

# Endüstriyel Tip Isı Pompalı Kurutucuda Çekirdeksiz Üzümün Kurutulması

Mesut ABUŞKA, Hikmet DOĞAN

## ÖZET

Bu çalışmada Sultaniye tip çekirdeksiz üzümün, sıhhi, kapalı ve kontrollü şartlarda endüstriyel çapta kurutulması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, ısı pompası teknolojisi esas alınmış ve Türkiye’de ilk olarak 10.000 kg kapasiteli endüstriyel tip ısı pompalı kurutma (IPK) sistemi tasarımı ve imalatı yapılarak deneysel olarak incelenmiştir. IPK’da yapılan deneylerde % 324,45<sub>kb</sub> nem oranındaki ürünler, 60,2 °C kurutma havası sıcaklığında 52 saatte % 20,71<sub>kb</sub> nem oranına kurutulmuştur. Açık havada beton üzeri bez sergide yapılan kurutma işleminde ise % 330,81<sub>kb</sub> nem oranındaki ürünler, 199 saatte % 14,60<sub>kb</sub> nem oranına kurutulmuştur. IPK’da kurutulan üzümler temizlik açısından tozsuz ve renk değeri olarak 10 numara değer elde edilmiştir. Açıkta kurutulan üzümler ise tozlu ve renk değeri olarak 9 numara elde edilmiştir. Sultaniye tipi çekirdeksiz üzümlerin kurutulmasında deneysel olarak analiz edilen kurutucunun, ürünün kurutulması sırasında ortalama ısıtma tesir katsayısı COP<sub>sistem</sub>: 2,81, özgül nem alma verimi SMER<sub>sistem</sub>: 1,53, nem alma verimi MER: 99,15 olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kurutma, endüstriyel tip ısı pompası, çekirdeksiz üzüm.

## Drying of the Seedless Grape in An Industrial Type Heat Pump Dryer

### ABSTRACT

In this study, seedless grapes sultanas, sanitary, industrial-scale drying of a closed and controlled conditions intended. To this end, was covered in heat pump technology and as Turkey's first industrial-type heat-pump drying (HPD) system with a capacity of 10,000 kg had been examined experimentally by designing and manufacturing. In experiments in the HPD 324.45<sub>db</sub> % humidity products, drying air temperature of 60.2 °C, 52 hours 20.71<sub>db</sub> % moisture content were dried. Under the sun drying process of concrete above the cloth sheet 330.81<sub>db</sub> % humidity products, 199 hours 14.60<sub>db</sub> % moisture content were dried. At the HPD dried grapes for cleaning dust-free and color value for the number 10 was obtained. Grapes are dried in the open as the dusty and the color value of the number 9 was obtained. Sultana type seedless grapes drying in the experimental analysis of the dryer, the average heating effect of the product during drying COP<sub>system</sub> coefficient: 2.81, specific SMER<sub>system</sub> dehumidification efficiency: 1.53, dehumidification efficiency MER: 99.15 respectively.

**Keywords:** Drying, industrial type heat pump, seedless grape.

### 1. GİRİŞ

Dünyada tarım ürünleri endüstriyel veya doğal şartlarda kurutulmaktadır. Açıkta ürün kurutmada; çoğu kere ürünün sağlığa uygunluğu (bakteriyolojik), renk ve lezzet gibi özelliklerinin bozulmasından; ürünün kalitesi düşmekle birlikte zaman ve işçilikte de büyük kayıplara sebep olmaktadır. Ayrıca açıkta tabii olarak kurutmada, meteorolojik etmenler de ürün kayıplarına neden olmaktadır. Bunun yanında endüstriyel kurutmada ilk yatırım maliyeti ve sürekli enerji maliyeti girdileri yüksek olduğundan ürün maliyetleri artmaktadır. Ancak kurutmanın kapalı şartlarda kontrollü olması, ürün kalitesi, zaman, işçilik, mikro biyolojik ve ürün kaybının azaltılması yönünden büyük getiriler sağlamaktadır.

*Makale 28.12.2010 tarihinde gelmiş 02.06.2011 tarihinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.*

*M. ABUŞKA, Org. Kenan Evren Endüstri Meslek Lisesi, Alaşehir, Manisa*

*e-posta : mesut\_abuska@hotmail.com*

*H. DOĞAN, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü*

*e-posta : hdogang@gazi.edu.tr*

*Digital Object Identifier 10.2339/2010.13.4, 271-279*

Açık havada, yer sergilerde üzüm kurutulması esnasında sabahları çiy oluşması ve bazen yağmur yağmasıyla kuruma sürecinin uzamasına (12–20 gün), üzümden afla toksin (küflenme) oluşmasına sebep olmaktadır. Örneğin; Manisa’da her yıl ürünün 1/3’ü yağmurlardan zarar görmektedir [1]. Türkiye, 2008 yılında 825 bin tonluk kuru üzüm üretimi içersinde 300 bin ton kuru üzüm üretimi ile dünyada en çok kuru üzüm üretimi yapan ülke konumundadır. Türkiye 2007 yılında 240 bin ton kuru üzüm dış satım miktarı ile de 316 milyon \$ gelir elde etmiştir. Türkiye açısından önemi büyük olan çekirdeksiz kuru üzüm, Ege Bölgesi’nde 100.000’i aşkın aileye istihdam imkânı sağlamaktadır [2].

Uluslar arası ürün standartlarının yükselmesine paralel olarak; son yıllarda, üreticilerin ve tarımsal işletmelerin endüstriyel ve kaliteli kuru üzüm üretimine yönelik talepleri giderek artmaktadır. Kuru üzüm işleme paketlemesi yapan işletmeler, ürün mikroorganizma yükünün azaltılmasına yönelik olarak, ürünün yıkamalı ve yıkamasız işleme sonrası kurutma veya noktasal sıcaklıkta ısıtma işlemi-sterilizasyon uygulamalarına talepleri; endüstriyel kurutma sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır.

Tarımsal işletmeler ve üreticilerin endüstriyel sistem talebinde; hızlı ve yüksek kaliteli üretim, sıcaklık-nem-hava hızı gibi değerlerin kontrol edilebilme isteği ve son yıllardaki iklim değişikliğinden dolayı yüksek orandaki ürün kayıplarının meydana gelmesi etkili olmuştur.

