

ISI POMPALI NEM KONTROLLÜ BİR KURUTUCUDA DEFNE YAPRAĞI KURUTULMASI

Mustafa AKTAŞ¹, Emrah GÖNEN²

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Teknikokullar, Ankara

mustafaaktas@gazi.edu.tr, emrah0640@hotmail.com

(Geliş/Received: 24.04.2013; Kabul/Accepted: 27.03.2014)

ÖZET

Bu çalışmada, kapalı devre ısı pompalı bir kurutucuda defne yaprağı kurutulması ve sistem analizinin yapılması amaçlanmıştır. Türkiye’de büyük bir potansiyele sahip olan defne yaprağı Akdeniz ve Ege bölgelerinde yetişmektedir. Kurutma havası bağıl nemi, sıcaklığı ve hızı Programlanabilir Mantıksal Kontrolör (PLC) ekranından girilmiş ve set değerlerine göre kontrol edilmiştir. Isı pompalı kurutma sisteminde 6 farklı deney 40°C, 45°C ve 50°C kurutma havası sıcaklıklarında 1 m/s ve 1,5 m/s kurutma havası hızlarında yapılmıştır. Nem alma ünitesi kullanılarak deneyler esnasında kurutma havası bağıl nemi % 4-11 aralığında tutulmuştur. Deneyler sonucunda tüm sistem için en yüksek performans katsayısı (COP_{ts}) değeri 45°C ve 1,5 m/s için 3,02 olarak hesaplanmıştır. Kurutulmuş defne yapraklarının su aktivitesi değerleri 0,49-0,55 aralığında ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kurutma, defne yaprağı, ısı pompası, nem kontrolü, nem alma

BAY LEAVES DRYING IN A HUMIDITY CONTROLLED HEAT PUMP DRYER

ABSTRACT

In this study, drying of bay leaves and system analysing were aimed in a closed cycle heat pump dryer. The bay leaf that has a high potential in Turkey, grows in Mediterranean and Aegean regions. Drying air relative humidity, temperature and air velocity which were entered from Programmable Logic Controller (PLC) screen, controlled according to set value. Six different experiments were done in a heat pump dryer at 40 °C, 45 °C and 50 °C drying air temperatures and 1 m/s and 1.5 m/s drying air velocities. Relative humidity of drying air was kept between the 4-11 % during the experiments by using dehumidification unit. The highest coefficient of performances (COP_{ts}) of whole system was calculated as 3.02 at 45 °C - 1 m/s at the end of the experiments. Water activity values of dried bay leaves were measured between the 0.49-0.55.

Keywords: Drying, bay leaves, heat pump, humidity control, dehumidification

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kurutmadaki temel amaç gıdanın su aktivitesi değerini belli bir değere indirerek raf ömrünün uzatılmasıdır. Böylece ürün kurutularak mikrobiyal büyüme ve enzim aktivitesi engellenmiş olacaktır. Akdeniz defnesinin kullanılan kısımları yaprakları ve meyveleridir. Kurutulmuş defne yaprakları genellikle doğrudan doğruya konservelerde, çorba, balık ve et yemeklerinde baharat olarak kullanılmaktadır. Yaş veya kurutulmuş yapraklardan elde edilen eterik yağ gıda sanayinde temel kullanım yeri bulmaktadır. Ayrıca romatizma ağrılarını giderici ve terletici

özellikleri nedeni ile kimya ve ilaç endüstrisinde de yararlanılmaktadır [1-3].

Literatürde defne yaprağı kurutulması ile ilgili az çalışma bulunmaktadır. Günhan vd. farklı şartlarda defne yapraklarını kurutarak matematiksel modellemesini yapmışlardır [4]. Hawlader ve Jahangeer, güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutucunun ve su ısıtıcısının performansını araştırmışlardır. Çalışmada, kompresör hızı arttığında özgül nem çekme oranının ve performans katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir [5].

Oktay (1997), ısı pompalı bir kurutucunun performansına etki eden parametreleri araştırmıştır.

İncelemelerde by-pass hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisi sistemin performansına etki eden anahtar parametreler olmuştur [6]. Demir vd. kurutulan defne yapraklarının bazı kalite parametrelerini incelemişlerdir [7]. Goh vd. kurutma uygulamaları için ısı pompalı kurutucuları analiz etmiş ve değerlendirmiştir [8]. Teeboonma vd. ısı pompalı meyve kurutucuların optimizasyonunu yapmışlardır [9]. Lee ve Kim, ısı pompalı bir kurutucuda ince dilimlenmiş kırmızı turpu kurutmuşlardır. Çalışma, ayrıca ısı pompalı kurutmanın, sıcak havalı kurutmaya nazaran % 58,9 -69,5 oranında enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir [10].

Kırmacı vd. yaptıkları çalışmada dondurarak kurutma sistemi tasarlayıp çilek kurutma testlerini gerçekleştirmişlerdir [11]. Söylemez, kurutma sistemlerinde sistemdeki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Sistem elemanları için optimum çalışma şartlarında COP değerini 2,3596 olarak hesaplamıştır [12].

Queiroz vd. yaptıkları çalışmada elektrik rezistanslı ve ısı pompalı olmak üzere iki farklı kurutucu kullanarak domates kurutmuşlar ve performanslarını araştırmışlardır. Sıcaklık, hava hızı ve domates tiplerinin etkilerini inceleyip ısı pompalı kurutucunun efektif COP değerini 2,56-2,68 arasında tespit etmişlerdir [13].

