve tam kuru ağırlığı belirlenmek üzere hazırlanmıştır. Kurutma sisteminde fındık çeşidi olarak sivri fındık kurutulmuştur. Zuruflarından ayrılan fındıkların kabukları kırılmış ve daha sonra aşağıdaki işlemler sırasıyla takip edilmiştir.

a) Kabukları kırılmış olan iç fındıkların zarları ayıklanmıştır.

b) Zarları ayıklanmış iç fındıklar parçalama sonucu parçaların kalınlıkları 2 mm - 4 mm arasında olacak şekilde parçalanmıştır.

c) Parçalanmış iç fındıklar 103 ± 2 °C’ sıcaklık değerinde, kurutma fırınında kurutulmaya başlanmıştır.

d) 6 saatlik kurutma periyotları sırasınca ağırlık değişimi her 6 saatte bir takip edilerek, en son iki ölçüm arasındaki fark % 1’den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ağırlık değişimleri her 6 saatte bir takip edilerek, değerler kaydedilmiştir. Ölçümler Mettler Toledo marka dijital ağırlık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. İki ölçüm arasındaki fark %1’den daha az olduğu durumda fındıklar tam kuru kabul edilmiştir.

e)- Bu işlemler 4 ayrı numune için ayrı ayrı yapılarak tam kuru ağırlık değeri olarak bu dört değer ortalaması alınmıştır.

Fındıkların kuru baza göre başlangıç nem miktarı Eşitlik 18’den belirlenmiştir.

7.2. Fındıkların Kurutulması (Drying of Hazelnuts)

Başlangıç nem miktarları belirlenmiş olan 1000 gram fındık ısı pompalı kurutucuda kurutma kabineye yerleştirilerek, kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kurutma sisteminde fındık için uygun kurutma havası sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak, kurutma havası sıcaklık değeri 40 °C ve kurutma havası hızı da 0.3 m/s olarak belirlenmiştir. Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklığı proses kontrol cihazından set edilerek kurutma işlemi başlatılmıştır.

Yapılan bu deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Deneylerde kullanılan cihazların özellikleri (Properties of equipments used at experiments)

Kullanılan cihaz	Özellikleri
Dijital tartı	Mettler Toledo, Excellence XS6002S model, en yüksek ölçülebilecek miktar 6100 g, ölçüm hassasiyeti 0.01 g
Hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazı	Testo, sıcaklık -20,+70 °C, hız 0-20 m/s ölçüm hassasiyeti 0.01 m/s, 0.1 °C, heated wire, NTC sensör.
Sıcaklık ve nem ölçüm cihazı (Termohigrometre)	Testo, 625 model, 5-95% bağıl nemde ± 3 % ölçüm hassasiyeti, 0-50 °C sıcaklıkta $\pm 0,5$ °C ölçüm hassasiyeti
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Testo, 650 model, su aktivitesi a_w değeri 0 – 1 arasında olduğunda ölçüm hassasiyeti 0.001

7.3 Kurutma İşleminin Sonlandırılması (Completed of Drying Process)

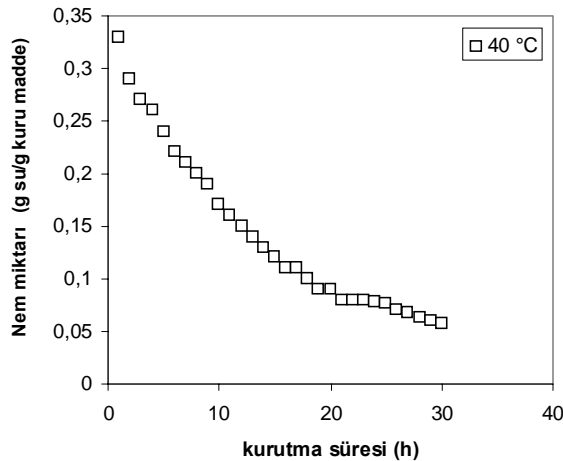
Yapılan kurutma işleminde aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurularak, kontroller yapılmış ve kurutma işlemi sonlandırılmıştır.

