



Klasik Isı Pompalı Kurutucunun Performans ve Sürdürülebilirlik Analizinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of the Performance and Sustainability Analysis of the Classical Heat Pump Dryer

Halil Atalay ^{1*} 

¹ Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: halil.atalay@yalova.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 14.11.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 22.08.2023

Atıf şekli/ How to cite ATALAY, H.(2023). Klasik Isı Pompalı Kurutucunun Performans Ve Sürdürülebilirlik Analizinin Deneysel Olarak İncelenmesi. DEUFMD, 25(75), 623-637.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257509

Öz

Bu çalışmada klasik ısı pompalı kurutucunun deneysel olarak enerji ve ekserji tabanlı performans analizi değerlendirilmiş ve ekserji verilerine bağlı olarak sürdürülebilirlik açısından incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kefal havyarı olarak bilinen botarganın kurutma karakteristiği belirlenmiştir. Yapılan deneylerde botarga 40°C sabit sıcaklıkta yaş baza göre ortalama %50-55 nem içeriğinden %16-17 nem içeriğine düşürülünceye kadar kurutulmuştur. Çalışmanın temel amaçlarını ısı pompalı kurutucunun performans ve sürdürülebilirliğini deneysel olarak kanıtlamak ve hassas bir ürün olan botarganın kuruma davranışlarını tespit etmek şeklinde belirtmek mümkündür. Deneyler sonucunda sistemin ekserji verimliliğinin %67.28 - %78.98 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yapılan kurutulmuş botarga üzerinde yapılan gıda analiz sonuçlarına göre ortalama nem ve su aktivitesi değerlerinin ise sırasıyla %16.2 ve 0.7198 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ısı pompalı kurutucunun özellikle enerji ve ekserji performansı açısından oldukça verimli bir sistem olduğunu ve hassas bir ürün olan botarganın sabit sıcaklıkta zarar görmeden kurutulabileceğini açıkça ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Isı pompalı kurutucu, enerji ve ekserji analizi, sürdürülebilirlik, botarga.

Abstract

In this study, the energy and exergy-based performance analysis of the conventional heat pump dryer was evaluated experimentally and examined in terms of sustainability depending on the exergy data. In experimental studies, the drying characteristics of bottarga, known as mullet caviar, were determined. In the experiments, bottarga was dried at a constant temperature of 40°C until it was reduced from an average moisture content of 50-55% to 16-17% relative to the wet base. The main objectives of the study are to experimentally prove the performance and sustainability of the heat pump dryer and to determine the drying behavior of bottarga, which is a sensitive product. As a result of the experiments, it was observed that the exergy efficiency of the system varied between 67.28% - 78.98%. In addition, according to the results of the food analysis on the dried bottarga, the average moisture and water activity values were detected to be 16.2% and 0.7198, respectively. The results clearly showed that the heat pump dryer is a very efficient system especially in terms of energy and exergy performance, and that bottarga, a sensitive product, can be dried at constant temperature without being damaged.

Keywords: Heat pump dryer, energy and exergy analysis, sustainability, bottarga.

1. Giriş

Kurutma işlemi, özellikle gıda ürünlerinin uzun süre bozulmadan kalmasını sağlamak için kullanılabilecek en elverişli yöntemlerden birisidir. Gelişmiş ülkelerde kurutma işlemine yönelik enerji tüketim oranı toplam enerji tüketiminin %10-25'i aralığında değişim göstermektedir. Fakat kurutma %25-50 arasında değişen düşük ısı verim ile enerjinin yoğun olarak hissedildiği bir prosestir[1]. Özellikle düşük ve sabit sıcaklık uygulaması istenen kurutma işlemlerinde daha yoğun bir enerjiye gereksinim duyulduğu açıkça görülmüştür. Kurutma işlemi sırasında uygulanan ısı işlem nedeniyle ürün kalitesinde ciddi değişiklikler meydana gelebilmektedir. Sıcaklığın düşük olması sebebiyle yüksek kalitede enerji kaynağına ihtiyaç duyulacağı göz önüne alındığında bu durum tersinmezliklerin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır[2]. Dolayısıyla kurutma işlemi ile ilgili yapılan çalışmalarda geliştirilen sistemlerin enerji ve ekserji verimliliğinin artırılmasına yönelik yapılan araştırmalar ön plana çıkmaktadır.

Literatürde farklı kurutma teknolojileri üzerinde yapılan çalışmalarda genel olarak sistemlerin performans analizlerinin ele alındığı görülmüştür. Bu kurutma teknolojilerine yönelik gerçekleştirilen örnek çalışmalardan bazılarını kısaca şu şekilde açıklamak mümkündür:

Literatürdeki en yaygın kurutucu türlerinden biri ısı pompalı kurutuculardır. Araştırmalarda genel olarak ısı pompalı kurutucuların enerji ve ekserji verimliliği üzerinde durulmuştur. Çeşitli meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında elde edilen sonuçlara bakıldığında ısı pompalı kurutucuların enerji ve ekserji verimliliğinin arttığı görülmüştür [2-4]. Özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucular yaygın olarak incelenmiş ve bu kurutucuların performansları klasik ısı pompalı kurutucular ile karşılaştırılmıştır. Örnek bir çalışmada, Singh vd. [5], güneş enerjisi destekli ısı pompası kurutucusunun enerji, ekserji, eksergoekonomik analizlerini incelemiş ve geleneksel ısı pompalı kurutucu ile karşılaştırmıştır. Konvansiyonel ısı pompalı kurutucu ve güneş enerjili ısı pompalı kurutucusunun toplam ekserji yok

etme maliyetleri sırasıyla 0.1185 \$ / h ve 0.1386 \$ / h olarak belirlenmiştir. Başka bir çalışmada ise, Singh vd. [6] atık ısı geri kazanımı destekli ısı pompalı kurutucusunun performans, ekonomik ve eksergoekonomik analizlerini incelemişlerdir. Çalışmada ısı pompalı kurutucu farklı çalışma modlarında geliştirilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %56.26 ve %35.9 olarak tespit edilmiştir. Toplam ekserji yok olma maliyeti ise 0.1266\$/h olarak belirlenmiştir. Sistemde iyileştirilmesi gereken temel bileşenin ise kurutma odası olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı bir çalışmada ise Erbay ve Hepbaşlı [7] bir toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminin farklı ölü hal sıcaklıklarına göre eksergoekonomik analizini araştırmışlardır. Analiz sonucunda, kondenserin toplam maliyeti 1.347 \$/h ve 0.029 eksergoekonomik faktör ile sistemin verimliliğini artırma açısından en önemli bileşen olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ölü hal sıcaklığındaki artışın genellikle ekserji verimliliğinde bir azalmaya yol açtığı ve bu durumda maliyetlerin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Erbay ve Hepbaşlı [8] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise toprak kaynaklı ısı pompası ile desteklenen bir gıda kurutucusunun eksergoekonomik performansı değerlendirilmiştir. Analizde sistem bileşenlerinin termodinamik verimsizlikleri ve maliyet performansı incelenmiştir. Sonuçlar, tüm sistemin toplam maliyetinin 4.008 \$/h olduğunu ancak toplam maliyetin 2.569 \$/h' in önlenebilir olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, önlenebilir yatırım maliyetlerinin önlenebilir yıkım maliyetlerinden önemli ölçüde daha düşük olabileceği öne sürülmüştür. Yapılan ileri eksergoekonomik analizde maliyetlerin önemli bir kısmının kurutma kanalı ve kondenserden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Güngör vd. [9] gazla çalışan bir ısı pompalı kurutma sisteminin deneysel sonuçlarına dayanan ekserji analizini ve özgül ekserji maliyetini incelemiştir. Farklı ölü nokta sıcaklıklarının kurutma sistemi bileşenleri ve güç-ekonomik performans parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında en iyi performans değerlerinin 0°C ölü sıcaklıkta bu kurutucudan elde edildiği tespit edilmiştir. Lui vd. [10] linyiti ısı pompalı kurutucuda kurutmuş ve sistemin enerji, ekserji ve ekonomik analizini gerçekleştirmiştir.