Phani ve ark. (2005), kapalı çevrimli sürekli akışlı ısı pompası destekli kurutma sistemini test etmişlerdir. Çalışmada, sistemde ürün kalite optimizasyonu için düşük sıcaklıklarda (30–35 °C) kurutulması gereken bitkileri kurutmuşlardır.

Özgül nem çekme oranını (SMER) 0,006–0,61 kg/kWh arasında hesaplamışlardır. Ürün kurutmasında elektrikli tel ısıtıcı geleneksel sistem ile ısı pompası sistemi karşılaştırıldığında ısı pompalı sistemde kurutma süresinin % 65 ve kullanılan enerjinin de % 22 azaldığı görülmüştür [3].

Filho ve Strommen (1996), kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucuların düşük sıcaklıklarda çalışan konvansiyonel kurutuculara göre daha verimli çalışma potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucularda atık havadan duyulur ve gizli ısının çekilmesiyle sistem ısı performansının iyileşeceğini belirtmişlerdir [4].

Baines (1986), ısı pompalı kurutucular kullanıldığında, kurutucularda enerji kayıplarının azaldığını belirtmiştir. Araştırmacı, ısı pompalı sistemlerde SMER değerinin 1-6 kg/kWh arasında değiştiğini belirtmiştir [5].

Söylemez (2006), kurutma sistemlerinde sistemdeki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Araştırmacı, sistemin termo-ekonomik analizi için sistem elemanlarının ısı analizi ile birlikte basit bir ekonomik analiz yapmış ve ısı pompası için en uygun sıcaklık değerlerini hesaplamıştır. Sistem için en uygun yoğunlaştırıcı çıkış hava sıcaklığı 50,13 °C, buharlaştırıcıdan ayrılan hava sıcaklığı 11,90 °C ve buharlaştırıcıya giren sistem havası sıcaklığını ise 37,68 °C olarak hesaplanmıştır. Sistem elemanları için en uygun çalışma şartlarında COP değerini 2,35 olarak hesaplanmıştır [6].

Oktay (1997), ısı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkileyen etkenleri araştırmıştır. Araştırmacı, “yan geçit (by-pass) hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisi; sistemin performansını etkileyen anahtar verilerdir” ifadesini kullanmıştır. Buharlaştırıcı etrafındaki by-pass havasının sistemin performansını %20 oranında iyileştirebileceği, bu iyileşmenin artan hava debisi ile artacağı, egzoz havasının %10 azaltılması ile özgül nem çekme oranının (SMER) %15 ve ürün geçişinin %50 oranında iyileşebileceği belirtilmiştir. Fakat bu iyileşmenin soğutmanın yüksek çalışma sıcaklığı ile sınırlı olduğunu belirtmiştir [7].

Oktay (2003), mekanik ısı pompalı bir kurutucunun testini yapmıştır. Test materyali olarak ıslak yün kullanılmıştır. Yapılan deneylerde kütleli hava hızları 0,78 – 1,50 kg/m<sup>2</sup>s arasında değişmiştir. By-pass hava oranı ve dönüş havası oranı %20 - %80 arasında değiş-

miş ve tüm sistem SMER değeri dönüş havası oranına bağlı olarak 1,5 ve 2,8 kg/kWh arasında değişmiştir. Yapılan çalışmada, buharlaştırıcı hava oranları arttıkça hem tüm sistem performansı hem de SMER’in arttığı gözlemlenmiştir [8].

Teeboonma ve ark. (2002), ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmışlardır. Isı pompalı meyve kurutucularının en uygun şartları belirlenirken en önemli faktörlerin dönüş havası oranı, buharlaştırıcı by-pass oranı, kütleli debi ve kurutma havası sıcaklığı olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, “sonuç olarak kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri en uygun hava debisini ve buharlaştırıcı by-pass hava oranını önemli bir biçimde etkilemektedir” ifadesini kullanmıştır [9].

Ceylan ve ark. (2007), ısı pompası destekli kereste kurutucusunun enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada, 40°C sıcaklık ve 0,8 m/s hava hızında yapılan kurutma işleminde kavak keresteleri 1,28 kg su/kg kuru madde nem oranından 0,15 kg su/kg kuru madde nem oranına 70 saatte ve çam keresteleri de 0,60 kg su/kg kuru madde nem oranından 0,15 kg su/kg kuru madde nem oranına 50 saatte indirgenmiştir [10].

Chua ve ark. (1998a, 1998b, 2000), ısı pompalı kurutucuda tarımsal ve deniz ürünlerini (mantar, meyveler ve istiridyeler) kurutmuşlardır. Araştırmacılar, “ısı pompalı kurutucularda planlanmış kurutma şartları ile tarımsal ve deniz ürünlerinin kalitesinin artırılacağı” ifade etmişlerdir [11-13].

Prasertsan ve ark. (1997, 1998b), ısı pompalı kurutucuda tarımsal gıdaları (muz) kurutmuşlardır. Araştırmacılar, “ısı pompalı kurutucuların yüksek nem miktarına sahip materyaller için daha uygun olduğunu” ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışmada, ısı pompalı kurutucuların işletme maliyetlerinin onları ekonomik olarak daha mümkün kıldığı belirtilmiştir [14,15].

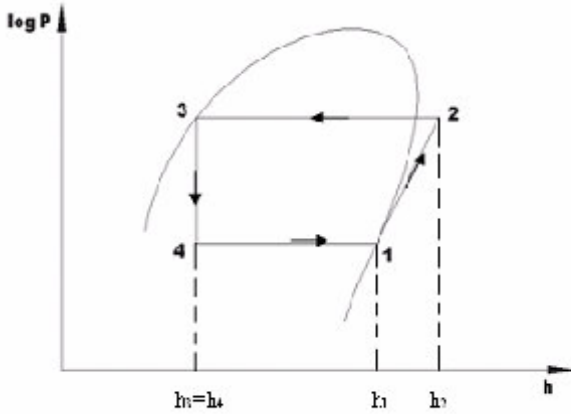
Tosun (2009), ısı pompası destekli, ısı geri kazanımlı, raflı bir kurutucu bazı yüksek nemlilikteki tarım ürünlerinin kurutulmak üzere tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Sistemde iki kademeli yoğunlaştırıcı kullanılmıştır. Ön soğutucu olarak bir ısı değiştirici ilave edilmiş ve böylece ısı geri kazanımı sağlanmıştır. Elma kurutma deneyindeki kuruma süreleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 435, 300, 300, ve 285 dakika sürmüştür. Aynı kurutma sıcaklıkları için sırasıyla kurutma havasının girişteki bağıl nemi %14, 16, 15, 11 ve çıkıştaki bağıl nemi %21, 23, 20, 21 olarak bulunmuştur.

