



KAPALI DÖNGÜ BİR ISI POMPALI KURUTMA SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Cüneyt TUNÇKAL*, Salih COŞKUN**, Seçil ERDOĞAN***

*Yalova Üniversitesi, Yalova MYO, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı,
77100 Yalova, tunckal1998@hotmail.com

**Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı,
16000 Bursa, scoskun1968@gmail.com

***Atatürk Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü, Gıda Teknolojileri Bölümü,
77100 Yalova, seciley@hotmail.com

(Geliş Tarihi: 07.09.2015, Kabul Tarihi: 04.03.2016)

Özet: Kurutma işlemlerinde kapalı döngü ısı pompalı kurutma (IPK) sistemlerinin tercih sebebi, kurutma odasından atılan sıcak ve nemli kurutma havasının duyulur ve gizli ısısını geri kazandırmasıdır. Bu çalışmada kapalı döngü bir IPK sistemi yardımıyla 40 °C kurutma odası sıcaklığında dört farklı tarımsal ürün kurutulmuştur. Literatürde mevcut sistemlerden farklı olarak tasarlanan bu sistemde kurutma odası sıcaklığı, mevcut iç yoğuşturucuya seri olarak bağlanmış bir dış yoğuşturucunun devreye sokulması suretiyle kontrol edilmiştir. Ayrıca IPK sisteminin ortalama performans katsayısı (ITK), dış yoğuşturucunun devreye girme oranları (DGO) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Deneyle, aynı miktarda ve herhangi bir ön işleme maruz bırakılmadan 5 mm kalınlığında dilimlenmiş muz, kivi, elma ve kavun numuneleri üzerinde 1 m/s kurutma hava hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda en yüksek ortalama ÖNÇO (Özgül nem çekme oranı) değeri kavun için (0.323 kg/kWh), en düşük ÖNÇO değeri ise muz için (0.232 kg/kWh) elde edilmiştir. Tüm sistem için en yüksek ortalama ısı pompası performans katsayısı (ITK_{sis}) değeri kivi için 2.75 olarak hesaplanırken en düşük muz için 2.49 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı pompalı kurutucu, kurutma, performans analizi.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A CLOSED LOOP HEAT PUMP DRYER SYSTEM

Abstract: A closed loop heat pump dryer (HPD) system was preferred at drying processes. Because it gains sensible and latent heat from hot and humid drying air exhausted. This study deals with the drying of four different agricultural products at 40°C drying chamber temperature via heat pump assisted dryer with closed. Different from literature in this system, drying air temperature in dryer cabinet was controlled by cutting in external condenser with internal condenser. Besides, mean coefficient of performance of HP system was calculated by considering activation rate of external condenser with internal condenser. Experiments were performed on 5 mm thick slices of banana, kiwi apple and melon with an air flow of 1 m/s without any prior modification. At the end of study, the highest SMER value of 0,332 kg/kWh was obtained with melon, whereas the lowest value of 0,232 kg/kWh with banana. The highest mean performance coefficients of whole system (COP_{sys}) were calculated as 2.75 with kiwi whereas the lowest value of 2.49 with banana.

Keywords: Heat pump dryer, drying, performance analysis.

SEMBOLLER

| | |
|----------------------|---|
| ITK _{ip,1} | Isı pompası ısıtma tesir katsayısı (dış yoğuşturucusuz) |
| ITK _{sis,1} | Tüm sistemin ısıtma tesir katsayısı (dış yoğuşturucusuz) |
| W _{komp} | Kompresör güç tüketimi [kW] |
| Q _{yog} | Yoğuşturucu tarafından havaya verilen ısı miktarı [kW] |
| W _{fan,i} | Sistemde havayı dolaştıran aksel fanın enerji tüketimi [kW] |
| ITK _{ip,2} | Isı pompasının ısıtma tesir katsayısı (dış yoğuşturuculu) |

| | |
|----------------------|--|
| ITK _{sis,2} | Tüm sistemin ısıtma tesir katsayısı (dış yoğuşturuculu) |
| W _{fan,d} | Dış yoğuşturucu fanının enerji tüketimi [kW] |
| m _h | Kurutma havası kütleli debisi [kg/s] |
| h _A | İç yoğuşturucu çıkışında kurutma havasının özgül entalpisi [kJ/kg] |
| h _E | İç yoğuşturucu girişinde kurutma havasının özgül entalpisi [kJ/kg] |
| ÖNÇO | Tüm sistemin özgül nem uzaklaştırma oranı [kg/kWh] |
| DGO | Dış yoğuşturucunun devreye girme oranı [%] |
| m _s | Üründen buharlaştırılan su miktarı [kg/h] |
| M _{YA} | Yağ ağırlık [kg] |
| M _{KA} | Kuru ağırlık [kg] |

| | |
|-----------|---|
| M_t | Herhangi bir t anındaki ürün kütlesi [kg] |
| M_c | Denge anındaki ürün kütlesi [kg] |
| M_0 | Ürünün başlangıç kütlesi [kg] |
| MC_{tb} | t anındaki ilk nem [kg] |
| MC_{ts} | t anındaki son nem [kg] |

Alt Simge

| | |
|-----|----------------|
| B | Başlangıç |
| e | Denge |
| s | Son |
| h | Hava |
| y | Yoğuşan su |
| ü | Ürün |
| i | İç |
| d | Dış |
| fan | Fan |
| g | Giriş |
| ç | Çıkış |
| buh | Buharlaştırıcı |
| yog | Yoğuşturucu |
| YA | Yaş ağırlık |
| KA | Kuru ağırlık |

GİRİŞ

Ülkemizde birçok ürünün kurutulması güneşe serilerek doğal yolla yapılmaktadır. Kontrolsüz olarak yapılan doğal kurutma işlemlerinde ürün daha uzun sürede ve kalitesiz olarak kurumaktadır. Ayrıca yapılan bu kontrolsüz kurutma işlemleri yüzünden üründe istenmeyen mikrobiyolojik bozulmalar meydana gelmektedir. Son yıllarda kurutulmuş sebzelerin giderek artan miktarda gıda sanayiinde kullanıldığı görülmektedir. Kurutulmuş sebzeler, meyveler, hazır çorbalar, soslar, hazır yemekler, bebek mamaları, çeşitli et, balık ve süt ürünleri gibi çok farklı ürünlerde kullanılmaktadırlar (Kahyaoglu ve Aytac, 2009). Üretim sektöründe kullanılan toplam enerjinin ortalama % 12'si endüstriyel kurutucular tarafından tüketilmektedir. Kurutma işleminin gerçekleştiği üretim sektöründe kurutma maliyeti, toplam maliyetin % 60 ile % 70'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle, kurutma endüstrisinde kullanılan enerjinin maliyetini düşürmek büyük önem taşımaktadır. Bu da enerjinin verimli kullanılması ile mümkün olabilecektir (Dincer, 1998; Syahrul vd, 2002). Herhangi bir kurutma sisteminde asıl amaç; kurutma sistemini optimize etmek ve atık enerji sarfiyatını azaltmak suretiyle minimum fiyat ve maksimum kapasitede, arzu edilen kalitede kurutulmuş ürün elde etmektir (Chua vd, 2001, Söylemez, 2006). Kurutma kalitesi ve enerji verimini iyileştirmek için sıcak hava kurutma, vakum kurutma, dondurarak kurutma ve ısı pompalı kurutma sistemleri (IPK) üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu metotların arasında IPK sistemleri daha az enerji tüketimleri nedeniyle en gelişmiş sistemlerdir. Özellikle kapalı döngü IPK sistemlerinin gıda kurutma için geleneksel sıcak havalı kurutuculara göre daha yüksek enerji verimliliği, daha iyi ürün kalitesi, dış hava koşullarından bağımsız çalışabilme gibi pek çok avantajları vardır. Bu sistemler kurutucu egzoz havasından hem duyulur hem de gizli ısıyı geri kazandırdıkları için tüm sistem performansını

iyileştirirler (Filho ve Strommen,1996, Çolak ve Hepbaşlı, 2009). Ayrıca düşük enerji gereksinimi ve atmosfere zararlı gaz salınımına neden olmadıkları için çevre dostudurlar (Perera ve Rahman, 1997). Yapılan çeşitli çalışmalarda, ısı pompası kullanılarak kurutulmuş tarım ürünlerinin renk ve aroma kalitesi geleneksel sıcak havalı kurutuculara göre daha iyi bulunmuştur (Strommen ve Kramer, 1994; Prasertsan ve Saen-saby, 1998; Soponronnarit vd, 1998; Teeboonma vd, 2003). IPK sistemlerinde değiştirilmiş atmosfer şartlarında ürün kurutulması üzerine yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar sonucunda kuruma esnasında ürün kalitesinin yüksek olduğu, renk ve C vitamini değerlerinin korunduğu tespit edilmiştir (Hawlder vd, 2006, Yun-Hong vd, 2014). IPK sistemlerinin çalışma mekanizmaları, farklı tip IPK sistem uygulamaları, verimleri, avantaj ve dezavantajları ile tarımsal ürünlerin kurutulması alanındaki gelişmeler üzerinde yapılan çalışmalar devam etmektedir Patel ve Kar (2012).