Geliştirilen modeller ile ısı pompalı kurutucunun enerji ve enerji performansı ele alınmıştır. Ayrıca, ön ekonomik analiz, linyit ön ısıtıcı ve linyitsiz ısı pompalı kurutucu entegrasyonunun sırasıyla 1,42 ve 1,73 milyon USD kazandırabileceğini göstermiştir.

Literatürde yaygın olarak incelenen diğer bir kurutucu türü güneş enerjisi destekli kurutuculardır. Özellikle son yıllarda güneş kurutucularının sürdürülebilirliği, ekserji ve enerji analizleri ile ilgili çalışmalar ön plana çıkmıştır. Güneş enerjisi kullanımının gün ışığı ile sınırlı olduğu durumlarda, güneş enerjisi destekli kurutucular genellikle enerji depolama sistemleri ile birlikte geliştirilmiş ve performansları incelenmiştir. Geliştirilen bu sistemler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda, sistemlerin enerji ve ekserji verimlilikleri ile kurutma performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda sistemlerin enerji ve ekserji verimlilikleri ile kurutma hızının arttığı gözlemlenmiştir [11-19]. Ayrıca son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda, enerji depolama ortamları olan / olmayan güneş kurutucular, rüzgâr enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklenen hibrit sistemler olarak geliştirilmiş ve yapılan performans analizleri sonrasında sistemlerin enerji ve ekserji performanslarının arttığı tespit edilmiştir[20-22]. Geliştirilen bu sistemler sayesinde özellikle kurutma ve sistem geri ödeme sürelerinin sırasıyla %15 ve %33 oranında azaldığı belirlenmiştir [23]. Yapılan farklı bir çalışmada ise, Atalay [24] ısı pompası ve güneş kurutucularını ekserji, ekonomi ve eksergoekonomik değerlendirme açısından ayrı ayrı karşılaştırmıştır.

Literatürde klasik ısı pompalı kurutucular ile enerji depolama ortamına sahip güneş enerjisi destekli kurutma teknolojilerinin performans, ekonomik ve enerji maliyet analizlerine yönelik çalışmaların yaygın bir şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür. Sürdürülebilirlik analizlerine yönelik çalışmalarda ise özellikle güneş enerjisi destekli kurutma sistemlerinin ön plana çıktığı tespit edilmiş, klasik ısı pompalı kurutucuların performansa bağlı sürdürülebilirlik analizlerine ilişkin deneysel çalışmaların ise sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak hem hassas hem de pahalı bir ürün olan botarganın kurutma karakteristiğinin belirlenmesine

yönelik çalışmaların da oldukça az sayıda olduğu görülmüştür. Çalışmayı literatürdeki diğer araştırmalardan ayıran en önemli noktası ise hem klasik bir ısı pompalı kurutucunun sürdürülebilirliğini deneysel olarak kanıtlamak hem de hassas bir ürün olan botarganın kuruma özelliklerinin sabit sıcaklıkta klasik bir ısı pompalı kurutucu ile belirlenebildiğini ortaya koymaktır. Böylelikle kurutulması zor bir ürün olan kefal havyarının klasik ısı pompalı kurutucuda sabit sıcaklıkta herhangi bir sorun yaşanmadan kurutulabileceği açıkça tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kurutulan ürün analizi

Kefal havyarı olarak bilinen botarga dişi kefal balığı yumurtalarının temizlenip kurulanmasından sonra balmumuyla kaplanarak elde edilmektedir. Yüksek besin değerine ve uzun raf ömrüne sahiptir. Botarga ince dilimler veya rendelenmiş halde ısıtılmadan veya pişirilmeden tüketilebilmektedir[25]. Botarganın kefal balığı içinden çıkartıldıktan sonra bozulmaması için etrafında yer alan kanların veya atık maddelerin temizlenmesi gerekmektedir. Bu maddelerin temizlenmesi sırasında da zararın yarıltılmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde üründe bozulmalar meydana gelebilir. Bir sonraki aşamada ise çıkarılan botargalar 3-4 defa bol suda yıkanarak kurulanmıştır. Bu çalışmada deneylere başlamadan önce botargalar ağırlık kalibrasyonuna göre minimum 15 dakika maksimum ise 45 dakika tuzda fermente edilmiştir. Bu durum botarganın içinde yer alan bakterilerin hareketini durdurmak amacıyla yapılmıştır. Bir sonraki aşamada fermente edilen botargalar tuzdan arındırılarak kurutma tepsisine yerleştirilmiş ve kurutma işlemi başlatılmıştır. Botarga hassas bir ürün olduğu için kurutma işlemi sırasında sıcaklığın 40°C'yi geçmemesine dikkat edilmiştir. Aksi takdirde daha yüksek sıcaklıklarda ürünün pişmesi durumu ile karşı karşıya kalınabilir. Yaş baza göre ürün nem oranının %16-17 seviyelerine düşmesi durumunda kurutma işlemi sonlandırılmıştır.