Oktay ve Hepbaşlı mekanik ısı pompalı bir kurutucunun performans değerlenmesini yapmışlardır. Yapılan çalışmada, kondenser ve eveparatör sıcaklıklarına bağlı olarak performans katsayısı 2,47 ile 3,95 arasında değişmiştir [14]. Fatouh vd. ısı pompalı kurutucu kullanılarak maydanoz, nane ve ebegümeci kurutmuşlardır [15].

Yağcıoğlu vd. farklı kurutma koşullarında defne yaprağının kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Kontrollü koşullarla kurutmanın geleneksel kurutmaya göre birçok problemi ortadan kaldırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yaprakların % 10 nem içeriğine kadar kurutma zamanı, geleneksel kurutma işlemine göre 12 kez ya da 40 °C sıcaklıkta kurutma şartlarına göre 8 kez daha kısaldığını ve hiçbir kayıp olmadığını ifade etmişlerdir [16]. Acar defne yaprağından uçucu yağ üretimi ve değerlendirilmesi konusunda yaptığı çalışmalarda; yaprakta kaliteyi etkileyen esas özelliklerin başında uçucu yağ miktarı ve bu yağın fizikokimyasal yapısının geldiğini belirtmiştir. Uçucu yağ miktarı ve bu yağın fizikokimyasal yapısı üzerine üretim yöresi, üretim zamanı, üretime alınan sürgünlerin yaşı gibi faktörlerin son derece etkili olduğunu ortaya koymuştur [17].

Tanker vd. defne yapraklarından % 2 oranında uçucu yağ elde ettiklerini bildirmişlerdir. Defne uçucu yağının bileşiminde % 45-50 oranında 1,8-sineol, %

30 geraniol ve sitronellool, % 5 öjenol, metilöjenol ve asetilöjenol içerdiğini, bu bileşenlerin yanısıra uçucu yağda pinen başta olmak üzere oksijensiz terpenik maddelerin bulunduğunu belirtmişlerdir [18]. Müller vd. Almanya’da, kurutma sıcaklığının tıbbi adaçayının uçucu yağ üzerine etkilerini incelemişler ve araştırmada; 30-90 °C arasında değişen, numune ağırlığı ve kuruma oranları üzerine etkisi yapraklardaki nem % 11’e düşüncüye kadar incelenmiştir. 60 °C’de uçucu yağ kaybına rastlanılmamış ve bu sıcaklıktan sonra uçucu yağ kaybının arttığını, 90 °C’de % 11’lik nem içeriğinde uçucu yağ kaybı % 30’a ulaştığını, % 11’lik nem içeriğinden sonra kurutma işlemine devam edildiği de 50 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda uçucu yağ kaybının olduğu ve 90 °C’de % 90’a ulaştığını belirtmişlerdir [19].

Bu çalışmada yapılacak olan kapalı devre teknik kurutma yöntemi ile; enerji tasarrufu ve yatırım maliyetlerinin düşürülmesi ve kurutulan ürünün de kaliteli olması hedeflenmiştir. Isı pompalı nem kontrollü kurutucuda defne yaprağı kurutulması çalışması şartlarının belirlenmesi ve bu optimum çalışma şartlarının enerji verimliliğine etkisi incelenmiştir. Kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi kontrol edilerek ürünün bu değişimlerden etkilenmeden kurutulması hedeflenmiştir.

Defne yaprağı kurutulmasında kaliteye etki eden parametreler ürünün nem miktarı, ürünün rengi, tadı, ürünün büzülmesi ve besin değerleri vb. olarak sayılabilir. Bugüne kadar kurutma ile ilgili yapılan çalışmalarda gerek Ashrea yayınları ve standartlar gerekse de akademik çalışmalar kurutma sonrası ürün kalitesine ve kurutmada harcanan enerji miktarına dikkat çekmişlerdir. Bu nedenle makalede defne yaprağı kurutulması için daha önceki çalışmalarda rastlanmayan sıcaklık, bağıl nem, hava hızı ve ürün ağırlığı kontrollü ısı pompalı kapalı bir sistem tasarlanmış ve enerji analizi yapılmıştır. Kurutma sonrası kaliteli ürün eldesi için sıcaklık, bağıl nem, hava hızı ve ürün ağırlığının kontrol edilmesi gereklidir. Bu sistem tasarlanırken ürün kalitesine etki eden faktörler göz önünde bulundurulmuştur.

2. TEORİK ANALİZ (THEORETICAL ANALYSIS)

Deneye başlamadan önce defne yapraklarının kuru ağırlığını belirleyebilmek için yaş defne yapraklarıyla ön çalışma yapılması gereklidir. Ön çalışma; etüv fırınında defne yapraklarının ağırlık değişimine göre nem kontrolünün belirlenmesi ve sabit sıcaklıkta (103 ± 2 °C) tutulan bu fırında belirli aralıklarla defne yapraklarının tartılması ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi şeklinde yapılır.

Ön çalışmada alınan ölçüm sonuçları defne yaprağı ağırlık değişimi %1 ‘den az olana kadar devam eder. Ağırlık ölçümlerine defne yapraklarının nem miktarı

sabit kalana kadar alınmaya devam edilip; son ölçümler arası ağırlığın % 1'den az olması durumunda defne yaprakları tam kuru kabul edilir. Üç kez etüv fırınında işlemler tekrarlanarak ölçüm sonuçlarının ortalaması alınıp ve ürünün kuru ağırlığı saptanır.

Defne yaprağı kuru esasa göre hesaplanan nem miktarı için;

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (1)$$

eşitliği kullanılır.