IPK sistemi yardımıyla mango, papaya meyveleri (Soponronnarit vd, 1998, Teeboonma vd, 2003, Achariyaviriya vd, 2000), domates (Queiroz ve ark. 2004, Aktaş vd, 2012), ginseng, herbs ve ekinezya gibi bitkiler (Phani ve ark. (2005), fındık (Aktaş, 2007), kivi, avokado ve muz meyveleri (Chua ve ark. 2001, Ceylan 2009, Aktaş ve Kara, 2013), biber (Pal ve Khan, 2008), elma (Ceylan vd, 2005, Tosun 2009, Aktaş ve ark. 2009), üzüm (Abuşka ve Doğan, 2010), mantar (Juan ve ark. 2013), kırmızı biber (Aktaş ve ark. 2010) vb. çok farklı tarımsal ürünler kurutulmuştur. Soponronnarit ve ark. (1998) 100-132 kg kapasiteye sahip, 12 tepsi bulunan bir kurutma odasında kapalı döngü bir ısı pompalı kurutucuda meyve kurutmuşlar. . Bu odada 50°C sıcaklıkta papaya meyvesini kurutmuşlardır. Yapılan deneyler sonunda ÖNÇO değeri 0.363 kg su buharı/kWh ve ısı pompası performans değeri 3.71 ile 3.85 aralığında elde edilmiştir. Phani ve ark. (2005), kapalı döngü bir IPK sisteminde düşük sıcaklıklarda (30-35°C) sıcaklıklarda ginseng, herbs ve ekinezya gibi özel ürünler kurutulmuştur. ÖNÇO değerleri 0,06–0,61 kg/kWh arasında elde edilmiştir. Ürün kurutmasında elektrikli ısıtıcı geleneksel sistem ile ısı pompası sistemi karşılaştırıldığında ısı pompalı sistemde kurutma süresinin % 65 ve kullanılan enerjinin de % 22 azaldığı görülmüştür. Ceylan (2009) PID kontrollü ısı pompalı yardımcı tepsili kurutucuda 40 °C kurutma havası sıcaklığında ve ortalama 0.37 m/s hava hızında kivi, avokado ve muz meyvelerini kurutmuştur. Kivi, muz ve avakado meyvelerinin kurutulması sırasında tüm sistem için performans değerleri (ITK_{sis}) sırasıyla 2.49, 2.47 ve 2.41 olarak hesaplanmıştır. Ceylan çalışmasında yoğuşturucu sıcaklık ve basıncını fan hızını ayarlamak suretiyle kontrol etmiş ve bu yüzden sistemde dış bir yoğuşturucu kullanmamıştır. Tosun (2009), ısı pompası destekli, ön soğutuculu, paralel yoğuşturuculu rafli bir kurutucu tasarlamış ve elma kurutmuştur. Kurutma süreleri 40 °C, 44 °C, 48 °C ve 50 °C kurutma havası sıcaklıkları için sırasıyla 435, 300, 300 ve 285 dakika sürmüştür. ÖNÇO değerleri 40 - 50 °C sıcaklık aralığı için 0.46 ile 0.81 kg/kWh olarak, ITK değerleri ise 2.59-

2.81 aralığında tespit edilmiştir. Aktaş ve Kara (2013) yaptıkları çalışmada güneş enerjisi destekli IPK sistemi yardımıyla kivi kurutmuşlardır. Sistemde, kurutma odasına girmeden önce çevre havasını güneş kollektöründen geçirip ön ısıtma sağlanmış ve daha sonra yoğuşturucudan geçirerek tekrar ısıtılarak kurutma odasına gönderilmiştir. Bu sistemde buharlaştırıcı nem alıcı olarak kullanılmamıştır. 5 mm kalınlığında dilimlenmiş kiviler üç farklı sıcaklıkta (35, 40, 45°C), 0.1-1 m/s arasında değişen hava hızlarında kurutulmuşlardır. Isı pompası (ITK_{ip}) ve tüm sistemin (ITK_{sis}) performans verimleri sırasıyla 2.90 ve 2.27 olarak hesaplanmıştır. Achariyaviriya ve ark. (2000) papaya meyvesini ısı pompası yardımıyla kurutmak suretiyle %40.4 den %23.2 bağıl nem değerine düşürmüşler ve ÖNÇO değerini 0.091 kg/kWh olarak elde etmişlerdir. Abuşka ve Doğan (2010), 10 ton kapasitesinde endüstriyel tip IPK sisteminde yaklaşık 60°C kurutma havası sıcaklığında çekirdeksiz üzüm kurutmuşlardır. ÖNÇO değeri 1.53 ve ortalama ITK değerini ise 2.81 olarak elde edilmişlerdir. Juan ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada bir IPK sistemi yardımıyla mantar kurutulmuştur. Kurutma başlangıcında kurutma odasına 90 kg yüklenen mantar, kurutma sonunda 75.2 kg'a düşürülmüştür. Bu esnada üründen harcanan enerjiye karşılık çekilen nem miktarı değeri (ÖNÇO) 2.3 kg/kWh olarak tespit edilmiştir.

Yukarıda açıklanan çalışmaların bir kısmı ise IPK sistemlerinin kontrol yöntemleri üzerinedir. Ürün kalitesini arttırmak ve enerji tasarrufunu sağlamak, IPK sistemlerinin doğru şekilde kontrolüyle mümkündür. IPK sistemlerinde kurutma havası sıcaklık kontrolü üç şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi fan hızını kontrol ederek (Ceylan, 2009, Yang vd, 2016), ikincisi, kompresör devrini kontrol ederek (Kivevele ve Huan, 2014), üçüncüsü iç yoğuşturucuya paralel olarak bağlanmış dış yoğuşturucunun devreye sokulmasıyla (Soponronarit vd, 1998; Teeboonma vd, 2003, Pal ve Khan, 2008, Hawlader vd, 2006, Qi-Long vd, 2008, Queiroz vd, 2004, Zhao vd, 2013, Yun-Hong vd, 2014) gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak iç yoğuşturucuya seri olarak bağlanmış dış yoğuşturucu devreye sokularak, kurutma havası sıcaklık kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca IPK sistem performans değerleri saatlik bazda dış yoğuşturucunun devreye girme oranları dikkat alınarak hesaplanmış ve ortalama performans değerleri belirlenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Deney Tesisatı

Bu çalışmada Yalova Üniversitesi, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı laboratuvarında, tasarlanan ve imal edilen kapalı döngü çalışan bir IPK sisteminde, dış kabuğu soyulmuş 5 mm kalınlıkta ve her bir denemede 1.785 kg kütlelerindeki kivi, elma, kavun ve muz meyveleri kurutulmuştur (Şekil 1). Kurutma sırasında hiçbir şekilde dışarıdan taze hava beslemesi yapılmayıp, aynı kurutma havası kapalı bir döngü

