

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(DOKTORA TEZİ)

GIDA KURUTMA SİSTEMLERİNİN
EKSERJİ ANALİZİ

Neslihan ÇOLAK GÜNEŞ

Güneş Enerjisi Enstitüsü Ana Bilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.05.04

Sunuş Tarihi : 29.01.09

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

2. Danışman : Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Bornova – İZMİR

III

Sayın **Neslihan ÇOLAK GÜNEŞ** tarafından DOKTORA TEZİ olarak sunulan “**Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi**” başlıklı bu çalışma, E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 29.01.2009 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı ;.....

Raportör ;.....

Üye ;.....

Üye ;.....

Üye ;.....

ÖZET**GIDA KURUTMA SİSTEMLERİNİN EKSERJİ ANALİZİ**

GÜNEŞ ÇOLAK, Neslihan

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü

Danışman : Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

2. Danışman : Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Ocak 2009, 188 sayfa

Kurutma endüstrisinde amaç, istenilen özelliklere sahip kuru ürün elde etmek için maksimum düzeydeki suyu minimum enerji kullanımı ile uzaklaştırmaktır. Kurutma, gelişmiş ülkelerde ulusal enerjinin % 9 ile %25'inin tüketildiği, enerji yoğun bir işlemdir. Kurutma işleminin gerektiği üretim sektöründe kurutma maliyeti toplam maliyetin % 60 ile % 70'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle, enerji tasarrufu dünya ekonomisi için önemli bir hedeftir ve öyle olmaya devam edecektir. Daha az enerji kullanmanın en etkin yolu ise, enerjiyi daha faydalı kullanmaktır.

Bu nedenle, termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji analizi, enerji kayıplarının büyüklüğünün ve yerinin, doğal kaynakların verimsiz kullanılmasının ve atık enerji ile çevrenin kirletilmesinin başarılı bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır.

Son yıllarda, meyve, sebze ve biyolojik materyallerin kurutulması için ısı pompalı kurutucuların kullanımına büyük bir ilgi vardır. Isı pompaları düşük kalitedeki ısı enerjisini nispeten küçük miktarda yüksek kaliteli enerji kullanarak daha faydalı düzeye çıkaran ekipmanlardır. Isı

VI

pompalarının konvektif sıcak havalı kurutucularda kullanılması ısı pompası uygulamaları için ideal bir alandır.

Bu tezin amacı, toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma (TKIPK) sisteminin çeşitli gıdaların kurutulması için uygun olup olmadığının belirlenmesi ve TKIPK sisteminin geleneksel kurutuculara alternatif olarak kullanılabilirliğinin tartışılmasıdır. Bu bağlamda, beş farklı ürün (makarna, zeytin, elma, havuç ve nane) TKIPK sisteminde kurutulmuş, her bir ürünün kurutulması için ekserji analizi yapılmıştır.

Makarnanın İzmir'de bulunan Pastavilla Makarna Fabrikasındaki döner tambur kurutucularda ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulu bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı tepsili kurutucuda kurutulması için ekserji verimlilikleri belirlenmiş ve iki sistem birbiriyle karşılaştırılmıştır. Tez kapsamında ayrıca her iki sistemde kurutulmuş olan makarna örneklerinin kalite açısından kıyaslaması da yapılmıştır. Fabrikadan iki çeşit makarna örneği alınmıştır. Makarnanın başlangıç nem içeriği % 28.64 ve ön kurutma bölümünden çıkıştaki nem içeriği % 22.9'dur. Bu şekil verilmiş ve ön kurutma yapılmış makarna örneklerinin son nem içeriği % 11.48'dir. Ekstrüder çıkışından ve ön kurutucu çıkışından alınan makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulması için ekserji verimliliği değerleri sırasıyla, % 39.21 ve % 21.70 olarak bulunurken, fabrikadaki kurutma sisteminin ekserji verimliliği % 2.80 olarak bulunmuştur. Buradan, TKIPK sisteminin fabrikadaki kurutma sistemine göre daha verimli olduğu sonucu çıkarılabilir.

Zeytin örnekleri, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesinde bulunan geleneksel bir kurutucuda ve TKIPK sisteminde kurutulmuştur. Her iki kurutma sisteminin ekserji verimliliklerinin karşılaştırılması ürünün kalite özellikleri de dikkate alınarak yapılmıştır. Geleneksel sistemde yeşil zeytin kurutulmasının ekserji verimliliği değerleri dört farklı hava sıcaklığı

VII

(40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C) için belirlenmiştir. Bu kurutma havası sıcaklıkları için sistemin ekserji verimliliği değerleri hesaplanmış ve 40 °C hava sıcaklığında en yüksek verimlilik değeri bulunmuştur.

Yeşil zeytinin geleneksel kurutucuda ve TKIPK'da kurutulması için, elde edilen kuruma eğrileri, ekserji analizi sonuçları ve kalite değerlendirmesi birlikte yorumlandığında, yeni bir ürün olan kurutulmuş yeşil zeytin için TKIPK sisteminin önerilebilir olduğu belirlenmiştir.

Elma dilimleri, TKIP kurutucuda 45 °C, 50 °C ve 55 °C sıcaklık, %20 nispi nem ve 1 m/s hıza sahip kurutma havası ile kurutulmuştur. Bu üç farklı sıcaklık için, ekserji verimliliği değerleri belirlenmiş ve en yüksek verimlilik değeri 55 °C hava sıcaklığında % 15.38 olarak elde edilmiştir.

Isı pompalı tepsili kurutucuda havuç kurutma deneyleri iki farklı sıcaklık (40 °C ve 45 °C), % 17 nispi nem ve 1 m/s hızdaki hava kullanılarak yapılmıştır. Hava sıcaklığının 40 °C'den 45 °C'ye çıkması ile ekserji verimliliği % 7.39 artmıştır.

TKIP tepsili kurutucuda %16 nispi nem ve 3 farklı hava sıcaklığında (40 °C, 45 °C ve 50 °C) nane kurutma için deneysel veriler elde edilmiş, ekserji analizi sonucunda, ekserji verimliliğinin hava sıcaklığı arttıkça arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gıda kurutma sistemleri, ısı pompalı kurutma, makarna, zeytin, elma, havuç, nane, ekserji analizi.

ABSTRACT

EXERGY ANALYSES OF FOOD DRYING SYSTEMS

GÜNEŞ ÇOLAK, Neslihan

Ph.D. in Solar Energy Institute

Supervisor : Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

Co-supervisor : Prof. Dr. Günnur KOÇAR

January 2009, 188 pages

In the drying industry, the goal is to use a minimum amount of energy for maximum moisture removal for the desired final conditions of the product. Drying is an energy intensive operation consuming 9-25% of national energy in the developed countries. In manufacturing processes where drying is required, the drying cost can approach to 60-70% of the total cost. For this reason, energy conservation is a key goal of the world economy and will continue to be one in the future. The most effective way to reduce energy demand is to use energy more efficiently.

In this regards, exergy analysis, based on the second law of thermodynamics, successfully identifies the magnitudes and locations of energy degradations, inefficient uses of natural resources and the pollution of the environment by means of waste energy.

Recently, there has been a great interest in utilizing heat pump dryers (HPDs) for drying fruits, vegetables and biological materials. Heat pumps (HPs) are devices for raising the temperature of low grade heat energy to a more useful level using a relatively small amount of high grade energy.

Using HPs in convective hot air dryers has been recognized as an ideal area for HP applications.

The main objective of this thesis is to assess the performance of a ground-source heat pump drying (GSHPD) system for drying of various foods and to discuss possibility of using this GSHPD as an alternative to traditional dryers. In this context, five different food samples (pasta, olive, apple, carrot and mint) were dried in the GSHPD, while drying of each sample was evaluated using exergy analyses method.

Exergy efficiencies of pasta drying in the rotary dryers in the Pastavilla Pasta Plant in Izmir and a GSHPD system constructed in Solar Energy Institute, Ege University, Izmir were compared with each other. This thesis also included a comparison of quality of pasta samples dried in the two various systems. Two different pasta samples were taken from a factory, located in Izmir. Moistures at the inlet to the pasta and at the outlet from the pre-drying section in the plant were 28.64% and 22.9%, respectively. These extruded and pre-dried pasta dough samples were dried to a final moisture content of 11.48%. Exergy efficiency for the whole drying system in the plant was found to be 2.80%, while that for the GSHP drying system utilizing the extruded and pre-dried pasta samples was calculated to be 39.21% and 21.70%, respectively. It may be concluded that the pasta drying in the GSHP dryer was more efficient compared to that in the rotary dryers in the plant.

Olive samples were also dried in a traditional dryer constructed in the Agricultural Faculty, Ege University and GSHP dryer. Exergy efficiencies of the two drying systems were compared in terms of quality properties. Exergy efficiency values for drying of green olive samples in the traditional dryer were determined for four different drying air temperatures (40 °C, 50 °C, 60 °C and 70 °C). Exergy efficiency values of

the system for these drying air temperatures were calculated and the highest efficiency value was found at 40 °C drying air temperature.

When drying curves, results of the exergy analyses and evaluation of the quality values for drying of green olives in the traditional dryer and GSHPD explain together, GSHPD can be proposed for dried green olive, that is a new product.

The apple slices were dried in the GSHPD at temperatures of 45 °C, 50 °C and 55 °C, a relative humidity of 20% and an air flow velocity of 1 m/s. Exergy efficiency values of the system for these three drying air temperatures were determined, while the highest exergy efficiency value was calculated as % 15.38 at drying air temperature of 55 °C

The experimental data for the drying of carrots in a HP tray dryer were obtained at two different temperatures (40 °C and 45 °C), 17% relative humidity and air flow velocity of 1 m/s. Exergy efficiency of the drying chamber increased about 7.39 % as the temperature of drying air increased from 40 °C to 45 °C.

The experimental data for the drying of the mint leaves in the GSHP tray dryer were obtained at three different drying air temperatures (40 °C, 45 °C and 50 °C) and a relative humidity of 16 %. It was determined that exergy efficiency values increased with increasing the drying air temperatures.

Keywords: Food drying systems, heat pump drying, pasta, olive, apple, carrot, mint, exergy analyses.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince, değerli görüşlerinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI'ya ve Prof. Dr. Günnur KOÇAR'a, Güneş Enerjisi Enstitüsü Müdürü Sayın Prof. Dr. Sıddık İÇLİ'ye, tez izleme ve sınav komitesi üyelerine, fabrikada makarna kurutma hattında ölçümler yapmama ve makarna örnekleri almama izin veren başta üretim müdürü Sayın Neşe YAVUZ BİLGİN olmak üzere, Pastavilla Makarna'nın tüm çalışanlarına, zeytin örneklerini temin eden T.C. Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Zeytincilik Araştırma Enstitüsüne, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümünden Prof. Dr. Abdülkadir YAĞCIOĞLU'na, Doç. Dr. Vedat DEMİR'e ve Dr. Tuncay GÜNHAN'a, Ege Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç. Dr. Filiz İÇİER'e ve Araş. Gör. Zafer ERBAY'a, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü teknik ve idari kadro çalışanlarına, değerli arkadaşım Dr. Ebru HANCIOĞLU KUZGUNKAYA'ya, değerli aileme, beni sevgi ve özveri ile destekleyen sevgili eşim Mustafa GÜNEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
ABSTRACT	IX
TEŞEKKÜR	XIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XX
ÇİZELGELER DİZİNİ	XXIV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XXVII
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	9
2.1 Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi Çalışmaları	9
2.2 Isı Pompalı Kurutma Sistemleri ile İlgili Çalışmalar	11
2.2.1 Proses verimliliği üzerine çalışmalar	11
2.2.2 Modelleme üzerine çalışmalar	21
2.2.3 Ürün kalitesinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar	22
3. ISI POMPALI KURUTMA SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	29
3.1 Isı Pompası Tiplerine Göre Yapılan Sınıflandırma	29

İÇİNDEKİLER (devam)

3.1.1 Hava kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri	29
3.1.2 Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri	31
3.1.3 Kimyasal ısı pompalı kurutma sistemleri	32
3.1.4 Hibrit ısı pompalı kurutma sistemleri	34
3.2 Kurutucu Tiplerine Göre Yapılan Sınıflandırma	36
3.2.1 Kesikli kurutma sistemleri	37
3.2.2 Sürekli kurutma sistemleri	39
3.2.3 Akışkan yatak kurutma sistemleri	41
3.3 Kurutulan Ürün Çeşitlerine Göre Yapılan Sınıflandırma	43
4. KURUTMA TEORİSİ	51
4.1 Kuruma Evreleri	52
4.2 Su Aktivitesi	55
4.3 Kurutma Sırasında Isı ve Kütle Transferi	57
4.4 Uygun Kurutucu Seçimi	60
5. TEORİK ANALİZ	65
5.1 Kütle ve Enerji Denklikleri	65
5.1.1 Isı pompası için kütle ve enerji denklikleri	65

İÇİNDEKİLER (devam)

5.1.2 Kurutucu için kütle ve enerji denklikleri	68
5.2 Performans Değerlendirmesi	73
5.3 Belirsizlik Analizi	77
6. MATERYAL VE METOD	79
6.1 Makarna Kurutma	79
6.1.1 Deney düzeneği	79
6.1.2 Deney yöntemi	88
6.2 Zeytin Kurutma	92
6.2.1 Deney düzeneği	92
6.2.2 Deney yöntemi	93
6.3 Elma Kurutma	97
6.3.1 Deney düzeneği	97
6.3.2 Deney yöntemi	97
6.4 Havuç Kurutma	100
6.4.1 Deney düzeneği	100

XVIII

İÇİNDEKİLER (devam)

6.4.2 Deneş yöntemi	100
6.5 Nane Kurutma	103
6.5.1 Deneş düzeneği	103
6.5.2 Deneş yöntemi	103
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	107
7.1 Makarna Kurutma ile İlgili Sonuçlar	107
7.2 Zeytin Kurutma ile İlgili Sonuçlar	125
7.3 Elma Kurutma ile İlgili Sonuçlar	137
7.4 Havuç Kurutma ile İlgili Sonuçlar	142
7.5 Nane Kurutma ile İlgili Sonuçlar	147
7.6 TKIPK'da Kurutulan Ürünlerin Karşılaştırılması	152
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	153
EK AÇIKLAMALAR-A.....	157
EK AÇIKLAMALAR-B.....	161

XIX

KAYNAKLAR DİZİNİ.....	163
TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR	186
ÖZGEÇMİŞ	188

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	IPK sistemlerinin performans değerlendirmesi için kullanılan yöntemlerin dağılımı	12
3.1	Hava kaynaklı bir IPK'nın basit bir şematik gösterimi	29
3.2	Kapalı çevrim ısı pompalı kurutma sistemi	30
3.3	Toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma sistemi	31
3.4	CAO/H ₂ O/Ca(OH) ₂ reaksiyonunu kullanan bir kimyasal IPK sisteminin şematik gösterimi	33
3.5	Isı pompası destekli bir mikrodalga kurutma sistemi	35
3.6	Güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sistemi	36
3.7	IP kesikli bir kurutma sistemi	37
3.8	Isı pompalı dönel giysi kurutma sistemi	38
3.9	IP konveyör kurutma sistemi	40
3.10	Akışkan yatak IP kurutma sistemi	42
3.11	Çok basamaklı akışkan yatak IPK	42
3.12	Gaz motoru tahrikli IPK sistemi	47
3.13	Çalışma akışkanı olarak CO ₂ kullanan prototip bir ısı pompalı kurutucu	49
3.14	Giysi kurutma için entegre bir IPK	50

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
4.1	Tipik bir kuruma debisi eğrisi	52
4.2	Su aktivitesi ile gıdalardaki bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki	56
4.3	Gıda maddeleri için kuruma olayının şematik gösterimi	57
5.1	Basit bir kurutma kabininin şematik gösterimi	68
6.1	Makarna üretimi işlem akış şeması	80
6.2	Dört basamaklı makarna kurutma hattı	81
6.3	Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi	82
6.4	TKIPK sisteminin bütününün görünümü	84
6.5	Isı pompasının üç farklı görünümü	86
6.6	Kurutma kabini	87
6.7	TKIPK sisteminde makarna kurutulması	91
6.8	Tepsili kurutma sistemi	92
6.9	TKIPK sisteminde zeytin kurutma	96
6.10	TKIPK sisteminde elma kurutma	99
6.11	TKIPK sisteminde havuç kurutma	102
6.12	TKIPK sisteminde nane kurutma	105

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.1 1 ve 2 numaralı örnek için zamana bağlı nem miktarı değişimi	113
7.2 1 ve 2 numaralı örnek için kuruma debisi eğrileri	115
7.3 Elektrikli kurutucuda dört farklı hava sıcaklığında kurutulan zeytin örneklerinin nem içeriklerinin zamana bağlı değişimi	125
7.4 Elektrikli kurutucuda dört farklı hava sıcaklığında kurutulan zeytin örneklerinin kuruma debisinin zamana bağlı değişimi	126
7.5 Zeytinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi.....	129
7.6 Zeytinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma akımı grafiği.....	130
7.7 Elma dilimlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi.....	137
7.8 Elma dilimlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma debileri grafiği.....	138
7.9 Elma kurutma için sıcaklıkla ekserji kayıpları değişimi.....	140
7.10 Elma kurutma için sıcaklıkla ekserji verimliliğinin değişimi	140
7.11 Havuç örneklerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi.....	142
7.12 Havuç örneklerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma debileri grafiği.....	143
7.13 Havuç kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji kayıplarının ve ekserji yıkımlarının değişimi.....	145

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
7.14	Havuç kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji verimliliğinin değişimi.....	145
7.15	Nane yapraklarının ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi.....	147
7.16	Nane yapraklarının ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı kuruma debisi değişimi.....	148
7.17	Nane kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji kaybı, ekserji yıkımı ve buharlaşma ekserjisi değişimi.....	150
7.18	Nane kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji verimliliğinin değişimi.....	150
7.19	TKIPK sisteminde kurutulan tüm ürünlerin ekserji verimliliklerinin karşılaştırılması.....	152

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Isı pompalı kurutucu ile vakum ve sıcak havalı kurutucuların genel olarak karşılaştırılması	13
2.2 Isı pompalı kurutma sistemlerinin performans değerlendirmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar	16
2.3 Isı pompalı kurutma sistemlerinde ürün kalitesinin iyileştirilmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar	26
4.1 Isı ve kütle transferini betimleyen boyutsuz sayılar	59
6.1 TKIPK sisteminin ana bileşenlerinin teknik özellikleri ...	85
6.2 Makarna örneklerinin bileşim değerleri	89
6.3 Zeytin örneklerinin bileşim değerleri	96
6.4 Starking elmanın bileşim değerleri	99
6.5 Havucun bileşim değerleri	101
6.6 Nananın bileşim değerleri	104
7.1 Makarnanın 4 basamaklı kurutucuda kurutulmasına ait ölçüm değerleri	108
7.2 Kurutuculara giren – çıkan akımlar için entalpi, entropi, özgül ekserji ve ekserji akımı değerleri	110
7.3 Her bir kurutucu için $\dot{E}x_k$, $\dot{E}x_{buh}$, $\dot{E}x_{yikim}$, η_{ex} ve IP değerleri	111

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>	
7.4	Ölçülen ve hesaplanan veriler için toplam belirsizlik değerleri	112
7.5	Dört aşamalı kurutucuda makarna kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri	112
7.6	1 Numaralı makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri	116
7.7	2 Numaralı makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri	117
7.8	TKIPK sisteminde makarna kurutma için $\dot{E}x_k, \dot{E}x_{buh}, \dot{E}x_{yikim}, \eta_{ex}$ ve IP değerleri	119
7.9	TKIPK sisteminde makarna kurutma için hesaplanan değerlere ait toplam belirsizlikler	120
7.10	TKIPK sisteminde makarna kurutma için hesaplanan değerlere ait toplam belirsizlikler.....	121
7.11	Kurutulan makarna örneklerine ait kalite analizi sonuçları	122
7.12	Elektrikli kurutucuda zeytin kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler	127
7.13	Elektrikli kurutucuda zeytin kurutma için $\dot{E}x_k, \dot{E}x_{buh}, \dot{E}x_{yikim}, \eta_{ex}$ ve IP değerleri	128
7.14	Elektrikli kurutucuda zeytin kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri	128