SMER değerleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.46, 0.68, 0.61 ve 0.81 olarak hesaplanmıştır. MER değerleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.65, 0.99, 0.94 ve 1.2 olarak bulunmuştur. COP değerleri de 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 2.72, 2.62, 2.59 ve 2.81 olarak tespit edilmiştir. Isı pompalı kurutucunun düşük nem ve sıcaklıkta çalışmasından dolayı kurutmanın ürün kalitesinde de olumlu etkisinin bulunduğu gözlemlenmiştir [16].

## 2. ISI POMPALI KURUTUCU

Isı pompasında kompresör, yoğuşturucu (kondenser), kısma vanası ve buharlaştırıcı (evaporatör) bulunmaktadır. Isı pompaları ısı kaynağı olarak hava, su ve toprak kaynaklı olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Bu çalışmada, havadan havaya bir ısı pompası kullanımı ile çekirdeksiz üzüm kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutma sisteminde ihtiyaç duyulan ısı, ısı pompasının yoğuşturucusundan sağlanmaktadır. Kullanılan soğutkanın (soğutucu akışkan) Şekil 1’de verilen log P-h diyagramındaki değerler;  $h_1-h_2$ : kompresör giriş-çıkışı,  $h_2-h_3$ : yoğuşturucu giriş-çıkışı ve  $h_3=h_4$ : kılcal boru giriş-çıkışı entalpi değerleridir ve buna göre kondenser kapasitesi;



Şekil 1. Isı pompası sisteminin log P-h diyagramı

$$\dot{Q}_K = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Yoğuşturucunun kurutma havasına verdiği ısı miktarı ise;

$$\dot{Q}_{ve} = \dot{Q}_K \cdot K_h \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Kurutucu çalıştığı sürece ısı pompası sistemi de devrede kalacağından, kurutucu çalışma süresi ( $K_h$ ), aynı zamanda ısı pompası çalışmasıdır. Kurutma sisteminde kullanılan toplam enerji miktarı, yoğuşturucu kapasitesi kabul edilmiş ve soğutkan debisi de buna göre bulunan sistemde, kompresör gücü için;

$$\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad (3)$$

eşitliğinden faydalanılır. Sistemdeki buharlaştırıcı kapasitesi de;

$$\dot{Q}_E = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Çekirdeksiz üzümün kurutulmasında kullanılan ısı pompalı sistem, ısıtma ve soğutma uygulamalarını kapsamaktadır. Sürekli akışlı açık sistem için, enerjinin ve kütlelenin korunumu kanunu uygulanarak aşağıdaki eşitlikler verilmiştir.

Kurutma sistemi için kütlelenin korunumu kanunun genel eşitliği:

$$\Sigma \dot{m}_\zeta = \Sigma \dot{m}_g \quad (5)$$

Kuru hava ve su buharı için kütle korunumunun genel eşitliği:

$$\Sigma \dot{m}_{KHg} = \Sigma \dot{m}_{KH\zeta} = \Sigma \dot{m}_{KH} \quad (\text{kuru hava için}) \quad (6)$$

$$\Sigma (w_g \cdot \dot{m}_{KHg}) = \Sigma w_\zeta \cdot \dot{m}_{kh\zeta} \quad \text{veya}$$

$$\Sigma (\dot{m}_{KHg} + \dot{m}_{Sg}) = \Sigma \dot{m}_{NH\zeta} \quad (\text{nemli hava için}) \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir.

Enerjinin korunumunun genel eşitliği:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) - \Sigma \dot{m} \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \quad (8)$$

Enerji eşitliğinde kinetik enerji ve potansiyel enerji değişimleri, ısı ve iç etkileşimleri, değişimleri yanında çok küçük olduğundan ihmal edilerek, hesaplamalarda enerji eşitliği aşağıdaki gibi kullanılmıştır.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_\zeta \cdot h_\zeta - \Sigma \dot{m}_g \cdot h_g \quad (9)$$

Kurutma havasının neminin çekilmesi için kurutma tüneline kullanılan ısı yükü:

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_{Hg} \cdot (h_{Hg} - h_{H\zeta}) \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Sistemde yoğuşturucudan atılan ısı yükü ( $\dot{Q}_K$ ) kurutma havasının sahip olduğu ısı yüküne eşittir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{Hg} \cdot c_p \cdot (T_{Hg} - T_{H\zeta}) \quad \dot{m}_{Hg} = \rho_{Hg} \cdot \dot{V}_g \quad (11)$$

Tüm sistem için etkinlik katsayısı ( $COP_{\text{sistem}}$ ) hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır [17].

$$COP_{\text{sistem}} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + \dot{W}_1 + \dot{W}_2} \quad (12)$$

Kurutma havasının bağıl nemi;

$$\phi = \frac{w \cdot p}{(0,622 + w) \cdot p_D} \quad (13)$$

Kurutma havasının özgül entalpisi;

$$h = c_{pKH} \cdot T + w \cdot h_D \quad (14)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır [18].

Kurutma esnasında kurutma tüneline enerjinin kullanılma oranı ( $EUR_{dt}$ ) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [19].

$$EUR_{dt} = \frac{\dot{m}_{Hg} \cdot (h_{Hg} - h_{H\zeta})}{\dot{m}_{Hg} \cdot c_p \cdot (T_{Hg} - T_{H\zeta})} \quad (15)$$

## 3. MATERYAL VE METOT

Tasarlanan ve imalatı yapılan endüstriyel tip ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutma sistemi ana hatları ile kurutma tüneli, yoğuşturucu, fan, buharlaştırıcı ve kompresör odaları, dış kompresör gurubu (tetikleyici), ısı pompası sistemini oluşturan tesisat parçalarından ve

kontrol donanımlarından oluşmaktadır. Sistem kapasitesi 10.000 kg'dır. Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusu resmi Şekil 2'de, teknik resmi Şekil 4'de verilmiştir. Açıkta yapılan kurutmanın resmi ise Şekil 3'te verilmiştir.