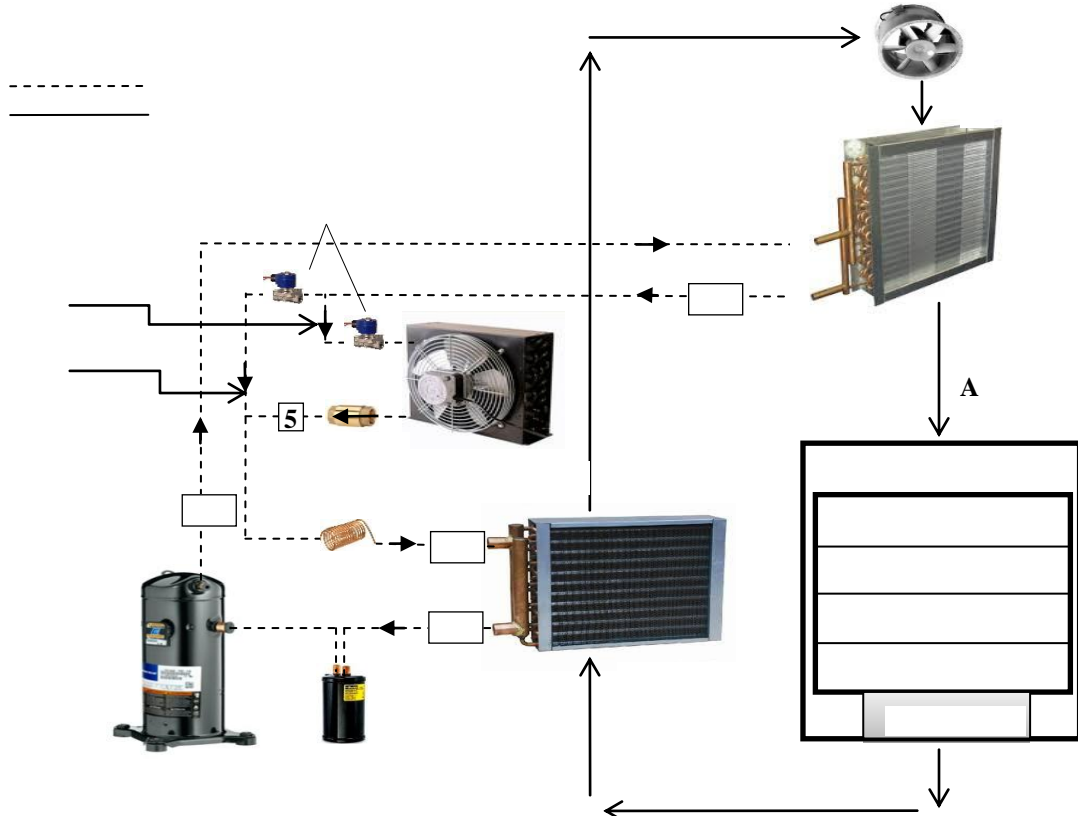
şeklinde kullanılmıştır. Kurutma, 1 m/s hava hızı ve 40 °C kurutma kabin havası sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kurutma sistemi; ısı pompası, fan, kanal sistemi, 0.60x0.60x0.60 m³ boyutlarındaki kurutma odası ile 0.40x0.45x0.02 m³ boyutlarında ve 3 mm çaplı delikli teflon kaplı tepsilerden oluşmuştur. IPK sisteminde (Şekil 1) kurutma havası, kapalı bir döngü şeklinde kanal sistemi içerisinde aksel bir fan yardımıyla sağlanmıştır. IPK sisteminde kurutma havası sıcaklık kontrolü, iç kısımdaki yoğuşturucuya seri olarak bağlanmış kurutma odası dışına yerleştirilmiş dış yoğuşturucunun devreye sokulmasıyla sağlanmıştır. Kurutma sırasında gerçekleşen kurutma işlem aşamaları şu şekilde gerçekleştirilmektedir: Öncelikle kurutma odasına gönderilmeden önce iç yoğuşturucudan geçen kurutma havası (E) soğutucu akışkanın ısısını alarak ısıtılmakta ve kurutma odasına gönderilmektedir (A). Bu esnada kurutma havasına ısısını veren soğutucu akışkan ise yoğuşmakta (3) ve kılcal borudan geçmek suretiyle basıncı düşürülerek buharlaştırıcıya gönderilmektedir (4). Sıcaklığı artan ve bağıl nemi düşen kurutma havası ise, tepsilere yerleştirilmiş ürünle temas ederek, ısı ve kütle transferi yardımıyla ürünün nemini bünyesine almakta ve yüksek bağıl nemde kurutma odasını terk etmektedir (B). Daha sonra kurutma havası buharlaştırıcının üzerinden geçirilmektedir (C-D). Buharlaştırıcı üzerinden geçen kurutma havası bünyesindeki nem, çiğ noktası sıcaklığının altında bir sıcaklığa sahip ve içinden soğutucu akışkan geçen buharlaştırıcı boruları üzerinde yoğuşmaktadır. Böylece kurutma havasının nemi alınarak tekrar kurutma işlemi için uygun hale getirilmektedir. Fakat bu işlem esnasında kurutma havası bir miktar soğumaktadır. Soğuyan kurutma havası tekrar yoğuşturucuda ısıtılarak kurutma odasına gönderilmektedir (E-A). Buharlaştırıcı boruları içinde dolaşan soğutucu akışkan ise, kurutma havasından ısı çekerek buharlaşmakta (1) ve kompresör tarafından emilerek, yoğuşturucuya basılmaktadır (2).

Kurutma işlemi esnasında kurutma odası sıcaklığı, kurutma odası çıkış havası sıcaklığını referans alan elektronik termostat yardımıyla iç yoğuşturucuya seri olarak bağlanmış dış yoğuşturucunun devreye sokulmasıyla (5) kontrol edilmiştir. Dış yoğuşturucunun devreye girmesiyle, zamana bağlı olarak kurutma boyunca artan kurutma havası sıcaklığı nedeniyle ısı atmakta zorlanan iç yoğuşturucunun yükünün bir kısmı alınarak, ısı pompasının yoğuşturucu kapasitesi artırılmıştır. Dış yoğuşturucunun devreye girmesiyle artan yoğuşma kapasitesiyle doğru orantılı olarak, buharlaşma kapasitesi artmış ve böylece kurutma havasından daha fazla nem çekilmesi sağlanmıştır. Şekil 1' de tasarlanan IPK sistemine ait şematik resim görülmektedir.

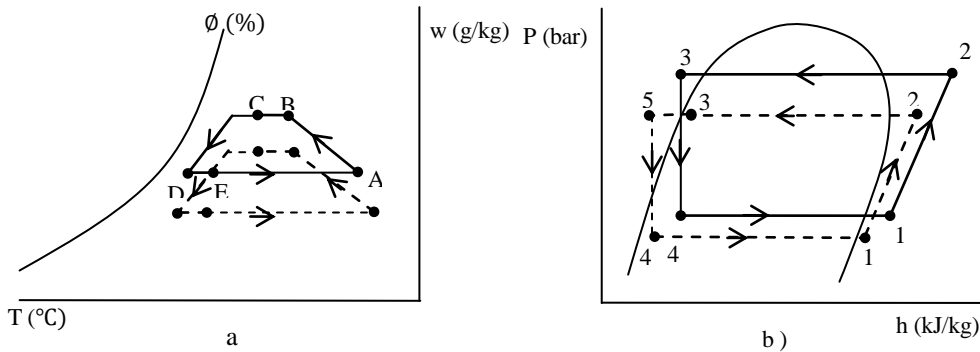
IPK sistemi üzerinde gerçekleşen kurutma havasının termodinamik çevrimi psikrometrik diyagramda Şekil 2-a'da gösterilirken, Şekil 2-b'de ise ısı pompası devresinde dolaşan soğutucu akışkanın termodinamik çevrimi basınç-entalpi diyagramında gösterilmiştir. Burada dolu çizgi sadece iç yoğuşturucu devrede olduğu

an ki işlemi gösterirken, kesikli çizgi ise iç yoğuşturucu yanında dış yoğuşturucunun da devrede olduğu anı göstermektedir. Görüldüğü gibi, dış yoğuşturucunun devreye girmesiyle yoğuşma ve buharlaşma basınç ve

sıcaklık değerleri düşmekte ve buna bağlı olarak da çevrim içi kurutma havası sıcaklık değerleri de düşmektedir (Şekil 2).