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>		<u>Sayfa</u>
7.15	Yeşil zeytin örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri	131
7.16	Kurutma kabini için ekserji analizi sonuçları.....	132
7.17	TKIPK sisteminde zeytin kurutma için tüm sistemin ekserji analizi sonuçları.....	133
7.18	TKIPK sisteminde zeytin kurutma için hesaplanan değerlere ait toplam belirsizlikler	134
7.19	Kurutulan zeytin örneklerine ait kalite analizi sonuçları ...	135
7.20	Elma örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler.....	139
7.21	Elma kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri.....	141
7.22	Havuç örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler.....	144
7.23	Havuç kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri.....	146
7.24	Nane yapraklarının TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler.....	149
7.25	Nane kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri.....	151

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a_w	su aktivitesi
C	özgül ısı (kJ/kgK)
ψ	özgül ekserji (kJ/kg)
\dot{E}	enerji akımı (birim zamandaki enerji akımı) (kW)
\dot{E}_x	ekserji akımı (kW)
h	özgül entalpi (kJ/kg)
IP	iyileşme potansiyeli akımı (kW)
\dot{I}	tersinmezlik akımı (kW)
k	sistem bileşenleri
k	kütle transfer katsayısı
m	madde miktarı (kg)
\dot{m}	kütlesel debi (kg/s)
N	nem içeriği (gsu/gkuru katı, kg/kg)
N	Kuruma akısı (kgsu/m ² h)
P	basınç (bar, kPa)
q	ısı transferi
Q	ısı miktarı (kJ)
\dot{Q}	ısı akımı (kW)
R	hava sabiti (J/kgK)
s	özgül entropi (kJ/kgK)
\dot{S}	entropi akımı (kW)
t	zaman (h, s)
T	sıcaklık (K, °C)
\dot{W}	güç (kW)
w	belirsizlik
w	kütle transferi
X	kütle fraksiyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Üzeri nokta	birim zamandaki miktar

Grek semboller

η	ekserji verimi
ω	mutlak nem (kg su/kg)
ρ	yoğunluk (kg/m ³)

Alt indis

0	ölü hal
1	giriş
2	çıkış
a	kül
y	sınır (veya yüzey)
c	karbonhidrat
da	kuru hava
elek	elektrik
evap	evaporasyon/evaporatör
ex	ekserji
f	yağ
fi	lif
kond	yoğuşma/kondenser
g	gaz
h	hava
ıp	ısı pompası
k	kayıp
km	kuru madde

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
komp	kompresör
m	malzeme, materyal
N	nem
p	sabit basınç
pr	protein
q	ısı transferi
sa	soğutucu akışkan
sb	su buharı
sis	sistem
soğ	soğuk
u	uzaklaştırılan
V	hız
v,ort	ortalama akı
w	güç
w	su

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
A.Y.	Akışkan Yatak
E	Enerji
EK	Etki Katsayısı (veya COP)
Eks	Ekserji
Eko	Ekonomi
FAO	Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü
Gu	Gukhman sayısı
Gr	Grashof sayısı
HKIPK	Hava kaynaklı ısı pompalı kurutucu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
IPK	Isı pompalı kurutucu
K	Kesikli
kb	kuru baz
KIPK	Kimyasal ısı pompalı kurutucu
MA-IPK	Mikrodalga destekli ısı pompalı kurutucu
NÇO	Nem Çekme Oranı (veya MER)
Nu	Nusselt sayısı
ÖNÇO	Özgül Nem Çekme Oranı (veya SMER)
Pr	Prandtl sayısı
Re	Reynolds sayısı
S	Sürekli
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
TKIP	Toprak Kaynaklı Isı Pompası
UN.A.F.P.A.	Avrupa Birliği Makarna Üreticileri Birliği
USDA	Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
yb	yaş baz

1. GİRİŞ

Gıda maddeleri üretildikleri andan itibaren, tüketime kadar geçen süre içerisinde, birçok enzimatik, mikrobiyolojik ve kimyasal olaylar sonucu hızla bozulma eğilimindedir. Bu oluşumda, yapılarında % 98'lere kadar değişen oranlarda bulunan su en önemli rolü oynamaktadır. Kurutulmuş son üründe, hammaddenin ve son ürünün karakterine, ambalajlama ve depolama şartlarına göre değişmekle birlikte, % 3 ile % 10 seviyelerinde su bulunabilmektedir. Gıdanın başlangıçta sahip olduğu yüksek miktardaki suyun bu seviyelere kadar azaltılabilmesi için farklı kurutma teknikleri uygulanmaktadır (Cemeroğlu ve Acar, 1986; Fellows, 1988).

Kurutma, bilinen en eski gıda saklama tekniğidir ve yüzyıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır. M.Ö. 20000 yıllarında Rusya'da, et dilimlendikten sonra güneşte kurutma yapılmaktaydı. M.Ö. 10000'li yıllarda deniz suyunun güneşte kurutulması ile tuz elde edilmekteydi. Antik Mısır'da M.Ö. (2800 – 2300) elma, üzüm ve kayısı gibi meyveler güneş altında kurutulmaktaydı.

Tarih öncesi zamandan beri, güneş altında sererek kurutma, tarım ürünlerinin, özellikle meyve ve sebzelerin muhafaza edilmesi için kullanılan bir tekniktir. Enerji kaynağı bedava ve yenilenebilir olduğu için bu metot oldukça ekonomiktir. Bununla birlikte bu kurutma tekniğinde ürün, mikrobiyal kontaminasyona, mikroorganizma gelişmesine ve böcek istilasına açıktır, ayrıca ürünün beslenme değerinde azalma meydana gelir (Ayensu, 1997; Madhlopa et al., 2002).

Bu olumsuzluklar nedeniyle, günümüzde kontrollü şartlar altında kurutma tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamada yaygın

olarak kullanılan tekniklerin hemen tamamında, gıda maddesi içinde bulunan suyun buharlaştırılması için gerekli olan ısı enerjisinin, uygun sistemler kullanılarak, gıda kitlesine aktarılması yapılmaktadır. Sıcak hava veya sıcak yüzeyler aracılığı ile aktarılması gereken ısının miktarı, gıda maddesi içinde bulunan suyun içeriğinde birçok gıda bileşeninin çözünmüş olması, bu suyun hücreler arasında, poroz yapılarda ve kapiler sistemlerde bulunması nedeniyle serbest suya göre daha fazladır. Öte yandan, gıda maddesinde karboksil ve amino grupları gibi iyonik gruplarla etkileşim halindeki, bağlı su olarak adlandırılan suyun buharlaştırılması, pratikte uygulanan kurutma teknikleriyle, mümkün değildir. Bu nedenden ötürü, kurutma işleminde, gıda kitlesinden buharlaştırılan su serbest su olarak adlandırılan sudur. Serbest suyun toplam su içerisindeki oranı % 85 - % 90 seviyesindedir. Ayrıca, kurutmanın seyrine bağlı olarak, yapıdaki serbest su içeriği azaldıkça, suyun uzaklaştırılması için gereken ısı enerjisinin birim kütle başına düşen miktarı önemli seviyede artış göstermektedir (Cemeroğlu ve Acar, 1986; Singh and Heldman, 1993).

Kurutma, katı ürün üreten tüm sektörlerde en önemli ve yaygın olarak kullanılan temel işlemlerden biri olarak kabul edilebilir. Pek çok uygulamada kurutma, yüksek enerji girdisi olan bir prosestir. Bu da suyun buharlaştırılması için gereken gizli ısının yüksek olmasından ve endüstriyel kurutucuların enerji verimliliğinin nispeten düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Üretim sektöründe kullanılan toplam enerjinin ortalama % 12'si endüstriyel kurutucular tarafından tüketilmektedir. Kurutma işleminin gerektiği üretim sektöründe kurutma maliyeti toplam maliyetin % 60 ile % 70'ini oluşturmaktadır (Syahrul et al., 2002). Bu nedenle, kurutma endüstrisinde, kaliteli kuru gıda üretimi için kullanılan enerjinin maliyetini düşürmek büyük önem taşımaktadır. Bu da enerjinin verimli kullanılması ile mümkün olabilecektir (Dincer, 1998; Syahrul et al., 2002).

Günümüzde, kurutma sistemlerinin performansının değerlendirilmesinde, enerji verimi, özgül nem çekme oranı, bağıl yararlı enerji gibi, çeşitli değerlendirme kriterleri kullanılmaktadır. Oysa bu kriterler, sistem içindeki tersinmezliklerin dağılımı ve bunların büyüklüğü, başka bir deyişle; enerji verimliliği bakımından sistemdeki olası iyileştirme potansiyellerinin belirlenmesinde yeterli olmamaktadır. Bu bağlamda, enerji verimliliği yanında, ekserji verimliliğinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Enerji analizi (birinci yasa analizi), ısı kayıplarını azaltmak veya ısı geri kazanımını artırmak için kullanılmaktadır. Bu arada, proses ekipmanlarında meydana gelen faydalı enerjinin degradasyonu hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir (Tekin and Bayramoglu, 1998). Daha az enerji kullanmanın en etkin yolu ise, enerjiyi daha faydalı kullanmaktır. Bu nedenle, termodinamiğin ikinci yasasına dayanan ekserji analizi, enerji kayıplarının büyüklüğünün ve yerinin, doğal kaynakların verimsiz kullanılmasının ve atık enerji ile çevrenin kirletilmesinin başarılı bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır (Kotas, 1986). Bu yüzden ekserji analizi, var olan verimsizliklerin azaltılması ile daha verimli ısı sistemlerinin tasarımının mümkün olup olmadığını ve ne kadar mümkün olduğunu ortaya çıkarabilmektedir (Dincer and Sahin, 2004).

Ekserji, enerjinin faydalılığının, kalitesinin bir ölçüsü olarak görülebilir ve bir maddenin çevreyle etkileşim potansiyelinin etkin bir ölçümüdür. Kurutma süresince, ekserjinin büyük bir bölümü prosteşte kullanılmakta olup, kalan kısmı ise, kayıplar ve/veya atıklardır. Ekserji, enerjiden farklı olarak, korunmaz ve atıklarla orantılı bir şekilde sistemde entropi üretilmektedir. Dolayısıyla, ekserji analizi ile sistemdeki tersinmezlikler belirlenebilmekte, enerji kayıpları minimize edilebilmekte ve kullanılmadan atılan enerjinin değerlendirilmesi sağlanabilmektedir (Moran, 1989; Fortes and Ferreira, 2004).

Fosil yakıtlar yakın bir gelecekte tükeneceği için, dünyadaki bütün endüstriyel sektörlerin bütün bölümleri enerjiyi daha etkin kullanmak için daha verimli yöntemlere ihtiyaç duymaktadır (Strumillo et al., 1995). Bu nedenle kurutma endüstrisinde baş edilmesi gereken en önemli unsur, kaliteli kuru gıda üretimi için kullanılan enerjinin maliyetini düşürmektir (Dincer, 1998).

1980'lerden beri, enerji fiyatlarındaki artış, kirlilik üzerine yasal düzenlemeler, çalışma koşulları ve emniyet ihtiyaçları gittikçe sıklaşmaktadır. Bu gereksinimleri karşılamak ve enerji tüketimini optimize etmek için kurutma yöntemi ve kurutucu tasarımı yeni teknolojilerin kullanılması gerekmektedir (Hawlander et al., 1998).

En düşük maliyetle en kaliteli ürün elde etmek için sıcak havalı kurutma, vakum kurutma ve dondurarak kurutma gibi pek çok teknoloji geliştirilmiştir (Krokida et al., 2000). Fakat bu kurutma prosesleri yoğun enerji tüketimine sahiptirler. Enerji tasarrufu aynı zamanda maliyeti azaltan en etkin yöntemlerden biridir. Ürün kalitesi de dikkate alınması gereken bir diğer faktördür (Sokhansanj, 1984).

Isı pompalı kurutucuların gıda kurutma için geleneksel sıcak havalı kurutuculara göre daha yüksek enerji verimliliği, daha iyi ürün kalitesi, dış hava koşullarından bağımsız çalışabilme gibi pek çok avantajı vardır. Ayrıca bu teknoloji düşük enerji gereksinimi ve atmosfere zararlı gaz salınımına neden olmadığı için çevre dostudur (Perera and Rahman, 1997). Yapılan çeşitli çalışmalarda, ısı pompası kullanılarak kurutulmuş tarım ürünlerinin renk ve aroma kalitesi geleneksel sıcak havalı kurutuculara göre daha iyi bulunmuştur (Strommen and Kramer, 1994; Prasertsan and Saen-saby, 1998; Soponronnarit et al., 1998; Teeboonma et al., 2003).

Isı pompalarının enerji kullanım verimliliklerinin, elektrik enerjisi kullanan sistemlere göre 3 ile 6 kat, buhar kazanlarına göre 2 kat daha

yararlı olduğu dikkate alınırsa, gelişmiş ülkelerde geniş kullanımı olan ısı pompalarından yararlanmanın ülkemizde de yaygınlaştırılması ile, önemli miktarlarda enerji tasarrufunun sağlanacağı söylenebilir.

Son yıllarda, meyve, sebze ve biyolojik materyallerin kurutulması için ısı pompalı kurutucuların kullanımına büyük bir ilgi vardır (Hawlder et al., 2006). Isı pompaları düşük kalitedeki ısı enerjisini nispeten küçük miktarda yüksek kaliteli enerji kullanarak daha faydalı düzeye çıkaran ekipmanlardır (Eisa, 1996). Isı pompalarının konvektif sıcak havalı kurutucularda kullanılması ısı pompası uygulamaları için ideal bir alandır (Carrington et al., 1995). Strommen et al. (2002), ısı pompalı kurutucuların aynı sıcaklıktaki kurutma işlemi için geleneksel kurutuculara göre % 60 ile % 80 daha az enerji tükettiğini bulmuşlardır.

Yaklaşık 10.5 milyon ton olan dünya makarna üretimi içinde % 5.3'lük pay ile 5. sırada yer alan (UN.A.F.P.A., 2007) ülkemiz için, yüksek enerji girdisi olan kurutma prosesi için yeni verimli yöntemler geliştirmek ve enerjiyi daha verimli kullanmak çok önemlidir.

Makarna, Akdeniz diyetinin temel gıda maddesidir. İçerdiği karbonhidrat sindirime yardımcı olan bazı yıkım proseslerine izin verdiği için, makarnanın sindirilebilirliği oldukça yüksektir (Andrieu and Stamatopoulos, 1986; Sannino, et al., 2005). 1960'lı yıllardan beri makarna üretimi hızla artmaktadır (Dexter, et al., 1981).

Kurutma işlemi makarna üretimindeki en eski ve yaygın temel işlemlerden biridir ve endüstriyel makarna üretiminin de önemli bir basamağıdır. Kurutma prosesi, kurutulmuş ürünün son kalite özelliklerinin oluşmasında kritik bir öneme sahiptir. Çünkü, kurutma işlem koşulları, kurutulmuş makarnanın yapısında termal ve mekanik bozulmalar oluşmasına yol açabilir (Migliori et al., 2005). Kurutmanın çok yavaş olması mikrobiyal ve kimyasal bozulma reaksiyonlarına yol açarken, çok

hızlı kurutma makarnada çatlamalara neden olan dik bir nem eğrisine yol açar (Donelli, 1991; Hills et al., 1997). Bu sebeplerden dolayı, optimum kurutma şartlarının belirlenmesi için daha fazla çaba harcanmalıdır (Cummings et al, 1993; Hills et al, 1997). Kurutma işlemi sadece son ürün kalitesinin arzu edilen düzeyde olmasını sağlamak amacıyla değil, üretim maliyetinin düşürülmesi amacıyla da değerlendirilmelidir.

Dünya Tarım Örgütü'nün (FAO, 2007) verilerine göre, dünya genelinde 17500000 ton zeytin üretimi gerçekleştirilmektedir. Dünya zeytinyağı üretiminin % 97'sini elinde bulunduran İspanya, Yunanistan, İtalya, Tunus ve Türkiye Akdeniz Bölgesinin en önemli zeytinyağı üreten ülkeleridir (Lopez-Villalta, 1998). Türkiye 1525000 ton zeytin üretimi ile (FAO, 2007) dünya sofralık zeytin üretiminde İspanya'dan sonra ikinci sıradadır.

Üretilen zeytinlerin önemli bir kısmı zeytinyağına işlense de, dikkate değer oranda zeytin de direkt tüketim için sofralık zeytin olarak işlenmektedir. Türkiye'yi de içine alan Güney Avrupa için fermente edilmiş, yeşil ve siyah sofralık zeytin oldukça önemli ürünlerdir.

Bu çalışmada, gerek ülkemiz için gerek dünya için oldukça önemli bir gıda olan makarnanın fabrika şartlarında ve ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmasının performans ve kalite bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Bunun için, İzmir'de bulunan Pastavilla makarna fabrikasındaki fiyonk makarna üretim hattının ekserji analizi yapılmış ve bu hattan alınan fiyonk şekli verilmiş makarna hamuru ve ön kurutma yapılmış makarna örnekleri Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulu bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı tepsili kurutucuda kurutulmuştur. Bu sistemin de ekserji verimliliği belirlenerek kalite ve ekserji verimliliği konusunda kıyaslama yapılmıştır. Yapılan literatür taraması sonucu makarna üretiminde ısı pompalı kurutucuların kullanılabilirliğine dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Ayrıca, ülkemizde yaygın olarak üretilen yeşil zeytinin saklanması için yeni bir yöntem olan kurutma işlemi hem geleneksel bir elektrikli kurutucu hem de ısı pompalı bir kurutucu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve iki sistem performans ve kalite açısından değerlendirilmiştir. Bunun için, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümünde kurulu bulunan elektrikli tepsili kurutucuda yeşil zeytin kurutulmasının ekserji ve kalite analizleri yapılmıştır. Benzer örnekler toprak kaynaklı ısı pompalı sistemde de kurularak ekserji ve kalite analizi yapılmış ve önceki çalışma ile kıyaslanmıştır. Yapılan literatür incelemesinde, yeşil zeytin kurutulması ile ilgili sınırlı sayıda yayın bulunduğu, yeşil zeytin kurutulmasının performans değerlendirmesi ve ısı pompalı yeşil zeytin kurutma ile ilgili ise bir çalışma bulunmadığı tespit edilmiştir.

Ayrıca tez kapsamında, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda nane, elma ve havuç kurutması yapılmış, bu işlemler için de ekserji analizi yapılmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda toplam 5 farklı ürün çeşidinin kurutulmasının ekserji verimlilikleri de kıyaslanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölüm, gıda kurutma sistemlerinin ekserji analizi ve ısı pompalı kurutma ile ilgili yapılmış olan çalışmalar olarak iki ana bölümde incelenmiştir.

2.1 Gıda Kurutma Sistemlerinin Ekserji Analizi Çalışmaları

Meyve ve sebze kurutma sistemleri ve proseslerinin enerji-ekserji analizi konusunda yürütülen çalışmaların sayısı, ısı sistemlerin ve değişik proseslerin ekserji analizine göre göreceli olarak azdır (Akpınar, 2004).

Topic (1995), yüksek sıcaklıkta gıda kurutması yapan endüstriyel bir sistemin ekserji analizi için matematik bir model oluşturmuştur. Sisteme giren bileşenlerin kalitatif analizinin yapılması için bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, gıda kurutması için bir örnek olarak modelin uygulaması ve yazılımı, ekserji değişimi ve temel elemanların ve sistemin önemli parametrelere bağlı çalışma kalitesi göstergeleri verilmiştir.

Syahrul et al. (2002), yaptıkları çalışmada, nemli partiküllerin akışkan yataklı sistemde giriş ve çıkış koşullarının optimize edildiği koşullarda kurutulmasının termodinamik analizini yapmışlardır. Enerji ve ekserji modelleri kullanmış ve giriş hava sıcaklığı, akış hızı ve başlangıç nem miktarı gibi hidrodinamik ve termodinamik koşulların enerji ve ekserji verimliliği üzerine etkileri konusunda çalışmışlardır. Analiz, farklı materyaller için gerçekleştirilmiştir.

