



GIDA KURUTULMASINDA ISI POMPALI KURUTUCULARIN KULLANIMI VE ELMA KURUTMADA UYGULANMASI

USAGE OF HEAT PUMP DRYER IN FOOD DRYING PROCESS AND APPLE DRYING APPLICATION

Gökhan GÜRLEK^{1*}, Özay AKDEMİR¹, Ali GÜNGÖR¹

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
gokhan.gurlek@ege.edu.tr, ozay.akdemir@ege.edu.tr, ali.gungor@ege.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.06.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 11.09.2015
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.35761
Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Türkiye’de gıda kurutma çalışmalarının önemli bir kısmı güneşte sergi yöntemi ile yapılmakta ve doğal olarak kurutulan ürünlerin kalitesi düşük olmaktadır. Günümüz rekabetçi piyasa şartlarında gıdaların daha gelişmiş teknikler ve cihazlar kullanılarak daha kaliteli olarak iç ve dış piyasaya sürülmesi son derece önemli hale gelmiştir. Ürün kalitesinin yanı sıra kurutma prosesinin düşük enerji tüketimli bir proses olması piyasa şartlarında ürünün rekabet gücünü arttırmaktadır. Bu nedenle kurutma işleminde temel amaç maksimum düzeydeki suyu yüksek kalite değerlerinden ödün vermeden minimum enerji kullanımı ile uzaklaştırmaktır. Bu amaçla ısı pompalı kurutucular, kurutma çalışmalarında önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ısı pompalı kurutucuların çalışma prensibi, kurutma işlemlerinde ısı pompası kullanım tipleri, ısı pompalı kurutucuların performans kriterleri ele alınacak, bölümümüz laboratuvarında, ısı pompalı kurutucuda gerçekleştirilen elma kurutma çalışmalarından elde edilen belli başlı sonuçların verileceği örnek bir uygulama anlatılacaktır.

Anahtar kelimeler: Isı pompalı kurutucu, Kurutma, SMER, MER, SEC, Enerji tüketimi

Abstract

In Turkey, drying is achieved natural method by spreading out the material on the ground. In this way, there are many disadvantages like low quality and hygienic problems. The resulting loss of food quality in the dried products may have effect negatively trade potential and economical worth. For preventing the deterioration of the materials different types of drying methods have been developed. Low energy consumption applications are important for drying industry besides high product quality. For this purpose, heat pump dryer is gaining importance day by day in drying applications. In this study, the working principle of the heat pump dryer, heat pump types in the drying process and the heat pump dryer performance criteria will be considered. An example of application will be described using obtained results from apple drying operation that is conducted in the heat pump dryer.

Keywords: Heat Pump Dryer, Drying, SMER, MER, SEC, Energy Consumption

1 Giriş

Doğada kendi kendine gerçekleşen kuruma işlemi, ilk çağlardan beri insanoğlunun ilgisini çekmiştir. Zamanla tarım ürünleri ve gıdaların uzun süreler muhafazasını sağlamak için kurutma yöntemleri geliştirilmiştir. Öncelikle açık sergi olarak anılan doğal kurutma şeklinde yapılan kurutma işlemleri, daha sonraları makineleşmeyle birlikte daha hızlı ve sağlıklı şekilde gerçekleşmiştir [1],[2].

Kurutma teknolojisinden, kurutulacak olan gıdadan nemin uzaklaştırılmasının yanında, kağıt, kereste, çimento ve kimya sanayi gibi birçok sanayi dalında da yararlanılmaktadır. Enerji tüketimleri ve ekonomiklik bakımından en uygun kurutma yöntemini seçmek çok önemlidir. Gıda maddelerinin kurutulmasındaki çok sayıda amaçtan en önemlisi uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasının önlenmesidir. Uzun süreli depolamalarda kurutulan ürünün bozulmadan kalabilmesi için su aktivitesi mikrobiyal aktivitelemlerin oluşacağı sınır değerinin altına düşürülmelidir [1],[2].

Bunun yanı sıra düşürülen nem miktarı ile kurutulmuş ürünün besin değerinin ve kalite özelliklerinin de korunması sağlanmaktadır. Kurutma işleminin önemli bir diğer amacı ise ürün hacmini azaltarak taşımada ve depolamada verimliliği artırmaktır [1],[2].

Dünyada tarım ürünleri endüstriyel veya doğal şartlarda kurutulmaktadır. Açıkta ürün kurutmada; çoğu kere ürünün sağlığa uygunluğu (mikrobiyolojik), renk ve lezzet gibi özelliklerinin bozulmasından; ürünün kalitesi düşmekte, zaman ve işçilikte büyük kayıplar yaşanmaktadır. Ayrıca açıkta doğal olarak kurutmada, meteorolojik etmenler de ürün kayıplarına neden olmaktadır. Bunun yanında endüstriyel kurutmada ilk yatırım maliyeti ve sürekli enerji girdi maliyetleri yüksek olduğundan ürün maliyetleri artmaktadır. Ancak kurutmanın kapalı şartlarda kontrollü olması, ürün kalitesi, zaman, işçilik, mikrobiyolojik ve ürün kaybının azaltılması yönünden büyük getiriler sağlamaktadır [3].