Şekil 1. Isı pompalı kurutma deney düzeneğinin şeması



Şekil 2. a) Kurutma havası çevriminin psikrometrik diyagramında gösterimi, b) Soğutucu akışkan çevriminin Basınç-özgül entalpi diyagramında gösterimi

IPK sistemini oluşturan elemanların teknik özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Deneye başlamadan önce IPK sisteminde 0.22x0.30 m² dikdörtgen kanal boyutlarında dolaşan kurutma havası hızı, 30 ayrı noktadan bir hızölçer eleman (anemometre) yardımıyla ölçülmüş ve kurutma havası hızı, bu değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Goodfellow ve Tahti, 2001). Kurutulan ürünlerin tam kuru ağırlığını belirlemek için, üründen alınan 3 gram kütledeki örnek 70 °C (şekerce zengin gıdalarda nem tayini 70 °C’de yapılmaktadır) etüve konarak kurutma

kütlesi sabit bir değere ulaşmaya kadar kurutulmuştur. Sabit bir kütleye ulaştığı kuruma sonuna doğru 1 saat ara ile yapılan iki tartım arasındaki farkın 5 mg veya altına düşmesiyle karar verilmiştir (Cemeroğlu 2010). Deney sırasında kurutma havası sıcaklık ve bağıl nem değerleri 1 dakika aralıklarla ölçülerek veri toplayıcıya kaydedilmiştir. Soğutucu akışkan basınç değerleri elektronik manometre yardımıyla ölçülürken, soğutucu akışkan sıcaklıkları ise boru yüzeyine monte edilmiş sıcaklık hissedici elemanlar yardımıyla ölçülmüştür. Kompresörün, fanların ve tüm sistemin harcadığı güç değerleri, elektrik güç ölçer ve elektronik sayaç

yardımla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Deney boyunca kurutma kabini içerisinde mevcut üründeki kütle kaybını ölçmek için ise elektronik terazi kullanılmıştır. Deney sonunda kaydedilen tüm veriler Microsoft Excel programına aktarılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Kullanılan ölçüm cihazları ve teknik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. IPK sistemini oluşturan elemanların özellikleri

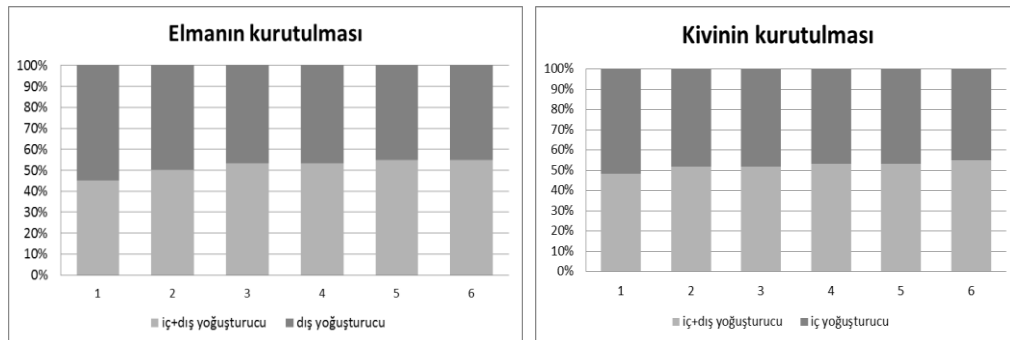
| Sistem parçaları | Teknik özellikler |
|----------------------|--|
| Kompresör | Rotary tip, silindir hacmi 8.6 cm ³ , nominal güç 750 W |
| Buharlaştırıcı | Alüminyum kanatlı, boru ısı transfer toplam yüzey alanı, 2.78 m ² |
| İç yoğuşturucu | Alüminyum kanatlı, boru ısı transfer toplam yüzey alanı, 3.60 m ² |
| Dış yoğuşturucu | Alüminyum kanatlı, boru ısı transfer toplam yüzey alanı, 1.56 m ² |
| Kurutma sistemi fanı | Eksenel tip (nominal güç 50 W) |
| Dış yoğuşturucu fanı | Eksenel tip (nominal güç 33 W) |
| Kılcal boru | 1 m uzunluk ve 1.5x10 ⁻³ m iç çap |
| Soğutucu akışkan | Freon – 410A |

DENEY AKIŞI

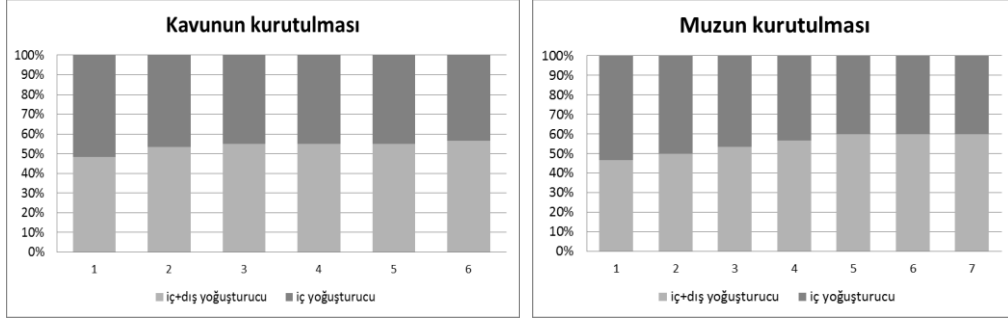
Tasarlanan IPK sistemi üzerinde deneylere başlamadan önce, sürekli hal şartlarına ulaşmak için sistem en az 30 dakika çalıştırılmıştır. Deneyler süresince, kurutma odası sıcaklığı 40±0.5 °C’de sabit tutulmuştur. Bu işlem, iki adet elektromanyetik vanayı kontrol eden elektronik bir termostat yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de görüldüğü gibi elektromanyetik vanalardan biri, dış yoğuşturucu girişine yerleştirilirken, diğeri ara soğutucu akışkan hattına yerleştirilmiştir. Kurutucu çıkışında kurutma hava sıcaklığı ayarlanan set değerine ulaştığında elektronik termostat, dış yoğuşturucu girişindeki elektromanyetik vanayı açarken, ara soğutucu akışkan hattı üzerindeki elektromanyetik vanayı kapatmış ve böylece iç yoğuşturucu ile birlikte dış yoğuşturucuda devreye girmiştir. Kurutma havası sıcaklığı, diferansiyel sıcaklık değerine kadar (yaklaşık ±0.5°C) düştüğünde, elektronik termostat ara hat elektromanyetik vanasını tekrar açmış, diğeri ise kapatmıştır. Böylece dış yoğuşturucu devreden çıkartılmıştır. Şekil 3 ve 4’de tüm meyvelerin kurutulmaları süresince dış yoğuşturucunun devreye girme oranları (DGO) verilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri

| Ölçülen kısım | Ölçüm cihazı | Ölçüm aralığı | Doğruluk |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Ürün kütlesi | Elektronik terazi | 0 - 70 kg | ±0.002 kg |
| Kurutma hava hızı | Sıcak tel hızölçer (anemometre) | 0.1 - 10 m/s | ±0.1 m/s |
| Kurutma havası sıcaklık ve nem | Sıcaklık ve nem veri toplayıcı | 0 – 100 % - 40 – +80 °C | ±2% ±0,4 °C |
| Ortam havası sıcaklık ve nem | Pervaneli hızölçer (anemometre) | -20 - +70 °C, 0.4 - 20 m/s | ±0.5 °C, ±0.2 m/s |
| Kompresör ve fanların güç tüketimi | Elektronik elektrik sayacı | 150 - 300 V | 0.5 s/gün |
| Soğutucu akışkan basınçları | Elektronik manometre | 0 - 50 bar | ±0.1 bar |
| Soğutucu akışkan sıcaklıkları | 4 kanallı veri kaydedici termometre | -40 - 250 °C | ±0.5 °C |
| Kurutma odası sıcaklığı | Elektronik termostat | -50 - +130 °C | ±0.1 °C |



Şekil 3. Elma ve Kivinin kurutulma süresince dış yoğuşturucunun devreye girme oranları



Şekil 4. Kavun ve muzun kurutmaları süresince dış yoğuşturucunun devreye girme oranları

ANALİZ

IPK sisteminin ısıl özellikleri ve performansı ÖNÇÖ (özgül nem çekme oranı yani kilowatt saat başına kilogram olarak uzaklaştırılan nem miktarı), kurutma işlemindeki kullanılan enerjinin verimini ifade eder ve ısı pompasının verimi ITK (ısıtma tesir katsayısı; yoğuşturucudan atılan ısının kompresörde harcanan işe oranı) ile tanımlanır (Patel ve Kar, 2012).

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak ITK değeri iki şekilde ifade edilmiştir. Sadece iç yoğuşturucu devredeyken ısı pompasının performans değerini ifade eden $ITK_{ip,1}$ ve iç yoğuşturucuyla birlikte dış yoğuşturucunun da devrede olduğunda hesaplanan performans değeri ise $ITK_{ip,2}$ ile ifade edilmiştir.