Dincer (2002), yaptığı çalışmada, kurutma sistemlerini enerji, ekserji ve çevre yönünden değerlendirmiştir. Bazı ısı proseslerinin enerji ve ekserji

verimliliği açısından karşılaştırması yapılmıştır.

Midilli and Kucuk (2003), güneş enerjisi ile kabuklu ve kabuksuz fıstık kurutulmasının enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Bu çalışmada, kurutma kabini giriş sıcaklığına bağlı olarak ekserji ve ekserji verimi hesaplaması yapılmış, kullanılan enerji miktarına göre ekserji kaybının değişimi belirlenmiştir.

Dincer and Sahin (2004), yaptıkları çalışmada, nemli katıların kurutulması işleminin ekserji analizi için yeni bir termodinamik model geliştirmişler ve ekserji verimliliğini ısı ve kütle transfer parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır. Ayrıca, sunulan modelin önemine dikkat çekmek için aydınlatıcı bir örnek sunulmuş ve kurutma sistemi analizi ve optimizasyonu için ne kadar önemli olduğu gösterilmiştir. Bir bakıma, kurutma konusunda yürütülecek olan ekserji analizi çalışmaları için, önemli bir kılavuz niteliği taşıyan, literatürdeki en önemli çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Akpınar (2004), doğranmış kırmızı biberlerin konvektif tip kurutucuda kurutulmasının enerji ve ekserji analizini yaptığı çalışmasında, enerji kullanım oranının, ekserji ve ekserji veriminin kurutma zamanına bağlı olarak değişimini göstermiş, 3 farklı sıcaklık için (55 °C, 60 °C ve 70 °C) enerji ve ekserji hesaplaması yapmıştır.

Fortes and Ferreira (2004), tahıl tanelerinin akışkan yataklı bir kurutucuda kurutulmasının modelleme ve simülasyonu ile ekserji analizini yapmışlardır. Tahıl olarak, buğday özü kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, enerji ve ekserji veriminin zamana göre değişimini, hava hızı ve sıcaklığının enerji ve ekserji verimine olan etkisini incelemişlerdir.

Akpınar et al. (2006), balkabağı kurutma prosesinin performansını, enerji ve ekserji yöntemlerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, balkabağı dilimlerinin tek kat olarak siklon tipi bir kurutucuda

kurutulmasının enerji ve ekserji analizi yapılmış, kuruma süresince kullanılan enerji belirlenmiş, farklı sıcaklıklarda hava (60 °C, 70 °C ve 80 °C) kullanıldığında kurutma süresince meydana gelen ekserji kayıpları grafik üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, zamana bağlı olarak farklı hava sıcaklıklarında ekserji verimi değişimi de incelenmiştir.

Akpınar et al. (2005a) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise, siklon tipi bir kurutucuda patates kurutulmasının enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Üç farklı hava sıcaklığı kullanılarak yapılan kurutma işleminde zamana bağlı olarak enerji kullanımı, ekserji, ekserji verimi ve ekserji kayıpları belirlenmiştir.

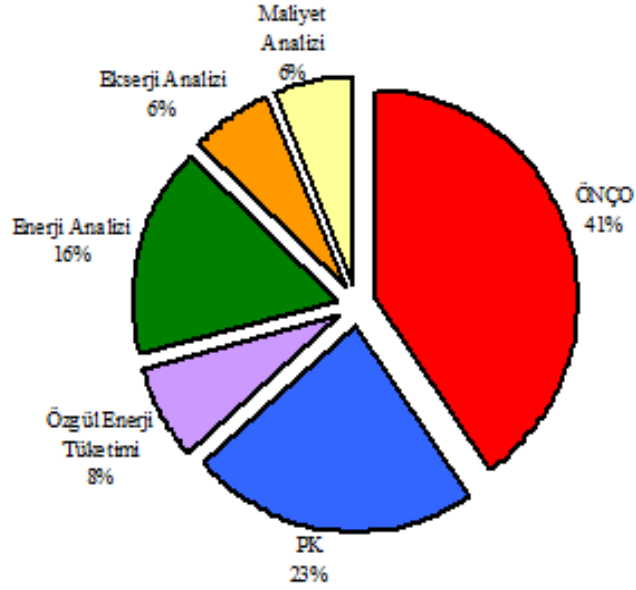
Colak and Hepbasli (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, çekirdekleri çıkarılmış yeşil zeytinin elektrikli bir kurutucuda kurutulmasının ekserji analizi yapılmıştır.

2.2 Isı Pompalı Kurutma Sistemleri ile İlgili Çalışmalar

Isı pompalı kurutma sistemleri ile ilgili uzun yıllardır pek çok çalışma yapılmaktadır. Isı pompalı kurutucular için ilk patent başvuruları 1973 yılında başlamış, bu konuda literatürde yer alan ilk çalışmalar Hodgett (1976) ve Geeraert (1976) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar üç alt başlık altında incelenmiştir.

2.2.1 Proses verimliliği üzerine çalışmalar

Isı pompalı kurutucuların performans değerlendirmesi, nem çekme oranı (NÇO), özgül nem çekme oranı (ÖNÇO), performans katsayısı (PK), enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve ekonomik analiz yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, IPK sistemlerinin performans değerlendirmesi için kullanılan en yaygın yöntem ÖNÇO’dur.



Şekil 2.1 IPK sistemlerinin performans değerlendirmesi için kullanılan yöntemlerin dağılımı (Colak and Hepbasli, 2009)

Isı pompalı kurutucuların vakum ve sıcak havalı kurutucularla genel bir karşılaştırması Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Hodgett (1976), ortalama 3 kg/kW ÖNÇÖ değerine sahip ısı pompalı bir kurutucunun, % 75 ısı verimliliğe sahip buharlı kurutucudan daha az enerji kullandığını bildirmiştir. 50 °C ve 80 °C kurutma sıcaklıklarında ısı pompalı bir kurutucunun ÖNÇÖ değerleri Oliver (1982) tarafından sırasıyla 0.57 kg/kW ve 1.02 kg/kW olarak bulunmuştur.

Jolly et al. (1990), ısı pompası destekli sürekli bir kurutucunun performansını belirlemiştir.

Tablo 2.1 Isı pompalı kurutucu ile vakum ve sıcak havalı kurutucuların genel olarak karşılaştırılması (Perera and Rahman, 1997)

	Sıcak hava kurutma	Vakum kurutma	IP kurutma
ÖNÇÖ (kg H ₂ O/kWh)	0.12 – 1.28	0.72 – 1.2	1.0 – 4.0
Kurutma verimi (%)	35 – 40	≤ 70	95
Kurulum maliyeti	Düşük	Yüksek	Orta
İşletme maliyeti	Yüksek	Çok yüksek	Düşük

Isı pompalı bir kurutucunun tahıl kurutma için ekonomik fizibilitesi Meyer and Greyvenstein (1992) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada minimum işletme periyodunun ısı pompalı kurutucuyu diğer kurutuculardan daha ekonomik yaptığı bulunmuştur.

Strommen and Jonassen (1996) ve Alves-Filho and Strommen (1996) tarafından yapılan çalışmalarda, ısıya duyarlı ürünler için yüksek ÖNÇÖ değerine sahip yeni bir ısı pompalı akışkan yataklı kurutucu geliştirilmiştir.

Yeni Zelanda Elektrik Kurumu tarafından elektrikli ısı pompalı kurutucu pilot işletmesi kurulmuştur. Bu sistemde 50 °C kurutma havası sıcaklığı ve % 80 nispi nem değerlerinde ÖNÇÖ değeri 7.94 kg/kWh olarak bulunmuştur (Barneveld et al., 1996).

Perera and Rahman (1997), ısı pompalı kurutucu ile vakum ve sıcak havalı kurutucuların genel karşılaştırmasını yapmışlardır.

Isı pompalı bir meyve kurutucunun performans değerlendirmesi ve maliyet analizi Soponronnarit et al. (1998) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, enerji tüketimi 9.93 MJ/kg buharlaşan su ve toplam işletme maliyeti US\$ 0.38 / kg buharlaşan su olarak bulunmuştur.

Acharyaviriya et al. (2000), ısı pompalı kurutucular için bir matematik model geliştirmiş ve açık çevrim, kapalı çevrim ve yarı kapalı çevrim kurutucuların performansını simüle etmişlerdir. Bu çalışmada, evaporatör bypass havası oranı arttığında ısı pompalı kurutucunun tüm bileşenleri için performans katsayısı değerinin düştüğü kaydedilmiştir.

Ameen and Bari (2004), giysilerin kondenserin atık ısısının kullanıldığı kontrollü şartlar altında kurutulabileceğini belirtmişlerdir. Böyle bir sistem için kuruma oranı geleneksel bir kurutucuya göre % 32.9, doğal kurutmaya göre % 205 daha yüksek bulunmuştur.

Isı pompalı atmosferik dondurarak kurutma işleminde tipik özgül nem çekme oranları 4.6 kg/kWh ile 1.5 kg/kWh arasındadır (Strommen et al., 2005). Aynı şekilde, endüstriyel vakumlu dondurarak kurutma işlemi için ÖNÇÖ değerleri 0.4 veya altında bulunmuştur (Gehrmann et al., 2004; Claussen et al., 2007).

Adapa and Schoenau (2005), bazı ürünlerin re-sirkülasyonlu ısı pompası destekli sürekli yatakta kurutulmasının enerji analizi konusunda çalışmışlardır. Bu çalışmada, re-sirkülasyonlu IPK'nın geleneksel elektrikli ısıtıcılı kurutuculara göre enerji verimliliğinin % 22 daha yüksek olduğunu ve kurutma süresinin % 65 kısaldığını bulmuşlardır.

Colak and Hepbasli (2005), ısı pompalı bir kurutucuda elma kurutulmasının ekserji analizini yapmışlardır. Bu çalışmada, farklı kurutma havası sıcaklıkları için ekserji yıkım ve verimlilik değerleri belirlenmiştir.

Soylemez (2006), IPK için optimum çalışma sıcaklıkları ve sistem bileşenlerinin optimum büyüklüklerinde, yaşam döngüsü maliyetini minimum olarak hesaplamıştır. Bu çalışmada, net toplam yaşam döngüsü maliyeti ortalama 5500 US \$ olarak bulunmuştur.

Fatouh et al. (2006), değişik bitkilerin ısı pompalı kurutucudaki kuruma karakteristiklerinin karşılaştırılması konusunda araştırma

yapmışlardır. Saplarından ayrılmış küçük boyuttaki bitkilerin düşük özgül enerji tüketimi ve düşük kuruma süresine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Isı pompası destekli bir kereste kurutucusunun enerji ve ekserji analizi Ceylan et al. (2007) tarafından yapılmıştır. Isı pompalı kurutucudaki keresteden buharlaştırılan su miktarı azaldıkça kurutucusunun enerji tüketimi de azalır ve ekserji verimliliği kurutma periyodu boyunca değişir.

Kuzgunkaya Hancıoğlu and Hepbaslı (2007), düşey toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma sisteminde defne yaprağı kurutmanın ekserjetik değerlendirmesini yapmışlardır. Bu çalışmada, kurutma prosesi için ekserji verimliliği değerleri ürün/yakıt temelinde 40 °C ve 50 °C hava sıcaklıkları için sırasıyla % 9.11 – % 15.48 olarak bulunmuştur (Kuzgunkaya Hancıoğlu and Hepbaslı, 2007a; 2007b).

Colak and Hepbaslı (2007), haşlanmış havuç dilimlerinin toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutucuda üç farklı hava sıcaklığında (45 °C, 50 °C ve 55 °C) kurutulmasının ekserji analizini yapmışlardır.

Peregrina et al. (2008), biyolojik arıtma çamurunun ve yeniden işlenmiş kullanılmış yağın katı bir yakıtı dönüştürülmesi için kullanılan yeni bir yöntem olan termal kızartma – kurutma teknolojisi üzerine bir ekonomik analiz çalışması sunmuşlardır. Bu çalışmada, açık ısı pompası ile kızartma – kurutma prosesinin kombine olarak kullanıldığı sistemin verimli bir enerji geri kazanımı sağladığı tespit edilmiştir.

Colak et al. (2008), ısı pompalı bir kurutucuda nane yapraklarının kurutulmasının ekserjetik değerlendirmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Isı pompalı kurutma sistemlerinde performans analizi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2 Isı pompalı kurutma sistemlerinin performans değerlendirmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar

Yazarlar	IPK Türü			Kurutucu Türü			Ürün	Sistemin Performansı					
	HKIPK	TKIPK	KIPK	A.Y	K.	S.		ÖNÇO	COP	NÇO	E	Eks	Eko.
Geerart, 1976	X				X		Kereste				X		
Hodgett, 1976	X				X		-	X					
Oliver, 1982	X				X		Tekstil, kil, kereste	X		X			
Tai et al., 1982	X				X		-				X		
Zylla et al., 1982							-	X					
Cunney and Williams, 1984	X						Tane				X		
Jolly et al., 1990	X					X	-	X					
Meyer and Greyvenstein, 1992							Tane						X
Rossi et al., 1992	X					X	Sebze				X		
Birchall, 1993	X						Zencefil, patates				X		
Clements et al., 1993	X						Sünger	X					
Jia et al., 1993	X					X	Sünger, havuç, zencefil	X	X				

Tablo 2.2 Devamı

Yazarlar	IPK Türü			Kurutucu Türü		Ürün	Sistemin Performansı							
	HKIPK	TKIPK	KIPK	A.Y	K.		S.	ÖNÇÖ	COP	NÇÖ	E	Eks	Eko.	
Hesse, 1994	X				X		-	X		X				
Birchall, 1994	X				X		Zencefil, patates	X			X			
Strommen and Kramer, 1994	X			X			Granül gıdalar ve biyoteknolojik ürünler	X	X					
Bameveld et al., 1996	X						-	X						
Strommen and Jonassen, 1996	X			X			-	X						
Abrahamsson et al., 1997	X					X	Kağıt		X			X		
Bannister et al., 1998	X				X		Kereste	X				X		
Hawladar et al., 1998	X				X		Tatlı patates	X						
Hawladar et al., 1998	X				X		-		X					
Prasertsan and Saen-saby, 1998 a, b	X				X		Kauçuk ağacı, muz	X	X					
Schmidt et al., 1998	X					X	Çamaşır	X	X				X	
Soponronnit et al., 1998	X				X		Papaya	X	X		X		X	

Tablo 2.2 Devamı

Yazarlar	IPK Türü			Kurutucu Türü			Ürün	Sistemin Performansı					
	HKIPK	TKIPK	KIPK	A.Y	K.	S.		ÖNÇÖ	COP	NÇÖ	E	Eks	Eko.
Achariyaviriya et al., 2000	X				X		Papaya	X	X				
Ho et al., 2001	X				X		Patates				X		
Klocker et al., 2001	X				X		Çamaşır	X	X	X			
Adapa et al., 2002	X					X	Özel bitkiler	X					
Alves-Filho, 2002	X			X			Yaban mersini ve patates- şalgam karışımı	X					
Braun et al., 2002	X				X		Giysi	X					
Hawladar et al., 2003	X				X		Gıda taneleri		X				
Oktay, 2003	X				X		Yün	X	X				
Oktay and Hepbasli, 2003	X				X		Yün	X	X				
Sosle at al., 2000; 2003	X				X		Elma	X		X			
Teeboonma et al., 2003	X				X		Papaya ve mango						X
Ameen and Bari, 2004	X				X		Giysi			X			

Tablo 2.2 Devamı

Yazarlar	IPK Türü			Kurutucu Türü		Ürün	Sistemin Performansı							
	HKIPK	TKIPK	KIPK	A.Y	K.		S.	ÖNÇÖ	COP	NÇÖ	E	Eks	Eko.	
Fernandez-Golfim Seco et al., 2004	X				X		Yün	X						
Ogura et al., 2004			X			X	Seramik				X			X
Queiroz et al., 2004	X				X		Domates		X					
Zhang et al., 2004	X			X			Havuç	X						
Adapa and Schoenau, 2005	X					X	Özel bitkiler	X			X			
Colak and Hepbasli, 2005		X			X		Elma						X	
Chua and Chou, 2005	X				X		-	X		X				
Fatouh et al., 2006	X				X		Ebegtimeci, nane, maydanoz			X				
Hawladar and Jahangeer, 2006	X				X		Yeşil fasulye	X		X				
Soylemez, 2006	X				X		-			X				X
Ceylan et al., 2007	X				X		Kereste	X		X		X	X	
Kuzgunkaya and Hepbasli, 2007 a,b		X			X		Define yaprakları						X	
Shi et al., 2008	X				X		İstavrit	X						

Tablo 2.2 Devamı

Yazarlar	IPK Türü			Kurutucu Türü			Ürün	Sistemin Performansı					
	HKIPK	TKIPK	KIPK	A.Y	K.	S.		ÖNÇO	COP	NÇO	E	Eks	Eko.
Hawladet et al., 2008	X				X		-				X		
Lostec et al., 2008	X					X	Odun yongası		X				X
Colak et al., 2008		X			X		Nane yaprakları						X

IPK: Isı pompalı kurutucu

A.Y.: Akışkan yatak

ÖNÇO: Özgül nem çekme oranı

HKIPK: Hava kaynaklı IPK

K: Kesikli

COP: Performans katsayısı

TKIPK: Toprak kaynaklı IPK

S: Sürekli

NÇO: Nem çekme oranı

KIPK: Kimyasal IPK

E: Enerji, Eks: Eksjerji, Eko: Ekonomi

2.2.2 Modelleme üzerine çalışmalar

Isı pompalı kurutma sistemlerinde ısı ve kütle transferi üzerine pek çok teorik çalışma yapılmıştır (Adapa et al., 2002). Matematik modelleme, değişik şartlar altında uygun kuruma oranı ve verimliliğin öngörülmesini sağlayan bir araçtır (Prasertsan et al., 1996).

Jolly et al. (1990) ısı pompalı bir kurutucunun sürekli çalışması durumu için bir model geliştirmişlerdir. Clements et al. (1993) bu modeli ısı pompası destekli sürekli bir kurutucunun performansını belirlemek için kullanmışlardır.

İnce tabaka kuruma kinetiği kompleks kurutma sistemlerinin tasarım, simülasyon ve optimizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Son ürünün kalitesi kadar proses süresinin kısılması da kesin olarak tahmin edilebilir (Madamba et al., 1996). İnce tabaka kuruma kinetiği ısı pompalı kurutma sistemlerinin tasarımı için gereklidir. Rahman et al. (1998) bezelyelerin desorbsiyon izoterminin ölçülmesi ve modellemesi üzerine çalışmışlar, ayrıca, bezelyelerin ısı pompalı kurutucudaki kuruma kinetiğini iki bileşen modelini kullanarak belirlemişlerdir.

Alves Filho et al. (1998), iki bağımsız kurutma bölümü ve iki soğutucu akışkan döngüsüne sahip, çoklu akışkan yataklı ısı pompalı bir kurutucu için bir simülasyon bileşen modeli tanımlamışlardır.

Kurutma kinetiği, ürün kalite parametreleri ve ısı pompalı kurutma boyunca ısı geri kazanımının artırılması için belirlenen optimizasyon parametrelerinin optimize edilmesi için çeşitli kesikli kurutma tasarımları Ho et al. (2001) tarafından seçilmiştir.

Adapa et al. (2002), ısı pompası destekli bir bitki kurutucu için basitleştirilmiş bir matematik model geliştirmişlerdir.

Levha formundaki ısıya duyarlı materyallerin konveksiyonla kurutulması için Islam et al. (2003) tarafından simülasyon yapılmıştır.

Çeşitli deneysel şartlar altında ısı pompalı bir kurutucuda kestane kurutulması Moreira et al. (2005) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda, farklı çeşitlerde kestane kullanılmasının kuruma kinetiğinde önemli farklılıklara sebep olmadığı tespit edilmiştir.