Kurutma endüstrisinde amaç, istenilen özelliklere sahip kuru ürün elde etmek için maksimum düzeydeki suyu minimum enerji kullanımı ile uzaklaştırmaktır. Gelişmiş ülkelerde ulusal enerjinin önemli bir kısmı kurutma işlemlerinde kullanılmaktadır. Kurutma işleminin gerektiği üretim sektöründe kurutma maliyeti toplam maliyetin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji tasarrufu dünya ekonomisi için önemli bir hedefdir ve öyle olmaya da devam edecektir. Daha az enerji kullanmanın en etkin yolu ise, enerjiyi daha faydalı kullanmaktır [4].

Son yıllarda ısı pompalı kurutucuların kurutma işleminde büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağladığı bilinen bir

gerçekdir. Ülkemizde halen konfor amaçlı kullanılan ısı pompaları, sanayileşmiş yabancı ülkelerde kurutma dâhil birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı pompalarının endüstriyel alanda özellikle ürünlerin kurutulması sırasında çok büyük enerji tasarrufu sağlandığı bilinmektedir [5].

King (1974), kurutma işleminde başarılı olabilmek için aşağıdaki hususların sağlanması gerektiğini belirtmiştir:

Ürün kalitesi;

- Minimum kimyasal ve biyokimyasal bozulma reaksiyonları,
- Ürün yapısının muhafazası,
- Suyun, aroma gibi uçucu malzemeleri etkilemeden seçici olarak uzaklaştırılması,
- Son ürünün arzulan renkte olması,
- Hızlı ve basit rehidrasyon,
- Kurutma sonrasında kontaminasyon (mikrobiyal bulaşma) olmaması.

Kurutma ekonomisi;

- Minimum ürün kaybı,
- Suyun hızlı uzaklaştırılması (kurutma ekipmanının birim miktarından yüksek kapasite eldesi),
- Ucuz enerji kaynağı,
- Karmaşık olmayan kurutma cihazı (güvenilirlik ve minimum işçilik) [4].

Bu çalışma kapsamında, başarılı bir gıda kurutma gerçekleştirebilmek amacıyla öncelikle enerji tasarrufu ve ürün kalite özellikleri bakımından büyük avantajlar sağlayan ısı pompalı kurutucu sistemleri incelenmiş ve bu tip bir kurutucu kullanılarak yapılan örnek bir çalışmanın belli başlı sonuçları paylaşılmıştır.

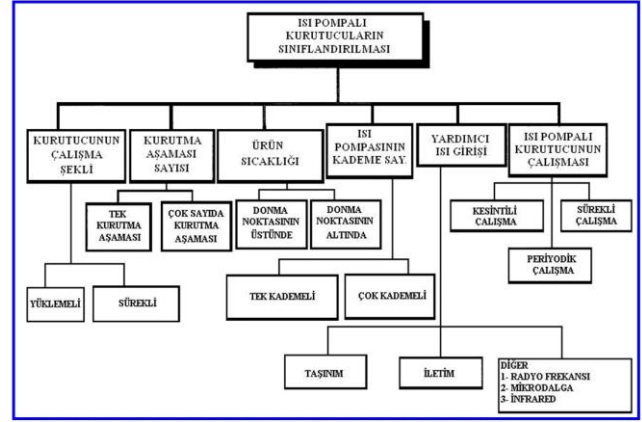
2 Isı Pompalı Kurutucular

Isı pompası destekli kurutma sistemlerinde, ısı pompası ve kurutma olma üzere iki ayrı mühendislik yaklaşımı dikkate alınmaktadır. Diğer sistemlere göre daha yüksek verimde çalışan ısı pompalı sistemler, daha düşük enerji tüketmekte ve bu sistemler ile daha kaliteli ürün elde edilmektedir [6]. Isı pompalı kurutucular çalışma şekli, ısı pompası kademe sayısı, kurutma aşama sayısı, ürün sıcaklığı, ek ısı girişi ve ısı pompalı kurutucu çalışma tipleri olmak üzere farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır [7],[8]. Isı pompalı kurutucular için geliştirilmiş sınıflandırma şeması Şekil 1'de görülmektedir.