a. Kurutucu dış görünüşü



b. Kurutma tüneline ürün kasası yerleşimi

Şekil 2. Endüstriyel tip ısı pompalı üzüm kurutucusunun resmi

Endüstriyel tip kurutucudaki donanımlar:

- 1 adet 30 BG, 2 adet 20 BG yarı hermetik kompresör
- 2 adet 145 m<sup>2</sup>, 1 adet 80 m<sup>2</sup>, 2 adet 86 m<sup>2</sup> yoğuşturucu
- Yoğuşturucu üzeri 9 adet elektrikli ısıtıcı rezistans (1.000 W)
- 4 adet 100 m<sup>2</sup>, 3 adet 41 m<sup>2</sup>, 1 adet 150 m<sup>2</sup> buharlaştırıcı
- 1 adet salyangoz ikiz fan (150.000 m<sup>3</sup>/h),
- 1 adet salyangoz fan (53.000 m<sup>3</sup>/h),
- 1 adet elektrik motoru 7,5 BG ikiz fanda,
- 1 adet 3 BG elektrik motoru tekil fanda,
- 3 adet Ø 400, 2 adet Ø 500, 4 adet Ø 450 ve 6 adet Ø 300 kanat çapında eksenel fan
- 2 adet çarpma kapı (90x190 cm),
- 1 adet sürgülü kapı (200x250 cm),

- 94 m<sup>2</sup> hazır poliüretan izolasyonlu duvar/tavan paneli (8 cm)

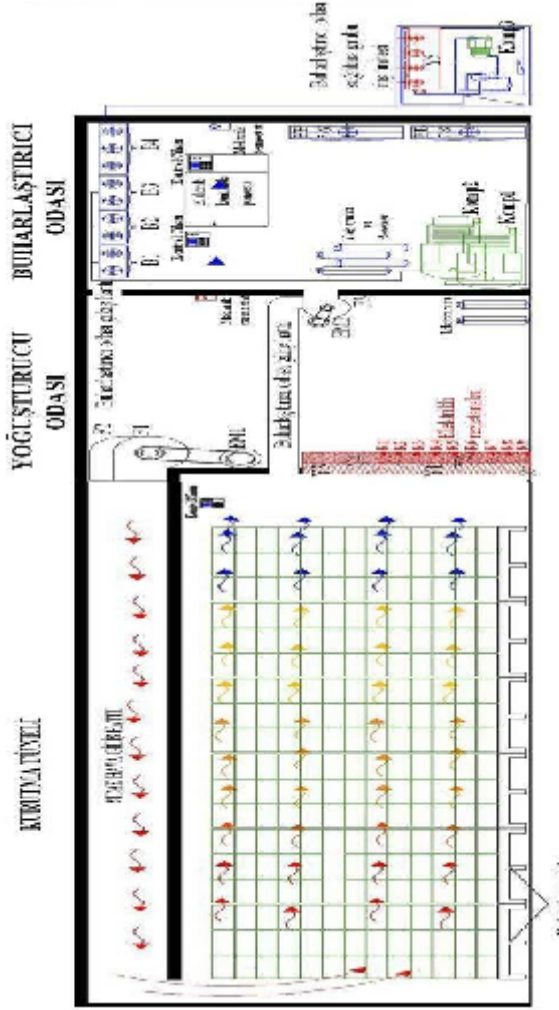


Şekil 3. Açıkta yapılan kurutma resmi

Endüstriyel tip kurutucuda ısı pompası sisteminin yoğuşturucusunu enerji kaynağı olarak kullanacak şekilde düşünülmüş ve imal edilmiştir. Kurutucu içerisindeki ürünlerin nemi, yoğuşturucuda ısıtılan kurutma havası vasıtasıyla buharlaştırılarak kurutma havasına karışmaktadır. Bu nedenle, nemi artan kurutma havasının zamanla nem alma yeteneği azalacağından dolayı, kurutma havasının içerisindeki nem buharlaştırıcıda yoğuşmaktadır. Yoğuşurma işlemi; nemli havayı soğuk yüzeyde çiy noktası sıcaklığının altında düşürülerek gerçekleştirilmektedir.

İmal edilen kurutucuda, ürün üzerinden geçtikten sonra dışarı atılan kurutma havasının buharlaştırıcı üzerinden geçirilmesi ile sistemde atık ısıdan faydalanılmaya çalışılmıştır. Böylece sistemde ısı pompasının buharlaştırıcısı buharlaşma gizli ısısının bir kısmını atılan kurutma havasından çekmektedir. Böylece kurutma sistemi, havadan-havaya bir ısı pompası olarak çalışmaktadır. Kurutucu sistemde, kurutma havası tünel sonunda iki kola ayrılıp, tünele girmeden önce tekrar birleşmektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudan geçen havaların karışması ile elde edilen karışım havası, "kurutma havası" olarak, kurutma tüneline giriş yapmaktadır.

Toplam kurutma havası debisinin 2/3'ü yoğuşturucu üzerinden ısıtılarak tekrar dolaştırılmakta, 1/3'ü ise buharlaştırıcıda soğutulmaktadır. Yoğuşturucuda ısıtılan ve buharlaştırıcıda soğutulmuş nemli düşürülen hava debileri karıştırılarak kurutma tüneline yönlendirilmektedir. Böylelikle yoğuşturucu ve buharlaştırıcı dolayısıyla kompresör kapasitelerinin daha küçük seçilebilmeleri sağlanmıştır.

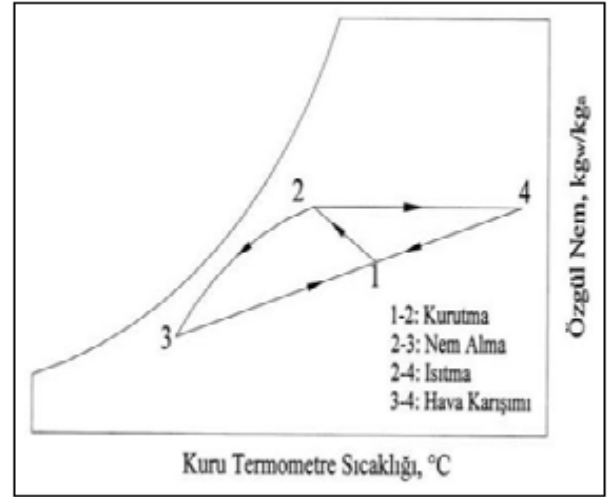


Şekil 4. Endüstriyel tip ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusunun teknik resmi

Kurutma sisteminde kurutma işlemi esnasında sistem havasının psikrometrik döngüsü Şekil 5.'te verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları Çizelge 1.'de verilmiştir.