Rahman et al. (2007), ısıya duyarlı komposit ürünlerdeki ısı ve kütle transferi için iki boyutlu teorik bir model geliştirmişlerdir. Modelin bildirdiği sonuçları doğrulamak için, ısı pompası destekli kesikli bir kurutucuda dikdörtgen şeklindeki patates ve elma dilimlerinin komposit kurutma nesnesi olarak kullanıldığı deneysel çalışmalar yapılmıştır.

2.2.3 Ürün kalitesinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar

Araştırmacılar, yüksek kalitede kuru ürün elde etmekle düşük işletme maliyeti arasında denge sağlamak için yeni kurutma yöntemlerinin uygulanabilirliğinin araştırılması konusunda öncülük etmektedirler. Bazı çalışmalarda, yüksek kaliteye sahip kuru ürün elde etmek ısı pompalı kurutucuların en önemli avantajı olarak vurgulanmaktadır (Rossi et al., 1992; Strommen and Kramer, 1994; Prasertsan and Saen-saby, 1998).

Ürün kalitesinin iyileştirilmesine yönelik olarak yapılmış olan çalışmalar Tablo 2.3'te verilmiştir.

Kurutma prosesi boyunca, farklı oranlarda renk, aroma ve dokuda bozulmalar meydana gelebilir. Isı pompalı kurutma ve geleneksel kurutma metotlarının pek çok üründe kalite azalması bakımından karşılaştırıldığı çalışmalar da yapılmıştır (Perera and Rahman, 1997). Pek çok çalışmada yaygın olarak varılan sonuç, ısı pompalı kurutma ile daha iyi kalitedeki kuru ürünlerin daha az enerji tüketimi ile elde edildiği yönündedir (Rossi

et al., 1992; Birchall, 1993; Prasertsan and Saen-saby, 1998).

Kurutma şartlarına bağlı olarak, gıda ürünleri farklı derecelerde kahverengileşme, büzüşme, besin değeri kaybı ve benzeri değişimlere uğrayabilirler (Hawlander et al., 2006b,c). Meyve ve sebzeler gibi gıdalar su, karbonhidrat, protein ve lipit fraksiyonları içerirler. Bu bileşenler yüksek sıcaklıktaki kurutma koşullarında kolayca değişime uğrar ve gıda kalitesinin düşmesine sebep olurlar (Sokhansanj and Jayas, 1987).

Kurutma süresince, nemli materyalden su uzaklaştırıldığı için yapısal özelliklerde önemli değişiklikler gözlenebilir. Gıda polimerleri suyun olmadığı durumda yerçekimi kuvveti altında çökerek ağırlıklarını kaldıramadıkları için büzüşme meydana gelir (Achanta and Okos, 2000).

Gıda ürünlerini kurutmak için ısı pompalı kurutucuların en önemli avantajları, elde edilen ürün kalitesinin iyileştirilme potansiyelinin olmasıdır (Perera and Rahman, 1997).

Van Blarcom and Mason (1988), ısı pompalı kurutucuda 50 °C hava sıcaklığında kurutulan macadamia fındıklarında kahverengileşme probleminin meydana gelmediğini göstermişlerdir.

Rossi et al. (1992), soğan dilimlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması sonucunda geleneksel kurutuculara kıyasla % 30 enerji tasarrufu ile birlikte daha iyi ürün kalitesi elde edildiğini bulmuşlardır.

Britnell (1994), ısı pompalı kurutucuları mikrobiyolojik yönden incelemiştir. Isı pompalı kurutucularda nispeten düşük kurutma sıcaklıkları (< 55 °C) uygulanması nedeniyle, mikrobiyolojik çoğalma için risk oluşmaktadır. Bu araştırma, ısı pompalı kurutucunun kapsamlı bir mikrobiyal çoğalmayı desteklemediğini ortaya koymuştur.

Chua et al. (2001), muz dilimlerinin kurutulması için, kuruma süresini kısaltmak ve ürün rengini iyileştirmek amacıyla seçilmiş olan bazı

kesikli kurutma sistemleri için fizibilite çalışması yapmışlardır.

Modifiye atmosferde ısı pompalı kurutucuda elma kurutulması Perera (2001) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, kurutulmuş elmalarda, bütün kuru ürün kalitesinin çok yüksek olmasının yanı sıra, mükemmel renk ve C vitamini korunumu gözlenmiştir.

Cardona et al. (2002), Laktik Asit Bakterilerinin (LAB) ısı pompalı sistemde kurutulması konusunda çalışmışlardır. Bu çalışmanın amacı, LAB'nin canlılık ve aktivitesinde kabul edilemez bir kötüleşmeye yol açmadan, ısı pompalı kurutucuda hangi preparasyon ve kurutma şartları altında kurutulabileceğini değerlendirmektir. Aynı zamanda kurutulan ürünün farklı depolama sıcaklıklarındaki raf ömrü de belirlenmiştir.

Namsanguan et al. (2004), kızgın buharlı kurutmanın ardından ısı pompalı kurutma yapılan iki basamaklı bir kurutma sistemini araştırmışlardır. Bu çalışmada, kurutmanın bu iki basamakları arasındaki durumun etkisi kurutma süresinin kısaltılması amacıyla incelenmiştir. Kuruma karakteristikleri, büzüşme, renk, doku, rehidrasyon özellikleri ve mikro yapı gibi kurutulmuş karidesin çeşitli kalite özellikleriyle birlikte incelenmiştir.

Birinci basamakta kızgın buharlı kurutma ve takiben ikinci basamakta ısı pompalı kurutma veya tam tersinin yapıldığı iki basamaklı kurutma sistemleri, ürün kalitesini geliştirmek için farklı kurutma tekniklerinin kombine edilmesi ile alternatif bir kurutma teknolojisi olarak bulunmuştur (Namsanguan et al., 2004; Uengkimbuan et al., 2005).

Hawlder et al. (2006b), modifiye atmosferde ısı pompalı kurutucuda yaklaşık 45 °C sıcaklık ve % 10 nispi nem şartlarında kurutmanın daha iyi fiziksel özellikler sağladığını göstermişlerdir. Isı pompalı kurutucuda inert çevre (azot veya karbon dioksit) şartlarında kurutulan elma, guava ve patatesin renk özelliklerinin vakum veya

dondurarak kurutma ile elde edilen sonuçlara benzer olduğu görülmüştür.

Atmosferik ısı pompalı kurutucuda kurutulan kırmızı biberlerin kuruma kinetiği ve ürün kalitesi üzerine kullanılan hava sıcaklığının etkisi Alves-Filho et al. (2007) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, vakum-dondurarak kurutmaya göre kurutma süresini kısaltmak ve maliyeti düşürmek için, 20 °C gibi bir evaporasyon sıcaklığı kurutulmuş biberdeki kırmızı ve sarı renklerin yoğunlaştırılması için süblimasyonla başarılı şekilde kombine edilmiştir.

Sunthonvit et al. (2007), ısı pompalı kurutmanın dilimlenerek kurutulmuş nektarinlerdeki uçucu bileşenler olan lakton ve terpenoidlerin korunması için en uygun sistem olduğunu bulmuşlardır.

Kurutmanın ilk basamağı sonunda, kızgın buhar sıcaklığının ve tavuğun nem içeriğinin kuruma kinetiği ve kurutulmuş tavuğun renk, büzüşme ve rehidrasyon yeteneği gibi kalite özellikleri üzerine etkileri Nathakaranakule et al. (2007) tarafından belirlenmiştir.

Jangam et al. (2008), sapota meyvesinin kurutulması konusunda bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, sapota pulpunun kuruma özellikleri, konveksiyon kurutma, düşük sıcaklıkta çalışan bir ısı pompalı kurutma ve dondurarak kurutma yapılarak incelenmiştir.

Fiala and Guidetti (2008), kapalı çevrim bir ısı pompalı kurutucunun tıbbi bitkilerin kurutulması için uygun olduğunu göstermişlerdir.

Coogan and Wills (2008), ısı pompalı kurutucuda kurutulan beyaz turptaki aroma değişiminin sıcak havalı sistemde kurutulana göre daha az olduğunu bulmuşlardır.

Tablo 2.3 Isı pompalı kurutma sistemlerinde ürün kalitesinin iyileştirilmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar

Yazarlar	IPK türü	Kurutulan Ürün			Hava		
		Çeşit	Başlangıç nem içeriği (%)	Son nem içeriği (%)	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Nispi nem (%)
Van Blarcom and Mason, 1988	HKIPK	Macadamia fındığı	20	1.5	-	50	10
Rossi et al., 1992	HKIPK	Sebze					
Birchall, 1994	HKIPK	Zencefil	82 - 85	12	1.8	35, 45, 55	-
		Patates	80	10	1.3 - 3	55	-
Britnell, 1994	HKIPK					<50	
Payne, 1994	HKIPK	Mango	85	16	1.5	35, 45, 55	-
Strommen and Kramer, 1994	MA-IPK	Balık	-	-	0-3	-20, 50	20 - 90
Wood, 1994	HKIPK	Zencefil	-	-	0.25 - 1	35, 45, 55	-
Haw/lader et al., 1998	HKIPK	Tatlı patates	-	-	1	40, 45, 50	30, 40, 50

Tablo 2.3 devamı

Yazarlar	IPK türü	Kurutulan Ürün			Hava		
		Çeşit	Başlangıç nem içeriği (%)	Son nem içeriği (%)	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Nispi nem (%)
Prasertsan and Saen-Saby, 1998	HKIPK	Yün, muz					
Chua et al., 2001	HKIPK	Muz			2.5	30 - 35	19.8 - 43.2
Ho et al., 2001	HKIPK	Patates	4.2	1.0	1.6	25, 30, 40	32 - 44
Perera, 2001	HKIPK	Elma	-	-	-	-	-
Cardona et al., 2002	HKIPK	Laktik asit bakterisi	-	-	1.7	10 - 40	21.7
Dandamrongrak, et al., 2003	HKIPK	Muz	-	25 (k.b.)	3.1	50	-
Namsangan, et al., 2004	Hibrit IPK	Karides	30 - 40 (y.b.)	20 (y.b.)	0.9	50	-
Hawtlader et al., 2006	MA-IPK	Guava, papaya	-	-	0.7	45	10
Hawtlader et al., 2006	MA-IPK	Zencefil	-	-	0.7	45	10

Tablo 2.3 devamı

Yazarlar	IPK türü	Kurutulan Ürün			Hava		
		Çeşit	Başlangıç nem içeriği (%)	Son nem içeriği (%)	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Nispi nem (%)
Hawlander et al., 2006	MA-IPK	Elma	-	-	0.7	45	10
Alves-Filho et al., 2007	Hibrit IPK	Kırmızı biber	27.78 (k.b.)	0.75 (k.b.)	1.5 - 2.5	-3, -5, -10, 20	-
Nathakaranakule et al., 2007	Hibrit IPK	Tavuk eti	43, 67 (k.b.)	0.11 (k.b.)	-	55	-
Stawczyk et al., 2007	Hibrit IPK	Elma küpleri	-	-	-	-4, -8, -12, -16	-
Sunthonvit et al., 2007	HKIPK	Nektarin	-	18-20 (y.b.)	1.6	25	10
Jangam et al., 2008	HKIPK	Sapota	68-73 (k.b.)	6-7 (k.b.)	1	40	15
Coogan and Wills, 2008	HKIPK	Beyaz turp	-	<10	-	-	-
Alves-Filho et al., 2008	HKIPK	Protein	85	-	1, 2, 3	-5, 25	-

MA-IPK: Mikrodalga destekli ısı pompalı kurutucu

HKIPK: Hava kaynaklı ısı pompalı kurutucu

k.b.: Kuru baz

y.b.: Yaş baz

3. IPK SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

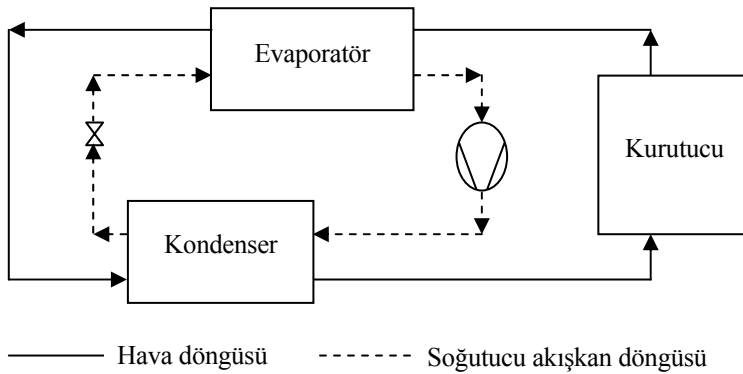
Isı pompalı kurutma uygulamaları kullanılan ısı pompası tiplerine, kullanılan kurutucu çeşitlerine ve kurutulan ürünlere göre üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır.

3.1 Isı Pompası Tiplerine Göre Yapılan Sınıflandırma

Piyasada kurutma uygulamaları için farklı tiplerde ısı pompaları mevcuttur. Bu bölümde, kurutma için kullanılan ısı pompası tipleri dört ana başlık altında incelenmiştir.

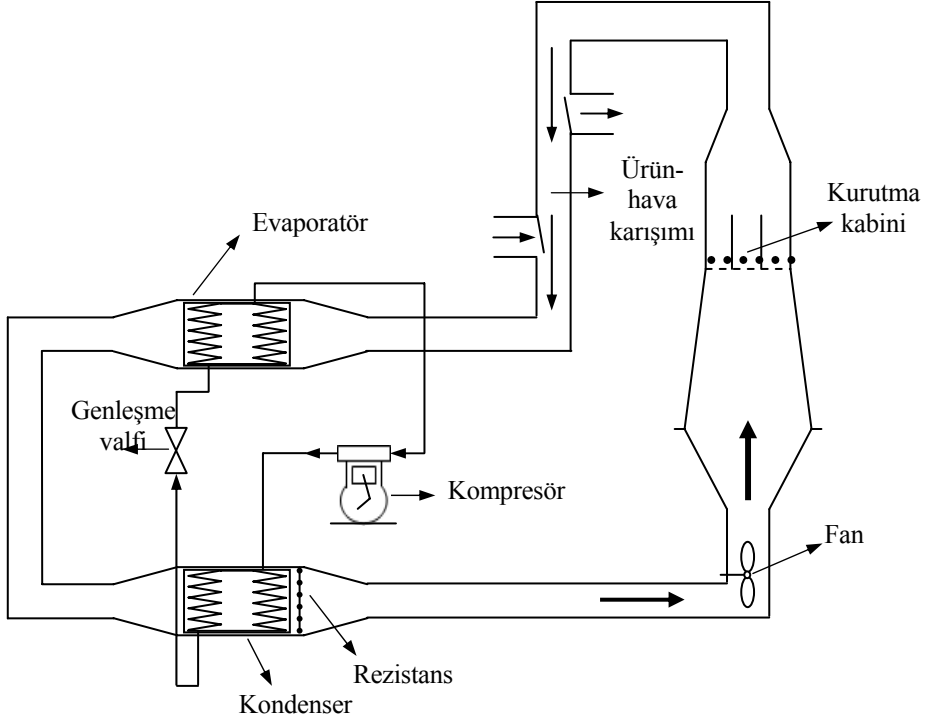
3.1.1 Hava kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri

Hava kaynaklı ısı pompaları, kurutma uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Hava kaynaklı ısı pompalı bir kurutucunun basit şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Hava kaynaklı bir IPK'nın basit bir şematik gösterimi

Xanthopoulos et al. (2007), bütün haldeki incirlerin kapalı çevrim deneysel bir ısı pompalı sistemde tek tabaka halinde kurutulmasının matematik modellemesini sunmuşlardır. Bu sistem Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

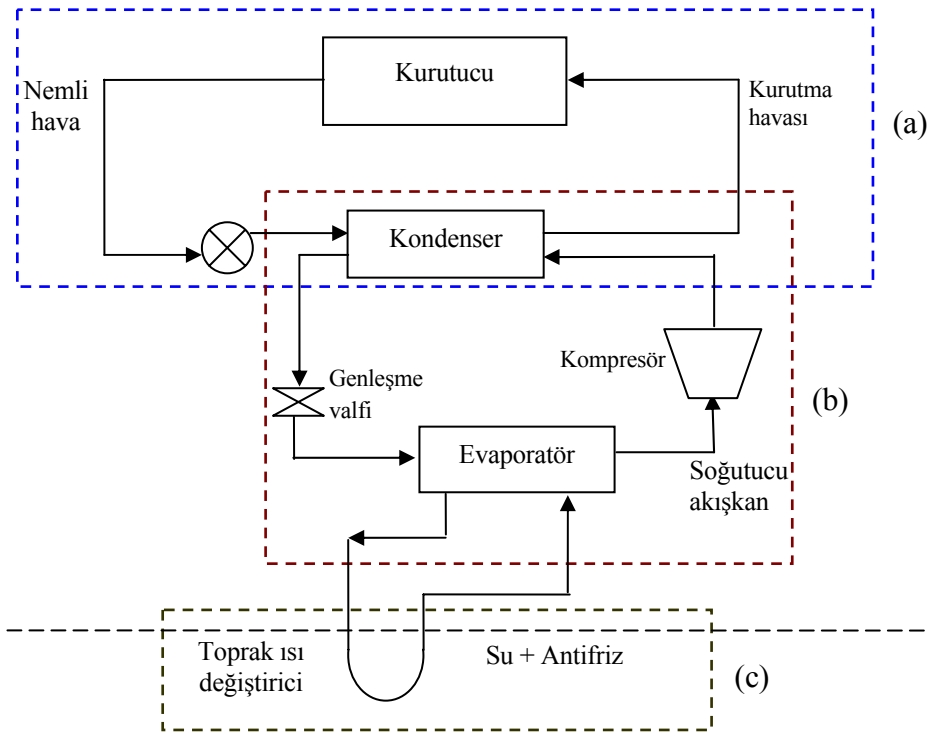


Şekil 3.2 Kapalı çevrim ısı pompalı kurutma sistemi (Xanthopoulos et al., 2007)

Invernizzi ve Angelino’ya (1990) göre, basit ısı pompası döngüsünün verimliliğini iyileştirmek ve böylece daha fazla ısı geri kazanımı sağlamak için en iyi yol çok kademeli soğutma ve sıkıştırma işlemleridir. Prototip bir, iki basamaklı evaporatörlü ısı pompası destekli mekanik bir kurutma sistemi Chua ve Chou (2005) tarafından tasarlanmış, imal edilmiş ve ısı geri kazanımını artırmak için test edilmiştir.

3.1.2 Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemleri

Isı pompalı kurutma sistemleri ile ilgili uzun yıllardır pek çok çalışma yapılmış olmasına rağmen, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma çalışmaları oldukça sınırlıdır. Toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma sisteminin şematik bir gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma sistemi

Bu sistem başlıca üç alt sistemden meydana gelmektedir; (a) toprak kaynaklı ısı değiştirici (b) ısı pompası sistemi (c) kurutma kabini. Isı pompası sisteminin ana bileşenleri bir evaporatör, bir kondenser, bir kompresör ve bir genleşme valfidir. Bu sistemde ısı, su-antifriz çözeltisinin

sirküle edildiği toprak kaynaklı ısı değiştirici vasıtasıyla topraktan alınır. Isı, evaporatörde soğutucu akışkana aktarılır, kondenserde akışkandan aldığı ısıyla sıcaklığı artan hava kurutma kabinine giriş yapar (Colak and Hepbasli, 2005).

Kuzgunkaya Hancioglu and Hepbasli (2007a,b) toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutucuda defne yapraklarının kurutulmasının ekserji analizini yapmışlardır.