2.2. Isı pompalı kurutma sistemi deneysel kurulumu

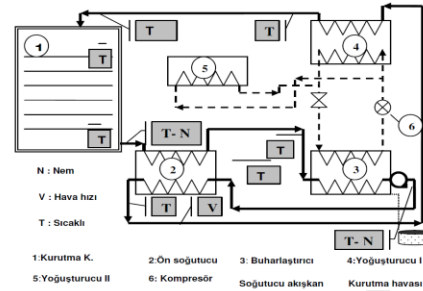
Geliştirilen ısı pompalı kurutucu, ısı pompası, kurutma kabini, ön soğutma için kullanılan kurutma havası kanallı ısı geri kazanım ünitesi ve ihtiyaç duyulduğu koşullarda devreye alınan ikinci bir kondenserden meydana gelmektedir. Kurutma kabini 8 cm kalınlığında poliüretan izolasyona sahip panel malzemeden yapılmış olup boyutları 86x86x120 cm' dir. Kabin içerisinde yer alan raflar, kurutma havasının geçişini kolaylaştırmak ve her rafta bulunan ürünün kurumasını dengeli bir şekilde gerçekleştirmek amacıyla kademeli olarak imal edilmiştir. Raflar 70x 70x2 cm boyutlarındaki çerçeve içerisinde 6x6 mm gözenekli çelik tellerden oluşacak şekilde imalatı gerçekleştirilmiştir. Kurutma kanalı ise dikdörtgen kesite sahip olup 40x 20cm ölçülerinde ve 0.6 mm kalınlığında galvaniz sac malzemeden yapılmıştır. Sistem kanal montaj işleminden sonra tamamen izole edilmiştir. Sistem üzerinde yer alan ısı pompasının çalışma sıcaklığı 5-50°C arasında değişim göstermektedir. Isı pompası üzerinde yer alan kompresör tek silindirlidir ve iş akışkanı olarak R404A kullanılmıştır. Kurutma havası sıcaklığı bir termostat yardımıyla kontrol edilmiş ve ihtiyaç halinde ikinci kondenser devreye girmiştir. Sistemde iki adet radyal ve bir adet de eksenel fan bulunmaktadır. Sistemde hava sirkülasyonu radyal fan ile gerçekleştirilmiştir. Eksenel fan ise ikinci kondenserin çalışması ile devreye girmektedir. Isı pompalı kurutucunun şematik diyagramı ve kurulum resmi sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Isı pompası bileşenlerine ait kapasite değerleri Tablo 1'de belirtilmiştir. Hava kanalı üzerinden iki farklı noktadan bağıl nem ve sekiz farklı noktadan ise sıcaklık ölçüm değerleri yapılmıştır. Ölçüm noktaları belirlenirken kütle ve enerji dengeleri göz önüne alınmıştır. Sıcaklık ölçümleri ön soğutucunun giriş ve çıkışı, kurutma kabini giriş ve çıkışı, evaporatör, kondenser, kabin üst ve alt rafları olmak üzere sekiz farklı noktadan alınmıştır. Yapılan ölçümler kullanılan üç adet datalogger ve bir kontrol ünitesi yardımıyla veri tabanına aktarılmıştır. Ayrıca ürünlerin ağırlık değişimleri her 30 dakikada bir hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan deneyler sırasında fan

ve kompresör tarafından tüketilen elektrik enerjisi değerleri de bir multimetre vasıtasıyla ölçülmüştür. Ürün nem miktarı %16-17 seviyelerine düştüğünde kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Bu çalışmada, deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarına ilişkin hassasiyet değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. En yüksek hassasiyet değerine sahip olan cihazın %2 ile nem sensörü olarak tespit edilmiştir. Ölçüm cihazlarının hassasiyet değerlerinin %5'in altında olması ilgili standartlara göre kabul edilebilir olduğunu açıkça göstermiştir.

Tablo 1. Isı pompalı kurutucu elemanlarının kapasite değerleri

Table 1. Capacity values of heat pump dryer equipments

Isı pompalı kurutucu elemanları	Kapasitesi
Kompresör	1300 W
Kondenser I	4800 W
Kondenser II	3000 W
Evaporatör	3500 W
Radyal Fan	600 m ³ /h
Aksiyal Fan	1200 m ³ /h
Kurutma Kabini	86 x 86 x120 cm
Kurutma Kanalı	400 x 200 mm



Şekil 1. Isı pompalı kurutucu akış diyagramı [28]

Figure 1. Flow chart of heat pump dryer [28]



Şekil.2. Isı pompalı kurutucu montaj resmi [28]

Figure 2. Assembly picture of heat pump dryer [28]

Tablo 2. Ölçüm cihazlarının hassasiyet değerleri

Table 2. Sensitivity values of measuring devices

Ölçüm Cihazı	Ölçüm Tipi	Hassasiyet
PLC Datalogger	Veri transfer cihazı	-
Anemometre	Hava hızı (m/s)	±0.5
T- type thermocouple	Sıcaklık(°C)	±0.2
Nem sensörü	Bağıl nem(%)	±2%
Hassas terazi	Kurutulmuş ürün ağırlık kaybı (g)	0.001g

2.3. Teorik analiz

2.3.1. Sistem ile ilgili yapılan kabuller

Isı pompalı kurutucunun çalışması ile ilgili bazı temel varsayımlar yapılmıştır. Isı pompalı kurutucu için temel varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Tüm prosesler kararlı halde gerçekleştirilmiştir.
- Ölü hal koşulları olarak hava için $T_0 = 25^\circ\text{C}$ and $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$, $\phi = 50\%$ ve R404A soğutucu akışkanı için referans noktası $T_0 = 25^\circ\text{C}$ and $P_0 = 101.325 \text{ kPa}$ olarak alınmıştır.

- Hava için özgül ısı ($C_{p,a}$) ve gaz sabiti (R_a) değerleri sırasıyla 1.005 kJ / kg K ve 0.287 kJ / kgK olarak seçilmiştir.
- Hava ve R404A için termodinamik özellikler, REFPROP 10.0 yazılım paket programı kullanılarak hesaplanmıştır [26].

2.3.2. Isı pompası enerji analizi

Isı pompasının kullanılmasındaki temel amaç arzu edilen ısıtma etkisinin meydana getirilmesidir[27]. Isı pompasının verimliliği performans(etkinlik) katsayısı ile ifade edilmektedir. Isı pompası için etkinlik katsayısı sadece kompresör güç tüketimini ele alan COP_{HP} ve tüm sisteme yönelik güç tüketimini dikkate alan COP_{TS} olmak üzere iki farklı şekilde bulunabilir [28]:

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_H}{W_{kompresör}} \quad (1)$$

$$COP_{TS} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{Sistem}} \quad (2)$$

Isı pompası için maksimum teorik verim ise Carnot verimi ile tespit edilir [27]:

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_{kondenser}}{T_{kondenser} - T_{evaporatör}} \quad (3)$$

Uygulamalarda ısı pompasının sahip olabileceği verim genel olarak Carnot veriminin %40-50'si civarında değişim göstermektedir.

2.3.3. Kurutma Performans Analizi

Kefal havyarı olarak adlandırılan botarganın yaş baza göre nem içeriği Eşitlik (4) ile hesaplanmıştır [29]:

$$M_w = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (4)$$

Kurutma hızı, birim zaman dilimi içerisinde bir kg kuru üründen çıkarılan nem miktarının temel ifadesi olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir[20]:

$$D_r = \frac{M_a - M_{a-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

Kurutma işleminin en önemli parametrelerinden biri olan nem oranı ise Eşitlik (6) ile belirlenebilir [30,31]:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (6)$$

Isı pompalı kurutma sisteminin verimliliği ise özgül nem çekme miktarı(SMER) ve nem alma hızı (MER) ile belirlenir.

Kurutucunun enerji verimliliği ifade eden SMER değeri aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir [28]:

$$SMER = \frac{\text{Üründen Uzaklaşan Nem Miktarı}(kg_w)}{\text{Enerji Girişi}(kWh)} \quad (7)$$

2.3.4. Isı Pompalı Kurutucunun Ekserji Analizi

Bir sistemin performans analizi genel olarak enerji ve ekserji verimliliği ile belirlenir. Bu çalışmada deneysel olarak botarganın kurutma özellikleri tespit edilirken elde edilen veriler doğrultusunda ısı pompalı kurutucunun ekserji kaybı ve ekserji verimliliği sistemi oluşturan her bir bileşen için aşağıdaki bağıntılar yardımıyla ayrı ayrı hesaplanmıştır. T_0 ortam hava sıcaklığına göre temel ekserji denklemi aşağıdaki bağıntıya göre yazılabilir [32]:

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (8)$$

Nemli hava (nh) için giriş ve çıkış ekserji değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilir:

$$\dot{E}x_{giris} = \dot{m}_{nh} \bar{C}_{p,nh} [(T_{giris,nh} - T_{nh}) - T_{nh} \ln \frac{T_{giris,nh}}{T_{nh}}] \quad (9)$$

$$\dot{E}x_{cikis} = [\dot{m}_{nh} \bar{C}_{p,nh} [(T_{cikis,nh} - T_{nh}) - T_{nh} \ln \frac{T_{cikis,nh}}{T_{nh}}] \quad (10)$$

Nemli hava için özgül ısı kapasitesi, Zare ve diğerleri tarafından verilen aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [33];

$$C_{p,nh} = 1009.26 - 0.0040403 T + 0.00061759 T^2 - 0.0000004097 T^3 \quad (11)$$

Ortalama özgül ısı kapasitesi şu şekilde hesaplanabilir;

$$\bar{C}_{p,nh} = C_{p,nh} + w_{giris} C_{p,su} \quad (12)$$

Ekserji kaybı ve ekserji verimliliği değerleri sırasıyla Eşitlik (13) ve Eşitlik (14) ile bulunabilir:

$$\dot{E}x_d = \dot{E}x_{giris} - \dot{E}x_{cikis} \quad (13)$$

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}x_d}{\dot{E}x_{giris}} \quad (14)$$

Isı pompalı kurutucunun her bir bileşeni için ekserji kaybını ($\dot{E}x_d$) ve ekserji verimliliğini (η_{ex}) ifade eden denklemler aşağıdaki gibidir:

Kompresör

$$\dot{E}x_{d,komp} = \dot{W}_{komp} + \dot{m}_r(ex_{2r} - ex_{1r}) \quad (15)$$

$$\eta_{ex,komp} = \frac{\dot{E}x_{2r} - \dot{E}x_{1r}}{\dot{W}_{komp}} \quad (16)$$

Kondenser I

$$\dot{E}x_{d,kond,I} = \dot{m}_r(ex_{2r} - ex_{3r}) + \dot{m}_a(ex_{4a} - ex_{5a}) \quad (17)$$

$$\eta_{ex,kond,I} = \frac{\dot{E}Q_{kond,I}}{\dot{E}x_{2r} - \dot{E}x_{3r}} \quad (18)$$

Kondenser II

$$\dot{E}x_{d,kond,II} = \dot{m}_r(ex_{3r} - ex_{4r}) \quad (19)$$

$$\eta_{ex,kond,II} = \frac{\dot{E}Q_{kond,II}}{\dot{E}x_{3r} - \dot{E}x_{4r}} \quad (20)$$

Genleşme Valfi

$$\dot{E}x_{d,Gen,v} = \dot{m}_r(ex_{4r} - ex_{5r}) \quad (21)$$

$$\eta_{ex,Gen,v} = \frac{\dot{E}x_{5r}}{\dot{E}x_{4r}} \quad (22)$$

Evaporatör

$$\dot{E}x_{d,eva} = \dot{m}_r(ex_{5r} - ex_{1r}) + \dot{m}_a(ex_{2a} - ex_{3a}) \quad (23)$$

$$\eta_{ex,eva} = \frac{\dot{E}Q_{eva}}{\dot{E}x_{5r} - \dot{E}x_{1r}} \quad (24)$$

Kurutma Kanalı

$$\dot{E}x_{d,kk} = \dot{m}_a(ex_{1a} - ex_{2a}) + \dot{m}_a(ex_{3a} - ex_{4a}) \quad (25)$$

$$\eta_{ex,kurutma\ kanali} = \frac{\dot{E}x_{2a} + \dot{E}x_{4a}}{\dot{E}x_{1a} + \dot{E}x_{3a}} \quad (26)$$

Kurutma Kabini

$$\dot{E}x_{d,kurutma\ kabini} = \dot{m}_a(ex_{5a} - ex_{1a}) + \dot{W}_{fan} \quad (27)$$

$$\eta_{ex,kurutma\ kabini} = \frac{\dot{E}x_{5a} - \dot{E}x_{1a}}{\dot{W}_{fan}} \quad (28)$$

Bu denklemde 'a' indisi kurutma havasını 'r' indisi ise soğutucu akışkanı ifade etmektedir.

2.3.5. Isı pompalı kurutucunun sürdürülebilirlik analizi

Sürdürülebilirlik ekserji verimliliğinin devamlılığını gösteren en önemli faktörlerden biridir [33]. Ekserji kurutma teknolojisinde ve birçok endüstriyel alanda yüksek verimli, sürdürülebilir, ekonomik ve çevresel etki değeri yüksek enerji kullanımı konusunda etkin bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar temel sürdürülebilirlik faktörleri olarak bilinen sürdürülebilirlik indeksi (SI), iyileştirme potansiyeli (IP) ve atık ekserji oranının (WER) tamamen ekserji değerleri ile ilgili olduğunu ortaya koymaktadır [34,35]. Bu çalışma kapsamında ısı pompalı kurutma sistemi için sürdürülebilirlik analizi yapılmıştır. Temel sürdürülebilirlik göstergeleri giriş ve çıkış ekserji değerleri, ekserji kaybı ve ekserji verimliliğine bağlı olarak Eşitlikler (29-31) ile belirlenmiştir [36,37]:

$$SI = \frac{1}{1 - \eta_{ex,verim}} \quad (29)$$

$$IP = (1 - \eta_{ex})Ex_d \quad (30)$$

$$WER = \frac{Ex_d}{Ex_{giris}} \quad (31)$$

3. Bulgular

3.1. Kurutma ve enerji performans analizleri

Bu çalışmada klasik ısı pompalı kurutucunun performans ve sürdürülebilirlik analizleri ele alınmış ve deneysel çalışmalarda kefal havyarı olarak da bilinen botarganın kurutma karakteristiği incelenmiştir. Yapılan deneyler sırasında kabin içerisindeki sıcaklık ve bağıl nem değişimleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Deney başlangıç sıcaklığı 32°C olarak ölçülmüş ve sıcaklık 40°C'ye kadar artmasına izin verilmiştir. Daha sonraki aşamada 40°C sabit sıcaklıkta kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın 40°C'de sabit tutulmasının temel nedeni ise botarganın hassas bir ürün olmasından dolayı daha yüksek sıcaklıklara çıkılması halinde pişmesini engellemektir. Kabin içi bağıl nem değeri ise kurutma işlemi boyunca %16.5 ile %35.9 arasında değişim göstermiştir. Deneylerde ağılıkları 69-80 gr arasında

değişen 7 adet botarganın kuruma özellikleri incelenmiştir. Kurutma işlemi ortalama 5 saat sürmüştür. 7 farklı numune için nem içeriğinin ve kuruma hızının zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Botargalar yaş baza göre ortalama %50-55 arasında değişen nem içeriğinden %16-17 nem içeriğine düşürülünceye kadar kurutulmuştur. Elde edilen verilere göre de kurutma hızının ürün ağırlık değişimine bağlı olarak 0.02-0.32 kg/kg (d.b.)h değerleri arasında değişen sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında tüketilen toplam enerji miktarı ve kurutma işleminin temel verim parametresi olan SMER değeri 1,44 kWh ve 0.139 Kgw/kWh olarak bulunmuştur. Ayrıca, ısı pompasının verimini ifade eden COP değeri ise ortalama 2.76 olarak bulunmuştur.