- Fındıkların son nem miktarı
- Fındıkların su aktivitesi değeri
- Fındıklarda yapılan duyuusal analiz

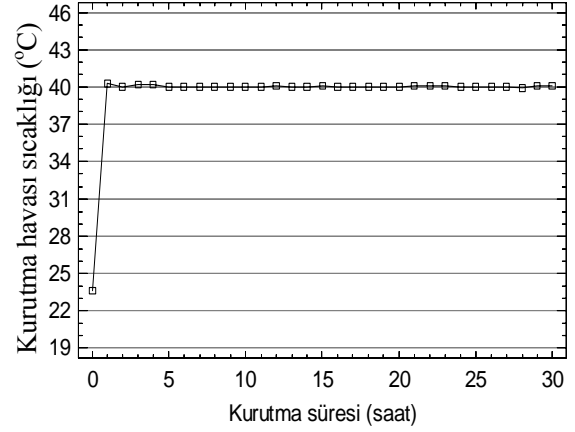
8. SONUÇLAR (RESULTS)

Isı pompalı kurutma odasında fındıklar 40 °C kuru termometre sıcaklığında, ortalama %25 bağıl neminde ve 0.38 m/s hava hızında, %35 nem (kuru esas) miktarından %5 nem (kuru esas) miktarına kadar 30 saatte indirilmiştir. Fındıklardaki nem miktarının kurutma süresine göre değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 3'de kurutma süresi boyunca kurutma havası sıcaklığının değişimi verilmiştir. Ayrıca Şekil 4'de kurutma havası bağıl neminin, kurutma süresince değişimi gösterilmiştir.

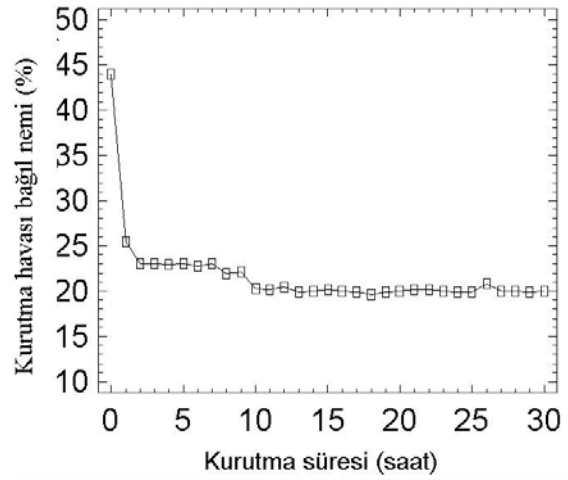
Su aktivitesi değeri ürünlerin bozulmadan uzun süre depolanmasını etkileyen çok önemli bir kriterdir. Deneye başlamadan önce 4 adet numunenin su aktivitesi değeri ölçülmüş olup bu dört değer ortalama olarak 0.905 olarak bulunmuştur. Kurutma işleminin sonunda %5 nem değerine ulaşıldığında ise yine 4 numuneden ölçülen su aktivitesi değeri ortalama olarak 0.349 olarak bulunmuştur. Normal depo koşullarında su aktivitesi değeri naturel fındıklar için 0.38, kavrulmuş fındıklar için 0.24 değerlerinde olduğunda aflatoksin oluşumu önlenmektedir Dolayısıyla kurutma işleminin sonucunda naturel fındıklarda 0.38 olan su aktivitesi değerinin altına inilmiştir. Kurutma süresi boyunca fındıklardaki 25°C'deki su aktivitesinin değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir. Ayrıca fındıklardaki nem miktarına göre su aktivitesinin değişimi de Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 2. Fındıklardaki nem miktarının kurutma süresine göre değişimi (Variation of moisture content of hazelnuts according to drying time)

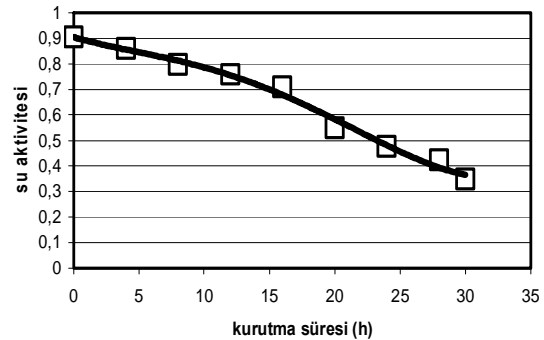


Şekil 3. Kurutma süresi boyunca kurutma havası sıcaklığının değişimi (Variation of drying air temperature during drying time)