Ayrıca, sistem içerisinde aksel fan ve dış yoğuşturucu fanı da enerji tükettiğinden dolayı, toplam enerji tüketimi hesabında dikkate alınmıştır. Verilen ısıya karşılık sistemde harcanan toplam enerji tüketimini hesaba katan ve sistemin performansını ifade eden, $ITK_{sis,1}$ ile $ITK_{sis,2}$ olmak üzere iki farklı değer hesaplanmıştır. Isı pompasının ve tüm sistemin ısıtma tesir katsayısı değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Dış yoğuşturucu devreye girmeden ısı pompasının ısıtma tesir katsayısı Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$ITK_{ip,1} = \frac{\dot{Q}_{yog,i}}{\dot{W}_{komp}} \quad (1)$$

Dış yoğuşturucu devreye girmeden tüm sistemin ısıtma tesir katsayısı ise aşağıdaki Eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$ITK_{sis,1} = \frac{\dot{Q}_{yog,i}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{fan,i}} \quad (2)$$

Dış yoğuşturucu devreye girdiğinde ısı pompasının ve tüm sistemin ısıtma tesir katsayıları sırasıyla Eşitlik (3) ve (4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$ITK_{ip,2} = \frac{\dot{Q}_{yog,i+d}}{\dot{W}_{komp}} \quad (3)$$

$$ITK_{sis,2} = \frac{\dot{Q}_{yog,i+d}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{fan,i} + \dot{W}_{fan,d}} \quad (4)$$

Kurutma işlemi süresince dış yoğuşturucunun devreye girme oranı (DGO) dikkate alınarak yapılan performans katsayısı hesabıyla, kurutma işlemi boyunca tüm sistem ve ısı pompası için ortalama ITK değerleri eşitlik (5) ve (6) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$ITK_{ip,ort} = \frac{[ITK_{ip,2} \times (\% DGO) + ITK_{ip,1} \times (100 - \% DGO)]}{100} \quad (5)$$

$$ITK_{sis,ort} = \frac{[ITK_{sis,2} \times (\% DGO) + ITK_{sis,1} \times (100 - \% DGO)]}{100} \quad (6)$$

Sadece iç yoğuşturucu devredeyken ve hem iç hem de dış yoğuşturucu devrede olduğu zamanlar için, yoğuşturucu tarafından havaya verilen ısı miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_{yog} = \dot{m}_h (h_A - h_E) \quad (7)$$

ÖNÇÖ, özgül nem çekme miktarı olup, üründen çekilen neme karşılık tüketilen enerji miktarı olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır (Jia et al. 1990).

$$\text{ÖNÇÖ} = \frac{\dot{m}_y}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{fan,i} + \dot{W}_{fan,d}} \quad (8)$$

Üründe, kurutma esnasında nem miktarının kontrolü için ürünün kuru ağırlığının belirlenmesi gerekir. Meyve dilimlerinin kuru esasa göre nem miktarı;

$$MC_{KA} = \frac{M_{YA} - M_{KA}}{M_{KA}} \quad (9)$$

eşitliğinden hesaplanmıştır. Meyve dilimlerinin nem oranı (MR);

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (10)$$

eşitliğinden faydalanılarak hesaplanmıştır (Aktaş, 2007).

Deney sonuçlarına göre kuruma hızları ise,

$$DR = \frac{MC_{tb} - MC_{ts}}{d_t} \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır (Aktaş ve ark. 2012).

Belirsizlik Analizi

Deneysel ölçümlerin doğruluk derecesini belirlemek için hata analizine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada belirsizlik analizi, ölçülen ve hesaplanan değerlerin doğruluk derecesini tanımlamak için Holman (1994) tarafından tanımlanan eşitlik 12'de verilen metot kullanılmak suretiyle gerçekleştirildi. Örnek olarak muzun kurutulması sırasında ilk bir saatte ölçülen

değerlere göre belirsizlik analizi yapılarak Çizelge 3'te verilmiştir. Eşitlik 12'de F ölçülmesi gereken büyüklük, bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ şeklindedir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ ve F büyüklüğünün toplam belirsizliği U_F 'dir.

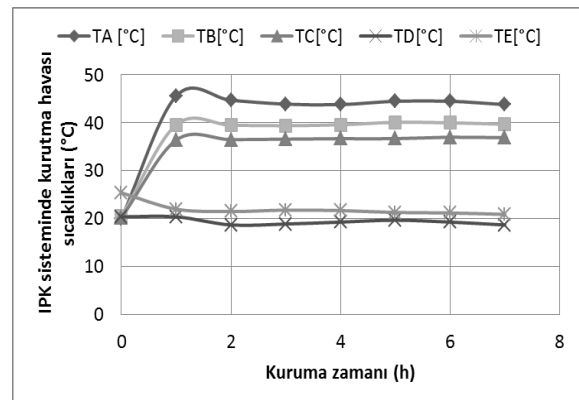
$$U_F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial z_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial z_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Çizelge 3. Ölçülen parametreler ve toplam belirsizlikleri

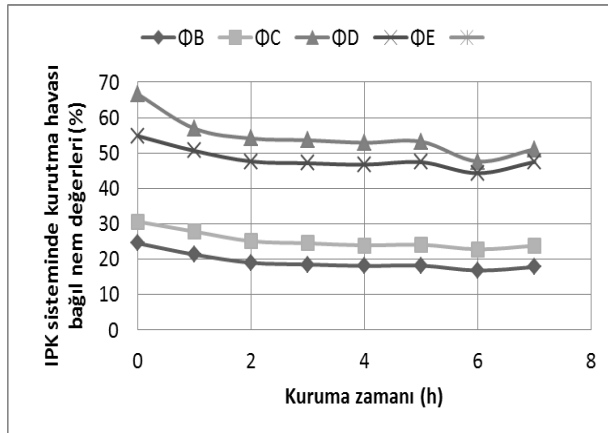
| Sembol | Ölçüm noktası | Ölçülen değer | Birim | Toplam Belirsizlik |
|-------------|---|---------------|-------|--------------------|
| T_A | Kurutma odası girişindeki kurutma havası sıcaklığı | 46.17 | °C | ± 0.49 |
| T_B | Kurutma odası çıkışındaki kurutma havası sıcaklığı | 39.56 | °C | ± 0.49 |
| T_C | Buharlaştırıcı girişindeki kurutma havası sıcaklığı | 35.92 | °C | ± 0.49 |
| T_D | Buharlaştırıcı çıkışındaki kurutma havası sıcaklığı | 20.65 | °C | ± 0.49 |
| T_E | İç yoğuşturucu girişindeki kurutma havası sıcaklığı | 22.17 | °C | ± 0.49 |
| Φ_A | Kurutma odası girişindeki kurutma havası bağıl nemi | 14.9 | % | ± 2 |
| Φ_B | Kurutma odası çıkışındaki kurutma havası bağıl nemi | 23.54 | % | ± 2 |
| Φ_C | Buharlaştırıcı girişindeki kurutma havası bağıl nemi | 29.77 | % | ± 2 |
| Φ_D | Buharlaştırıcı çıkışındaki kurutma havası bağıl nemi | 59.21 | % | ± 2 |
| Φ_E | İç yoğuşturucu girişindeki kurutma havası bağıl nemi | 52.75 | % | ± 2 |
| \dot{m}_h | Kurutma havası kütleli debisi | 0.0792 | kg/s | ± 0.0096 |
| $m_{ü,g}$ | Ürün giriş kütlesi | 1.785 | kg | ± 0.002 |
| $m_{ü,ç}$ | Ürün çıkış kütlesi | 1420 | kg | ± 0.002 |
| P_{buh} | Buharlaştırıcı soğutucu akışkan basıncı (mutlak) | 9.1 | bar | ± 0.25 |
| P_{yog} | Yoğuşturucu soğutucu akışkan basıncı (mutlak) | 30.2 | bar | ± 0.25 |
| T_1 | Buharlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkan sıcaklığı | 13.5 | °C | ± 0.49 |
| T_2 | Kompresör çıkışındaki soğutucu akışkan sıcaklığı | 66.5 | °C | ± 0.49 |
| T_3 | İç yoğuşturucu çıkışındaki soğutucu akışkan sıcaklığı | 49 | °C | ± 0.49 |
| T_4 | Buharlaştırıcı girişindeki soğutucu akışkan sıcaklığı | 5.5 | °C | ± 0.49 |

BULGULAR ve TARTIŞMA

Denemeler esnasında sistemin içinde bulunduğu çalışma ortam sıcaklığı 22,5 °C ve ortam bağıl nemi %40 olarak ölçülmüştür. Kurutma işlemi boyunca IPK sisteminde dolaşan kurutma havasının belirlenen noktalarda (Şekil 1) mevcut sıcaklık ve bağıl nem değerleri ölçülmüştür. Örnek olarak muzun kurutulması esnasında sistemin belirlenen noktalarındaki hava sıcaklık ve bağıl nem değerleri Şekil 5 ve 6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5. Zamana bağlı olarak kurutma havası sıcaklıklarının değişimi