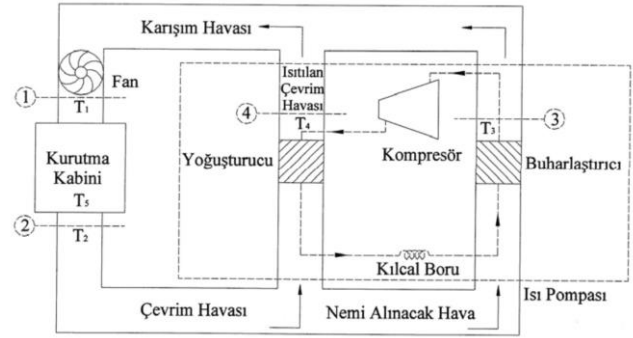
Geleneksel kurutucularda, kurutucudan gelen nemli hava atmosfere bırakılır, bunun sonucu olarak da nemli havanın içerdiği buharlaşma gizli ısı ile duyulur ısıdan yararlanılamaz. Bu enerji, ısı pompalı kurutucu kullanılmasıyla geri kazanılabilir. Kurutucu çıkışındaki nemli hava, duyulur ve gizli ısını geri verebileceği bir buharlaştırıcıdan geçirilir. Bu esnada havanın içindeki nem, buharlaştırıcının soğuk serpantin yüzeylerinde yoğunlaşarak daha düşük değerlere gelmektedir. Buharlaştırıcıda çekilen ısı, kurutucuya girmeden önce havanın ısıtılması için yoğunlaştırıcıya çevrim akışkanı ile taşınır [9].

Isı pompasının çalışmasının temel prensibini termodinamiğin ikinci yasası açıklar. Isı pompası, düşük sıcaklıktaki ısı kaynağından toplanan ısıyı yüksek sıcaklığa transfer edebilmek için yardımcı bir enerji kaynağına (örneğin kompresör için güç girişine) gereksinim duyar. Bu durumda ısı

pompasının çalışması, zorlanmış bir ısı transferi şeklinde yorumlanabilir [10]. Kurutma havasının tekrar kullanıldığı ısı pompalı kurutucu Şekil 2'de gösterilmiştir.

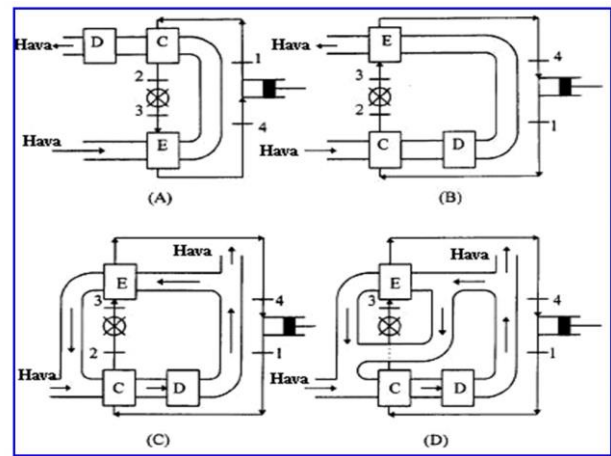


Şekil 1: Isı pompalı kurutucular için geliştirilmiş sınıflandırma şeması.



Şekil 2: Kurutma havasının tekrar kullanıldığı ısı pompalı kurutucu [6].

Isı pompalı kurutucular kullanım amacına ve istenen kurutma parametrelerine göre farklı çalışma düzenlerinde tasarlanabilmektedir. Şekil 3'te farklı çalışma düzenlerinde tasarlanmış ısı pompalı kurutucuların şematik gösterimleri görülmektedir.



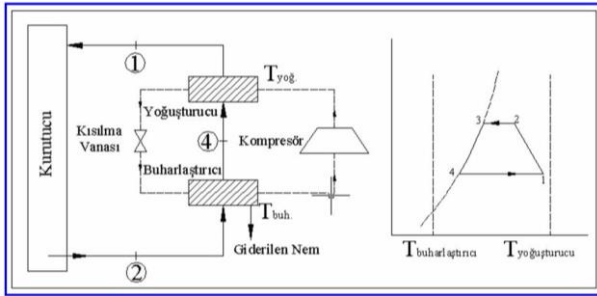
Şekil 3: Isı pompalı kurutucunun değişik çalışma düzenleri [11].

Şekil 3'te gösterilen dört farklı şekilde tasarlanmış ısı pompalı kurutucuların ilk modelinde tamamen dış havalı, nem almalı

ve tekrar ısıtmalı ısı pompalı kurutucu çalışma düzeni gösterilmiştir (A). Burada kurutucudan çıkan nemli hava doğrudan dışarı atılmaktadır. (B) tasarımında, atık nemli havadan ısı çekilip, taze kurutma havasının ısıtılması sağlanmaktadır. Sistem tamamıyla taze hava ile çalışmakta olup bu sistemde yeniden dolaşım yoktur. (C) modelinde atık nemli havadan ısı çekilip, taze kurutma havasının ısıtılması sağlanmaktadır. Sistem kısmen taze hava ile çalışmakta, kısmen nemli hava egzozu ile dolaşım gerçekleştirilmiştir. Bir diğer modelde ise atık nemli havadan ısı çekilip, taze kurutma havasının ısıtılması sağlanmaktadır. Sistem kısmen taze hava ile çalışmaktadır, kısmen nemli hava egzozu ve yeniden dolaşım vardır. Isı pompası evaporatöründen tüm hava geçirilmemekte, bir kısım nemli hava evaporatör çıkışından ve dış ortamdan gelen hava ile karıştırılarak ısı pompası kondenserinde tekrar ısıtılmaktadır [11].