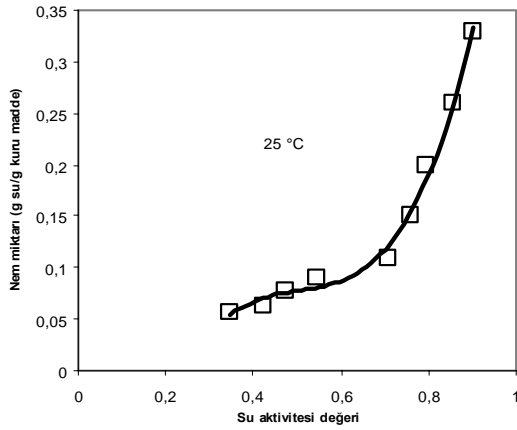


Şekil 4. Kurutma süresi boyunca kurutma havası bağıl neminin değişimi (Variation of relative humidity of drying air during drying time)

Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda tüm sistemin COP değeri 1.40 olarak bulunmuştur. Isı pompalı kurutma odasında enerjinin kullanılma oranı %14 ile %43 arasında değişmiştir. Enerjinin kullanılma oranı kurutmanın başlangıcında yükselme eğiliminde olup ürünlerdeki nem miktarının



Şekil 5. Kurutma süresi esnasında fındıklardaki su aktivitesinin değişimi (Variation of water activity of hazelnuts during drying time)



Şekil 6. Fındıklardaki su aktivitesinin nem miktarına bağlı olarak değişimi (Variation of water activity of hazelnuts depend on moisture content)

azalmasıyla azalan hızda kuruma periyoduna girildiğinde bu oran azalmıştır.

Yapılan çalışmanın literatürde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılması durumunda; doğada kurutmaya göre daha kısa sürede kurutma işlemi yapıldığı, ısı pompalı kurutucuda kurutma havası sıcaklığının ilk kez ek enerji gereksinimi duymadan PID olarak kontrol edilebildiği, kurutma işlemi ile fındıklardaki su aktivitesi değerinin uzun süreli depolamalarda bozulmasını önleyecek sınır değerinin altına inildiği görülecektir. Yapılan bu teknik kurutucuda; kurutma öncesinde, sırasında ve sonrasında su aktivitesi ve nem miktarının ölçümleri yapılmış, kurutma havası sıcaklığı ve hızı kontrol edilmiştir. Böylece en az enerji girdisi ile olabilecek uygun kurutma süresinde kaliteli ürün eldesi sağlanabilmiştir. Kurutulmuş olan fındıklardan alınan numuneler görüntü ve tat analizine de tabi tutulmuş ürünlerde herhangi bir bozulmaya rastlanılmamıştır.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
F_1	Fan gücü (kW)
F_2	Fan gücü (kW)
F_h	Fırın çalışma süresi (saat)
$h_3=h_4$	Soğutucu akışkanın kılcal borudan giriş-çıkış entalpisi (kJ/kg)
h	Soğutucu akışkanın entalpisi (kJ/kg)
\dot{m}	Kütlesel debi (kg/s)
Q_K	Kondenser kapasitesi (kJ)
Q_C	Kompresör gücü (kJ)
Q_E	Evaporatör kapasitesi (kJ)
Q_{ve}	Kondenserin kurutma havasına verdiği ısı (kJ)
P	Basınç (kN/m ²)
T_E	Evaporatör sıcaklığı (°C)
T_K	Kondenser sıcaklığı (°C)

\dot{V}	Hacimsel debi (m ³ /s)
\dot{W}	Yapılan iş (kJ)
\dot{W}_c	Kompresörün güç girişi (kW)
$P(T)$	Havanın T sıcaklığındaki kısmi su buharı basıncı (N/m ²)
T	Sıcaklık (°C)
W_f	Fanın güç girişi (kW)
w	Mutlak nem (g/kg)
ρ	Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
ϕ	Bağıl nem (%)
h_1	Soğutucu akışkanın kompresöre giriş entalpisi (kJ/kg)
h_2	Soğutucu akışkanın kompresörden çıkış entalpisi (kJ/kg)

KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

$COP_{c,h}$	Carnot çevriminin ısıtma tesir katsayısı
$COP_{hp,h}$	Carnot çevrimine göre ısı pompasının ısıtma tesir katsayısı
COP_{wh}	Carnot çevrimine göre bütün sistemin ısıtma tesir katsayısı
De	Kurutma odası
EUR_{dc}	Kurutma odasında enerjinin kullanılma oranı
\dot{I}	Giriş
ia	Giriş havası
KA	Kuru ağırlık (kg)
mp	Nem üretimi
o	Çıkış
oa	Çıkış havası
sat	Doymuş
SO_{KA}	Üründeki kuru ağırlığa göre su oranı (g su/g kuru ağırlık)
SO_{YA}	Üründeki yağ ağırlığa göre su oranı (g su/g yağ ağırlık)
wi	Su girişi
wo	Su çıkışı
YA	Yağ ağırlık (kg)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Olgun, H., Rzayev P., "Fındığın Üç Farklı Sistemde Güneş Enerjisi İle Kurutulması" **Tr J Engin Environ Sci**, Tübitak, 24, 1-14, 2000.
2. Aktaş, M., Ceylan İ., Doğan, H., "Isı Pompalı Endüstriyel Fındık Kurutma Fırınının Modellenmesi", Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, **Politeknik Dergisi**, Cilt 8, Sayı 4, s, 329-336, 2005.
3. Demirtaş, C., "Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1996.
4. Demirtaş, C., Ayhan, T., Kaygusuz, K., "Drying Behaviour of Hazelnut", **Journal Science of Agriculture**, 76, 559-564, 1998.

5. Lopez, A., Pique, M., T., Boatella, J., Ferran, A., Garcia, J., Romero, A., "Drying characteristics of the hazelnut", **Drying Technology**, 16, 3-5, 627-649, 1998a.
6. Filho, O., A., Strommen, I., "The application of heat pump in drying of biomaterials", **Drying Technology**, 14(9), p 2061-2090, 1996.
7. Baines P., G., "A comparative analysis of heat pump dryers", Ph.D. Thesis, University of Otago, New Zealand, 1986.
8. Söylemez, M., S., "Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery", **Journal of Food Engineering**, 74, p 292-298, 2006.
9. Chua, K., J., Chou, S., K., "A modular approach to study the performance of a two stage heat pump system for drying", **Applied Thermal Engineering**, Volume 25, Issues 8-9, p 1363-1379, 2005.
10. Hawlader, M., N., A., 9, Engineering Drive, Department of Mechanical Engineering, **National of Singapore**, pp 185-193, 2003.
11. Coşkun, S., "Kurutma İşlemlerinde Isı Pompası İle Enerji Tasarrufu Sağlanmasının İncelenmesi", Yüksek lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 1993.
12. Coşkun, S., "Isı Pompası Yardımıyla Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu", Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, 2000.
13. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., "Optimization of Heat Pump Fruit Dryers", **Journal of Food Engineering**, 59, pp 369-377, 2002.
14. Oktay Z., Hepbaşlı A., "Performance Evaluation of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer", **Energy Conversion and Management**, 44, pp 1193-1207, 2003.
15. Akpınar E., K., "Energy And Exergy Analyses of Drying of Red Pepper Slices in a Convective Type Dryer", **Int. Comm. Heat and Mass Transfer**, Vol. 31, No.8, pp. 1165-1176, 2004.
16. Y.A. Cengel, M.A. Boles, (1998), **Thermodynamics**, An Engineering Approach, third edition, McGraw-Hill, New York, p. 1056.
17. Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan H., "Energy and Exergy Analysis of Timber Dryer Assisted Heat Pump", **Applied Thermal Engineering**, 27, pp, 216-222, 2007.
18. ASHRAE Temel El Kitabı Bölüm 10, "Tarım ürünlerinin kurutulmasında ve depolanmasında göz önüne alınacak fizyolojik etkenler", Tesisat mühendisleri derneği teknik yayınlar:2, s, 10-5, 1993.