Şekil 6. Zamana bağlı olarak kurutma havası bağıl nem değerlerinin değişimi

Şekil 5 ve 6'dan da görüldüğü üzere, ilk 2 saatte, kurumanın hızlı olduğu süreçte, kurutma havası sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde dikkate değer bir değişim gözlenirken, daha sonra kuruma hızı yavaşladığı için değişim az olmuştur. Kurutma havası sıcaklık ve bağıl nem değerlerindeki değişimin azaldığı ilk iki saatin sonunda, kurutma odasına yaklaşık 45 °C ve % 15 bağıl nem şartlarında giren kurutma havası, 40 °C ve % 20 şartlarında terk etmiştir. Kurutma kanalında bir miktar sıcaklığı düşen kurutma havası, yaklaşık 38 °C ve % 25 şartlarında buharlaştırıcıya girmiş ve 18 °C soğuyarak ve nemini bırakarak 18 °C ve % 55 şartlarında buharlaştırıcıyı terk etmiştir. Soğuyan ve nemi düşen hava kurutma odasına gönderilmeden önce, tekrar ısıtılmak üzere, yoğunlaştırıcıya gönderilmiştir. Yoğunlaştırıcıya 22 °C ve % 48 bağıl nem şartlarında giren hava, 45 °C ve % 15 şartlarında yoğunlaştırıcıyı terk ederek ve tekrar kurutma odasına girmiştir. Kivi, muz, kavun ve elmada 40 °C sabit kurutma havası sıcaklığında kurutmanın başlangıcında, kurutma odasına giriş bağıl nemleri sırasıyla % 12.6, 11.5, 13.1, 13.2 olarak, çıkış bağıl nemleri ise % 20.1, 17.5, 22.4, 21.6 olarak ölçülmüştür. Kurutma işlemi sırasında, kompresörün ve tüm sistemin tükettiği güç değerleri her bir saatte bir ölçülerek ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Muzun kuruma süresi diğer meyvelere göre daha uzun olduğu için enerji tüketimi bu meyvede daha fazla olmuştur. Kurutma süresine bağlı olarak tüm sistemin özgül nem uzaklaştırma oranı (ÖNÇO) (8) numaralı

formül yardımıyla hesaplanmış ve Çizelge 5'te verilmiştir.

Denemesi yapılan bütün meyve çeşitlerinde ilk iki saatte en yüksek ÖNÇO değerleri elde edilmiştir. En yüksek değer ise kavunda elde edilmiştir. Ürünlerin kurutulması esnasında, her saat alınan ölçümler sonucunda saatlik ITK değerleri hesaplanmış ve bunlarında ortalaması alınmak suretiyle, sadece iç yoğunlaştırıcı devredeyken ve iç yoğunlaştırıcı yanında dış yoğunlaştırıcunun devreye girdiği durumlarda devreye girme oranları dikkate alınarak tüm sistemin ortalama performans değerleri elde edilmiştir (Çizelge 6).

Çizelge 4. Kurutma sistemi toplam enerji tüketimi

| TOPLAM ENERJİ TÜKETİMİ (kWh) | | | | |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Zaman (h) | Kivi | Muz | Kavun | Elma |
| 1 | 0.794 | 0.791 | 0.785 | 0.789 |
| 2 | 0.787 | 0.773 | 0.778 | 0.781 |
| 3 | 0.781 | 0.767 | 0.77 | 0.773 |
| 4 | 0.773 | 0.76 | 0.761 | 0.764 |
| 5 | 0.764 | 0.755 | 0.755 | 0.76 |
| 6 | 0.758 | 0.75 | 0.747 | 0.751 |
| 7 | - | 0.745 | - | - |
| TOPLAM | 4.657 | 5.341 | 4.596 | 4.618 |

Çizelge 5. Kurutma süresine göre tüm ürünlere ait özgül nem uzaklaştırma değerleri

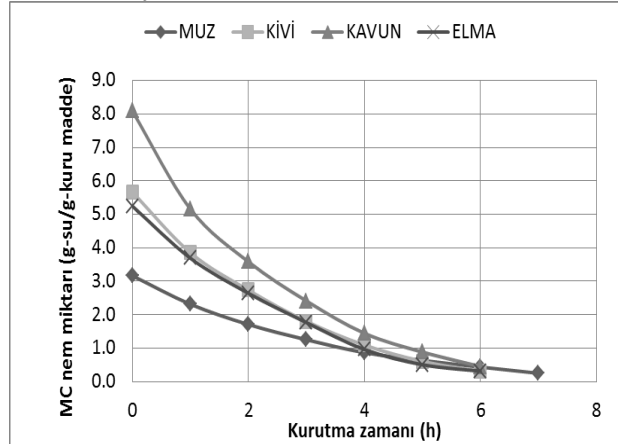
| ÖNÇO (kg su buharı / kWh) | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Zaman (h) | Kivi | Muz | Kavun | Elma |
| 1 | 0.611 | 0.461 | 0.732 | 0.564 |
| 2 | 0.381 | 0.336 | 0.398 | 0.384 |
| 3 | 0.320 | 0.254 | 0.299 | 0.323 |
| 4 | 0.246 | 0.217 | 0.250 | 0.301 |
| 5 | 0.170 | 0.132 | 0.146 | 0.171 |
| 6 | 0.106 | 0.113 | 0.114 | 0.073 |
| 7 | | 0.107 | | |
| ORTALAMA | 0.306 | 0.232 | 0.323 | 0.303 |

Çizelge 6. Dış yoğunlaştırıcı devredeyken ve değilken tüm sistem için hesaplanan saatlik ITK değerleri

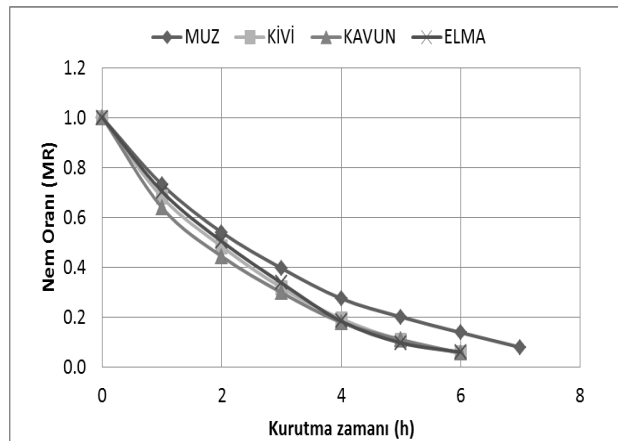
| Saatlik ITK _{sis} | | | | | | | | |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Zaman (h) | Kivi | | Muz | | Kavun | | Elma | |
| | ITK _{sis1} | ITK _{sis2} | ITK _{sis1} | ITK _{sis2} | ITK _{sis1} | ITK _{sis2} | ITK _{sis1} | ITK _{sis2} |
| 1 | 3.174 | 2.714 | 2.668 | 2.389 | 2.680 | 2.413 | 2.943 | 2.643 |
| 2 | 2.837 | 2.618 | 2.396 | 2.253 | 2.733 | 2.446 | 2.744 | 2.436 |
| 3 | 2.826 | 2.590 | 2.398 | 2.194 | 2.740 | 2.451 | 2.649 | 2.457 |
| 4 | 2.878 | 2.616 | 2.603 | 2.333 | 2.772 | 2.473 | 2.682 | 2.481 |
| 5 | 2.816 | 2.596 | 2.607 | 2.474 | 2.793 | 2.504 | 2.663 | 2.520 |
| 6 | 2.805 | 2.559 | 2.753 | 2.594 | 2.794 | 2.512 | 2.827 | 2.537 |
| 7 | | | 2.831 | 2.549 | | | | |

Denemeler sırasında tüm sistem için saatlik ITK_{sis} değerleri, dış yoğuşturucunun DGO dikkate alınarak (Şekil 3 ve 4) ve denklem (5) ve (6) kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu tüm sistem için ortalama ITK değerleri elma için 2.61, kivi için 2.75, kavun için 2.60 ve muz için 2.49 olarak elde edilmiştir. Isı pompası ITK değerleri ise elma için 2.82, kivi için 2.97, kavun 2.79 ve muz için ise 2.67 olarak hesaplanmıştır.