Defne yaprağındaki yaş esasa göre hesaplanan nem miktarı için;

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (2)$$

eşitliği kullanılır [20].

Kurutma prosesinde sürekli akışlı açık sistem için enerjinin korunumu en genel halde Eşitlik 3 ile ifade edilir [21].

$$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_h \left(h_\zeta - h_g + \frac{V_\zeta^2 - V_g^2}{2} \right) \quad (3)$$

Kurutma odasında ve nem alma ünitesinde birim zamandaki ısı değişimi Psikometrik diyagram kullanılarak aşağıdaki Eşitlik 4 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot (h_\zeta - h_g) \quad (4)$$

Yoğuşturucuda havaya atılan ısı miktarı (\dot{Q}_Y) Eşitlik 5 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_Y = \dot{m}_h \cdot c_h (T_\zeta - T_g) \quad (5)$$

Sistemde elektrik enerjisi tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Sistemde performans katsayısı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$COP_{hp,h} = \frac{\dot{Q}_Y}{\dot{Q}_c} \quad (6)$$

Bütün sistem için performans katsayısının (COP_{ts}) hesaplanmasında tüketim ekipmanları için

(kompresör, fan ve diğer ekipmanlar) aşağıdaki eşitlik kullanılır [22].

$$COP_{ts} = \frac{\dot{Q}_Y}{\dot{Q}_c + \dot{Q}_f + \dot{Q}_p} \quad (7)$$

Yapılan deneylerde ölçümlerde doğruluğu etkileyen en önemli etken deneyler sırasında oluşabilecek hatalardır. Ortaya çıkabilecek hatalar için toplam hata

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

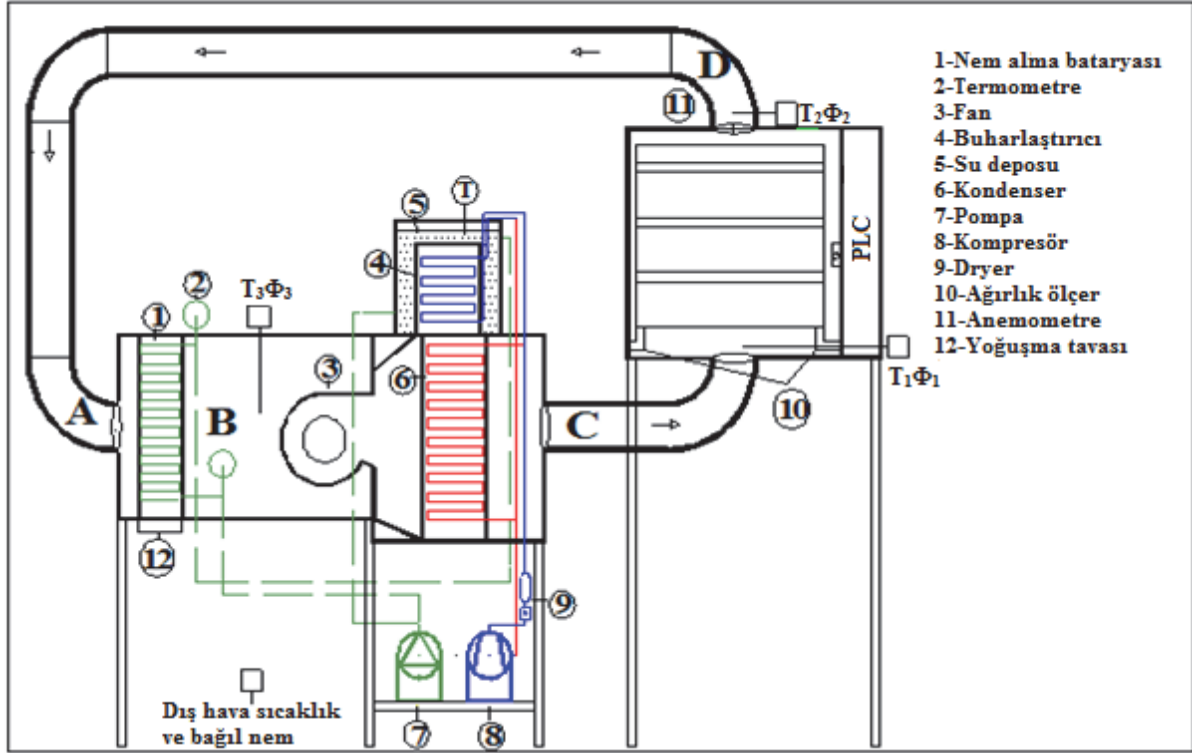
eşitliği ile hesaplanabilir [23,24]. Eşitlik 8'de R ölçülmesi gereken büyüklük, R büyüklüğüne etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 'dir. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün toplam belirsizliği W_R olarak ifade edilmiştir.

Tüm sistem için özgül nem çekme oranı ($SMER_{ts}$), üründen buharlaştırılan 1 kg nem için harcanan toplam enerji miktarına oranı olarak tanımlanıp Eş. 9 ile verilmiştir.