Enerji tasarrufu göz önüne alındığında kurutma sistemlerinde, ısı değiştirici kullanılarak atık ısının geri kazanımı ve kurutma havasının tekrar kullanılması uygulamalarına rastlanmaktadır. Kurutma sistemine eklenen ısı değiştiricisi ile atılan kurutma havasının ısını kurutma kabinine giren havaya vermek amaçlanmaktadır. Bu yöntemle ısı değiştiricisi ile kurutma havasını ısıtarak, gerekli olan ısıtma enerjisi ve enerji giderleri düşürülmektedir. Başka bir yöntem ise, geri besleme yapılarak nemli havanın taze hava ile karıştırılmasını sağlamaktır. Bu yöntemde, kurutma havası ile birlikte kurutma kabinine nemli havanın da girmesinden dolayı kurutma hızı azalacaktır. Kurutma kabininden çıkan nemli ve sıcak gazların gizli ve duylur ısısı ısı pompalı kurutucuların kullanılması ile sisteme kazandırılır [12].

Isı pompalı kurutucular üzerinde yapılan son çalışmalar ile büyük miktarda enerji tasarrufu sağlandığı görülmektedir [5],[7]. Isı pompalı sistemlerin şematik diyagramı Şekil 4'te görülmektedir [4],[5].



Şekil 4: Isı pompalı bir kurutma sisteminin şematik gösterimi

2.1 Isı Pompalı Kurutucuların Avantajları ve Sınırlamaları

Diğer mekanik sistemlerde olduğu gibi ısı pompalı kurutucuların da, kurutma uygulamaları için kabul edilmeden önce incelenmesi gereken bazı avantajları ve sınırlamaları vardır.

2.1.1 Isı Pompalı Kurutucuların Avantajları

- Isı pompalı kurutucuların en büyük avantajı iyileştirilen enerji verimliliğidir [7]. Isı geri kazanımının iyileştirilmesi sonucu elde edilen yüksek enerji verimliliği ile uzaklaştırılan her birim su için daha az enerji tüketilir [13].
- Isı pompalı kurutucular; sıcaklık, nem ve hava akış değerlerinin tam ve bağımsız kontrolüne olanak sağlarlar. Sürekli kontrol edilen kurutma koşulları ısı hassas

materyaller için fayda sağlarken açık bir şekilde daha iyi kalitede ürün elde edilir.

- Tipik olarak -20 °C'den 100 °C'ye (ilave ısıtmayla) sıcaklık ve %15-80 (nemlendirme sistemiyle) bağıl nemliliğe kadar çok geniş kurutma şartları sağlanabilir [7].
- Yüksek değerli ürünler için kurutma çevresinin kontrolü mükemmel bir şekilde sağlanırken, düşük değerli ürünler içinse elektrik tüketimi düşer.
- Kurutma işlemi sonunda aynı kalitede ürün elde edilir.
- Steril süreç şartları sağlanabilir [13].

2.1.2 Isı Pompalı Kurutucuların Sınırlamaları

- Birçok ısı pompası sisteminde ozon tabakasına zararlı CFC'lerin (Kloroflorokarbon) kullanılması çevrecilerin bu konu ile ilgilenmelerine neden olmuştur. Bununla beraber, çevreyle dost HCFC'lerin (Hidrokloroflorokarbon) ve hatta tamamen doğal olan amonyak ile suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı ısı pompalı kurutucular bu dezavantajı ortadan kaldırmışlardır.
- Isı pompalı kurutucunun kompresörleri, soğutucu akışkan filtreleri, ısı değiştiricileri vb. elemanlarına kurutucuyu optimum çalışma şartlarında tutabilmek için düzenli bakım yapılmalıdır.
- Borularda bir çatlak oluşması halinde soğutucu akışkan çevreye sızabilir. Sızıntı olması durumunda ısı pompası çevriminin basıncı yavaş yavaş düşecektir ve kurutucunun performans değeri azalacaktır.
- Güneş enerjili kurutma gibi diğer kurutma sistemleriyle karşılaştırıldığında ısı pompalı kurutucuların ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olabilir. Bunun yanında ısı pompalı kurutucuların ısıyı geri kazanmaları çalışma maliyetlerini düşürür, bu da yüksek maliyetlerini dengeler [7].
- Bazı soğutucu akışkanların (örneğin R22 için 99.6 °C) kritik basınç seviyelerinden dolayı yüksek sıcaklıkta kurutma yapılabilmesi için ilave ısıtmaya ihtiyaç duyulur.
- Arzu edilen kurutma şartlarına ulaşmak için sistem, kararlı hal periyoduna ihtiyaç duyar.
- Daha büyük soğutma sistemleri için üç fazlı güç ünitelerine ihtiyaç duyulabilir [13].