3.1.3 Kimyasal ısı pompalı kurutma sistemleri

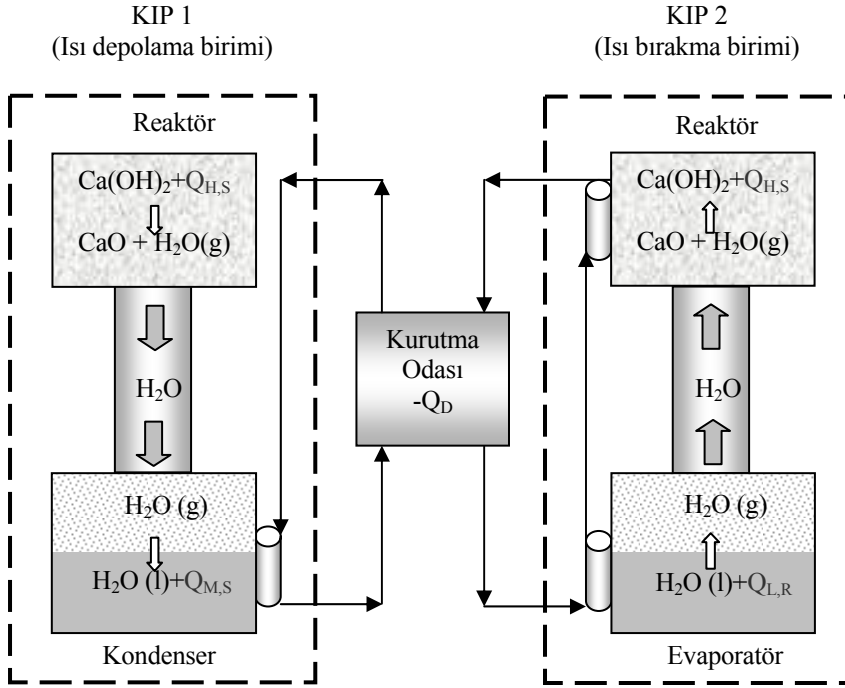
Kimyasal ısı pompası, kurutmada verimli enerji kullanımı için faydalı teknolojilerden biri olarak önerilmiştir. Kimyasal ısı pompasında, kurutucudan çıkan atık ısı, güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi termal enerjiler, uygun dizayn edilmiş bir reaktörde endotermik bir reaksiyon aracılığıyla kimyasal enerji formunda depolanabilir ve ısı gereken periyot boyunca ekzo/endotermik reaksiyonlar sayesinde çeşitli sıcaklık düzeylerindeki enerji salınabilir (Goetz et al., 1991; Mbaye et al., 1997; Ogura and Mujumdar, 2000; Ogura et al., 2002).

Ogura and Mujumdar (2000) kalsiyum oksit hidrasyon/dehidrasyon reaksiyonunun, sıcaklık düzeyi, güvenlik, korozyon ve maliyet açısından bakıldığında kimyasal ısı pompalı kurutma sistemleri için en uygun bulunduğunu bildirmişlerdir.

$\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaksiyonunun gerçekleşmesi ile ısıtma ve soğutma durumlarının oluştuğu bir kimyasal IPK sistemi şekil 3.4'te gösterilmiştir (Ogura et al., 2005).

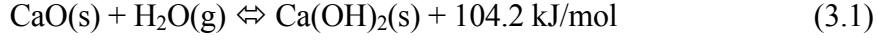
Ogura et al. (2002) kimyasal ısı pompası kullanan kesikli bir kurutucudaki ısı ve kütle transfer performansını deneysel bir çalışma ile sunmuşlardır. Bu sistemde, tek bir silindirik reaktör, kalsiyum

oksid/kalsiyum hidroksit hidrasyon/dehidrasyon dönüşümlü reaksiyonunu kullanan kimyasal ısı pompalı bir kurutucunun temel bileşeni olarak kurulmuştur. Bu çalışma, havanın 100 °C civarına ısıtılması için kimyasal ısı pompasının ısıyı bırakma basamağında yapılmıştır. Evaporatör sıcaklığı 17 °C düzeyinde korunurken, hidrasyon reaktör sıcaklığı 300 °C'nin üstüne çıkar.



Şekil 3.4 $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaksiyonunu kullanan bir kimyasal IPK sisteminin şematik gösterimi (Ogura et al., 2005)

$\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ kimyasal ısı pompası reaksiyonu aşağıdaki denkliliklerle açıklanabilir (Matsuda et al., 1985; Ogura et al., 2002):



Rolf and Corp (1990) ağaç kabuğu ve kereste gibi büyük hacimli materyallerin kurutulması için kimyasal ısı pompalı bir kurutucu geliştirmişlerdir. Bu kurutma yöntemi tüm endüstriyel kurutma proseslerine kolayca adapte edilebilir, fakat özellikle kağıt hamuru kurutma işlemleri ve kağıt endüstrisi için uygundur.

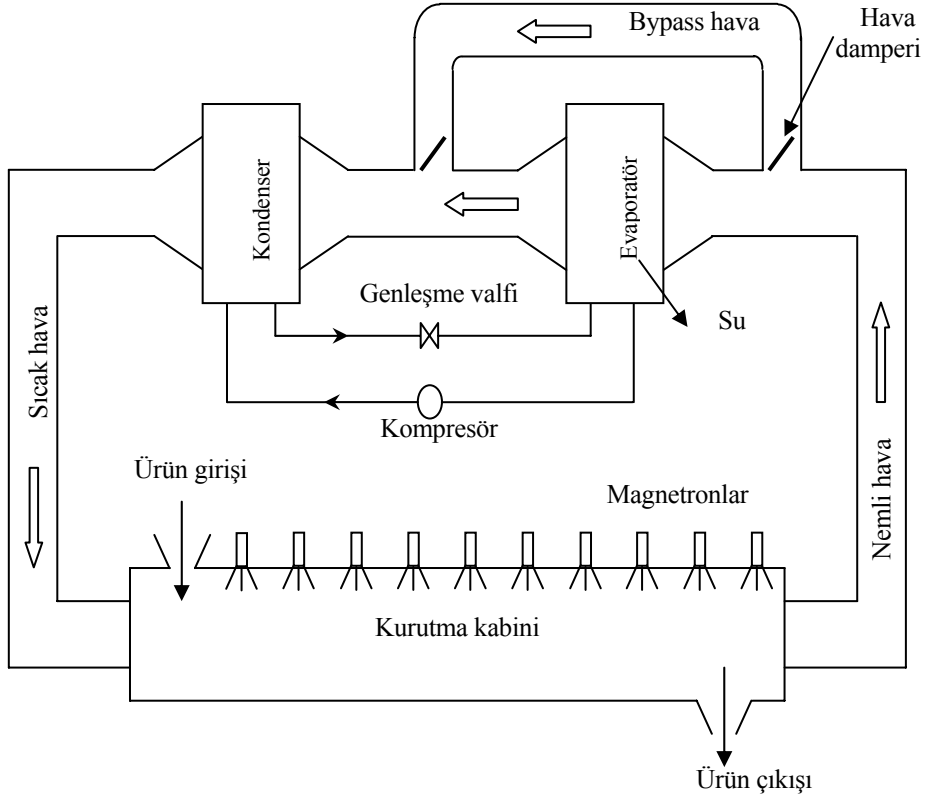
3.1.4 Hibrit ısı pompalı kurutma sistemleri

Bazı ısı pompalı kurutma sistemleri güneş, mikrodalga, infrared veya geleneksel enerji kaynakları gibi hibrid kaynaklar içerir. Isı pompası ile mikrodalga kurutmanın birlikte kullanıldığı literatürdeki ilk çalışmalar Lawton (1978) ve Metaxas and Meredith (1983) tarafından sunulmuştur. Bu hibrid kurutma sisteminin fizibilitesi ve toplam performansı Jia et al. (1993) tarafından belirlenmiştir. Bu çalışma, ısı pompası destekli mikrodalga kurutmanın dikkatli bir şekilde tasarlanması ile geleneksel konvektif kurutma ile enerji tüketimi açısından karşılaştırılabileceğine dikkat çekmektedir. Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.

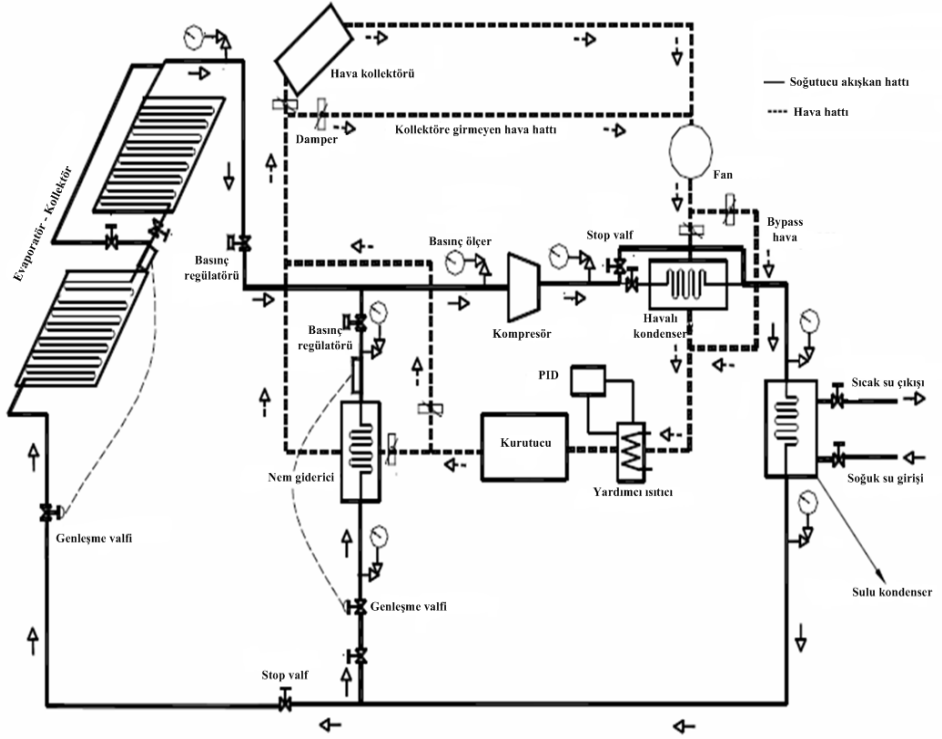
Zbicinski et al. (1992), aralıklı radyasyon kurutma modeli ile konvektif kurutmanın birleştirildiği sistemi ısıya duyarlı materyallerin kurutulması için önermektedirler.

Marshall and Metaxas (1998), radyo dalgaları ile ısıtma ile geleneksel ısı pompalı kurutmayı kombine etmişlerdir. Tipik bir radyo dalgaları destekli ısı pompalı bir kurutucu, radyo dalgaları enerjisi açığa çıkaran uygun bir radyo dalgaları üreten sistemle donatılmış bir buhar sıkıştırılmalı ısı pompası sistemini kapsamaktadır.

Hawlader and Jahangeer (2006), yeşil fasulye kurutmak için tam donanımlı deneysel bir güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sistemi kurmuşlardır. Bu sistem Şekil 3.6’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Isı pompası destekli bir mikrodalga kurutma sistemi
(Jia et al., 1993)



Şekil 3.6 Güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sistemi
(Hawlder and Jahangeer, 2006)

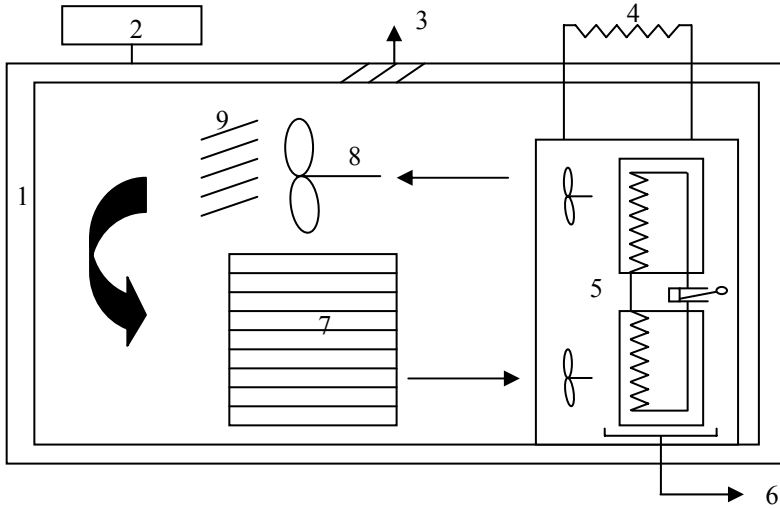
3.2 Kurutucu Tiplerine Göre Yapılan Sınıflandırma

Kesikli raf veya tepsili kurutucular veya fırınlar (odun için) ısı pompası ile birlikte en yaygın kullanılan kurutucular olsa da, farklı tipte kurutucular (örneğin, akışkan yatak kurutucular (Strommen and Jonassen, 1996; Alves-Filho and Strommen, 1996), dönel kurutucular, tünel kurutucular, v.b.) da kullanılabilir. Bununla birlikte, çok yüksek miktarlarda hava kullanan flaş veya sprey kurutucular ısı pompası uygulamaları için özellikle uygun değildir (Chua et al. 2002).

3.2.1 Kesikli kurutma sistemleri

Isı pompalı kurutma sistemi kesikli kurutma işlemi için sürekli olana göre daha uygundur, çünkü kesikli sistemler çok düşük bir hava miktarı ile toplam resirkülasyona izin vererek yüksek ısıl verimlilik sağlar. Kompresör basıncı kuruma oranından bağımsız olarak nispeten sabittir, bu da proses havası şartlarının veya kuruma oranının ısı pompalı kurutma sisteminin maliyeti üzerinde ihmal edilebilir bir rolü olduğuna işaret eder. Bu nedenle, kesikli kurutma maliyeti kurutma süresine bağlıdır (Prasertsan and Saen-saby, 1998).

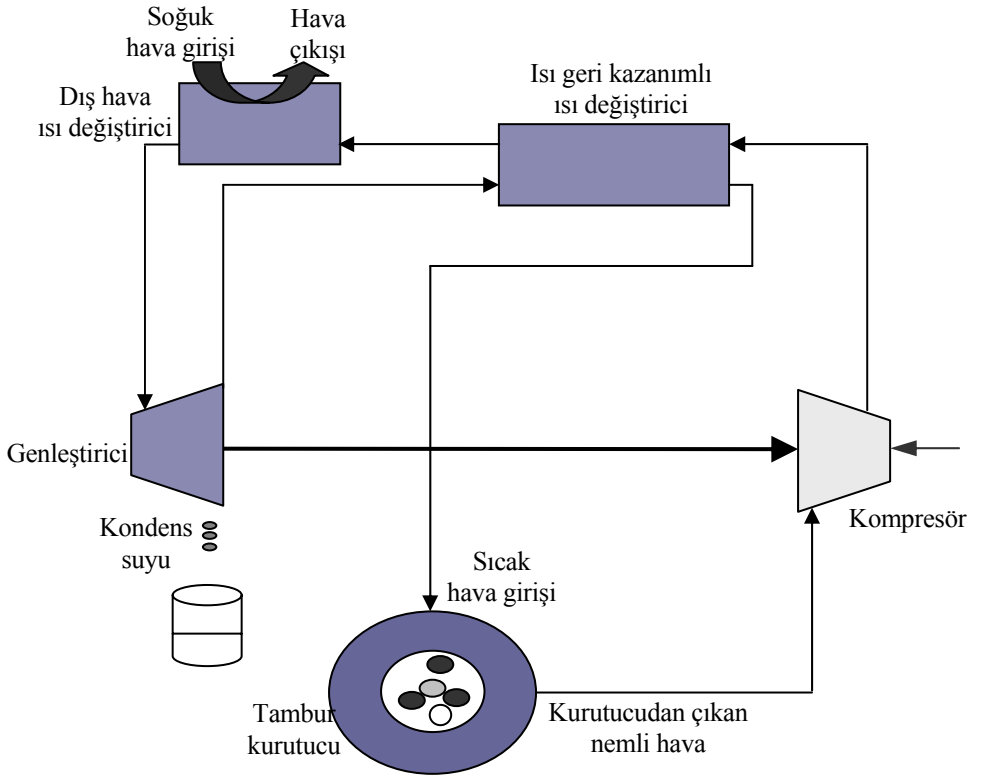
Isı pompalı kesikli bir kurutucu örneği, Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Rahman et al. (1998), bu sistemi bezelyelerin desorpsiyon izotermi ve kuruma kinetiğinin ölçülmesi ve modellenmesi için kullanmışlardır.



Şekil 3.7 IP kesikli bir kurutma sistemi (Rahman et. al., 1998)

1, Buhar geçirmeyen izolasyonlu yapı; 2, nemlendirme ünitesi; 3, fazla ısı tahliye bölümü; 4, dış kondenser; 5, ısı pompalı nem giderici; 6, kondensat; 7, ürün rafları; 8, birincil hava sirkülasyon fanı; 9, hava distribütörü.

Hava kaynaklı bir ısı pompası çevriminin fizibilitesi dönel giysi kurutucu için Braun et al. (2002) tarafından incelenmiştir. Şekil 3.8’de de görüldüğü gibi, bu tip bir kurutucu kesikli kurutucu için örnek teşkil etmektedir. Dönel kurutucular özellikle giysi kurutma için kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ısı pompalı dönel giysi kurutucunun performansı, bir dizi bileşen parametresi için geleneksel bir elektrikli kurutucu ile karşılaştırılmıştır. Bu kurutucu elektrikli olana göre enerji tasarrufunda % 40’a kadar iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 3.8 Isı pompalı dönel giysi kurutma sistemi (Braun et al., 2002)

3.2.2 Sürekli kurutma sistemleri

Sürekli yatakta kurutma kesikli kurutmaya göre umut verici sonuçlar göstermiştir ve çeşitli bitkiler için potansiyel olarak daha iyi bir seçenek olabileceği düşünülmektedir. Isı pompası destekli sürekli yatak kurutucular üzerine IP destekli kesikli kurutuculara göre oldukça az çalışma yapılmıştır (Adapa and Schoenau, 2005).

Strommen (1980), ısıya hassas ürünler için tünel tipi bir ısı pompalı kurutucu geliştirmiştir. Bu sistemde, kurutma sıcaklığı 0 °C ile 70 °C arasında değişmektedir (Kudra and Mujumdar, 2002).

Jolly et al. (1990), ısı pompalı bir kurutucuda sürekli operasyon için, sistemdeki hava şartlarının, evaporatördeki ısı transfer oranının, kondenser ve harici atık sisteminin, ısı pompalı kurutucunun performans katsayısının ve ulaşılabilen maksimum verimliliğin kontrol edildiği bir model geliştirmişlerdir. Bu model Jia et al. (1990) ve Clements et al. (1993) tarafından ısı pompası destekli sürekli bir kurutucunun performansını belirlemek için kullanılmıştır.

Clements et al. (1993), sürekli yatak kurutucuda ıslak sünger kurutmuşlar ve kurutucudan çıkan havanın nispi nem değerinin % 32'den % 80'e çıkması ile kurutucunun özgül nem çekme oranının 1.25 kg/kWh'ten iki katına çıkarak 2.5 kg/kWh değerine ulaştığını göstermişlerdir.

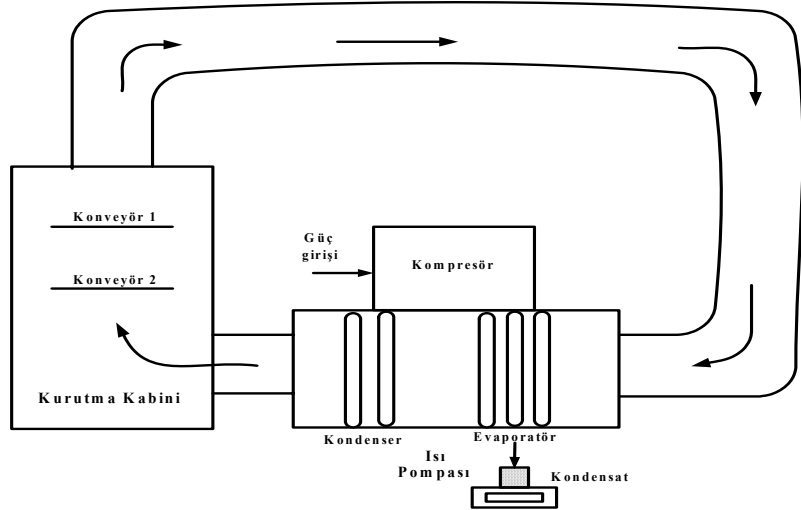
Isı pompası ve mikrodalga destekli hibrit kurutma sisteminin fizibilitesi ve toplam performansı Jia et al. (1993) tarafından belirlenmiştir. Şekil 3.5'de gösterilen bu sistemde, havuç dilimleri ve bütün kök zencefiller kurutulmuştur. Sadece ısı pompalı kurutmaya göre kombine ısı pompalı mikrodalga kurutma daha yüksek ürün kalitesini daha düşük ÖNÇO ile sağlamıştır, bu varyasyon giren mikrodalga güç miktarına göre

orantılıdır (Jia et al., 1993).