IPK sistemindeki hava akışının psikrometrik diyagramda; (1-2) kurutma tüneline kurutma işlemi, (2-4) yoğusturucuda ısıtma işlemi, (2-3) buharlaştırıcı odasında soğutma ve nem düşürme işlemi, (3-4) buharlaştırıcı odasında soğutulmuş ve nemi düşürülmüş hava ile yoğusturucuda ısıtılan havanın karışımıdır.

IPK sisteminde yeniden kullanılan çevrim havası oranı  $RAR=2/3$ 'tür. Toplam hava debisinin  $2/3$ 'ü yoğusturucu üzerinden ısıtılarak tekrar dolaştırılmakta,  $1/3$ 'ü ise buharlaştırıcıda soğutulmuş ve nemi düşürülmektedir. Yoğusturucuda ısıtılan ve buharlaştırıcıda soğutulmuş ve nemi düşürülen hava debileri karıştırılarak kurutma tüneline yönlendirilmektedir.



Şekil 5. Sistem havasının psikrometrik döngüsü.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Cihaz	Özellikleri
Kuru meyve nem test cihazı	Dried Fruit Moisture Asc. of California, Ölçüm hassasiyeti 0,5
Dijital tartı	Precisa BJ 410 C, en yüksek ölçüm 420 g, Ölçüm hassasiyeti 0,01 g
Halojen nem tayin cihazı	Metler Toledo HB43, 50 – 200 °C, ölçüm hassasiyeti % 0,01.
Etüv kurutma fırını	Nüve FN 400, 70 – 250 °C, sıcaklık hassasiyeti 1°C
Infrared termometre	TT Technic VA-6520, -50 – 500 °C, ölçüm hassasiyeti 0.1 °C
Dijital termometre	ETI Worthing Sussex, -50 – 150 °C, ölçüm hassasiyeti 0,1 °C
Dijital anemometre	Lutron Electronic am-4201, ölçüm aralığı: 0.4-30 m/s, ölçüm hassasiyeti: $\pm 2\% + 1d$
El tipi refraktometre	Ausjena, ölçüm aralığı 0–30 %
Termometre	Carel IR 33 dijital kontrol cihazı
Higrometre	Dixell XT110C dijital kontrol cihazı
Endüstriyel terazi	Tem TEKO20000 Eko led Terazi, 20 kg kapasiteli, ölçüm hassasiyeti 2 g
Elektrik sayacı	Köhler KHL.ES6 üç fazlı elektronik sayaç, 3x220/380V–50 Hz
Araç kantarı	-
Bome areometresi	-

## 4. DENEYİN YAPILIŞI

### 4.1. Ön işlemler

Kurutma işleminde kullanılacak çekirdeksiz üzümlerden rastgele alınan on adet numune salkımlardan üst-orta ve alt kısmından alınan ikişer adet üzüm tanesi sırası çıkartılarak suda çözünebilir kuru madde miktarı (briks) refraktometre ile 22,2 kuru madde miktarı değeri ölçülmüştür.

Üzümler kurutulmadan önce üzerlerindeki mum tabakasının uzaklaştırılabilmesi için; TS 3411'e uygun bandırma suyuna potasa adı verilen %5'lik  $K_2CO_3$  ve % 1 zeytinyağı eklenerek bir emülsiyon haline getirilerek bir çözelti hazırlanmıştır. Kurutulacak ürünler bu potasa çözeltisine daldırılıp kısa bir süre tutulduktan sonra (4-6 sn.) süzülerek plastik kurutma kasalarına yerleştirilmiş ve kurutucuya götürülmüştür. Büyük salkımlar, orta büyüklükte parçalara ayrılmıştır [20].

Ürünler, kurutma tüneline yerleştirilerek kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Çekirdeksiz üzüm için yoğunlaştırıcı çıkış havası sıcaklığı ( $72,5 \pm 2,5$ ) °C olarak belirlenmiştir. Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklığı kontrol cihazından ayarlanarak kurutma işlemine başlanılmıştır. Kurutucu tüneline üzümler, 60x40x20 cm boyutlarındaki plastik kasalarla, tünel genişliğine göre 3 ve uzunluğuna göre de 9 olmak üzere 27 palet, her palet üzerine 4 adet plastik kasada 13 kat olmak üzere toplam 1404 kasa istiflenmiştir. Toplam plastik kasa kurutma yüzeyi 337 m<sup>2</sup>'dir. Ürünün kurutma öncesi toplam ağırlığı, ticari kantarda 7050 kg olarak ölçülmüştür. Kurutucuda m<sup>2</sup> başına 20,92 kg düşmüştür. IPK sisteminde yapılan kurutmanın açıkta kurutma ile karşılaştırılabilmesi için eşzamanlı olarak beton üzeri bez sergide kurutma işlemi yapılmış ve 18,65 kg/m<sup>2</sup> üzüm serilmiştir.

### 4.2. Tam Kuru Ağırlığın ve Nem Miktarının Belirlenmesi

Isı pompalı kurutucuda yapılan denemede, kurutucu tüneline 27 palet halinde 1404 kasa ürün yerleştirilmiş ve tünel sonundaki orta palette 3 adet (paletin alt-orta ve üst kısmı) 250 g'lık numuneler belirlenmiştir. Bu numuneler, kurutucunun son bölümünde kurutulduktan sonra sırasıyla kuru meyve nem test cihazı, halojen nem tayin cihazı ve etüv fırınında 70 °C sıcaklıkta ( $\pm 1$  °C ve basınç da 100 mmHg düzeyini geçmeyecek şekilde 6 saat süre ile kurutulmuştur) kurularak ortalamaları alınmış ve tam kuru ağırlık belirlenmiştir. Ayrıca kurutucu tünelin orta-ilk kısmındaki ürünlerden (alt-orta ve üst kısım) ve beton üzeri bez sergide kurutulan üzümünden 250 g numuneler kurutma işlemi bittikten sonra sadece kuru meyve nem test cihazında teste tabii tutularak tam kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kuru meyve nem test cihazı ve etüv fırınında yapılan işlemler TS 3411'e uygun olarak yapılmışlardır.