2.2 Isı Pompalı Kurutucu Performansı

Kurutucu sistemlerinin etkinliğinin belirlenebilmesi için özgül nem alma hızı, nem alma hızı ve özgül enerji tüketimi kriterlerinden yararlanır.

2.2.1 Özgül Nem Alma Hızı (SMER)

Kurutucuların enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma hızı (SMER: Specific Moisture Extraction Rate) ile bulunur. Bu değer, birim kWh enerji kullanımı için kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütlelerini gösterir (kgw/kWh). Bir kurutucunun işletme maliyetleri enerji verimliliği için önemli bir parametredir [14].

$$SMER = \left(\frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji girişi}} \right) (\text{kgw/kWh}) \quad (1)$$

2.2.2 Nem Alma Hızı (MER)

Kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütlesi olarak tanımlanır (MER: Moisture Extraction Rate).

$$MER = \left(\frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kuruma süresi}} \right) \quad (2)$$

(kgw/h)

2.2.3 Özgül Enerji Tüketimi (SEC)

Özgül enerji tüketimi örneklerin kurutulması sırasında, örneklerden birim miktarda suyu uzaklaştırmak için gerekli enerji miktarı olarak tarif edilmiş, kJ/kg olarak ifade edilmiştir ve aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

Burada;

$$SEC = \left(\frac{\text{Sisteme giren toplam enerji}}{\text{Üründen uzaklaştırılan suyun kütlesi}} \right) \quad (3)$$

(kJ/kgw)

2.2.4 Enerji Maliyetleri Analizi

Enerji maliyetleri analizinde yatırım maliyetleri ve işletme giderleri olarak incelemek gerekir. Üreticilerin amaçladıkları ürünü en az maliyet ile kaliteli üretmeleri için kurutma koşullarının enerji maliyetlerine etkisini göz önünde bulundurmalarında fayda görülmektedir.

Kurutma sıcaklığının yükseltilmesi, kuruma süresini kısaltır ayrıca kurutucu boyutunu küçültür. Ancak ısıtıcıda enerji gereksinimini artırır. Sonuç düşük ilk yatırım, yüksek işletme giderleridir.

Hava neminin düşürülmesi, kuruma süresini kısaltır ayrıca kurutucu boyutunu küçültür. Ancak gereksinilen taze hava debisi artar, dolayısıyla ısıtıcıda enerji gereksinimi yükselir. Sonuç düşük ilk yatırım, yüksek işletme gideridir.

Kurutma havasının hızının artırılması kuruma süresini kısaltır ayrıca kurutucu boyutunu küçültür. Ancak fan gücünde artış gerekir. Sonuç düşük ilk yatırım, yüksek işletme gideridir [15]. Bu nedenlerle kurutma koşullarının belirlenmesi önemlidir.

2.2.5 Yıllık İşletme Maliyeti

$$C_{OP} = (C_S Q + C_e E) t_y \quad (4)$$

C_e = TL/kWh elektrik maliyeti.

C_S = TL/kWh ısıtma buharı maliyeti.

Bizim çalışmamızda işletme maliyeti olarak C_e alınarak enerji maliyet analizi elektrik maliyetleri üzerinden verilmiştir. Elektrik maliyeti 22.24 kr/kWh alınmıştır [15].

2.2.6 Enerji Tüketimi

Enerji kaynaklarının pahalılaşması ve azalması ile çevresel sorunların ortaya çıkması son yıllarda artan fosil yakıt kullanımındandır. Bu tip etkiler çevresel etkiler ve enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Yeni ekipman tasarımları son zamanlardaki çevre ve enerji politikalarına uyumluluk göstermektedir [4]. Enerji tüketiminin en az olacak şekilde düşünülmesi, enerji tüketiminin yüksek olduğu kurutma sektöründe, kurutma yöntemleri ve kurutucu tasarımında yeni teknolojik çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Kurutma işlemi en fazla enerji tüketiminin olduğu işlemlerden birisidir, öyle ki bütün endüstriyel enerji kullanımının % 15'ine yaklaşık olarak karşılık gelir [7]. Çok sayıda endüstriyel kurutma çalışmasında enerji

israfi büyük miktarlarda yapılmaktadır [16]. Bu oran gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında %12 düzeylerine ulaşabilmektedir. Enerji tüketiminin yüksek olduğu konvektif kurutucularda buharlaştırma aşaması ve atık nemli havadan olan kayıplar toplam enerji gereksiniminin önemli bir bölümünü oluşturur. Tablo 1'de bir konvektif kurutucuda enerji tüketiminin dağılımı görülmektedir [15].