$$SMER_{ts} = \frac{\dot{m}_{su}}{\dot{W}_c + \dot{W}_f + \dot{W}_p}$$

3. DENEY SETİ (EXPERIMENTAL SET UP)

Kurutma sisteminde kullanılan PLC kontrol sistemi; elde edilen deney verilerini bilgisayara aktarabilen ve kurutma havası sıcaklığını, bağıl nemini, hızını kontrol eden ve kurutulan defne yapraklarının ağırlık değişimini gösteren bir kontrol sistemidir. Kurutma sistemi kompresör (370 W), soğutucu akışkan R-134a, frekans invertörü, anemometre, yoğuşturucu, buharlaştırıcı, filtre, kılcal boru, fan (160 W & 990 m³/h), pompa (370 W, 2,4 m³/h), su deposu (40 litre), anemometre, 20 kg ölçme kapasitesine sahip ağırlık ölçer, elektronik elektrik sayacı, kurutma odası ve PLC kontrol cihazından (sıcaklık ve ağırlık ölçümü, 1 MB uygulama hafızası artı 512K font ve 3 MB resim hafızası, LCD LED dokunmatik ekran, operatör paneli) oluşmaktadır Şekil 1'de sistemde havanın sıcaklık ve bağıl nemi değerlerinin ölçüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 1. Defne yapağı kurutma sistemi (Bay leaf drying system)

Kurutma sisteminde ısı pompası sisteminin yoğuşturucu kısmı enerji kaynağı olarak kullanılmakta, buharlaştırıcı kısmı ise depodaki suyun düşük sıcaklıkta muhafaza edilmesini sağlamaktadır. Sistemde kapalı devre dolaşan kurutma havası, üründe mevcut olan nemi bünyesine alarak, nemi artmakta ve buharlaştırıcı tarafında sağlanan soğuk su pompa ile ısı değiştiricisine gönderilerek soğuk yüzeyde kurutma havasının nemini yoğuşturmaktadır. Kurutma sisteminde PLC kontrol cihazında ayarlanan sıcaklık, bağıl nem değeri sıcaklık-bağıl nem sensörü ile ve hava hızı anemometre ile ölçülüp set değerlerine göre kontrol edilmektedir. PLC’de girilen değer ısı çift ile ölçülen sıcaklıktan büyükse kompresör devreye girmekte ve sıcaklık artışı sağlanmaktadır. Buharlaştırıcı tarafından soğutulan suyun istenildiğinde pompa yardımı ile dolaşımı sağlanıp, sistemde kurutma havasının bağıl neminin kontrolü sağlanmaktadır.

Nem alma ünitesi üzerinden geçen hava “B” şartlarında yoğuşturucuda duyulur olarak ısıtılarak sıcaklığı ΔT kadar artarak “C” şartlarına gelir (Şekil 1’de A, B, C ve D noktaları gösterilmiştir). “C” şartlarında hava kurutma odasına girmekte defne yaprakları üzerinden geçerek “D” şartına gelmektedir. “D” şartlarında kurutma havasının özgül nemi bir miktar artmakta ve kuru termometre sıcaklığı da bir miktar düşmektedir. “D” şartlarındaki hava yalıtımlı hava kanalından akarak ısı kaybından dolayı bir miktar soğuyarak nem alma ünitesine gelir (A şartı). Sistemdeki nemli hava PLC’ye girilmiş bağıl nem değerinden yüksek ise nem alma ünitesi devreye girerek kurutma havası nemi soğuk yüzeyde alınır.

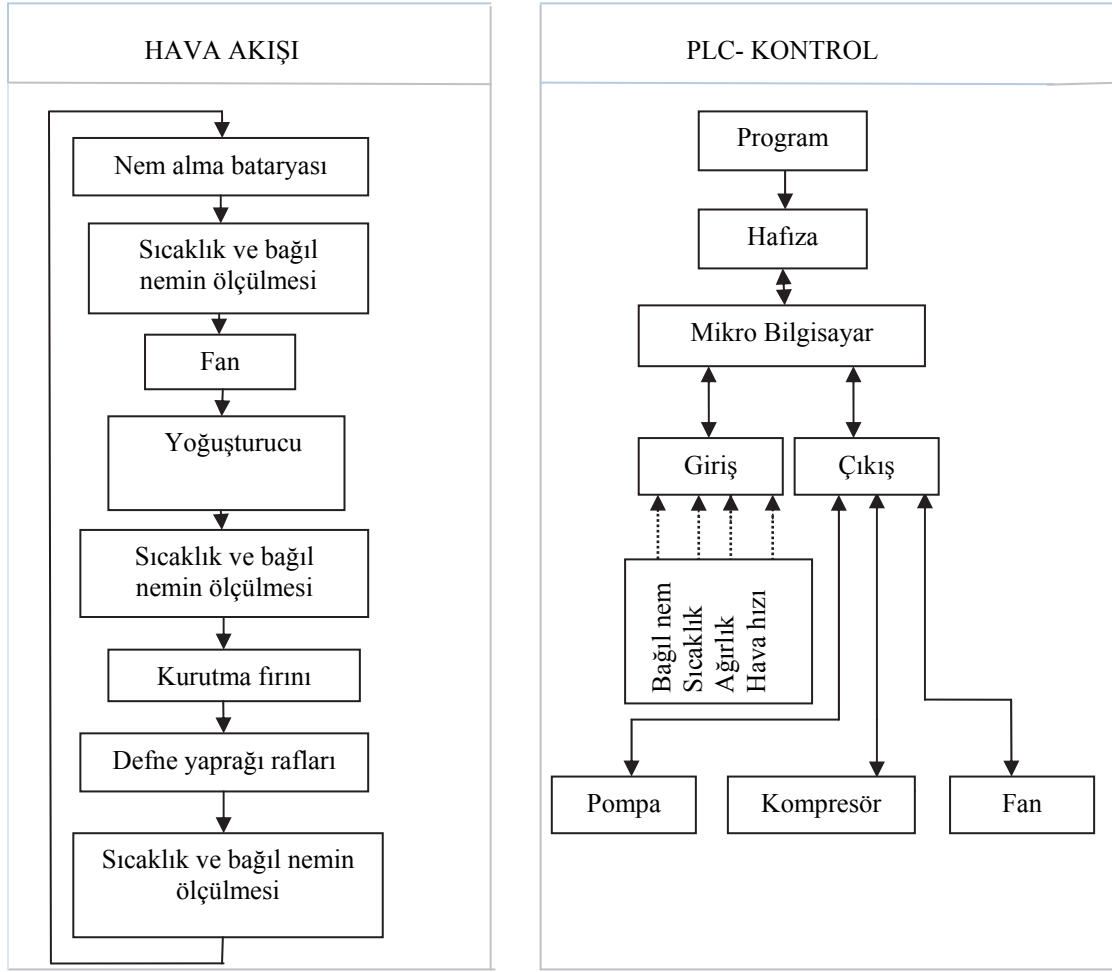
“A” şartlarındaki nemli hava nem alma ünitesinden geçerek tekrar “B” şartlarına gelir.