Ashrae TC 2.2. 'ye göre; su miktarı, “%” olarak oransal biçimde ve nem miktarının tanımlanmasında da “Yaş Baz” (yb.), “Kuru Baz” (kb.) olmak üzere iki yöntem kullanılır [21]. Bu çalışmada nem oranı “Yaş Baz” (yb.) ve “Kuru Baz” (kb.) olmak üzere belirlenmiştir.

Yaş baza göre nem, üründeki su ağırlığının ürünün tüm ağırlığına oranı olarak;

$$M_{yb} = \frac{W_S}{W_S + W_K} \cdot 100 \quad (\%) \quad (16)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

Kuru baza göre nem, üründeki su ağırlığının ürünün kuru ağırlığına oranı da;

$$M_{kb} = \frac{W_S}{W_K} \cdot 100 \quad (\%) \quad (17)$$

eşitliği ile belirlenir.

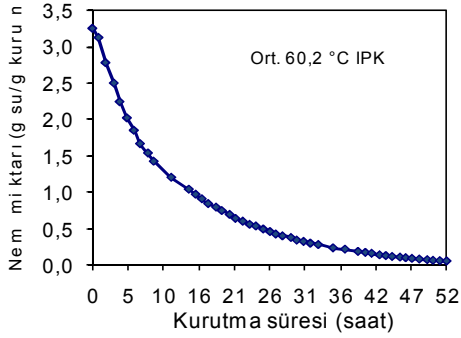
Çizelge 2. IPK ve Sergi üzeri açık havada kurutma değerleri.

Numune yeri	Numune no	İlk kütle (g)	Son kütle (g)	Kurutma sonrası kütle kaybı (g)	Tam kuru ağırlık (g)	Tam kuru ağırlığa göre kütle kaybı (g)	Tam kuru maddeye göre ürün nem oranı (% kb)	Tam kuru maddeye göre ürün nem oranı (% yb)	Kurutma sonrası ürün nemi (% kb)	Kurutma sonrası ürün nemi (% yb)
IPK tünel sonu ort.	1 <sup>a</sup>	250	71,10	178,90	58,90	191,10	324,45	76,44	20,71	17,16
IPK tünel orta kısım	2 <sup>b</sup>	250	68,28	181,72	58,12	191,88	330,14	76,75	17,48	14,88
IPK tünel ilk kısım	3 <sup>c</sup>	250	66,13	183,87	57,97	192,03	331,26	76,81	14,08	12,34
Sergi	4 <sup>d</sup>	250	66,50	183,50	58,03	191,97	330,81	76,79	14,60	12,74
IPK (kg)	Tüm ürün	7 050	1 894	5.156	-	-	-	-	-	-
Sergi (kg)	Tüm ürün	6 420	1 724	4 696	-	-	-	-	-	-

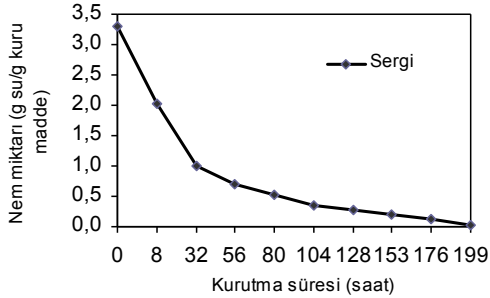
a : Tünelin son kısmındaki paletin alt-orta-üst kısmından alınan birer numune etüv fırında, halojen nem tayin cihazı ve kuru meyve nem test cihazında tam kurutma işlemi gerçekleştirilerek ortalamaları alınmıştır.  
b-c-d: Kurutma tünelinin orta-ilk kısmındaki paletin alt-orta-üst kısmından alınan birer numune ve sergi ortasından alınan numune sadece kuru meyve nem test cihazında ölçüm gerçekleştirilerek ortalamaları alınmıştır.

## 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Kurutma işleminde kurutucu tünelin son kısmındaki paletin orta kısmındaki numune kütle değişimi belirli zaman aralıklarında ölçülerek Eşitlik (17) ile hesaplanarak Şekil 6'da verilmiştir. Açık havada beton üstü bez sergide kurutulmuş üzümün nem oranı Şekil 7'de verilmiştir. IPK sisteminde % 324,45<sub>kb</sub> nem miktarındaki ürünler 60,2 °C kurutma havası sıcaklığında 52 saatte 20,71<sub>kb</sub> nem miktarına kurutulmuştur. Açık havada beton üzeri bez sergide yapılan kurutma işleminde ise % 330,81<sub>kb</sub> nem miktarındaki ürünler 199 saatte 14,60<sub>kb</sub> nem miktarına kurutulmuştur.

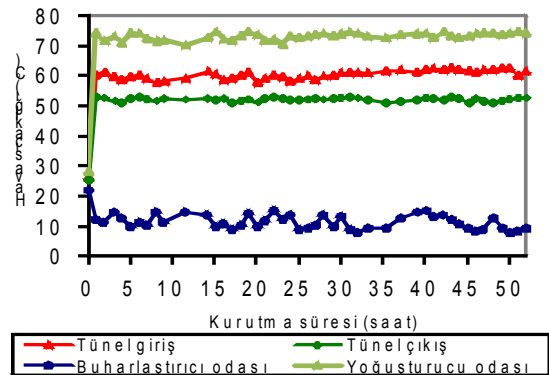


Şekil 6. Isı pompalı kurutucuda kurutulmuş üzümün zamana göre nem değişimi

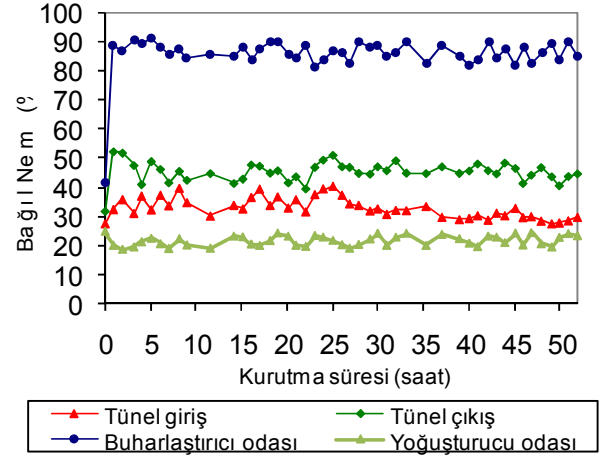


Şekil 7. Açık havada sergide kurutulmuş üzümün zamana göre nem değişimi

Kurutma denemesi esnasında kurutma süresine bağlı olarak kurutma havası sıcaklığının kurutma tüneline giriş, kurutma tüneline çıkış, yoğuşturucu odası ve buharlaştırıcı odasının sıcaklık değişimi Şekil 8'de, bağıl nem değişimi ise Şekil 9'da görülmektedir.