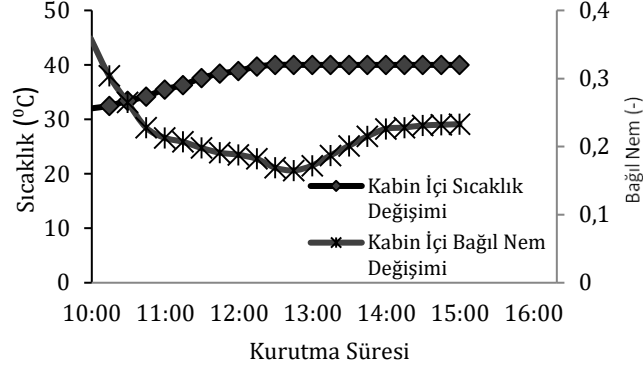
Buna ek olarak kurutulan botarga örneklerinin Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü laboratuvarında nem, su aktivitesi ve renk açısından analizleri gerçekleştirilmiştir. Havyar örneklerinin nem içeriği AOAC 950.46B(a) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Homojen olarak hazırlanan örnekten yaklaşık 5g tartılıp metal petrilere 105 °C sıcaklıkta etüve 18 saat boyunca sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiştir ve daha sonra soğuması için desikatöre alınmıştır [38]. Yapılan analizlerde kurutulmuş ürünlerin ortalama nem tayini değerinin %16.2 olduğu bulunmuştur.

Örneklerin su aktiviteleri, su aktivitesi ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Analiz için yaklaşık olarak 3-4 g örnek, örnek kabına aktarıldıktan sonra cihazın sızdırmaz örnek haznesine yerleştirilmiştir. Cihazda okunan değer dengeye geldiğinde, su aktivitesi değeri okunmuştur. Kurutulmuş botarga numunelerine ilişkin ortalama su aktivitesi değerinin 0.7198 seviyelerinde olduğu sonucu elde edilmiştir.

Örneklerin renk değerleri (L*-parlaklık, a*-yeşil/kırmızı, b*-mavi/sarı değerler) Minolta Chroma Meter CR-400 cihazı kullanılarak ve 5 adet rastgele noktadan ölçüm alınarak belirlenmiştir. Renk analizi sonucunda elde edilen verilere göre kurutulmuş botarga numunelerinin parlaklık değerlerinin (L*) genel olarak 27.69- 34.26 aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Benzer şekilde

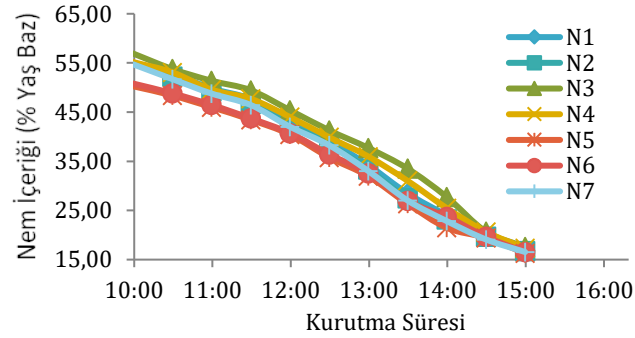
ürünlerde meydana gelen kırmızılık-yeşillik (a*) ve sarılık (b*) değerlerinin de sırasıyla 5.17- 7.9 ve 15.23-20.54 aralığında olduğu tespit edilmiştir. Kurutulmuş botarga örneklerine ve yapılan analizlere ilişkin

fotoğraflar Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar kurutulmuş kefal havyarının nem, su aktivitesi ve renk analizi açısından literatürdeki diğer çalışmalarla yaklaşık sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir[39,40].



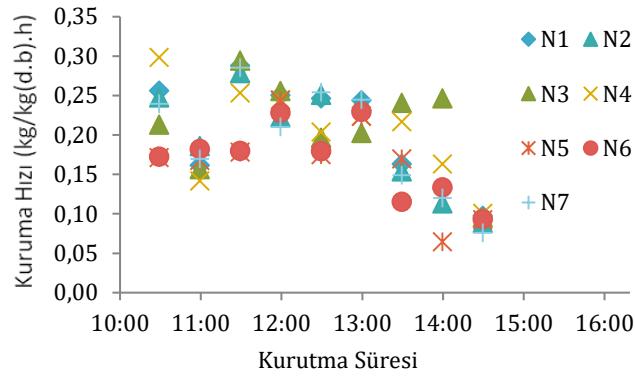
Şekil 3. Kabin içi sıcaklık ve bağıl nemin kurutma süresine göre değişimi

Figure 3. Variation of the temperature and relative humidity within the drying cabin, according to drying time



Şekil 4. Yaş baza göre botarga nem içeriğinin kurutma süresine göre değişimi

Figure 4. The change of moisture content of bottarga according to the drying time in the wet basis



Şekil 5. Botarganın kurutma hızının kurutma süresine göre değişimi

Figure 5. Variation of drying speed of bottarga, according to drying time



Şekil 6. Kurutulmuş botarga örnekleri ve analizlere ilişkin fotoğraflar

Figure 6. Some photographs related to the dried bottarga samples and analysis

3.2. Ekserji ve sürdürülebilirlik performans analizleri

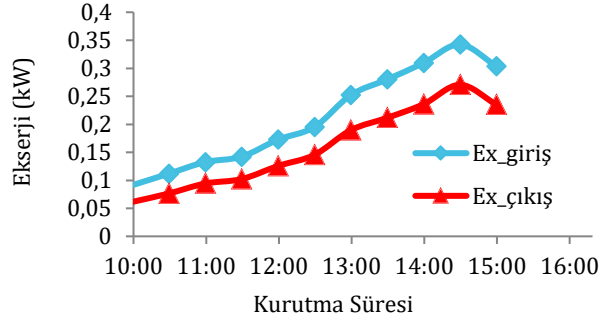
Bu çalışmada klasik ısı pompalı kurutucunun ekserji ve sürdürülebilirlik performansları da ele alınmıştır. Sistemin ekserji performansı için ısı pompalı kurutucuyu oluşturan her bir bileşenin giriş ve çıkış ekserji değerleri hesaplanmış ve bu değerlere bağlı olarak ekserji yıkımları ve ekserji verimleri bulunmuştur. Kefal havyarının pişmesini engellemek amacıyla sistem 40°C sabit sıcaklıkta çalıştırılmıştır. Yapılan deneyler sırasında sistemin ortalama enerji tüketimi 8.29 kWh olarak belirlenmiştir. Bu sistemde enerji tüketimine neden olan temel bileşenler

fan ve kompresördür. Sistemin ekserji giriş ve çıkış değerlerinin kurutma süresine göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Sistemin ortalama ekserji giriş ve çıkış değerlerinin sırasıyla 0.212 kW ve 0.159 kW olduğu gözlemlenmiştir. Ekserji kaybı ve ekserji verimliliğinin kurutma süresine göre değişimi ise Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8'de de görüldüğü üzere kurutma işleminin başlangıcından itibaren sistemin ekserji kaybının arttığı ve kurutma işleminin sonlarına doğru denge seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ekserji verimliliği değerleri ise kurutma işleminin başlangıcından itibaren yükselmiş ve kurutma işleminin son zamanlarında hafif bir düşüş eğilimi

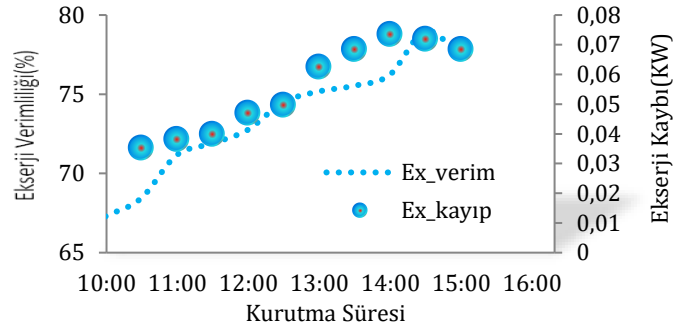
göstermiştir. Ortalama ekserji kaybı ve ekserji verimliliği değerleri ise sırasıyla 0.053 kW ve %73.57 olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında ısı pompalı kurutucunun ekserji veriminin %67.28 - %78.98 aralığında değişim göstermiştir. Ekserji kaybının düşük çıkmasının temel nedenini kurutma işleminin sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmesi, kütle akış hızı ve bağıl nem değişimleri olarak belirtmek mümkündür.