Isı pompalı PLC kontrollü kurutma sisteminde PLC dijital ekranından ürün ağırlık değişimleri gözlenerek yapılan deneylerde ürün ağırlık değişimi kurutma sistemi durdurulmadan kayıt altına alınmıştır. Sistemde hava akışını, sıcaklık değerini, nem miktarını ve ürün ağırlığı Şekil 2’de görüldüğü gibi PLC kontrol sistemi ile kontrol edilebilmektedir.

Sistemde istenilen hava debisi PLC ekranından girilerek, oransal-integral-türevsel (PID) kontrol yapılarak istenilen hava debisi frekans invertörü ile sağlanmıştır. Sistemde ölçülen hava hızı değerine göre, PLC frekans invertörüne istenilen sinyali göndermiştir. Ürün kütle değişimi deneyler esnasında PLC ekranından takip edilmiştir.

4. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

Deneylere başlamadan önce Karadeniz Bölgesi’den temin edilen defne yapraklarının kuru ağırlığının belirlenmesi için ön hazırlık işlemleri yapılmıştır. Dal kısmı ile toplanmış olan taze defne yaprakları dallarından ayrılarak kuru ağırlığı belirlenmek üzere hazır hale getirilmiştir. Dallarından ayrılan defne yaprakları 103 ± 2 °C’de sıcaklık değerinde, kurutma fırınında kurutulmaya başlanmıştır. İki ölçüm arasındaki fark %1’den daha az olduğu durumda defne yaprakları kuru kabul edilmiştir. Bu işlem sırası yapılan üç deneyde de uygulanmıştır.



Şekil 2. Hava akışı ve PLC kontrol şeması (Schema of air flow and PLC control)

Başlangıç nem miktarları belirlenmiş olan defne yaprakları, ısı pompalı kondenzasyonlu kurutucuda kurutma kabineine yerleştirilerek, kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kurutma sisteminde defne yaprakları için uygun kurutma havası sıcaklık değerleri göz önünde bulundurularak, kurutma havası sıcaklık değerleri 40°C, 45°C, 50°C kurutma havası hızları 1 m/s ve 1,5 m/s olarak belirlenmiştir. Kurutma sisteminde daha yüksek sıcaklıklarda kurutma yapılabilir fakat defne yapraklarının daha yüksek sıcaklıklarda kurutulması durumunda yaprak kızarıklığı ve kırıklar oluşarak kalite kayıplarının olduğu literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda yapılan defne yapağı kurutmada yani 50 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda uçucu yağ kaybının olduğu bilinmektedir [19]. Sistemde daha düşük hızlarda kurutma yapıldığında kurutma süresi uzayacaktır. 1,5 m/s'den daha büyük hızlarda hızlı kütle transferinden dolayı defne yapraklarında istenmeyen büzülme ve kırılmaların olduğu yapılan ön deneylerde gözlemlenmiştir. Kurutma sistemlerinde ideal hava hızının 1-1,5 m/s olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı 40-45-50 °C sıcaklık ve 1 - 1,5 m/s hava hızları denenmiştir. Bu sıcaklık değerleri için de ısı pompası teknolojisinin çok uygun olması sistemin tasarımında önemli rol oynamıştır. Sistemde istenilen

kurutma havası sıcaklığı ve hava hızı PLC kontrol cihazından ayarlanarak kurutma işlemi başlatılmıştır.

Kurutma işlemi sırasında defne yapraklarındaki ağırlık değişimi her yarım saatte bir ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Yapılan bu deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Deneylerde ölçülen bir parametrenin (sıcaklık, bağıl nem vb.) sabit hatalar, rastgele hatalar ve imalat hataları dikkate alınarak farklı bağımsız değişkenlerden dolayı ortaya çıkan toplam hatası Eş. 8 kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. Örneğin su aktivitesi ölçümündeki toplam hata su aktivitesi ölçüm cihazının hassasiyetinden kaynaklanan hata ile bu değer okunmasından kaynaklanan hataların toplamıdır.