Tablo 1: Tüketim Noktaları Enerji Gereksinimleri [15].

Tüketim Noktaları	Enerji Gereksinimi	
	(kJ/h)	%
Buharlaştırma	975400	55
Kurutucu çıkış havası	521200	30
Destek donanımı	143900	8
Işınım kayıpları	47900	3
Sistemin ısıtılması	45800	3
Fan	13300	1

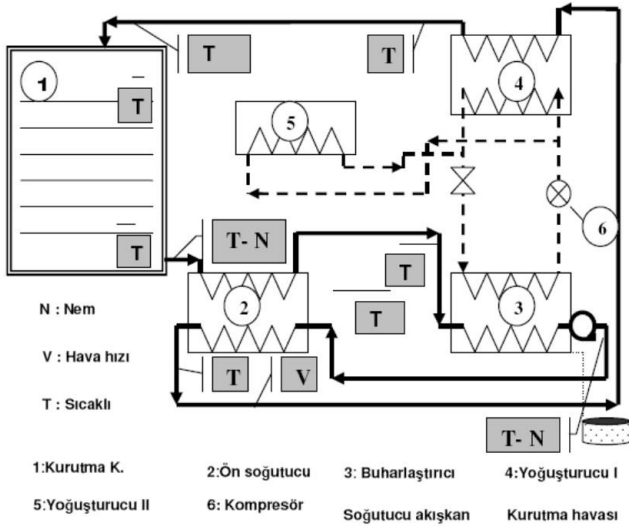
3 Isı Pompalı Kurutucu Uygulamalarından Bir Örnek

Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nün Termodinamik laboratuvarında bulunan Şekil 5'de şematik olarak gösterilen ısı pompalı kurutucuda elma dilimleri kurutulmuştur. Sistem temel olarak iki ana bölümden oluşmaktadır. (i) ısı pompası ünitesi, (ii) kurutma kabini.

Sistemin değerlendirilmesi için belirli yerlerden hava hızı, nem, sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Hava hızı ölçümleri hava hızı ölçüm probu (Testo 0635.9540, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve nem ölçümleri kurutucunun üzerinde bulunan nem ve sıcaklık ölçüm problemleri ile yapılarak kontrol ünitesinden okunarak kaydedilmiştir. Kütle kayıpları analitik terazi (Scaltec SBA 61, Almanya) ile izlenerek belirlenmiştir.

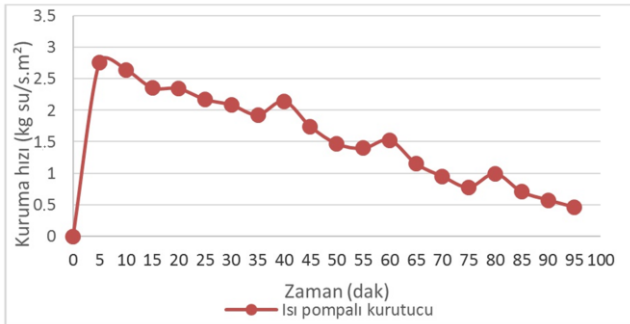
DeneySEL çalışmada kullanılacak Starking çeşidi elmalar yerel pazardan temin edilmiş ve çalışmalar öncesinde 4 °C sıcaklık ve %85 nemlilikte muhafaza edilmiştir. Elmalar su ile yıkandıktan sonra çekirdekleri çıkarılmış ve laboratuvar tipi dilimleyici ile dilimlenmiştir. Dilim kalınlığı olarak 2 mm seçilmiştir. Dilimlenen elmalar %2.5 askorbik asit çözeltisine daldırılarak ön işleme tabi tutulmuştur.

Isı pompalı kurutucuda, ön işlemlerden geçirilmiş ve kurutmaya hazır elma dilimleri, numune bazında gerçekleştirilen ön kurutma denemelerinden sonra (64 cm x 67 cm) boyutlarındaki 4 adet raflı ve elek delikli tepsiye (ısı transferi çift yönlü) ayrı ayrı konularak deneySEL kurutma çalışmasının yapılabilmesi için yerleştirilmiştir. Ayrıca numune tepsileri (24 cm x 24 cm) boyutundadır. Yerleştirmede ürünlerin üst üste denk gelmemesine dikkat edilerek havanın ürünün tüm noktalarına temas etmesi sağlanmıştır. 50 °C sıcaklıkta 2 m/s hava hızında yapılan deneySEL kurutma işlemi tek seferde gerçekleştirilmiş olup 5 dakika aralıklarla numune tepsilerinin ağırlıkları ölçülmüştür. Sıcaklık ve nem değerleri de kaydedilip kuruma eğrileri çizilmiştir. Azalan hız periyodunda gerçekleşen kurutma işleminin zamana bağlı kuruma hızı verileri Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 5: Isı pompalı kurutucu sisteminin gerçek ve şematik gösterimi [4].