Görüldüğü gibi, sadece iç yoğuşturucunun devrede olduğu an ITK değerleri maksimum değere ulaşmıştır. Dış yoğuşturucunun devreye girmesiyle birlikte ise yoğuşturucudan atılan ısının bir kısmı dışarıya atıldığından dolayı doğal olarak ITK düşmüştür. Kapalı döngü çalışan IPK sistemleri için dış yoğuşturucunun kullanılması kaçınılmaz bir durumdur. Fakat atılan ısının faydalı enerjiye dönüştürülmesiyle (örneğin kullanım suyu için su ısıtmak), bu bir kazanca dönüştürülebilir. Kurutma zamanına bağlı olarak nem miktarı ve nem oranı değişimi grafik halinde Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



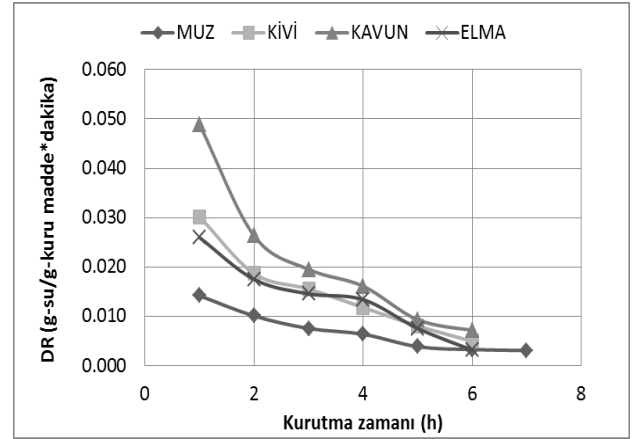
Şekil 7. Zamana bağlı olarak kurutma havası nem miktarlarının değişimi



Şekil 8. Kurutma havasının nem oranının zamana bağlı değişimi

Şekil 7 ve 8' den de görüldüğü üzere, kurutma sırasında ilk iki saat içinde ürün bünyesindeki nem hızlı bir şekilde (yaklaşık %50 oranında) uzaklaştırılmakta olup, daha sonra kalan nemin uzaklaştırılması sırasında kuruma hızı gittikçe düşmüştür. Ürünlerin içerdiği

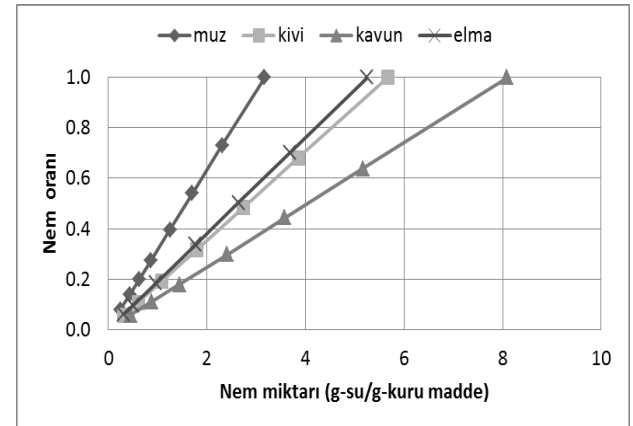
neme göre kuruma hızları da doğru orantılı olarak gerçekleşmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Zamana bağlı kuruma hızları

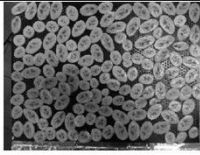
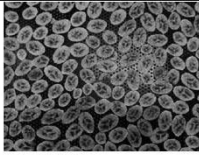
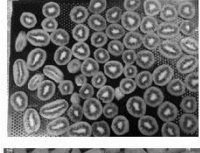
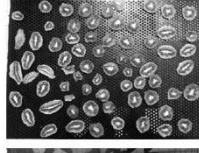
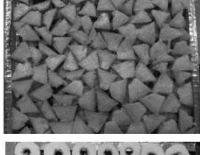

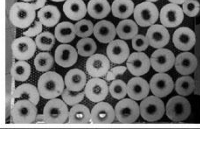
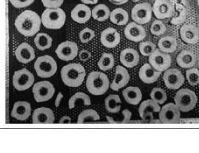
En yüksek kuruma hızı, başlangıçta en yüksek nem yüzdesine sahip olan kavunda, en düşük kuruma hızı ise başlangıçta en düşük nem miktarına sahip muzda görülmüştür. Şekil 10'a bakıldığında, en yüksek su içeriği kavun olup, onu kivi, elma ve muz takip etmiştir. Kivi ve elmanın nem içeriklerinin oldukça yakın olduğu, en düşük nem miktarına ise muzun sahip olduğu görülmüştür.

Kurutma sonrası renk ve aroma açısından ürün kalitesinin oldukça iyi durumda olduğu belirlenmiştir. Çizelge 7'de tarımsal ürünlerin kurutulmadan önce ve sonraki görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi su içeriği fazla olan kavunda kuruma sonrası su kaybının olmasından dolayı hacim azalması daha fazla görülmüştür. Bunu sırasıyla kivi, elma ve muz takip etmiştir. Isı pompalı kurutma sisteminde sıcaklığın yüksek olmamasının etkisi renklerde belirgin şekilde görülmektedir. Renkler dört meyvede de başlangıç rengine oldukça yakındır. Üründe renk kararmaları görülmemiştir. Meyvelerin aroması ve tadı yine sıcaklığın düşük olması nedeniyle daha iyi korunmuştur



Şekil 10. Her ürün için nem miktarına bağlı olarak nem oranları

Çizelge 7. Tarımsal ürünlerin kurutulmadan önce ve sonraki görüntüleri

| ÜRÜN | KURUTMADAN ÖNCE | KURUTMADAN SONRA |
|-------|---|---|
| MUZ |  |  |
| KIVI |  |  |
| KAVUN |  |  |
| ELMA |  |  |

SONUÇLAR

Bu çalışmada kapalı döngü bir IPK sistemi yardımıyla 40 °C kurutma havası şartlarında 1 m/s kurutma havası hızında 5 mm kalınlığında, ön işleme tabi tutulmamış 4 farklı ürün kurutulmuştur. Bu ürünlerin (kavun, kivi, elma ve muz) kurutma kinetikleri ve IPK sisteminin performansı incelenmiştir. Ayrıca literatürde mevcut çalışmalardan farklı olarak kurutma odası sıcaklık kontrolü, iç yoğuşturucuya seri olarak bağlı dış yoğuşturucunun devreye sokulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan çıkarılan sonuçlara göre;

Kurutma sonunda ürünlerin lezzet ve renk açısından oldukça iyi durumda olduğu belirlenmiştir. Ürünlerde renk kararmaları görülmemiştir. Meyvelerin aroması ve tadı yine sıcaklığın düşük olması nedeniyle daha iyi korunmuştur. Ürünler hijyenik ortamda kurutulmak suretiyle ürünün toz ve pisliklere maruz kalması önlenmiştir. Ayrıca klasik kurutma sistemlerine göre, kurutma odasından çıkan nemli ve sıcak kurutma havasını geri kazanıp, tekrar kullanmak suretiyle de önemli bir enerji tasarrufu sağlanmıştır. Bu yüzden IPK sistemleri endüstriyel uygulamalarda klasik kurutucuların yerine iyi bir alternatiftir.

Tasarlanan IPK sistemiyle başlangıçta kurutma odasına sırasıyla 8.091, 5.667 ve 5.250 g su/g kuru madde su oranında giren kavun, kivi ve elma, 0.453, 0.307 ve 0.22 g su/g kuru madde su oranına kadar 6 saatte kurutulurken, muz ise 3.167 g su/g kuru madde su oranından 0.201 g su/g kuru madde su oranına kadar 7 saatte kurutulmuştur. En uzun kuruma süresi muzda gerçekleşmiştir (7 saat).

Tüm meyvelerde kurutma hızının kurutma sonuna doğru giderek azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca kuruma hızındaki düşüğe bağlı olarak kurutma odası sıcaklık değerleri artmış ve buna bağlı olarak dış yoğuşturucu kurutma sonlarında daha fazla devreye girmiştir. Bunun sebebi yüzey yükünün artmasıdır yani ürün iç yapısında mevcut nemin yüzeye çıkarılmasının zorluğundandır.