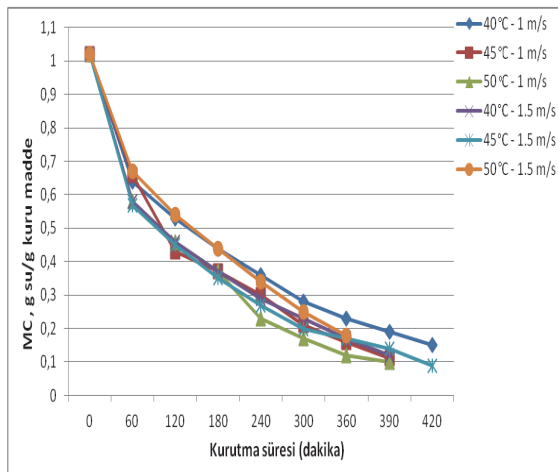
Kurutma sonrasında defne yapraklarının duyu analizleri, nem miktarının tespiti ve su aktivitesi değerinin ölçümü yapılmıştır. Yapılan duyu analizde defne yapraklarının görünümünde her hangi bir renk değişimi, tadında ve kokusunda her hangi bir bozulma gözlemlenmemiştir. El ile yapılan duyu analizde ise kurutulmuş yapraklar ikiye katlandığında kırılan olmadığı görülmüştür.

Çizelge 1. Ekipmanların teknik özellikleri (Technical properties of equipments)

Kullanılan cihaz	Teknik Özellikleri	Hata Analizi
Dijital tartı	En yüksek ölçülebilecek miktar 6100 g, ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ g	$\pm 0,0173$ g
Bağıl nem ve sıcaklık transmitteri	%0 -100 bağıl nemde ± 2 % ölçüm hassasiyeti, -40,+120 °C sıcaklıkta ± 1 °C ölçüm hassasiyeti, çalışma sıcaklığı -10 + 60 °C	$\pm \%0,0223$ RH $\pm 1,118$ °C
Hava hızı ve sıcaklık ölçüm cihazı	Sıcaklık -20,+70 °C, hız 0-20 m/s ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ m/s, $\pm 0,1$ °C, NTC sensör	$\pm 0,0141$ m/s $\pm 0,15$ °C
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Su aktivitesi a_w değeri 0–1 arasında olduğunda ölçüm hassasiyeti $\pm 0,001$	$\pm 0,002$
Isıl çift	Skala 0-70 °C, Besleme 24 V-DC, Çıkış 4-20 mA, hassasiyeti $\pm 0,1$ °C	$\pm 0,173$ °C
Ağırlık Ölçer	5 kg Kapasite, 40~+80 °C, 5~12 (DC), hassasiyeti $\pm \% 0,02$	$\pm \% 0,0223$

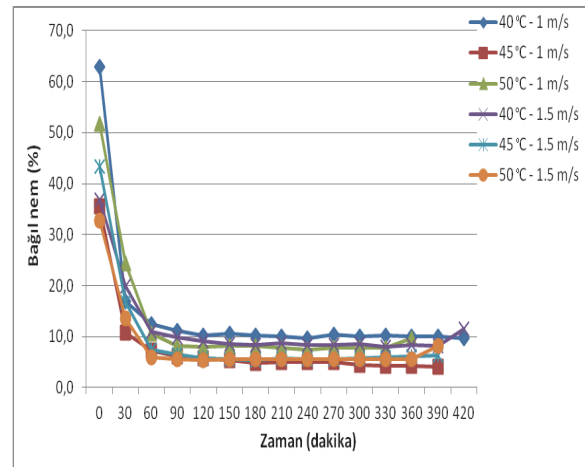
6. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Defne yapraklarının başlangıç nem miktarları kuru baza göre Eş. 1'den hesaplanarak 1,02 g su/g kuru madde olarak bulunmuştur. Kuru ağırlıkları belirlenen defne yaprakları PLC kontrollü kurutucuda farklı şartlarda kurutulmuştur. Deneyler esnasında defne yapraklarının kuru esasa göre son nem miktarı değişimi Şekil 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Kurutma esnasında defne yapraklarının nem miktarının değişimi (Moisture content changes during the drying of bay leaves)

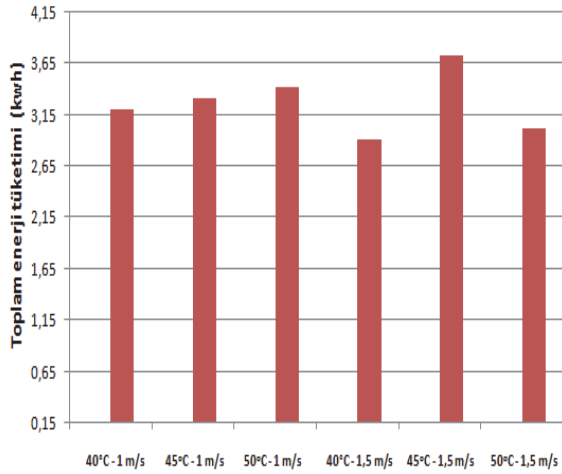
Şekil 3'de görüldüğü gibi defne yaprakları 6 farklı deneyde son nem miktarına ortalama 6,41 saatte indirilmiştir. Şekil 4' de yapılan deneylerde zamana göre kurutma havası bağıl nem değerlerinin değişimi görülmektedir.



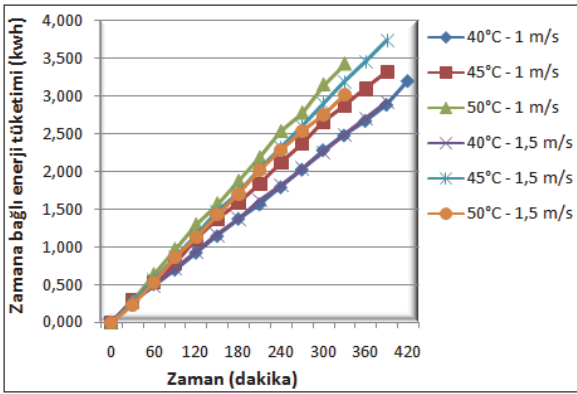
Şekil 4. Deneyler esnasında kurutma havası bağıl nem değişimi (Drying air relative humidity changes during the experiments)

Şekil 4'de görüldüğü gibi bağıl nem kontrollü olan kurutucuda üfleme havası bağıl nemi istenen değer aralığında tutularak havanın bünyesine nem alma kabiliyeti artırılmıştır.