Yapılan çalışmalar kapsamında elde edilen kurutulmuş ürünlere, nem tayini, su aktivitesi tayini, yığın yoğunluğu tayini, rehidrasyon yeteneği tayini ve renk tayinini içeren fiziksel analizler, pH tayini, titrasyon asitliği tayini, toplam fenolik madde miktarı tayini, toplam pektin miktarı tayini, invert şeker, toplam şeker ve sakkaroz miktarı tayinini içeren kimyasal analiz yöntemleriyle birlikte duyu analizler de yapılmıştır.



Şekil 6: Isı Pompalı Kurutucuda Kuruma Hızı - Zaman Grafiği
($T_{giriş} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{giriş} = 2\text{ m/s}$).

Gıda kalite belirleme testlerinin yanı sıra özgül nem alma hızı, nem alma hızı ve özgül enerji tüketimi kriterlerinden yararlanılarak ısı pompalı gıda kurutucusunun performans değerleri belirlenmiştir. Sistemin enerji maliyet analizi yapılmış olup enerji tüketimleri belirlenerek ekonomik üretim seçenekleri için ön bilgilendirme elde edilmiştir [4].

4 Sonuçlar

Isı pompalı kurutucuda gerçekleştirilen kurutma işlemi, azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. 1579.5 g kütleyle sahip yaş elma dilimlerinin nemi %10'un altına düşene dek kurutma gerçekleştirilmiş ve istenilen kuruma 90 dakikalık kuruma evresi sonunda gerçekleşmiştir. Başlangıçta taze elmanın kuru madde oranı %15 civarında değişirken kurutma sonunda kuru madde oranı %89.8 civarında olduğu belirlenmiştir. Isı pompalı kurutucuda kurutulan elma dilimlerinin kurutma işlemi sonundaki görüntüsü Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7: Isı pompalı kurutucuda kurutulmuş elma dilimleri [4].

Isı pompalı kurucu performansları göz önüne alındığında, SMER 2.26 kgw/kWh, MER 0.54 kgw/h, SEC değeri 1.6 MJ/kgw olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, elma dilimlerini kurutmada ısı pompalı kurutucu kullanımının özgül enerji tüketimini oldukça düşüreceğini göstermiştir. Tüm bu sonuçlara bakıldığında ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği bakımından çok iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

1 kg uzaklaşan su başına maliyet hesabı yapıldığında ısı pompalı kurutucuda maliyetin 0.1 TL olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, ısı pompalı kurucunun kullanılmasıyla çok düşük maliyetler ile kurutma işleminin gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Isı pompalı kurucularda, kurutma havasının kapalı çevrime sokularak neminin yoğuşturulması ve sistemden dışarı alınarak, nem çekilmesi ile kurutma havasından alınan gizli ısı ve duyulur ısının, ısı pompası yoğuşturucusundan sisteme tekrar geri verilmesi ile enerji tüketimi oldukça azalmıştır.

Isı pompalı kurutucuda yapılan kurutma işlemi sırasında sarf edilen enerji düşüktür ancak kalite özellikleri nispeten diğer kurutma çalışmalarına göre daha kötü sonuçlar vermiş ve farklı kurutucularda yapılan çalışmalardan elde edilen aynı

ürünler için uygulanan duysal analizde, panelistler tarafından çok fazla tercih edilmemiştir. Bu deneysel çalışma ile ilgili yapılan ayrıntılı kalite özellikleri ve duysal analiz testlerinin sonuçları diğer kurutma yöntemlerini de kapsayacak şekilde Baysal ve arkadaşlarının (2015) yaptığı araştırmada detaylı olarak verilmiştir [17]. Isı pompalı kurutucuda kalite özelliklerin, bu çalışmaya göre daha önce yapılan çalışmalarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Bizim çalışmamızda ise, ısı pompalı kurutucunun kapasitesinin diğer kurutuculara göre çok daha fazla olması nedeniyle gerek ön işlemlerin uzun sürmesi, gerek kuruma süresinin uzamasıyla kalite kayıplarının artmasına neden olmuştur. Bu nedenle ısı pompalı kurutucuda kurutulan elma dilimleri kalite açısından düşük değerler göstermiştir. Bu durumun ön işlemlere maruz kalma süresinin kısaltılarak önlenebileceği düşünülmektedir. Böylelikle düşük enerji tüketimini sağlayan ısı pompalı kurutucu kullanımıyla kaliteli ürünlerin elde edilebilecek sanayide kullanılabilir düzeyde olduğu düşünülmektedir.