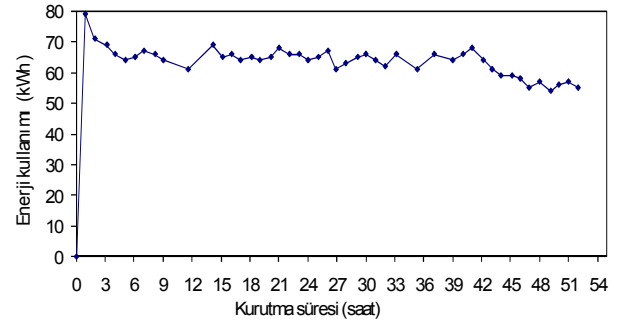


Şekil 8. IPK'da kurutma havası sıcaklığının değişimi



Şekil 9. IPK'da kurutma havası bağıl nem değişimi

Kurutma odasında kullanılan enerji miktarının kurutma süresince değişimi Şekil 10'da verilmiştir. IPK'da yapılan kurutma deneyinin performans değerleri de Çizelge 3'te verilmiştir.



Şekil 10. IPK'da enerjinin kullanımı

Çizelge 3. IPK performans verileri

Tanım	Değer
İlk Kütle (kg)	7.050
Son Kütle (kg)	1.894
Uzaklaştırılan Nem (kg)	5.156
Kurutma Süresi (h)	52
Toplam Enerji (kWh)	3.353
MER (kg/h)	99,15
SMER <sub>sistem</sub> (kg/kWh)	1,53
COP <sub>sistem</sub>	2,81



Şekil 11. Açık havada kurutulmuş örnek numune resmi (numune no: 4<sup>d</sup>)



Şekil 12. IPK'da kurutulmuş örnek numune resmi (numune no: 2<sup>b</sup>)

Isı pompalı kurutucuda kurutulmuş üzümün, olumsuz çevre şartlarından (yağmur, toz, toprak vb.) korunduğu dikkate alındığında temizlik açısından açık alanda kurutulmalardan daha temiz olduğu ve ayrıca sistemde kurutulmuş üzümün, açık alanda kurutulmuş üzümlere kıyasla renklerinin daha açık olduğu ve toz/toprak bulunmadığı gözlemlenmiştir. Açık havada ve IPK'dan alınan numune resimleri Şekil 11 ve 12'de görülmektedir. Açık havada sergide kurutulmuş üzüm numuneleri 9 numara, kurutucuda kurutulmuş üzüm numuneleri ise 10 numara renk değeri elde edilmiştir.

Kurutulmuş çekirdeksiz üzümdeki nem miktarı tam kuru madde bazında % 324,45-331,26 aralığında bulunmuş olup, bu nem miktarından % 14,08-20,71 nem miktarına kadar çekirdeksiz üzümler 52 saatte kurutulmuştur. Kurutma havası sıcaklığı ortalaması 60,2 °C ve kurutma havası hızı tünel sonunda ortalama 3,2 m/s ölçülmüştür. Kurutucuda yapılan kurutma deneyi ile eş zamanlı olarak açık havada üzeri bez sergi üzerinde yapılan kurutma deneyinde ise üzüm numunesi % 330,81 nem oranından % 14,60 nem oranına 199 saatte kurumuştur. Sultaniye tipi çekirdeksiz üzümlerin kurutulmasında deneysel olarak analiz edilen kurutucunun, ürünün kurutulması sırasında ortalama ısıtma tesir katsayısı tüm sistem için COP<sub>sistem</sub>: 2,81, özgül nem alma verimi SMER<sub>sistem</sub>: 1,53, nem alma verimi MER: 99,15 olarak bulunmuştur.

Kurutma havasının, tünel giriş sıcaklık ortalaması 60,2 °C ve buharlaştırıcı odası hava sıcaklığı ortalamasının 12,3 °C olduğu dikkate alındığında tünel giriş havası sıcaklığının artırılması ve buharlaştırıcı odası sıcaklığının düşürülmesi suretiyle sistem veriminin artırılabilmesi için tünel çıkış havası ve buharlaştırıcı odası çıkış havasının havadan-havaya ısı değiştiricisi kullanımının enerji verimliliğini artıracığı görülmüştür.

Krom nikel tepsili kurutma arabaları maliyeti yüksek olduğu için üzümler plastik kasalarda kurutulmuştur. Plastik kasalarda kurutulmuş üzümlerden bazıları (özellikle paletin alt kısmındaki kasalarda) tam kurumamış tanelere rastlanmıştır. Bu sonuca kasa içinden geçen kurutma havasının tam nüfuz etmediği anlaşılmıştır. Bu durum sistemde difüzör ihtiyacını göstermiştir. Ayrıca kurutma tünelinin başlangıç kısmındaki üzümlerde aşırı kuruma gözlemlenmiştir. Bu durum sis-

tem tasarımının ters akımlı olarak da çalıştırılması ihtiyacını göstermiştir.

Sistemin başlangıç kurutmasında sistemin aşırı yüklenmesini azaltmak için yoğuşurucu üzerine 9 adet 1000 W'lık elektrikli ısıtıcı yerleştirilmesiyle kompresörlerin zarar görmesinin önüne geçilmiştir.

Isı pompalı kurutma sistemiyle, kurutma havası istenilen şartlara (kurutma hava hız sıcaklığı-nem değerleri) ayarlanabilir olması ile her türlü meyve ve sebzeler, her türlü dış hava şartlarında, yılın on iki ayı boyunca negatif dış etkenlerden (toz/toprak, yağmur, çiy vb.) korunarak kurutulabilecektir. Böylelikle; tarımsal ürün kurutucularında meydana gelen ürün yakma ve çatlama sorununa ve açık havada yapılan kurutmada meydana gelen temizlik sorununa çözüm getirilebilecektir. Ayrıca; tarımsal işletmelerde kuru ürün işlemede yıkama sonrası kurutma ve mikroorganizma yükünün düşürülmesine yönelik noktasal sıcaklıkta ısı işlem-sterilizasyon uygulaması için rahatlıkla kullanılabilir.