Isı pompalı kondenzasyonlu kurutma sisteminde yapılan deneylerde harcanan enerjinin büyük bir çoğunluğu kurutma sisteminin ısıtılmasında ve defne yapraklarının içerisindeki nemi buharlaştırılmasında harcanmıştır. Yapılan deneylerde tüketilen toplam enerji miktarı Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Deneylerde tüketilen toplam enerji (Consumed total energy at the experiments)



Şekil 6. Deneyler esnasında enerji tüketimi artışı (Consumed energy increasing during the experiments)

Deneylerde enerji tüketiminin zamana bağlı olarak dalgalanması set değerlerine göre kompresörün ve nem alma ünitesinin devreye girip çıkmasından kaynaklanmıştır. Şekil 6'da deneyler esnasında enerji tüketimi artışı görülmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda tüm sistemin performans katsayıları (COP_{ts}) Eş. 7 kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm sistem performans katsayısının (COP_{ts}) en

Çizelge 2. Deneysel sonuçlar (Experimental results)

Deneyler	COP_{ts}	MC_{son} g su/g kuru madde	Kurutma süresi (h)	Harcanan toplam enerji (kWh)	$SMER_{ts}$ (g/kWh)
40°C - 1 m/s	2,41	0,15	7	3,204	40,39
45°C - 1 m/s	2,92	0,11	6,5	3,318	38,6
50°C - 1 m/s	2,34	0,1	6,5	3,423	37,98
40°C - 1,5 m/s	2,79	0,12	6,5	2,911	49,40
45°C - 1,5 m/s	3,02	0,1	6,5	3,735	39,40
50°C - 1,5 m/s	2,75	0,18	5,5	3,019	39,12

yüksek olduğu deney 45 °C sıcaklığında 1,5 m/s hava hızında hesaplanmıştır. Yapılan defne yapağı kurutma deneylerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de görülmektedir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi deneylerde en fazla enerji tüketimi 45 °C ve 1,5 m/s hava hızında yapılan deneyde olmuştur. Buna rağmen sistemde yapılan hesaplamalar sonucunda performans katsayısı en yüksek sistem 45 °C ve 1,5 m/s'de yapılan deneydir. Bunun sebebi kondenserden atılan ısı miktarının (\dot{Q}_y) diğer sistemlere göre daha fazla olmasıdır.

Defne yapağında yapılan duyu analizi sonucunda görünümünde, şeklinde, tadında ve kalitesinde herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, PLC kontrollü, ısı pompalı kurutma fırını ile Türkiye için önemli bir ihracat ürünü olan defne yapağı kurutulmuş, yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Kurutma esnasında sistemde kurutma odasından çıkan nemli hava nem alma ünitesinden geçirilerek havadaki nemin yoğunlaştırılması sağlanmıştır. Sistem kapalı devre nem kontrollü olarak çalıştırılarak enerji tüketimi azaltılmıştır.

Kurutulmuş defne yapraklarının su aktivitesi değerleri 0,49-0,55 aralığında ölçülmüştür. Bu metot ile ürün literatürdeki diğer çalışmalara göre daha kısa sürede kurutulmuş ve depolamaya hazır hale getirilmiştir.

Bu çalışma ile kurutulan defne yapraklarından daha kaliteli ürün elde edilebilmekte ve teknik kurutma ile yılın 12 ayı kurutma yapılabilmesi sağlanabilmektedir. Bu husus oldukça önemlidir, sebebi ise defne yapağındaki yaprak ağırlıklarının fazla olması nedeniyle kış kesimlerinin tercih edilmesidir.

Deneysel olarak analiz edilen ısı pompalı, sıcaklık, hava hızı ve nem kontrollü sistemde 6 farklı deney sonucunda performans katsayısı en yüksek sistem 45°C kurutma havası sıcaklığı ve 1,5 m/s hava hızının olduğu deneydir. 1,5 m/s’de yapılan deneylerde 1m/s hava hızına göre kondenserden ısı atımı daha fazla olduğundan dolayı hava sıcaklığı istenilen değere daha kısa sürede gelerek sistem kompresörü durmuş bu da performans katsayısını arttırmıştır. 50°C-1,5 m/s deneyinde 50°C kurutma havası sıcaklığını yakalayabilmek için 45°C-1,5 m/s deneyine göre kompresör daha uzun süre devrede kalmış sistem nem alma moduna geçince de hava daha sıcak olduğundan pompa daha uzun süre devrede kalmıştır. 45°C-1,5 m/s deneyinin performans katsayısının 50°C-1,5 m/s deneyinden daha yüksek olmasının nedeni budur.

Sistemde daha yüksek sıcaklık ve hava hızlarında defne yaprakları kurutulabilir, bu durumda kurutma süresi kısılırken, kurutulan ürün kalitesinde bazı bozulmalar (yaprak kızarıklığı, büzülmeler ve kırıklar) olacaktır.

Bu çalışmada enerji verimliliği açısından defne yaprağı kurutulmasındaki en ideal sıcaklık değerinin 45°C olduğu kurutma hava hızının ise 1,5 m/s olduğu tespit edilmiştir.