Çalışmada sistemin ekserji verilerine bağlı olarak atık ekserji oranı, sürdürülebilirlik endeksi, iyileştirme potansiyeli değerleri de belirlenmiş ve buna bağlı olarak sistemin enerji geri ödeme süresi tahmin edilmiştir. Atık ekserji oranı bir sistem içindeki ekserji kaybının giren ekserji değerine oranı olarak ifade edilebilir. Çünkü kurutma işlemi sırasında ekserjinin nem ile birlikte çevre ortama kaybolduğu gözlemlenmektedir. Deneyler sırasında giren ve kaybolan ekserji değerleri dikkate alınarak atık ekserji oranı hesaplanmıştır. Kurutma ünitesi içindeki sıcaklık ve hava hızına bağlı olarak atık ekserji oranı değerlerinin kurutma işleminin başında en yüksek değerde olduğu, ortasında düştüğü ve prosesin sonuna doğru hafif bir artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Atık ekserji oranının kurutma süresine göre değişimi Şekil 9.a' da verilmiştir. Maksimum atık ekserji oranı değeri 0.327 ile kurutma

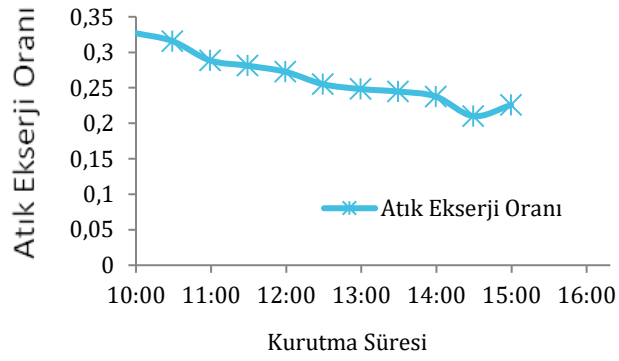
işleminin başlangıcında elde edilmiştir. Sürdürülebilirlik indeksi genel olarak ekserji verimliliğinin bir fonksiyonudur. Sürdürülebilirlik indeksi için en yüksek ve en düşük ortalama değer sırasıyla 4.7588 ve 3.056 olduğu belirlenmiştir. Sürdürülebilirlik endeksinin kurutma süresine göre değişimi Şekil 9.b' de gösterilmiştir. Bir başka temel parametre ise ekserji kaybı ve ekserji verimliliğine bağlı olarak belirlenen iyileştirme potansiyelidir. Bu değer belirlenmesindeki temel amaç ekserji kaybını azaltmaktır. Bu nedenden dolayı yapılan deneylerde iyileştirme potansiyeli değerlerinin kurutma işleminin başında en düşük değere sahip olduğu ve kurutma süresi boyunca sürekli artış gösterdiği, kurutma işleminin sonuna doğru ise denge konumuna ulaştığı tespit edilmiştir. En düşük ve en yüksek iyileştirme potansiyeli değerlerinin ise sırasıyla 0.0098 kW ve 0.0175 kW olarak hesaplanmıştır. İyileştirme potansiyelinin kurutma süresine göre değişimi Şekil 9.c' de belirtilmiştir.



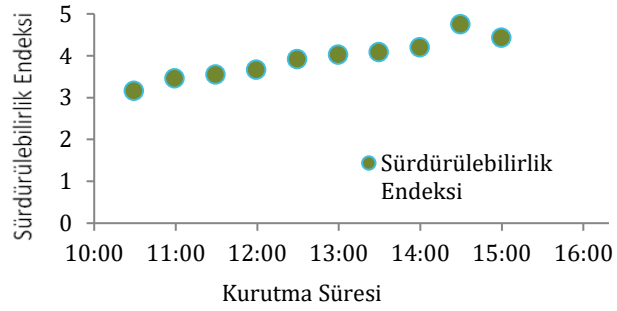
Şekil 7. Ekserji giriş- çıkış değerlerinin kurutma süresine göre değişimi
Figure 7. The change of exergy inlet-outlet values according to drying time



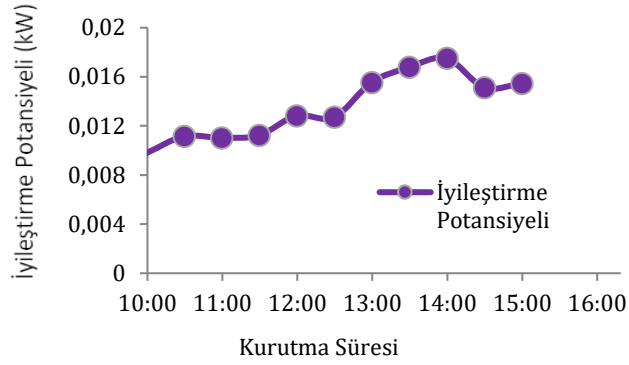
Şekil 8. Ekserji kaybı ve ekserji verimliliğinin kurutma süresine göre değişimi
Figure 8. Variation of exergy loss and exergy efficiency according to drying time



Şekil 9.a. Atık ekserji oranının kurutma süresine göre değişimi
Figure 9.a. The change of waste exergy rate according to drying time



Şekil 9.b. Sürdürülebilirlik endeksinin kurutma süresine göre değişimi
Figure 9.b. Variation of sustainability index according to drying time



Şekil 9.c. İyileştirme potansiyelinin kurutma süresine göre değişimi

Figure 9.c. The change of improvement potential with drying time

4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada klasik ısı pompalı kurutucunun enerji, ekserji ve ekserji verilerine bağlı sürdürülebilirlik performansı değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda hassas bir ürün olan ve kefal havyarı olarak da bilinen botarganın kuruma davranışı araştırılmıştır. Elde edilen bulguları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

- Kurutma sisteminde botargalar yaş baza göre %50-55 nem içeriğinden %20 nem içeriğinin altına düşürülünceye kadar genellikle 40°C sabit sıcaklıkta kurutulmuştur. Bu durum botarganın herhangi bir şekilde zarar görmeden kurutulmasına imkân tanımıştır.
- Kurutma işlemi sırasında sistemin enerji verimliliğini ifade eden özgül nem çekme miktarı (SMER) 0.139 kgw/kWh olarak belirlenmiştir. SMER değerinin düşük olmasının sebebini ise botarganın pahalı ve hassas bir ürün olduğu göz önüne alındığında kurutulan ürün miktarının az olması olarak belirtmek mümkündür. Dolayısıyla ürün miktarının artırılması halinde özgül nem çekme değerinin yükseleceği aşikârdır.
- Isı pompasının temel verimlilik göstergesi olarak ifade edilen etkinlik katsayısı değeri deneysel çalışmalar sırasında ortalama 2.76 olarak belirlenmiştir. Bu durum ısı pompasının çalışma performansının

oldukça iyi düzeyde olduğunu göstermiştir.