Chou et al. (1999), kurutucu performansı ve tasarım parametresi olarak temas faktörü kullanan bir yaklaşım tanımlamışlardır. Bu çalışmada, tarımsal ürünlerin ters akışlı bir tünel kurutucuda kurutulması referans durum çalışması olarak kullanılmıştır.

Kesikli kurutuculardan farklı olarak, sürekli kurutucuların kontrolü; enerji akışı ve sıcaklıklar sabit olduğu için, materyal daha uniform ve her tarafında sabit bir oranda akış olduğundan dolayı daha kolaydır (Adapa and Schoenau, 2005). Sürekli kurutma sistemlerinin konstrüksiyonu nedeniyle yüksek mühendislik, modelleme ve tasarım maliyetleri gerekebilir, faydalarını tek başına enerji verimliliği yerine maliyet temeli üzerinde değerlendirmek gereklidir (Claussen et al., 2007).

Adapa and Schoenau (2005), çeşitli bitkilerin ticari olarak kurutulması ve işlenmesi için kullanılan prototip bir sürekli yatak kurutucuyu tasarlamış, geliştirmiş ve onaylamışlardır. Prototip ısı pompalı konveyör kurutma sisteminin blok diyagramı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 IP konveyör kurutma sistemi (Adapa and Schoenau, 2005)

3.2.3 Akışkan yatak kurutma sistemleri

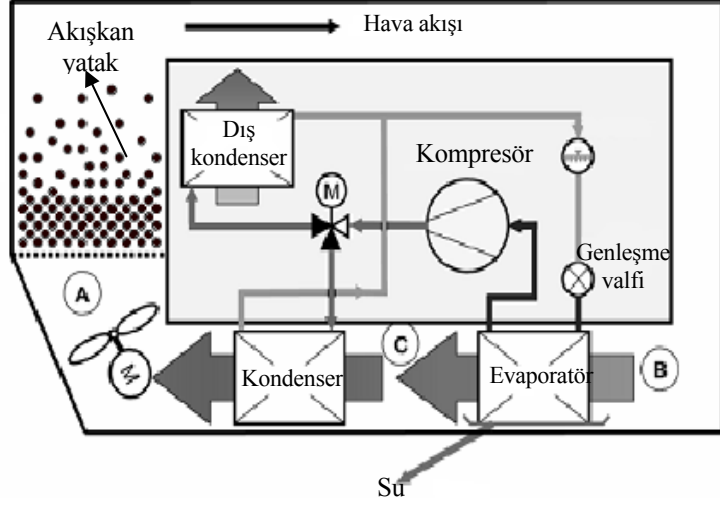
Akışkan yatak kurutmanın, gıda, seramik, ecza ve tarım endüstrilerinde granüle katıların kurutulması için pek çok uygulaması bulunmaktadır. 50 µm - 2000 µm aralığındaki tozların kurutulması için akışkan yatak kurutucu, diğer pek çok dönel, tünel, konveyör ve sürekli tepsili v.b. geleneksel kurutucu tipleri ile başarılı bir şekilde rekabet etmektedir (Chua et al., 2003). Akışkan yatak kurutucular basit bir şekilde yapılabilir ve ısı pompası sistemi ile kombine edilebilir; böylece gıda ve ilaç endüstrisinde rekabet edebilirler (Claussen et al., 2007).

Strommen and Kramer (1994), ısı pompalı düşük sıcaklıkta çalışan bir kurutucu konusunda çalışma yapmışlardır. Kurutucu, kurutma ortamı olarak hava veya inert gaz kullanılabilen akışkan yatak prensibi üzerine dayanmaktadır.

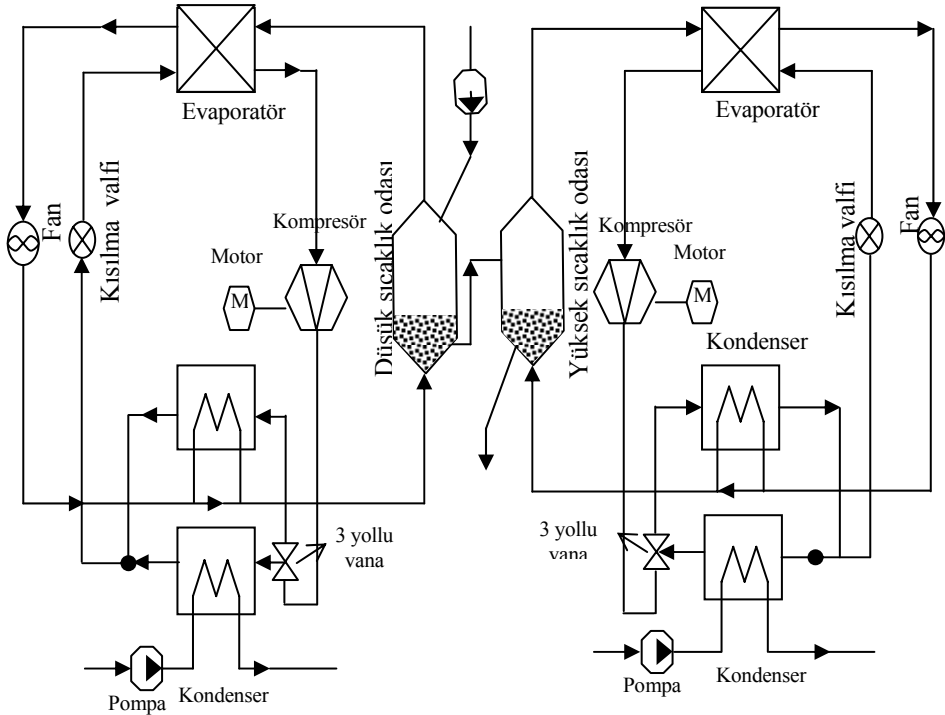
Strommen and Jonassen (1996) ve Alves-Filho and Strommen (1996), ısıya duyarlı ürünlerin kurutulması için yüksek ÖNÇO değerine sahip, yeni, ters akışlı ısı pompalı akışkan yatak kurutucuların geliştirilmesini anlatmışlardır.

Akışkan yatak ısı pompalı bir kurutma birimi bileşenleri ile birlikte Claussen et al. (2007) tarafından verilmiştir. Bu sistem Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Alves-Filho (1996) ve Alves-Filho et al. (1997), laboratuvar ölçekli tek akışkan yataklı bir ısı pompalı kurutucu tanımlamışlardır. Alves-Filho et al. (1998) iki bağımsız kurutma bölümü ve iki soğutucu akışkan döngüsüne sahip çoklu akışkan yataklı ısı pompalı bir kurutucu için bir simülasyon bileşen modeli sunmuşlardır. Biçimlendirilen çok basamaklı akışkan yatak kurutucunun planı Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3.10 Akışkan yatak IP kurutma sistemi (Claussen et al., 2008)



Şekil 3.11 Çok basamaklı akışkan yatak IPK (Alves-Filho et al., 1998)

Bu sistemde, çok basamaklı akışkan yatak ısı pompalı kurutucu, birbiriyle seri bağlanmış iki adet akışkan yatak ve kurutma kabineine koşullandırılmış hava sağlayan birbiriyle paralel bağlı iki ısı pompası sisteminden oluşur. Kurutma kabinleri seri olarak bağlanmıştır, böylece, bir tanesine nemli ürün girer ve yarı-kuru ürün olarak diğer kurutucuya geçer ve bu bölümden kurutulmuş ürün elde edilir.

Zhang et al. (2004), havuç küplerinin kurutulması için ısı pompası destekli akışkan yatak bir kurutucu tasarlamış ve kurmuşlardır. Bu çalışmada, havuç kurutma için nem çekme oranı ve özgül nem çekme oranı değerleri zamana bağlı olarak hızla azalmıştır.

3.3 Kurutulan Ürün Çeşitlerine Göre Yapılan Sınıflandırma

Isı pompalı kurutucular meyve ve sebzeler, et, kağıt, odun, kereste, giysi, seramik, kimyasal ve biyolojik materyaller gibi çeşitli ürünlerin kurutulması için kullanılmaktadır. Bu bölümde farklı ürünlerin ısı pompalı sistemde kurutulması ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Başlangıçtaki çalışmalar ısı pompası kullanılarak kurutulan tarım ürünlerinin renk ve aroma özelliklerinin geleneksel sıcak havalı kurutucular kullanılarak kurutulanlara göre daha iyi olduğunu vurgulamaktadır (Strommen and Kramer, 1994; Prasertsan and Saen-saby, 1998; Soponronnarit et al., 1998; Teeboonma et al., 2003).

Muz kurutma için kullanılan en popüler endüstriyel yöntemlerden biri ısı pompalı kurutmadır (Ranjan et al., 2004). Prasertsan and Saen-Saby (1998) muz kurutma için ısı pompalı kurutma kullanılması durumunda % 44'lük bir işletme maliyeti tasarrufuna ulaşılabildiğini bulmuşlardır. Chua et al. (2001) muz dilimlerinin iki basamaklı bir ısı pompalı kurutucuda kurutulması konusunda çalışmışlardır. Muz

dilimlerinin kesikli kurutulmasında zamana bağılı olarak değişen kurutma havası sıcaklığı, kuru ürünün renk özelliği üzerine olduğu kadar kuruma kinetiği üzerine de istenen etkiyi göstermiştir. Dandamrongrak et al., (2002, 2003) ısı pompalı nem alıcılı bir kurutma sisteminde kurutulan muzların kuruma oranı ve ince tabaka kuruma özellikleri üzerine ön işlemlerin etkilerini incelemiştir. Ranjan et al., (2004) geçici olarak birleştirilen ısı ve nem transfer denklemleri setinin iki boyutlu bir sonlu elemanlar formülünü ve çözümünü sunmuşlardır. Bu model, muzun sürekli kesikli kurutucuda olduğu kadar ısı pompalı bir kurutucuda da basamaklı olarak kurutulması için farklı kaynaklardan elde edilen deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ceylan et al. (2007), kivi, avokado ve muz kurutma için PID kontrollü bir ısı pompalı kurutucunun tasarımını yapmışlardır.

Sosle et al. (2000), ısı pompalı sistemde kurutulan elma dilimlerinin son ürün kalitesinin tüketici tercihleri açısından mükemmel olduğunu tespit etmişlerdir. Perera (2001), modifiye atmosfer şartlarında ısı pompalı sistemde kurutulan elmaların renk özelliklerinin çok iyi olduğunu ve C vitamininin korunduğunu gözlemlemiştir. Sosle et al. (2003) ısı pompalı bir kurutucunun elma kurutma için başarılı bir şekilde kullanılabildiğini kanıtlamışlardır. Yazarlar aynı zamanda elma kurutma için IPK'nın performansını değerlendirmişlerdir. Toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutucuda elma kurutulmasının performans değerlendirmesi ise ekserji analizi yöntemi kullanılarak Colak and Hepbasli (2005) tarafından yapılmıştır. Stawczyk et al. (2007) ısı pompası destekli atmosferik şartlarda dondurarak kurutma yapan bir sistem tasarlamış ve kurmuşlar; bu sistemde kurutmanın elma küplerinin kalitesi üzerine olan etkisi, konvektif ve vakum şartlarında dondurarak kurutma işlemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Vazquez et al. (1997), ısı pompası destekli, kapalı çevrim, sıcak hava konveksiyonlu kabin içeren pilot ölçekli bir kurutma sistemini

tanımlamışlar ve üzümün kuruma kinetiğini belirlemişlerdir. Xanthopoulos et al., (2007) bütün incirlerin deneysel bir kapalı döngü ısı pompalı sistemde tek tabaka halinde kurutulmasının matematik modellemesini yapmışlardır. Sunthonvit et al. (2007) kabin ve tünel kurutucularda dilimlenerek kurutulan meyvelerdeki uçucu bileşenlerin korunması için en uygun sistemin IPK olduğunu bildirmişlerdir.

Patates higro-termal özelliklerinden dolayı tipik bir ısıya hassas materyal olarak kullanılmaktadır. Isı pompalı sistemde kurutulmuş olan patates için toplam renk değişimindeki azalma Chua et al. (2000) tarafından % 87 olarak bulunmuştur. Ho et al. (2001), iki basamaklı bir ısı pompalı kurutma sisteminde ısıya duyarlı bir ürün olarak patates dilimlerinin kurutulması için bir optimizasyon şeması sunmuşlardır. Sun et al. (2005) patates kurutma için, eş zamanlı olarak kondüksiyon ve radyasyon ısıtma uygulamalarına izin verecek şekilde tasarlanmış kesikli bir IPK sistemini kullanmışlardır. Hawlader et al. (2006b), ısı pompalı kurutucuda inert çevre şartları altında patates, elma ve guava kurutulması konusunda çalışmışlar ve renk, yüzey pürüzlülüğü ve rehidrasyon yeteneği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dikdörtgen şeklindeki patates ve elma dilimleri kompozit gıda ürünleri için bir model olarak kesikli tip bir ısı pompalı kurutucuda Rahman et al. (2007) tarafından kurutulmuştur. Bu sistemde, kompozit ürün tek başına elma veya patates örneklerine göre daha iyi kuruma performansı göstermiştir.

Rossi et al. (1992), soğan dilimlerinin ısı pompalı bir sistemde kurutulması ile geleneksel kurutuculara kıyasla daha iyi ürün kalitesi ile birlikte % 30 civarında bir enerji tasarrufu elde etmişlerdir.

Wood (1994), IPK'da kurutulan zencefilin tat kalitesini araştırmışlardır. Bu ısı pompası çalışmasından elde edilen sonuçlar, uçucu bileşenlerin dondurarak kurutmaya göre daha yüksek konsantrasyonlarda tutulduğuna dikkat çekmektedir. Kısmi hava resirkülasyonu ile yapılan

sıcak havalı kurutma, ısı pompalı kurutmaya benzer sonuçlar vermiştir.

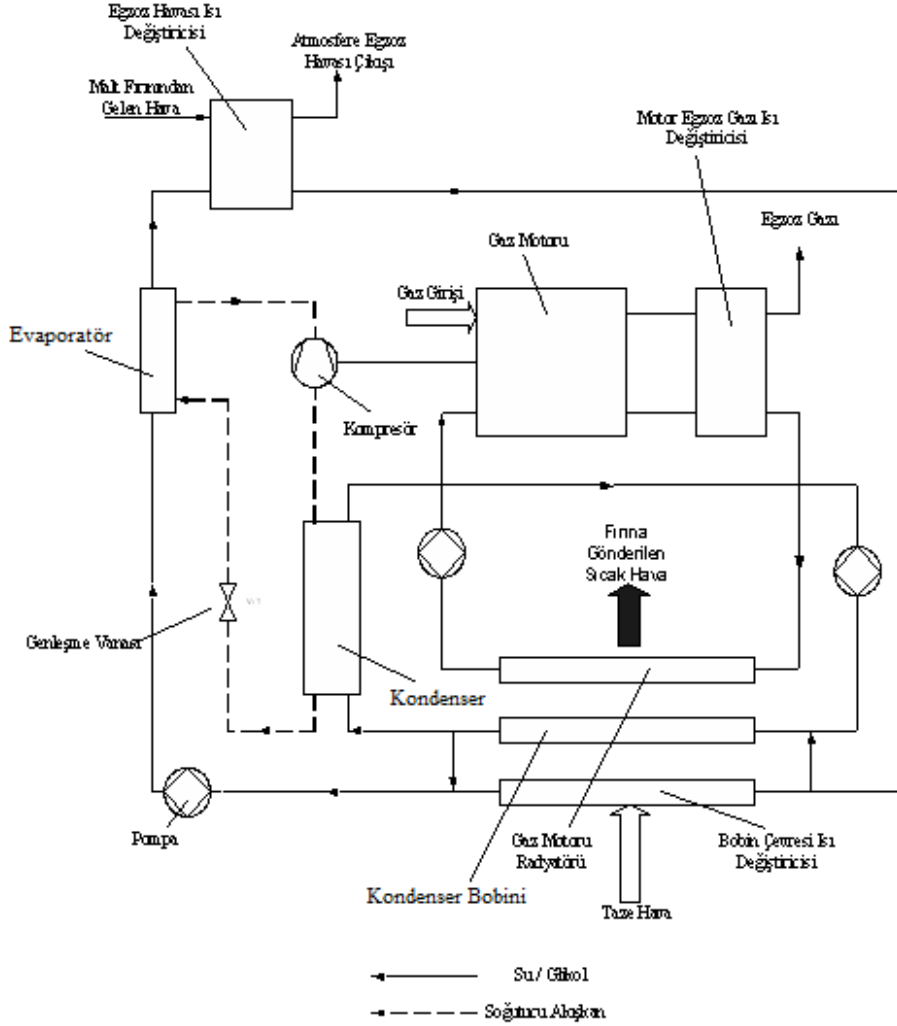
Chua and Chou (2005), yüksek kalitede kurutulmuş tarım ve deniz ürünleri elde etmek için, iyi bir hava şartlandırma kontrol mekanizması ile yüksek enerji verimliliğine sahip bir ısı pompalı kurutma sistemini tasarlamışlardır.

Rahman et al. (1998), IPK'da bezelyelerin ince tabaka kuruma kinetiği ve nem desorpsiyon izotermi için bir model geliştirmişlerdir. Adapa et al. (2002), ısı pompası destekli bir bitki kurutucu için basit bir matematik model geliştirmişler ve performansını belirlemişler ve modelin doğruluğunu deneysel sonuçlara dayanarak kanıtlamışlardır. Adapa and Schoenau (2005), ginseng, aromatik bitkiler ve ekinezya gibi özel bitkileri re-sirkülayonlu ısı pompalı sürekli bir yatak kurutucu sistemde kurutmuşlardır.

Alves-Filho et al. (2007), atmosferik şartlarda kırmızı biberlerin ısı pompalı sistemde kurutulması ile ilgili deneyleri anlatmışlardır. Bu çalışmada, vakum altında dondurarak kurutmaya kıyasla kurutma süresini ve maliyetini azaltmak için, 20 °C civarındaki evaporasyon sıcaklığı kuru biberdeki kırmızı ve yeşil rengin korunması için süblimleşme ile başarılı bir şekilde kombine edilmiştir.

Fatouh et al. (2006), kurutucu verimliliğini artırmak ve enerji tüketimini azaltmak için, ısı pompası ünitesi ile desteklenen bir kurutucu kullanarak çeşitli aromatik bitkilerin (ebegümece, nane ve maydanoz) kuruma karakteristiklerini belirlemişlerdir. Saplarından ayrılmış küçük boyuttaki bitkilerin düşük enerji tüketimi ve kuruma süresine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Kuzgunkaya Hancıoğlu and Hepbaslı (2007 a,b) toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutucuda iki farklı hava sıcaklığında defne yapraklarının kurutulmasının performans değerlendirmesini gerçekleştirmişlerdir.

Newbert (1985), maltın gaz motorlu ısı pompalı bir kurutucuda kurutulması ile enerji tüketiminin % 40 azaldığını bulmuşlardır. Bu sistem Şekil 3.12’de gösterilmiştir (Hepbasli et al., 2009).