Elma kurutmada en düşük enerji tüketiminin gerçekleştiği sistemlerin, daha önce yapılan çalışmalara da bakıldığında ısı pompalı kurutucuların olduğu görülmüştür. Isı pompalı kurutucuda yapılan çalışmalarda yüksek SMER ve MER değerleri saptanmıştır. Elma dilimlerinden birim kg su buharlaştırma maliyeti ise oldukça düşük değerler göstermiştir.

Enerji maliyetlerinin düşürülmesi, enerjinin etkin kullanılması, atık enerji miktarının düşürülmesi, enerji kaynaklarının ve çevrenin korunması ile verimliliğin artırılması yapılan çalışmalarda temel amaç olmalıdır. Bu kriterler dikkate alındığında gıda ürünlerinin kurutulmasında ısı pompalı kurutucuların kullanımı önemlidir. Her ne kadar son ürün kalite değerleri üst seviyelerde olmamasına karşın, sistemde ve kurutma prosesinde yapılacak değişiklikler ile kalite değerlerini iyileştirme olanağı bulunmaktadır.

5 Kaynaklar

- [1] Gürel AE, Yılmaz S, Ceylan İ. "Güneş Enerjili ve Nem Kontrollü Kurutucunun Deneysel Analizi". *e-Journal of New World Sciences Academy*, 5(2), 178-187, 2010.
- [2] Ceylan İ, Aktaş M. "Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 215-222, 2008.
- [3] Abuşka M, Doğan H. "Endüstriyel Tip Isı Pompalı Kurutucuda Çekirdeksiz Üzümün Kurutulması". *Journal of Polytechnic*, 13(4), 271-279, 2010.
- [4] Çapar B, Gökbulut S. Farklı Kurutma Metotlarıyla Kurutulan Elma Dilimlerinin Kalite Özelliklerinin ve Enerji Verimliliğinin İncelenmesi. Bitirme Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2013.
- [5] Coşkun S. "Basit Nem Alıcı Isı Pompalı Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu". *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 79-96, 2002.
- [6] Mirza M. Isı Pompalı Kurutucunun Isıl Tasarımı. Ege Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 2006.
- [7] Chua KJ, Chou SK, Ho JC, Hawlader MNA. "Heat Pump Drying: Recent Developments and Future Trends". *Drying Technology*, 20(8), 1599-1602, 2002.
- [8] Gül D, Dikmen E, Şencan Şahin A. "Isı Pompası Destekli Vakumlu Kurutucu Tasarımı". *Süleyman Demirel University International Technologic Science*, 6(1), 13-21, 2014.
- [9] Hawlader MNA, Chou SK, Jahangeer KA, Rahman SMA, Eugene Lau KW. "Solar-Assisted Heat-Pump Dryer and Water Heater". *Applied Energy*, 74, 185-193, 2003.
- [10] Erbil T. "Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı Hibrit Isı Pompası Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2002.
- [11] Prasertsan S, Saen-Saby P, Ngamsritrakul P, Prateepchaikul G. "Heat Pump Dryer Part 1: Simulation of the Models". *International Journal of Energy Research*, 20, 1067-1079, 1996.
- [12] Başaran B, Bitlisli BO, Sarı Ö, Özbalta N, Güngör A. "Deri Kurutulmasında Yeni Teknolojiler: Isı Pompalı Kurutucular". *I. Ulusal Deri Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 7-8 Ekim 2004.
- [13] Kudra T, Mujumdar AS. *Advanced Drying Technologies*. 2nd ed. New York, USA, CRC Press, 2009.
- [14] Özbalta N, Güngör A. "Kurutma Sistemlerinde Isı Pompası Kullanım Potansiyeli". *III. GAP Mühendislik Kongresi*, Şanlıurfa, Türkiye, 24-26 Mayıs 2000.s
- [15] Enerji Enstitüsü. "Nisan 2013 Elektrik Tarifesi enerji Enstitüsü". <http://enerjiinstitutusu.com/tag/nisan-2013-elektrik-tarifesi/> (04.04.2013).
- [16] Ogura H, Ishida H, Yokooji R, Kage H, Matsuno Y, Mujumdar AS. "Experimental Studies on a Novel Chemical Heat Pump Dryer Using a Gas-solid Reaction". *Drying Technology*, 19(7), 1461-1477, 2001.
- [17] Baysal T, Özbalta N, Gökbulut S, Çapar B, Tastan O, Gürlek G. "Investigation of Effects of Various Drying Methods on the Quality Characteristics of Apple Slices and Energy Efficiency". *Journal of Thermal Science and Technology*, 35(1), 135-144, 2015.