- Kurutulmuş ürün numuneleri nem, su aktivitesi renk açısından analiz edilmiş ve alınan sonuçların literatürdeki diğer araştırmalar ile uyum sağladığı gözlemlenmiştir.
- Ekserji analizi sonuçlarına göre sistemin ortalama ekserji kaybı ve ekserji verimliliği sırasıyla 0.053 kW ve %73.57 olarak belirlenmiştir. Ekserji verimliliğinin %67.28 - %78.98 arasında değiştiği görülmüştür. Elde edilen veriler özellikle sistemin ekserji verimliliğinin oldukça yüksek olduğunu açıkça ortaya koymuştur.
- Ekserji verilerine bağlı olarak sistemin atık ekserji oranı, sürdürülebilirlik endeksi ve iyileştirme potansiyeline ilişkin veriler hesaplanmıştır. Sonuçlar ortalama atık ekserji oranı, sürdürülebilirlik endeksi ve iyileştirme potansiyeli değerlerinin sırasıyla 0.264, 3.849 ve 0.0135 kW olduğunu göstermiştir.

5. Discussion and results

In this study, the sustainability performance of the conventional heat pump dryer based on energy, exergy and exergy data was evaluated. In experimental studies, the drying behavior of bottarga, which is a sensitive product and also known as mullet

caviar, was investigated. It is possible to summarize the obtained findings as follows:

- In the drying system, the bottargas were generally dried at a constant temperature of 40°C until they were reduced from 50-55% moisture content to below 20% moisture content according to the wet basis. This state allowed the bottarga to be dried without any damage.
- The specific moisture extraction rate (SMER), which expresses the energy efficiency of the system during the drying process, was determined as 0.139 kgw/kWh. The reason for the low SMER value is that the amount of dried product is low due to the fact that bottarga is an expensive and sensitive product. Therefore, it is obvious that the specific moisture extraction rate will rise if the amount of product is increased.
- The coefficient of performance (COP) value, which is expressed as the main efficiency indicator of the heat pump, was detected as 2.76 on average during the experimental studies. This showed that the operating performance of the heat pump was quite good.
- The dried product samples were analyzed in terms of moisture, water activity and color and it was observed that the results obtained were in agreement with other studies in the literature.
- According to the exergy analysis results, the average exergy loss and exergy efficiency of the system were determined as 0.053 kW and 73.57%, respectively. It was observed that the exergy efficiency ranged from 67.28% to 78.98%. The data obtained clearly revealed that the exergy efficiency of the system was quite high.
- Based on the exergy data, data on the waste exergy rate, sustainability index and improvement potential of the system were calculated. The results indicated that the average waste exergy ratio, sustainability

index and improvement potential values were 0.264, 3.849 and 0.0135 kW, respectively.

6. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma için deney sisteminin kullanılmasına izin veren Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne, ürün gıda analizleri için Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü'ne ve botarga (kefal havyarı) temini için değerli arkadaşım Taha Tuğral'a çok teşekkür ederim.

Simgeler

C_p -Özgül ısı değeri (kJ/kgK)

COP- Etkinlik katsayısı

Dr- Kurutma hızı (kg/kg(d.b.).h)

ex- Ekserji (kJ/kg)

h-Entalpi(kJ/kg)

\dot{m} -Kütleli debi (kg/s)

M-Nem içeriği (kg_{su}/kg_{kuru hava})

MR-Nem oranı

\dot{Q}_H -Isıtma etkisi(kW)

s-Entropi (kJ/kgK)

T-Sıcaklık(K)

w-Özgül nem(kg_{su}/kg_{kuru hava})

\dot{W}_{fan} -Fan gücü (kW)

\dot{W}_{komp} -Kompresör tarafından harcanan güç (kW)

\dot{W}_{sistem} -Tüm sistem tarafından harcanan güç (kW)

Kısaltmalar

a-Hava

e-Denge hali

f-Son hali

i-Başlangıç hali

nh-Nemli hava

r-Soğutucu akışkan

Kaynakça

- [1] Minea V. 2013. Heat-pump-assisted drying: recent technological advances and R&D needs, Dry Technol, Cilt. 31, 1177e89. DOI: 10.1080/07373937-2013-781623.