Başlangıçta kurutma tepsilerine aynı kütlede ürün konulduğu dikkate alınarak, 4 farklı meyve için saatte çekilen nem miktarı (ÖNÇO) değerleri her ürün için farklı değerler elde edilmiştir. Kurutma boyunca ortalama en yüksek ÖNÇO değeri kavun için 0.332 kg/kWh olarak elde edilirken, en düşük ÖNÇO değeri ise muz için 0.232 kg/kWh olarak elde edilmiştir. Elma ve kivi için ÖNÇO değerleri sırasıyla 0.306 kg/kWh ve 0.303 kg/kWh olarak birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu değerler Prasertsan ve Saensaby (1998), Tosun (2009) ve Phani ve ark. (2005) hesapladıkları ÖNÇO değerleri ile uyum göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan kurutma odası sıcaklık kontrolünde, iç yoğuşturucuya seri olarak bağlı dış yoğuşturucunun devreye sokulmasıyla sistem performans değerleri azalmıştır. Bunun sebebi faydalı ısının bir kısmının dış yoğuşturucuda kullanılması yüzündendir. ITK değerlerindeki bu azalma, paralel yoğuşturucunun devreye sokularak yapıldığı kontrol yönteminde de gerçekleşmektedir. Dört farklı meyvenin IPK sistemi yardımıyla kurutulması sırasında, tüm sistem için en yüksek ortalama ITK değeri kivi için 2.75 en düşük değer ise muz için 2.49 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu ITK değerlerinin, diğer kontrol yöntemleri kullanılan IPK sistemleriyle elde edilen ITK değerleriyle uyum gösterdiği (Abuşka ve Doğan, 2010, Tosun 2009), hatta bazılarına göre daha iyi sonuç elde edildiği (Aktaş ve Kara 2013, Ceylan 2009) görülmüştür. Fakat Soponronarit ve ark. (1998) elde edilen TIK değerine göre düşük değerler elde edilmiştir. Bu yüzden ileriye dönük olarak, daha yüksek ITK ve ÖNÇO değerlerini elde etmeye yönelik çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Bu kapsamda, kapalı döngü IPK sistemlerinde diğer kontrol yöntemlerinin de denenerek (kompresör hızı, fan kontrolü gibi) en verimli yöntemin belirlenmesi, ayrıca mevcut bu sistemin güneş enerjisi destekli hale getirilmesi ve değiştirilmiş atmosfer şartlarında kurutma işlemlerinin yapılması da planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

2013/BAP/082 no'lu "İSİ POMPASI KULLANIMININ TARIMSAL ÜRÜN KURUTULMASINDA KALİTE VE ENERJİ VERİMİ YÖNÜNDEN İNCELENMESİ" konulu proje çalışmasına verdikleri destekten ötürü Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne ve Laboratuvarlarını kullanımımıza açtıkları için Atatürk Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü'ne tüm yazarlar teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- Abuşka, M., ve Doğan, H. 2010, Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucuda çekirdeksiz üzümün kurutulması, *Politeknik Dergisi*, 13 (4) : 271-279.
- Acharyaviriya S., Sopanronnarit S., Terdyothin A. 2000, Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer. *Drying Technology*, 18 (1,2) 479-591.
- Aktas M. 2007. Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalatı ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Aktaş, M., Ceylan İ., Doğan H., Zülfikar, A. 2010, Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompalı Kırmızıbiber Kurutucusunun Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyleri, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi (Journal of Thermal Science)* 30:1, 111-120.
- Aktas M.,Sevik S., Doğan H.ve Ozturk M. 2012, Fotovoltaik ve termal güneş enerjili sürekli bir kurutucuda domates kurutulması, *Tarım Bilimleri Dergisi Journal of Agricultural Sciences*,18: 287- 298.
- Aktaş M. ve Kara M. Ç., 2013. Güneş Enerjisi ve Isı Pompalı Kurutucuda Dilimlenmiş Kivi Kurutulması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28:4 733-741.
- Aktaş, M., Ceylan I., Yılmaz, S. 2009. Determination of Drying Characteristics of Apples in a Heat Pump and Solar Dryer, *Desalination*, 239: 266-275.
- Cemeroğlu B., 2010, Gıda Analizleri. Genişletilmiş 2. baskı, *Gıda Teknolojileri Derneği*, No:34, Ankara.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H. 2005, Isı Pompalı Kurutma Odasında Elma Kurutulması, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi (Journal of Thermal Science)*25:2, 9-14.
- Ceylan I., 2009. Energy Analysis of PID Controlled Heat Pump Dryer, *Engineering*,1: 188-195.
- Chua, K., Mujumdar, A., Hawlader, M., Chou, S., Ho, J. 2001, Batch Drying of Banana Pieces- Effect of Stepwise Change in Drying Air Temperature on Drying Kinetics and Product Colour, *Food research international*, 34 (8): 721-731.
- Colak, N., Hepbaşlı, A. 2009. A Review of Heat Pump Drying part 1- Systems Models and Stuides. *Energy conversion and management*, 50: 2180-2186.
- Dincer I. 1998, Moisture Transfer Analysis During Drying of Slab Woods, *Heat and Mass Transfer*, 34:317-320.
- Filho, O. A. and Strommen, I.1996, The Application of Heat Pump in Drying of Biomaterials, *Drying Technology*, 14(9): 2061-2090.
- Goodfellow H. And Tahti E. 2001, *Industrial Ventilation Design Guide Book*, Academic Press
- Hawlader, M.N.A., Perera C.O., ve Tian, M. 2006, Properties of Modified Atmosphere Heat Pump Dried Foods, *Journal of Food Engineering*, 74: 392-401.
- Holman, J.P. 1994, *Experimental Methods for Engineers*, 6th Ed.
- Jia X.,Jolly P. And Clements S. 1990, Heat Pump Assisted Continuous Drying Part 2:Simulation Results. *International Journal of Energy Research*, (14): 771-782.
- Juan, W., Chong Z., Zhentao, Z. ve Luwei Y., 2013, Performance Analysis of Heat Pump Dryer to Dry Mushroom, *Advanced Journal of Food Science and Technology*, 5 (2): 164-168.
- Kahyaoglu and Aytaç G. 2009, Kurutulmuş Sebzeler. *T.C Basbakanlık Dış Ticaret Müstesarlığı İhracatı Gelistirme Etüd Merkezi*, Ankara.
- Kivevele, T., Huan, Z. 2014, A Review on Opportunities for The Development of Heat Pump Drying Systems in South Africa, *South African Journal of Science*, 110: 1-11
- Pal, U.S., Khan M.K., ve Mohanty S., N. 2008, Heat Pump Drying of Green Sweet Pepper, *Drying Technology*, 26: 1584-1590
- Patel K. K. ve Kar A., 2012. Heat Pump Assisted Drying of Agricultural Produce- An Overview, *Journal Food Science Technology*, 49 (2): 142-160.
- Perera C. O. ve Rahman M.S. 1997, Heat Pump Demuhidifier Drying of Food, *Trends in Food Science &Technology*.8:75-79.
- Phani K. A. ve Greg J. S. 2005, Re-circulating Heat Pump Assisted Continuous Bed Drying and Energy Analysis, *International Journal of Energy Research*, 29: 961-972.
- Prasertsan S., ve Saen-Saby P. 1998, Heat Pump Drying of Agricultural Material, *Drying Technology*, 16 (1,2):235-250
- Queiroz, R., Gabas, A.L., Telis, V.R.N., 2004. Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers. *Drying Technology*, 22 (7): 1603–1620.
- Qi-Long, S., Chang-Hu, X., Ya, Z., Zhao-Jie, L., Xiang-You, W. 2008, Drying Characteristics of Horse Mackerel (*Trachurus japonicus*) Dried in a Heat Pump Dehumidifier, *Journal of Food Engineering*, 84: 12-20.
- Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T., Rukprang, P. (1998). Fruit Drying Using Heat Pump. *RERIC International Energy Journal*, 20: 38–53.
- Soylemez, M.,S., 2006. Optimum Heat Pump in Drying Systems with Waste Heat Recovery, *Journal of Food Engineering*,74: 292-298.
- Strommen I. ve Kramer K.1994, New Applications of Heat Pumps in Drying Processes, *Drying Technology*,12(4):889-901.

Syahrul S., Hamdullahpur F., Dinçer I. 2002, Exergy Analysis of Fluidized Bed Drying of Moist Particles, *Exergy and International Journal*, 2: 87-98.

Teeboonma U., Tiansuwan J. ve Soponronnarit S.2003, Optimization of Heat Pump Fruit Dryers, *Journal of Food Engineering*, 59:369-377.

Tosun S. 2009, Bazı Tarımsal Ürünler İçin Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi. *Doktora Tezi Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.*

Yang, Z., Zhu, Z., Zhao, F., 2016, Simultaneous Control of Drying Temperature and Superheat for A Closed-Loop Heat Pump Dryer, *Applied Thermal Engineering*, 93: 571-579.

Yun-Hong, L., Shuai, M., Jian-Ye, W., ve Jian-Xue, L. 2014, Drying and Quality Characteristics of Flos Lonicerae in Modified Atmosphere with Heat Pump System, *Journal of Food Process Engineering*, 37: 37-45.

Zhao, Y., Zongsheng, Z., ve Enlong, Z. 2013, Experimental Research on Parallel Conversion Control of Drying Temperature in a Closed-Loop Heat Pump Dryer, *Drying Technology* 31: 1049-1055.