Şekil 3.12 Gaz motoru tahrikli IPK sistemi (Hepbasli et al., 2009)

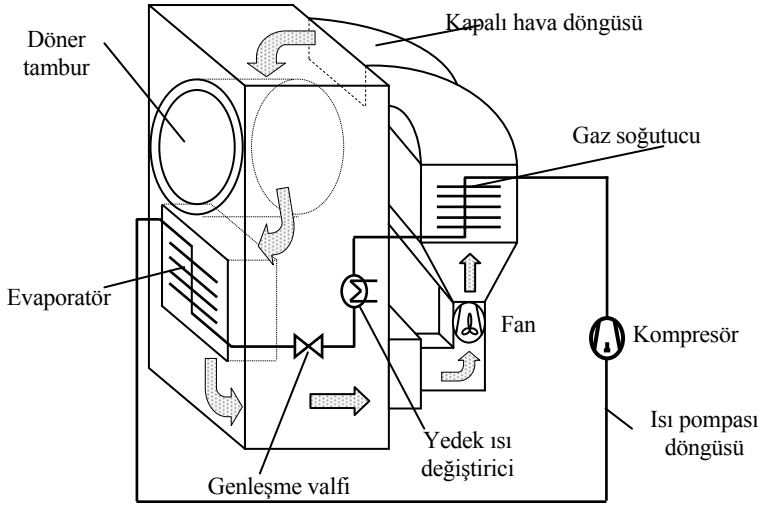
Namsanguan et al. (2004), kızgın buharlı kurutmayı takiben ısı pompalı kurutma yapılan karideslerde tek basamaklı kızgın buharlı sistemde kurutulanlara göre, daha düşük seviyede büzüşme, yüksek oranda rehidrasyon yeteneği, daha iyi renk, daha az sertleşme ve yumuşama ve daha fazla gözenek olduğunu göstermişlerdir. Nathakaranakule et al. (2007), tavuk eti kurutma için farklı şekilde kombine edilmiş kızgın buharlı kurutma teknikleri konusunda çalışmışlardır. Isı pompalı bir sistemde kurutulan istavritlerin kuruma karakteristikleri Shi et al. (2008) tarafından belirlenmiştir.

Cardona et al. (2002), maya kültürü hazırlamak için laktik asit bakterilerinin dondurularak kurutulmasına alternatif olarak ısı pompalı kurutma konusunda çalışma yapmışlardır.

Kağıt kurutma için absorpsiyonlu ısı pompasının farklı uygulamaları Friedel (1984) tarafından araştırılmıştır. Açık bir absorpsiyonlu ısı pompası konfigürasyonu Lazzarin and Longo (1994) tarafından konveksiyon kurutma için havanın yeniden ısıtılması ve neminin alınması amacıyla kullanılmıştır. Bu sistem geleneksel açık döngü kurutucuya göre, hava resirkülasyonu ve ısı geri kazanımı ile % 30 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Abrahamsson et al. (1997), kağıt kurutma işleminde bazı noktalarda tespit ettikleri atık ısıların, sıkıştırılmalı ve absorpsiyonlu ısı pompalarına özel önem verilmesi ile değişik ısı pompası sistemlerinde ısı geri kazanımı için kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

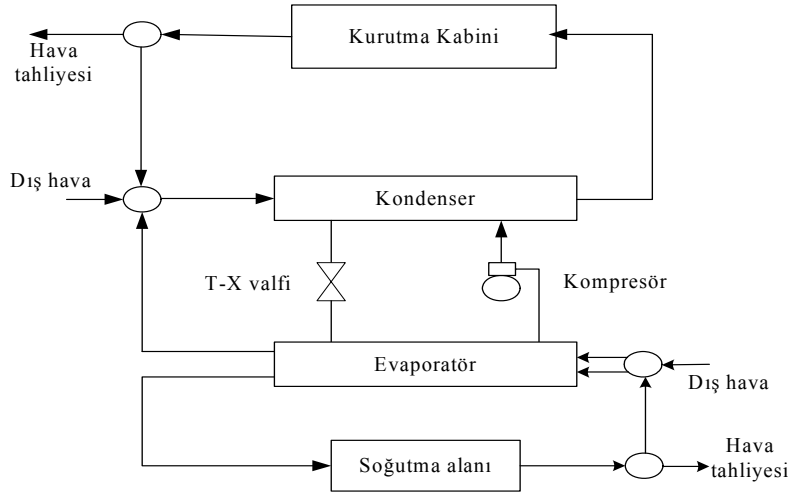
Ogura et al. (2004), endüstriyel bir seramik kurutma prosesi için enerji ve maliyet tasarrufu bakış açısıyla yeni bir kimyasal ısı pompalı kurutma sisteminin potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, endüstriyel seramik kurutma prosesinde, geleneksel gaz yakan boyler kullanan kurutma işlemine göre, enerji ve maliyet değerlerinin kimyasal ısı pompalı kurutma sisteminin kullanılması ile yarıdan daha aza indiği bulunmuştur.

Gopalnarayan et al. (1997), giysi kurutma için kullanılan kapalı çevrim bir ısı pompalı kurutucu için bir simülasyon yöntemi tanımlamışlardır. Schmidt et al. (1998), iki adet nem alıcılı ısı pompası çevriminin termodinamik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Klocker et al. (2001), çalışma akışkanı olarak CO₂ kullanan, laboratuvar ölçekli bir çamaşır kurutucuyu tasarlamış ve kurmuşlardır. Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Çalışma akışkanı olarak CO₂ kullanan prototip bir ısı pompalı kurutucu (Klocker et al., 2001)

Braun et al. (2002), tamburlu bir giysi kurutucu için kullanılan hava kaynaklı bir ısı pompası çevriminin fizibilitesini anlatmışlardır. Oktay (2003) ve Oktay and Hepbasli (2003), ısı pompası destekli mekanik açacaklı bir kurutma sisteminin performans değerlendirmesini ıslak yün kurutma için yapmışlardır. Ameen and Bari (2004), evsel bir iklimlendirme cihazından atmosfere bırakılan kondenser atık ısısının giysi kurutma için kullanılmasının fizibilite çalışmasını yapmışlardır. Bu sistem Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14 Giysi kurutma için entegre bir IPK (Ameen and Bari, 2004)

Nem alıcılı ısı pompaları kereste ve diğer ısıya duyarlı materyallerin kurutulması için kullanılan başlıca sistemlerdir (Ameen and Bari, 2004). Oda tipindeki odun kurutma fırınları için yaygın olarak kullanılan modüler ısı pompalı kurutucular, nem alıcının işlemin gerektirdiği esneklikte hareket etmesine izin verecek şekilde tasarlanmıştır (Carrington et al., 1995). Isı pompalı nem giderici bir fırının performansı Bannister et al. (1998) tarafından değerlendirilmiş ve kerestenin ticari boyutta kurutulması süresince fırının enerji dengesi hesaplanmıştır. Elektrikli ısı pompalı kurutma, çeşitli yumuşak ve sert odunlardan yapılmış kerestelerin kurutulması için Fernandez-Golfın Seco et al. (2004) tarafından değerlendirilmiştir. Bu çalışmada araştırmacılar, geleneksel fırın kurutma için bildirilen değerlerden çok daha düşük spesifik enerji tüketim değerleri elde etmişlerdir. Ceylan et al. (2007), kavak ve çam kerestelerinin IPK'da kurutulmasının enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır.

4. KURUTMA TEORİSİ

Katının içerdiği nemin uzaklaştırılması olarak tanımlanan kurutma, ısı ve kütle aktarımının aynı anda gözlendiği karmaşık bir olaydır. Kuruma sırasında, kurutucu gazdan katıya doğru ısı aktarımı gerçekleşir. Aktarılan kütlelerin katı-gaz ara yüzeyinde birikerek nemli bir tabaka oluşturmasını önlemek amacıyla, kurutucu gazın hareketliliği sağlanır.

Gıda maddelerinin kurutulmasındaki en önemli konulardan biri gıda maddesindeki suyun rolüdür. Rockland (1969) bağlı suyun kimyasal, fiziksel ve termodinamik özelliklerini anlatırken, gıda maddelerinde üç tip bağlı suyun bulunabileceğine işaret etmiştir. Bunlar; (a) karboksil ve amino grupları gibi iyonik gruplara bağlı olan su molekülleri, (b) hidroksil ve amid gruplarına hidrojen bağıyla bağlı su molekülleri ve (c) maddenin gözeneklerinde bulunan, gözenekler arası kapiler kuvvetler ve çözünebilir bileşikler nedeniyle, buhar basıncı saf suyun buhar basıncından düşük olan, bağlı olmayan serbest su.

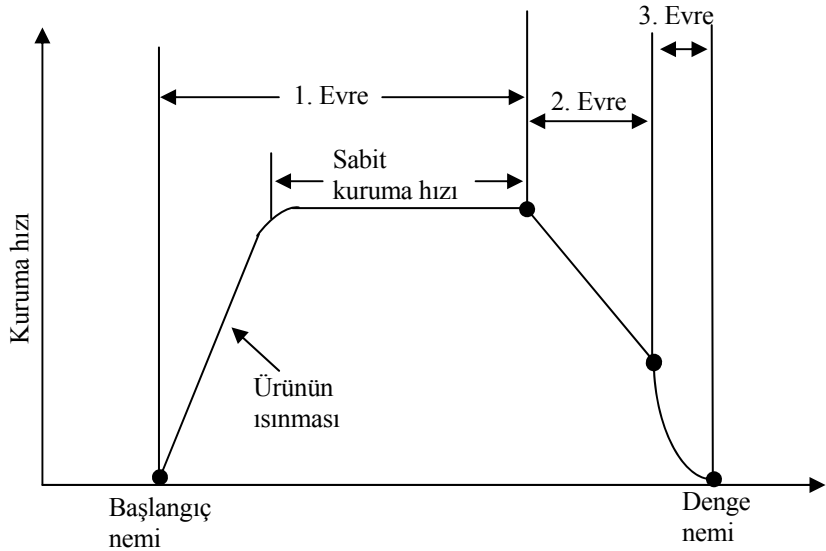
Ürünün kuruması, buharlaşma gizli ısını alan su moleküllerinin üründen atmosfere iletimi ile gerçekleştirilir. Gıda maddeleri kuru madde ağırlıklarının birkaç katı nem tutma özelliğine sahip higroskopik maddeler olup, kılcal-gözenekli yapıya sahiptirler (Öztekin ve Soysal, 1998). Kurutma işlemi sırasında suyun uzaklaştırılması zordur. Bu zorluk, suyun yukarıda sıralanan bulunma şekillerinden her biri için farklı düzeydedir. Yukarıdaki sıralama sondan başa doğru, ürünün nem miktarı azaldıkça buharlaştırılan suyun tipini göstermektedir. Bu, ilk olarak serbest suyun, arkasından hidrojene bağlı su moleküllerinin ve son olarak, iyonik gruplara bağlı suyun buharlaştırılıp uzaklaştırıldığı anlamına gelir. Bu bilgiler, nemin uzaklaştırılmasını sağlayan enerji gereksinimiyle de ilişkilidir. Her bir su tipinin uzaklaştırılması için gereken enerji miktarı farklıdır

(Heldman and Singh, 1989).

Gorling (1958), ürün içinde nemin yer değiştirmesine neden olan çeşitli mekanizmaları (a) kapiler kuvvetlerin neden olduğu sıvı hareketi, (b) sıvıların difüzyonu, (c) yüzey difüzyonu ve (d) su buharı difüzyonu olarak anlatmaktadır.

4.1 Kuruma Evreleri

Kılcal-gözenekli yapıya sahip bir biyolojik materyalden (tane, yaprak vb.) nem kaybı üç aşamada gerçekleşir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ısınan ürün sabit kuruma evresine ulaşır. Bu evrede, nemin üründen uzaklaşma debisi, ürün içindeki veya üstündeki suyun buharlaşma debisiyle sınırlıdır. Buharlaşmanın olduğu yüzeye nem transferi, yüzeyde gerçekleşmekte olan buharlaşmadan daha hızlı olduğu müddetçe bu tip kurutma devam eder.



Şekil 4.1 Tipik bir kuruma debisi eğrisi

Kritik nem miktarına ulaştıktan sonra, kuruma işlemi azalan hızda devam eder. Azalan hızın başladığı ikinci evrede, buharlaşmanın gerçekleştiği sınır tabakası yüzeyden iç kısımlara doğru ilerler. Bazı ürünlerde birden fazla azalan kuruma debisi periyodu gerçekleşebilir ve nem miktarı azaldıkça ikinci veya üçüncü azalan debi periyodu görülebilir.

Üçüncü kuruma evresinde sadece çok küçük kılcal borularda var olan nemin buharlaşması gerçekleşir. Bu aşamada kuruma hızı giderek azalır ve denge konumuna ulaşır. Kuruma esnasında ürünü çevreleyen atmosferin buhar basıncı, ürün içindeki suyun buhar basıncından fazla olduğu zaman üründen atmosfere olan nem iletimi durur. Denge konumuna ulaşıldığında ürünü çevreleyen havanın özelliklerinde bir değişiklik olmadığı sürece ürün nemi değişmez. Bu koşullardaki ürün nemine '*ürün denge nemi*', hava nemine de '*denge bağlı nemi*' adı verilir.

Ürün denge nemleri genellikle deneysel olarak elde edilir. Ürün nemi yaş veya kuru madde miktarına göre tanımlanır. Kuru madde esasına göre ürün nemi (N_{kb} , kuru baz) üründeki nem miktarının (m_N), kuru madde miktarına (m_{km}) oranıdır:

$$N_{kb} = \frac{m_n}{m_{km}} \quad (4.1)$$

Yaş madde esasına göre ürün nemi (N_{yb} , yaş baz) üründeki nem miktarının (m_N), ürünün toplam kütlesine ($m = m_N + m_{km}$) oranı olarak tanımlanır:

$$N_{yb} = \frac{m_n}{m} \quad (4.2)$$

Kurutma hesaplarında, ürün neminin yanı sıra sık kullanılan diğer bir büyüklük de *kuruma akımı*'dir. Ortalama kuruma akımı ($N_{v,ort}$, $\text{kg/m}^2\text{h}$), belirli bir (t,h) süre içinde ürünün birim kuruma yüzeyinden (A , m^2) uzaklaştırılan neme (m_u) göre hesaplanır;

$$N_{v,ort} = \frac{m_u}{A.t} \quad (4.3)$$

Kuru baza göre nem (N_{kb}) eğrisinin diferansiyeli, anlık kuruma akımını, (N_v , kg/m²h), verir.

$$N_{v,ort} = -\frac{m_{km}}{A} \frac{dN_{kb}}{dt} \quad (4.4)$$

Kurutulacak materyalin nem içeriği; kurutma açısından karakteristik olan değerlerine göre; denge nemi, kritik nem, maksimum nem miktarı, başlangıç nemi ve maksimum higroskopik nem olarak adlandırılabilir.

Denge nemi: Katının kurutma sonunda ulaşabileceği en düşük nem değeri olup, kurutucu gaz içindeki buhar miktarı ile denge halindedir.

Kritik nem: Sabit bir değerde seyreden kuruma hızının azalmaya başladığı noktadaki nem değeridir.

Maksimum nem içeriği: Katı içindeki tüm boşlukların sıvı ile dolu olduğu andaki nem değeridir.

Başlangıç nemi: Kurutmanın başlangıcındaki nem değeridir.

Maksimum higroskopik nem içeriği: Kurutucu gazın doymuş olduğu durumdaki nem değeridir.

Kuruma debisini kontrol eden önemli bir faktör de, nem miktarının azalması ile birlikte meydana gelen büzülme olayıdır. Bu özellik bakımından maddeler önemli derecede farklılık gösterir. Sert, gözenekli veya gözeneksiz katılar, kuruma sırasında önemli derecede büzülme göstermezler. Buna karşılık, koloidal ve lifli maddeler, nem kaybettikçe önemli derecede büzülürler. Büzülme üç farklı etkiye sahiptir; birincisi, maddenin birim ağırlığının yüzeyini değiştirmesidir. Bu husus gıda

maddeleri için özellikle doğrudur. Çünkü büzülme, hava ile temas eden madde yüzeyinin alanını önemli derecede değiştirir.

İkinci ve daha önemli olan etkisi, yüzeyde nemin buhar veya sıvı olarak geçişini engelleyen, sert bir kabuk tabakasının oluşmasıdır. Bu şekilde kabuk oluşması kurumayı büyük ölçüde yavaşlatır.

Büzülmenin üçüncü etkisi de maddenin çarpılmasına, yarılmasına veya tüm madde yapısının değişmesine sebep olur.

Çarpılma, yarıma veya sert bir yüzey tabakası meydana getirmeye meyilli olan maddeler, nemli hava kullanılarak kurutulurlar. Bu durumda hava ile katı maddenin yüzeyi arasındaki nem farkı, kurumayı yavaşlatmak amacı ile azaltılmış olur. Bu, içten dışa doğru olan nem farkının daha az olmasını mümkün kılarak, büzülmenin etkisini azaltır. Örneğin, kereste kurutucularında hava özellikle nemlendirilir ve böylece kurumanın ilk kademelerinde, madde ile hava arasında çok yüksek bir sıcaklık veya nem farkı oluşması önlenmiş olur. Böylece kuruma debisi, maddenin yeterli bir boyutsal sağlamlığa erişebileceği bir değere düşürülmüş olur.

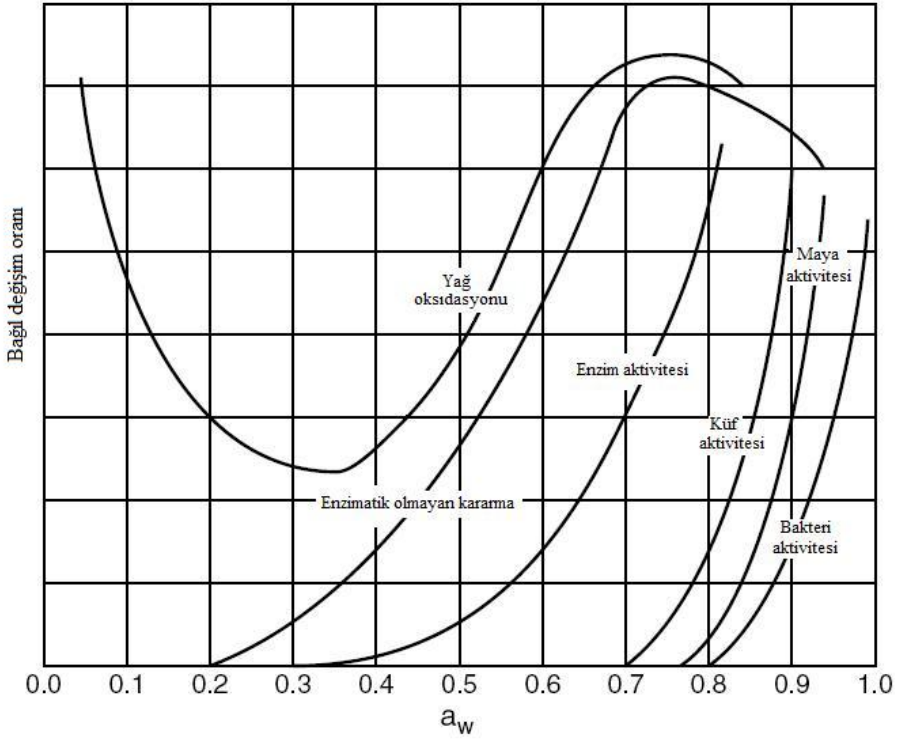
4.2 Su Aktivitesi

Kurutulmuş gıdalar, mikrobiyolojik aktivitenin olmadığı ve kimyasal ve biyokimyasal bozulma reaksiyonlarının minimum olduğu bir su aktivitesi değerine sahip oldukları için uzun süre saklanabilirler.