## 6. SEMBOLLER ve KISALTMALAR

<b>c</b>	Özgül ısı (kJ/kg ·K)
<b>c<sub>p</sub></b>	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg ·K)
<b>h</b>	Özgül entalpi (kJ/kg)
<b>h<sub>1</sub></b>	Soğutkanın kompresöre giriş özgül entalpisi (kJ/kg)
<b>h<sub>2</sub></b>	Soğutkanın kompresörden çıkış özgül entalpisi (kJ/kg)
<b>h<sub>3</sub>= h<sub>4</sub></b>	Soğutkanın genişleme vanasından giriş-çıkış özgül entalpileri (kJ/kg)
<b>K<sub>h</sub></b>	Kurutucu çalışma süresi
<b>m</b>	Kütleli debi (kg/s)
<b>M<sub>kb</sub></b>	Kuru baza göre nem oranı (%)
<b>M<sub>yb</sub></b>	Yaş baza göre nem oranı (%)
<b>p</b>	Basınç (Pa)
<b>RAR</b>	Yeniden kullanılan çevrim havası oranı
<b>t</b>	Zaman (s)
<b>T</b>	Sıcaklık (°C, K)
<b>v, V</b>	Hız (m/s)
<b>V̇<sub>kh</sub></b>	Kurutma havasının hacimsel debisi (m <sup>3</sup> /h)
<b>Q̇</b>	Birim zamandaki ısı gücü (kJ/s)
<b>Q<sub>K</sub></b>	Kurutma için gerekli ısı gücü (W)
<b>w</b>	Mutlak nem (kg <sub>su buharı</sub> / kg <sub>kuru hava</sub> )
<b>W<sub>s</sub></b>	Üründeki su ağırlığı (g)
<b>W<sub>k</sub></b>	Ürünün kuru ağırlığı (g)
<b>w<sub>1</sub></b>	Havanın sisteme girişteki mutlak nemi (kg <sub>su buharı</sub> / kg <sub>kuru hava</sub> )
<b>w<sub>2</sub></b>	Havanın sistemden çıkıştaki mutlak nemi (kg <sub>su buharı</sub> / kg <sub>kuru hava</sub> )
<b>φ</b>	Bağıl nem (%)
<b>ρ</b>	Yoğunluk (kg/ m <sup>3</sup> )
<b>çh</b>	Çıkan hava
<b>gh</b>	Giren hava
<b>H</b>	Hava
<b>kb</b>	Kuru baz



<b>KH</b>	Kuru hava
<b>NH</b>	Nemli hava
<b>S</b>	Su
<b>D</b>	Doymuş
<b>y<sub>b</sub></b>	Yaş baz
<b>1, g</b>	Açık sisteme giriş hali
<b>2, ç</b>	Açık sistemden çıkış hali
<b>IPK</b>	Isı Pompalı Kurutucu
<b>COP</b>	Isı Pompası Etkinlik Katsayısı
<b>MER</b>	Kuruma Hızı
<b>SMER</b>	Özgül Nem Alma Hızı
<b>TS</b>	Türk Standartları

## 7. KAYNAKLAR

1. Kısmalı, İ., Altındişli, A., “Çekirdeksiz kuru üzüm üretimi”, Ege Üniv. Ziraat Fak. Bahçe Bitkileri Bölümü.
2. T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi “Kuru üzüm” (2009).
3. Phani, K., A., Greg, J., S., “Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis”, International Journal of Energy Research, 29: 961-972, (2005).
4. Filho, O., A., Strommen, I., “The application of heat pump in drying of biomaterials”, Drying Technology, 14(9): 2061-2090, (1996).
5. Baines P., G., “A comparative analysis of heat pump dryers”, Ph.D. Thesis, University of Otago, New Zealand, 1-10, (1986).
6. Söylemez, M., S., “Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery”, Journal of Food Engineering, 74: 292-298, (2006).
7. Oktay, Z., “Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması”, Tesisat Kongresi, 1-2, (1997).
8. Oktay, Z., “Testing of a heat-pump-assisted mechanical opener dryer”, Applied Thermal Engineering, 23: 153-162, (2003).
9. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., “Optimization of heat pump fruit dryers”, Journal of Food Engineering, 59: 369-377, (2002).
10. Ceylan, İ., Aktas, M., Dogan H., “Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump”, Applied Thermal Engineering, 27: 216-222, (2007).
11. Chou S.K., Hawlader M.N.A., Ho J.C. and Chua K., J., “On the study of a twostage heat pump cycle for drying of agricultural products”, Proceedings of the ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology, Phitsanulok, Thailand, June 3-5, (1998a).
12. Chua K. J., Chou S. K., Hawlader M. N. A. and Ho J. C., “A two-stage heat pump dryer for better heat recovery and product quality”, Journal of the Institute of Engineers, Singapore, 38(6): 8-14, (1998b).
13. Chua K. J., Mujumdar A.S., Chou S.K., Hawlader M.N.A. and Ho J. C., “Heat pump drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on convective drying kinetics and colour change”, Drying Technology, 18(5), 907-936, (2000).
14. Prasertsan S., Saen-Saby P., Prateepchaikul G. and Ngamsritrakul P. “Heat Pump Dryer Part 3: Experiment verification of the simulation”, International Journal of Energy Research, 21: 1-20, (1997).
15. Prasertsan S. and Saen-Saby P., “Heat pump drying of agricultural materials”, Drying Technology, 16: 235-250, (1998b).
16. Tosun S., “Bazı tarımsal ürünler için ısı pompalı bir kurutucunun geliştirilmesi ve termodinamik analizi”, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
17. Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, Mc Graw-Hill-Literatür, İstanbul, 527-530s., (1999).
18. Akpınar, E., “Tarımsal ürünler için siklon tipi bir kurutucunun geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, (2002).
19. Ceylan, İ., Aktas, M., Dogan H., “Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump”, Applied Thermal Engineering, 27: 216-222, (2007).
20. Türk Standartları Enstitüsü, “TS 3411 Çekirdeksiz kuru üzüm”, (2009).
21. Ashrae TC 2.2, Plant and Animal Environment, “Temel El Kitabı-Tarım ürünlerinin kurutulmasında ve depolanmasında göz önüne alınacak fizyolojik etkenler”, Tesisat Müh. Derneği Teknik Yay. : 2, (1998).