SEMBOLLER (LIST OF SYMBOLS)

c_h	Havanın özgül ısısı [kJ/kg°C]
h	Entalpi [kJ/kg]
KA	Kurutma sonrası numune kütlesi, [g]
\dot{m}_h	Havanın kütleli debisi [kg/s]
\dot{Q}	Birim zamanda harcanan enerji [kJ/s]
\dot{Q}_c	Kompresör gücü [kJ/s]
\dot{Q}_f	Fan gücü [kJ/s]
\dot{Q}_p	Pompa gücü [kJ/s]
R	Ölçülmesi gereken büyüklük
SO_{KA}	Kuru maddeye göre ürün içerisindeki su miktarı [g su/g kuru madde]
SO_{YA}	Yaş maddeye göre ürün içerisindeki su miktarı [g su/g yaş madde]
T	Sıcaklık [°C]
V	Hız [m/s]
w	Hata oranı
\dot{W}	Birim zamanda yapılan iş [kJ/s]
W_R	R büyüklüğünün toplam belirsizliği
x	Bağımsız değişken
YA	Kurutma öncesi numune kütlesi, [g]

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

07/2010-22 kodlu projeye vermiş oldukları desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi’ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Göker, Y., ve Acar, İ., “Orman Yan Ürünlerinden Akdeniz Defnesi (*Laurus nobilis* L.)”, **İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi**, 33(1): 124-140, 1983.
- Acar, İ., “Defne (*Laurus nobilis* L.) Yaprağı ve Yaprak Eterik Yağının Üretilmesi ve Değerlendirilmesi”, **Ormanlık Araştırma Enstitüsü Yayınları**, Teknik Bülten Serisi, 186, Ankara, 10,11, 1987.
- Bozkurt, Y. ve Göker, Y., “**Orman Ürünlerinden Faydalanma Ders Kitabı**”, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, İ.Ü. Yayın No: 2840, Yayın No:297, 402, İstanbul, 1981.
- Günhan, T., Demir, V., Hancıoğlu E., Hepbaşlı, A.,” Mathematical modelling of drying of bay leaves”, **Energy Conversion and Management**, 46, 1667–1679, 2005.
- Hawladar, M., N., A., Jahangeer, K., A., “Solar heat pump drying and water heating in the tropics”, **Solar Energy**, 80(5): 492-499, 2006.
- Oktay, Z. “Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması” **Makine Mühendisleri Yayını**, Teskon Program Bildirileri, Soğ 047, 750-759, (1997).
- Demir, V., Günhan, T., Yağcıoğlu, A.K., Değirmencioglu A., “Mathematical Modelling and the Determination of Some Quality Parameters of Air-dried Bay Leaves”, **Biosystems Engineering**, 88 (3), 325–335, 2004.
- Goh, L. J., Othman, M., Y., Mat, S., Ruslan, H., Sopian, K., “Review of heat pump systems for drying application”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 4788– 4796, 2011.
- Teeboonma U, Tiansuwan J, Soponronnarit S. “Optimization of heat pump fruit dryers”, **Journal of Food Engineering**, 59:369–77, 2003.
- Lee, K. H., Kim, O. J., Investigation On Drying Performance And Energy Savings Of The Batch-Type Heat Pump Dryer, **Drying Technology**, 27, 565-573, 2009.
- Kırmacı, V., Usta H., Menlik T., “An Experimental Study on Freeze-Drying Behavior of Strawberries”, **Drying Technology**, 26:12, 1570-1576, 2008.
- Söylemez, M., S., “Optimum heat pump in drying systems with waste heatrecovery”, **Journal of Food Engineering**, 74: 292-298, 2006.
- Queiroz, R., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., “Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers”, **Drying Technology**, 22, 1603-1620, 2004.
- Oktay Z., Hepbaşlı A., “Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer”, **Energy Conversion and Management**, 44: 1193-1207, 2003.
- Fatouh, M., Metwally, A., B., Helali A., Shedid, M.,H., “Herbs drying using a heat

- pump dryer”, **Energy Con. and Man.**, 47(15-16): 2629-2643, 2006.
16. Yağcıoğlu, A., Degirmencioğlu, A., Çagatay, F., “Drying Characteristics of Laruel Leaves Under Different Drying Conditions”, **7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy**, Adana, 565-569, 1999.
 17. Acar, İ.,”Defne (*Laurus nobilis* L.) Yaprağı ve Yaprak Eterik Yağının Üretilmesi ve Değerlendirilmesi”, **Orm. Araş. Ens. Yayınları**, Seri No. 186, Ankara, 1988.
 18. Tanker, M. ve Tanker, N., **Farmakognozi 2**, Reman Basımevi, İstanbul, 1976.
 19. Muller, J., Köll-Weber, M., Kraus, W., “ Effect of Drying on the Essential Oil of *Salvia Officinalis*”, **Planta Medica**, No: 58 (1): 78, 1992.
 20. Aktaş, M., Kara M., Ç., “Güneş enerjisi ve Isı Pompalı Kurutucuda Dilimlenmiş Kivi Kurutulması”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 28:4, 733-741, 2013.
 21. Çengel, Y., A., Boles, M., A., “**Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik**”, Güven Bilimsel Yayınları, 230-232, 2008.
 22. Ceylan, İ., ve Aktaş, M., “Isı Pompası Destekli Bir Kurutucuda Fındık Kurutulması”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 23:1, 215-222, 2008.
 23. Holman JP., “**Experimental Methods for Engineers**”, Sigapore: McGraw-Hill; 1994.
 24. Kavak Akpınar E., “Drying of Mint Leaves in a Solar Dryer and Under Open Sun: Modelling, Performance Analyses”, **Energy Con. and Man.**, 51 2407-2418, 2010.