- [2] Icier F., Colak N., Erbay Z., Kuzgunkaya E.H., Hepbasli A. 2010. A comparative study on exergetic performance assessment for drying of broccoli florets in three different drying systems, *Dry Technol., Cilt. 28*, 193e204. DOI: 10.1080/07373930903524017.
- [3] Daghigh R., Ruslan M.H., Sulaiman M.Y., Sopian K. 2010. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products, *Renew Sustain Energy Reviews, Cilt. 14*, s. 2564-2579. DOI: 10.1016/j.rser.2010-04-004.
- [4] Erbay Z., Hepbasli A. 2013. Advanced exergy analysis of a heat pump drying system used in food drying, *Dry. Technol., Cilt. 31*, s. 802-810. DOI: 10.1080/07373937.2012.763044.
- [5] Singh A., Sarkar J., Sahoo R.R. 2020. Experimental energy, exergy, economic and exergoeconomic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer, *Renewable Energy, Cilt.156*, s. 1107-1116. DOI: 10.1016/j.renene.2020-04-100.
- [6] Singh A., Sarkar J., Sahoo R.R. 2020. Experiment on waste heat recovery-assisted heat pump drying of food chips: Performance, economic, and exergoeconomic analyses, *Journal of Food Processing and Preservation, Cilt.44(9)*, e14699. DOI: 10.1111/jfpp.14699.
- [7] Erbay Z., Hepbasli A., 2017. Exergoeconomic evaluation of a ground-source heat pump food dryer at varying dead state temperatures, *J. Clean. Prod. , Cilt. 142*, s. 1425-1435. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016-11-164.
- [8] Erbay Z., Hepbasli A. 2017. Assessment of cost sources and improvement potentials of a ground-source heat pump food drying system through advanced exergoeconomic analysis method, *Energy, Cilt. 127*, s. 502-515. DOI: 10.1016/j.energy-2017-03-148.
- [9] Gungor A., Erbay Z., Hepbasli A. 2012. Exergoeconomic (thermoeconomic) analysis and performance assessment of a gas engine-driven heat pump drying system based on experimental data, *Drying Technology, Cilt. 30*, s. 52-62. DOI: 10.1080/07373937-2011-618897.
- [10] Liu M., Wang S., Liu R., Yan J. 2018. Energy, exergy and economic analyses on heat pump drying of lignite, *Drying Technology, Cilt. 37(13)*, s. 1-16. DOI: 10.1080/07373937-2018-1531883.
- [11] Fudholi A., Sopian K., Alghoul M.A., Ruslan M.H., Othman M.Y. 2014. Performance analysis of solar drying system for red chili, *Solar Energy, Cilt. 99*, s. 47-54. DOI: 10.1016/j.solener.2013-10-019.
- [12] Natarajan K., Thokchom S.S., Verma T.N., Nashine P. 2017. Convective solar drying of Vitis Vinifera & Momordica charantia using thermal storage materials, *Renewable Energy, Cilt. 113*, s. 1193-1200. DOI: 10.1016/j.renene.2017-06-096.
- [13] Rabha D., Muthukumar P., Somayaji C. 2017. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger, *Renewable Energy, Cilt. 105*, s. 764-773. DOI: 10.1016/j.renene.2017-01-007.
- [14] Ndukwu M.C., Bennamoun L., Abam F.I., Eke A.B., Ukoha D. 2017. Energy and exergy analysis of a solar dryer integrated with sodium sulfate decahydrate and sodium chloride as thermal storage medium, *Renewable Energy, Cilt. 113*, s. 1182-1192. DOI: 10.1016/j.renene.201-06-097.
- [15] Yu X.L., Zielinska M., Ju H.Y., Mujumdar A.S., Duan X., Gao Z.J., Xiao H.W. 2020. Multistage relative humidity control strategy enhances energy and exergy efficiency of convective drying of carrot cubes, *Int J of Heat and Mass Transfer, Cilt. 149*, 119231. DOI: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2019.119231.
- [16] Khanlari A., Sözen A., Şirin C., Tuncer A.D., Gungor A. 2020. Performance enhancement of a greenhouse dryer: Analysis of a cost-effective alternative solar air heater, *J of Clean Product, Cilt. 251*, 119672. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019-119672.
- [17] Gilandeh Y.A., Jahanbakhshi A., Kaveh M. 2020. Prediction kinetic, energy and exergy of quince under hot air dryer using ANNs and ANFIS, *Food Science & Nutrition, Cilt. 8(1)*, s. 594-611. DOI: 10.1002/fsn3-1347.
- [18] Ekka J.P., Bala K., Muthukumar P., Kanaujiya D.K. 2020. Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates, *Renewable Energy, Cilt. 152*, s. 55-66. DOI: 10.1016/j.renene.2020-01-035.
- [19] Singh A., Sarkar J., Sahoo R.R. 2020. Experimentation on solar-assisted heat pump dryer: Thermodynamic, economic and exergoeconomic assessments, *Solar Energy, Cilt. 208*, s. 150-159. DOI: 10.1016/j.solener.2020-07-081.
- [20] Ndukwu M.C., Onyenwigwe D., Abam F.I., Eke A.B., Dirioha C. 2020. Development of a low-cost wind-powered active solar dryer integrated with glycerol as thermal storage, *Renewable Energy, Cilt. 154*, s. 553-568. DOI: 10.1016/j.renene.2020-03-016.
- [21] Amjad W., Gilani G.A., Munir A., Asghar F., Ali A., Waseem M. 2020. Energetic and exergetic thermal analysis of an inline-airflow solar hybrid dryer, *Applied Thermal Engineering, Cilt. 166*, 114632. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019-114632.
- [22] Manrique R., Vásquez D., Chejne F., Pinzón A. 2020. Energy analysis of a proposed hybrid solar-biomass coffee bean drying system, *Energy, Cilt. 202*, 117720. DOI: 10.1016/j.energy.2020-117720.
- [23] Lamrani B., Draoui A. 2020. Thermal performance and economic analysis of an

- indirect solar dryer of wood integrated with packed-bed thermal energy storage system: A case study of solar thermal applications, *Drying Technology*, Cilt. 203, 117791. DOI: 10.1080/07373937-2020-1750025.
- [24] Atalay H. 2019. Comparative assessment of solar and heat pump dryers with regards to exergy and exergoeconomic performance, *Energy*, Cilt. 189, 116180. DOI: 10.1016/j.energy.2019-116180.
- [25] Scano, P., Rosa, A., Pisano, M. B., Piras, C., & Cosentino, S. 2013. Lipid components and water soluble metabolites in salted and dried tuna (*Thunnus thynnus* L.) roes, *Food chemistry*, Cilt. 138(4), s. 2115-2121. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012-11-095.
- [26] Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.2013. NIST Standard Reference Database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties, REFPROP, Version 10.0. National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg.
- [27] Çengel Y., Boles, M. 2019. *Thermodynamics An Engineering Approach*, 5th ed., McGrawHill, AAA s.
- [28] Tosun S. 2009. Bazı Tarımsal Ürünler için Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 218 s, İzmir.
- [29] Madamba P.S., Driscoll R.H., Buckle K.A. 1994. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying, *J. Food Eng.*, Cilt. 23, s. 309-319. DOI: 10.1016/0260-8774(94)90056-6.
- [30] Doymaz I. 2009. An experimental study on drying of green apples, *Drying Technology*, Cilt. 27, s. 478-485. DOI: 10.1080/07373930802686065.
- [31] Panchariya P.C., Popovic D., Sharma A.L. 2002. Thin-layer modeling of black tea drying process, *J Food Eng*, Cilt. 52, s. 349-357. DOI: 10.1016/S0260-8774(01)00126-1.
- [32] Akbulut A., Durmuş A.2010. Energy and exergy analysis of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer, *Energy*, Cilt. 35, s. 1754-1763. DOI: 10.1016/j.energy.2009-12-028.
- [33] Zare D., Minaei S., Mohamad Z.M., Khoshtaghaza M.H.2006. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Convers. Manage.* Cilt. 47, s. 3241-3254. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.02.021.
- [34] Rosen M.A., Dincer I., Kanoglu M.2008. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact, *Energy Policy*, Cilt. 36, s. 128-137. DOI: 10.1016/j.enpol.2007-09-006.
- [35] Caliskan H., Hepbaşlı A., Dincer I., Maisotsenko V. 2011. Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle, *Int J Refrigeration*, Cilt. 34, s. 980-990. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011-02-001.
- [36] Ndukwu M.C., Abam F.I., Manuwa S.I., Briggs T.A. 2017. Exergetic performance indicators of a direct evaporative cooling system with different evaporative cooling pads, *Int J Ambient Energy*, Cilt. 38, s.701-709. DOI: 10.1080/01430750-2016-1195774.
- [37] Ibrahim A., Fudholi A., Sopian K., Othman M.Y., Ruslan M.H. 2014. Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system, *Energy Conversion and Management*, Cilt. 77, s. 527-534. DOI: 10.1016/j.enconman.2013-10-033.
- [38] Petrov, O.V., Hay, J., Mastikhin, I.V., Balcom, B.J. 2008. Fat and Moisture Content Determination with Unilateral NMR, *Food Research International*, Cilt. 41(7), s. 758-764. DOI: 10.1016/j.foodres.2008-05-010.
- [39] Çelik, U., Altinelataman, C., Diñer, T., Acarlı, D.2012. Comparison of fresh and dried flathead Grey mullet (*Mugil cephalus*, Linnaeus 1758) caviar by means of proximate composition and quality changes during refrigerated storage at 4 ± 2 °C, *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Cilt. 12, s. 1-5. DOI: 10.4194/1303-2712-v12-1-01.
- [40] Caredda, M., Addis, M., Pes, M., Fois, N., Sanna, G., Piredda, G., Sanna, G. 2018. Physico-chemical, colorimetric, rheological parameters and chemometric discrimination of the origin of *Mugil cephalus* roes during the manufacturing process of Bottarga, *Food Research International*, Cilt.108, s.128-135. DOI: 10.1016/j.foodres.2018-03-039