Su aktivitesi (a_w), denge bağıl nemi olarak ölçülür. a_w aynı zamanda ürünün içindeki serbest suyun kısmi basıncının (P_i) aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına (P^0) oranıdır.

$$a_w = \frac{P_i}{P^0} \quad (4.5)$$

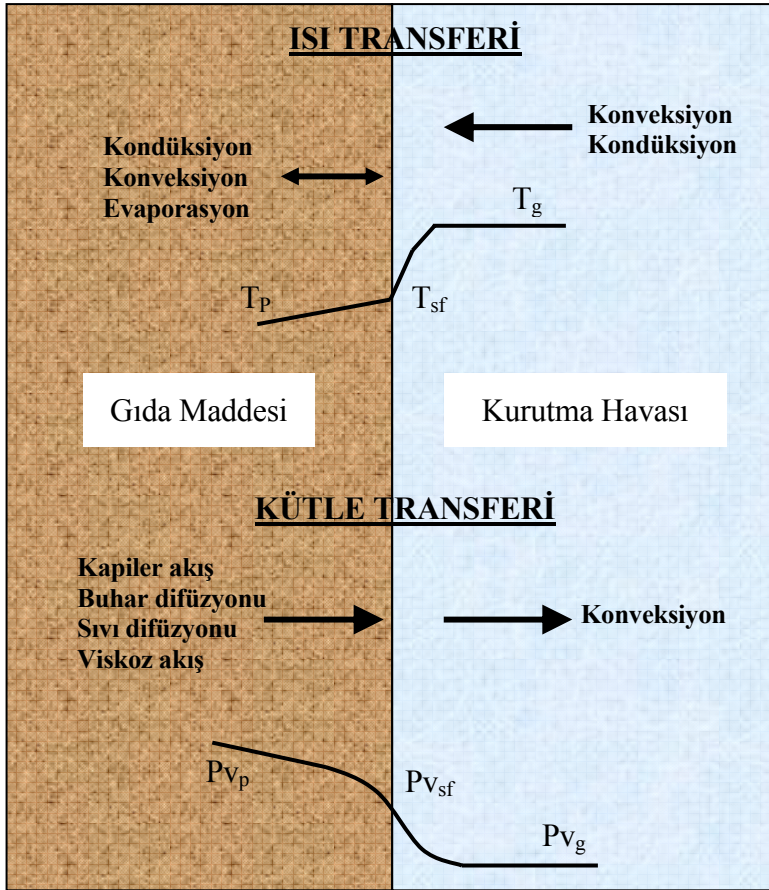
Su aktivitesi ile gıda içindeki bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki Şekil 4.2’de gösterilmiştir. a_w değerinin 0.7’nin altına düşmesi mikrobiyolojik bozulmayı önler. Bununla birlikte, $a_w = 0.7$ değerinin altında mikrobiyal bozulma olmamasına rağmen, bir gıda ürününün kurutularak başarılı bir şekilde muhafaza edilebilmesi için $a_w = 0.3$ ’ün altına düşürülerek diğer bozulma reaksiyonlarının da önlenmesi gereklidir (Toledo, 2007).



Şekil 4.2 Su aktivitesi ile gıdalardaki bozulma reaksiyonları arasındaki ilişki (Labuza et al., 1972)

4.3 Kurutma Sırasında Isı ve Kütle Transferi

Şekil 4.3'te şematik olarak gösterildiği gibi, kurutma boyunca iki çeşit transport prosesi eş zamanlı olarak meydana gelir: (1) kurutulacak materyalin yüzeyine dış çevreden ısı transferi ve (2) katı maddenin içinden yüzeye doğru gerçekleşen kütle transferi.



Şekil 4.3 Gıda maddeleri için kuruma olayının şematik gösterimi

Kurutulacak olan ürüne ve kurutma şartlarına bağlı olarak, buharlaşma ya yüzeyde ya da ürün içinde meydana gelir. Kuruma, hem dış koşullar hem de katının iç yapısından etkilenirse de bu faktörlerin etki derecesi kuruma periyoduna bağlı olarak değişir. Sabit hızda kuruma periyodunda, ısı ve kütle transferi katı-gaz ara yüzeyindeki koşullara bağlı iken, azalan hız periyodunda katı içindeki direnç önemli hale gelir.

Enerji, kurutulacak materyale şu yöntemlerle iletilir:

- Konveksiyon (Materyal içindeki suyun buharlaştırılması için gerekli olan ısı, buhar veya ısıtılmış hava olarak ürünün etrafından geçirilerek sağlandığında). Geleneksel kurutma proseslerinin çoğunda (tepsili, bantlı konveyör, flaş, akışkan yatak, püskürterek kurutma, vb) ısı transferi, esas olarak konveksiyonla sağlanır.

- Kondüksiyon (Materyal sıcak bir yüzeye temas halinde ise) Tepsili, tambur veya döner kurutucularda ürünün sıcak yüzeye temas etmesi durumunda ısı transferi kondüksiyonla sağlanır.

Kuruma için gerekli ısı, ısıl radyasyon, konveksiyon, iletim ya da mikro veya radyo dalgaları tarafından üretilen elektromanyetik enerjinin absorpsiyonu ile sağlanır.

Katı ile kurutucu gaz arasında, konvektif ısı ve kütle aktarımı hesaplamalarında,

$$q = h(T_s - T_g) \quad (4.5)$$

$$w = k(\rho_s - \rho_g) \quad (4.6)$$

eşitlikleri kullanılır. Isı ve kütle transfer katsayıları iki yöntemle hesaplanabilir. İlk yöntem, deneysel veriler veya ısı ve kütle transferini tanımlayan diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerinden uygun analitik bağlantıların bulunmasına dayanır. Laminer akım ve basit sistem

geometrisi dışında söz konusu denklemlerin çözümleri mümkün değildir. İkinci yöntem ise benzerlik teorisine dayanır. Kurutucu gaz ile ıslak katı arasındaki ısı ve kütle transferini etkileyen parametreler uygun birer boyutsuz sayı ile ifade edilebilir. Bu tür boyutsuz sayıların genel şekli, değişik ısı ve kütle transfer mekanizmaları için Tablo 4.1’de sunulmuştur (Strumillo and Kudra, 1986).

Tablo 4.1 Isı ve kütle transferini betimleyen boyutsuz sayılar (Strumillo and Kudra, 1986)

Aktarım Mekanizması	Aktarılan Büyüklük	Boyutsuz Sayı
Zorlamalı konveksiyon	Isı	$Nu = f_1(Re, Pr, Gu)$
Doğal konveksiyon	Isı	$Nu = f_2(Gr, Pr)$
Zorlamalı konveksiyon	Kütle	$Sh = f_3(Re, Sc, Gu)$
Doğal konveksiyon	Kütle	$Sh = f_4(Gr, Sc)$

Kurutma sırasında katı yüzeyi kurudukça, aktarılan ısının bir kısmı katıyı ısıtmak için harcanacağından, katının sıcaklığı artar. Bu sıcaklık artışına bağlı olarak sıvının katı içindeki etkin yayılım katsayısı da artar. Katı maddenin sıcaklığının daha da artması durumunda, nem yüzeye ulaşmadan buharlaşacağı için, buhar difüzyonu ve buna bağlı olarak da kuruma hızında değişiklikler oluşur. Katı içinde ısı ve kütle iletimle aktarıldığından, aktarım katsayılarının bulunmasında deneysel yöntemler daha yaygın olarak kullanılır. Isı aktarımında, nem içeriğine göre katılar üç gruba ayrılmış ve her bir grup için ısı aktarım katsayıları tanımlanmıştır (Strumillo and Kudra, 1986).

4.4 Uygun Kurutucu Seçimi

Uygun kurutucu sistemi seçimi için dikkate alınması gereken kriterler aşağıda sıralanmıştır: (van't Land, 1991)

- Üretim kapasitesi
- Başlangıç nem içeriği
- Partikül boyut dağılımı
- Kuruma eğrisi
- Maksimum ulaşılabilir ürün sıcaklığı
- Havanın özellikleri
- Toksik özellikler
- Elde edilmiş deneyimler
- Nem izotermi
- Korozyon özellikleri
- İlgili materyallerin fiziksel özellikleri

Kurutucu tipleri, aşağıdaki ana başlıklar altında kategorize edilebilir: (Driscoll, 2004)

• **Kurutucunun çalışma şekli:** Kesikli kurutuculara (örneğin, fırın tipi kurutucular) ürün yüklenir ve sistem çalıştırılır, sonra kurutulan ürün boşaltılır. Sürekli kurutuculara (örneğin, döner kurutucu) ise sistem çalışırken ürün yüklenir ve boşaltılır.

Kurutucunun büyüklüğü küçük (50 kg/h'e kadar), orta (50 kg/h – 1000 kg/h), veya büyük (1000 kg/h'in üzerinde) olabilir (Walas, 1988). Kurutucu kapasitesi, birim alandan birim zamanda buharlaştırılan suyun kilogram olarak miktarı ile de ifade edilebilir. Bu değer döner

kurutucularda çok yüksek (yaklaşık 50 kg/m²h) ve tepsili kurutucularda düşüktür (yaklaşık 1 kg/m²h).

• **Kurutucunun ısıtma şekli:** Direkt ısıtma, yanma odasından gelen gazların ürünle temas halinde olduğu ısıtma şeklidir; dolaylı ısıtma ise, ısının bir ısı değiştiricisi vasıtası ile gazlardan kurutma havasına aktarıldığı ve böylece ürünün olası kirleticilerden korunduğu ısıtma şeklidir. Isıtmanın elektriksel yollarla yapılması (ohmik, mikrodalga ve radyo dalgaları) özel bir durum olarak değerlendirilir.

• **Kurutulacak ürünün özellikleri:** Kurutulacak maddeler kuruma sırasındaki davranışlarına göre 3 temel gruba ayrılırlar:

1. Kuruma sırasında elastik özelliklerini koruyarak boyut değişikliğine uğrayan kolloid malzemeler.
2. Kuruma sonrasında kolayca öğütülebilir hale gelen kapiler – gözenekli malzemeler.
3. İlk iki sınıftaki malzemelerin özelliklerini aynı anda gösteren kolloidal – kapiler – gözenekli malzemeler.

Gözenek yarıçapı 10^{-5} m'den daha küçük olan tüm nemli katılar kapiler – gözenekli malzemeler olarak kabul edilebilirler. Bu tip katıların içinde nem hareketi esas olarak yüzey gerilimi kuvvetleri ile sağlanır. Gözenek yarıçapı 10^{-5} m'den büyük ise, yüzey gerilimi kuvvetlerinin yanı sıra yerçekimi kuvvetleri de göz önüne alınmalıdır. Bu tür özellikleri olan katılar gözenekli (poroz) katılar olarak adlandırılırlar.

Katıları içerdikleri nemin durumuna göre de sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmaya göre katılar;

- higroskopik,
- higroskopik olmayan,

- kısmen higroskopik

olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Higroskopik malzemeler bağı nem içeren mikrogözenekli yapılardır. İçerdikleri sıvının buhar basıncı, serbest yüzeyli saf sıvının verilen sıcaklıktaki buhar basıncından daha düşüktür. Kısmen higroskopik olan malzemeler makro gözenekli katılar olup, bağı nemin buhar basıncı, aynı sıcaklıktaki saf sıvının buhar basıncından çok az farklıdır.

Kurutulacak materyal ısıya duyarlı ise direkt ısıtma kullanılmalı veya kurutucudaki kalış süresi kısaltılmalıdır. Bu gibi durumlarda zorlamalı konveksiyonlu kurutucular veya spiral tüp kurutucuların kullanılması tavsiye edilir. Gıda maddelerinin kurutulmasında olduğu gibi, düşük sıcaklıklarda kurutma gerçekleştirilecekse, vakum altında, dondurarak veya ısı pompalı kurutma tercih edilebilir.

Havanın içindeki oksijen ile oksitlenebilecek malzemelerin kurutulmasında inert bir gaz (N_2 , CO_2 , vb) veya dolaylı ısıtma yöntemleri kullanılmalıdır.

- **Hava akışı yönü:** Kurutma havasının akışı, kurutulacak ürünün hareketli olduğu kurutucularda, ürün hareketi ile aynı doğrultuda, çapraz veya zıt yönde olabilir.

Eş yönlü hava akımı durumunda, girişte katı ile gaz arasındaki sıcaklık ve nem farkı dolayısı ile kuruma hızı yüksektir. Kurutucu içinden ilerledikçe aradaki sıcaklık ve nem farkı azalacağından kuruma hızı giderek düşer. Dolayısıyla, bu tür sistemlerde çok az miktarda kalan nemi ekonomik olarak uzaklaştırmak mümkün değildir. Kuru katının sıcaklığa duyarlı olduğu sistemlerde eş yönlü hava akımı kullanılabilir.

Zıt yönlü akımda, sıcak ve taze hava nispeten kuru katı, soğuk ve nemli hava ise nemi yüksek katı ile temas halindedir. Bu tür kurutucular sıcaklığa duyarlı maddelerin kurutulması için uygun değildir.

(Yapar, 1999).

Çapraz akımda tek bir kademede istenilen nem düzeyine kadar kurutma gerçekleştirilemez. Bu yöntemi kullanabilmek için katının sıcaklıktan etkilenmemesi gerekir. Kurumanın kısa sürede gerçekleştirilebilmesi bu yöntemin en önemli avantajlarından.

Farklı yöntemlerle sınıflandırılan kurutucu çeşitleri için yaklaşık 40 sınıf ve 100'den fazla alt sınıf vardır. Sınıflandırma yöntemleri, kurutucunun çalışma şekline (kesikli, sürekli), ürün besleme yöntemine (sıvı, süspansiyon, lapa, granül, lifli katı, pürüzlü katı, yoğun katı ve yaprak), ısıtma şekline (konveksiyon, temas, radyasyon, dielektrik), ürün hassasiyetine (vakum, düşük sıcaklık) göre olabilir (Walas, 1988).

Kurutmanın maliyeti kurutucu tasarımında ve seçiminde dikkate alınması gerekli olan önemli bir faktördür. Enerji, sermaye ve işçilik maliyetlerinden sonra, kurutma işlemlerindeki en önemli maliyettir (% 62) (Lee, 1983).

5. TEORİK ANALİZ

Bu bölüm, hem kurutma sistemleri için hem de ısı pompası için, enerji ve kütle denklileri, performans analizi ve belirsizlik analizi alt başlıklarından oluşmaktadır.

5.1 Kütle ve Enerji Denklileri

Bu bölümde, ısı pompası sistemi ve kurutma kabini için kütle, enerji, entropi ve ekserji denklileri verilmiştir.

5.1.1 Isı pompası için kütle ve enerji denklileri

Basit bir toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmiştir. Denkliler, tez kapsamındaki deneylerde kullanılmış olan bu toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi için verilmiştir.

Kütle dengesi

Genel kütle dengesi,

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (5.1)$$

Burada, \dot{m} kütleli debidir.

Toprak kaynaklı ısı pompası sistemi iki çevrim içermektedir. Isı pompasında soğutucu akışkan (R-22) ve toprak kaynaklı ısı değiştirici kısmında su devir daim etmektedir.

Soğutucu akışkan için kütle dengesi,

$$\dot{m}_{sa,giren} = \dot{m}_{sa,çikan} = \dot{m}_{sa} \quad (5.2)$$

Su için kütle dengesi,

$$\dot{m}_{su,giren} = \dot{m}_{su,çikan} = \dot{m}_{su} \quad (5.3)$$

şeklindedir.

Enerji Dengesi

Genel enerji dengesi aşağıdaki gibidir,

$$\sum \dot{Q}_{giren} = \sum \dot{Q}_{çikan} \quad (5.4)$$

Daha açık bir ifadeyle,

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{giren} \cdot h_{giren} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{çikan} \cdot h_{çikan} \quad (5.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Enerji dengesi eşitliği, giren enerji terimlerini çıkan enerji terimlerine eşitleyerek yazılır.

$$\dot{m}_{sa} (h_{giren} - h_{çikan}) = \dot{m}_{su} (h_{giren} - h_{çikan}) \quad (5.6)$$

Entropi Dengesi

Genel entropi denkliği,

$$\underbrace{\dot{S}_{giren} - \dot{S}_{çikan}}_{\text{Kütle ve ısı ile iletilen net entropi üretimi}} + \underbrace{\dot{S}_{üretilen}}_{\text{Entropi üretim oranı}} = 0 \quad (5.7)$$

Isı ve kütle akışı ile iletilen net entropi akımları, sırasıyla şu şekilde yazılır;

$$\dot{S}_{ısı} = \frac{\dot{Q}_k}{T_k}, \quad \dot{S}_m = \dot{m} \cdot s \quad (5.8)$$

$$\dot{S}_{üretilen} = \sum \dot{m}_{çikan} s_{çikan} - \sum \dot{m}_{giren} s_{giren} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (5.9)$$

Entropi üretimi bulunduktan sonra, tersinmezlik akımı (\dot{I}) aşağıdaki formülle bulunabilir;

$$\dot{I} = T_0 \cdot \dot{S}_{üretilen} \quad (5.10)$$

Ekserji Dengesi

Birim zamanda genel ekserji denkleği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum \dot{E}x_{giren} - \sum \dot{E}x_{çikan} = \sum \dot{E}x_{yikim} \quad (5.11)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_{giren} \psi_{giren} - \sum \dot{m}_{çikan} \psi_{çikan} = \dot{E}x_{yikim} \quad (5.12)$$

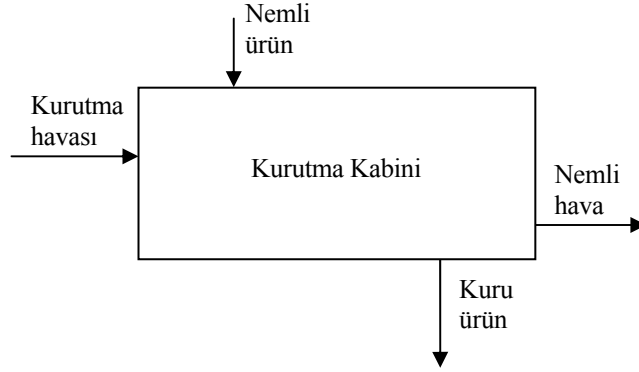
$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (5.13)$$

\dot{Q}_k k konumunda, T_k sıcaklığında sınır boyunca meydana gelen ısı transfer akımını, \dot{W} iş akımını, ψ ekserji akımını, s spesifik entropiyi ve alt indis olan 0 ölü hal durumundaki özellikleri ifade etmektedir.

$$\dot{E}x = \dot{m} \cdot \psi \quad (5.14)$$

5.1.2 Kurutucu için kütle ve enerji denklilikleri

Basit bir kurutucunun şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Basit bir kurutma kabininin şematik gösterimi

Kütle Dengesi

Genel kütle dengesi,

$$\dot{m}_{ü,giren} + \dot{m}_{h,giren} = \dot{m}_{ü,çikan} + \dot{m}_{h,çikan} \quad (5.15)$$

şeklindedir.

Enerji Dengesi

Kurutma işlemlerinde enerji dengesi, Şekil 5.1’de gösterilen kontrol hacmi için enerjinin korunumu yasası uygulanarak yazılır.

Enerji dengesi, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir:

$$\frac{dH_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_{h1} - \dot{m}_{h2} - \dot{Q}_k \quad (5.16)$$

burada, \dot{Q}_{evap} suyun buharlaşmasına bağlı ısı transfer akımı (kJ/s), \dot{Q}_k çevreye ısı transfer akımı (kJ/s), h_1 giren kuru havanın özgül entalpisi (kJ/kg), h_2 çıkan kuru havanın özgül entalpisi (kJ/kg).

Kurutma havasının ve ürünün kuru madde miktarı, kontrol hacminde zamanla değişmediği ve sabit kaldığı için, enerji dengesi şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\dot{m}_{km}(h_{m2} - h_{m1})}{\Delta t} = \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_{da}(h_{da1} - h_{da2}) - \dot{Q}_k \quad (5.17)$$

Enerji dengesi eşitliği, giren enerji terimlerinin çıkan enerji terimlerine eşitlenmesi ile kurutma sistemi için şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{m}_{da}h_{da1} + \dot{m}_m h_{m1} = \dot{m}_{da}h_{da2} + \dot{m}_m h_{m2} + \dot{Q}_k \quad (5.18)$$

Kurutulan ürün için entalpi farkı denklemleri aşağıdaki gibidir;

$$h_{m1} - h_0 = C_m (T_{m1} - T_0) \quad (5.19)$$

$$h_{m2} - h_0 = C_m (T_{m2} - T_0) \quad (5.20)$$

Ürün için entalpi dengesi şu şekilde ifade edilir:

$$h_{m2} - h_{m1} = C_m (T_{m2} - T_{m1}) \quad (5.21)$$

Kurutulan gıdanın özgül ısı değeri saf bileşenler dikkate alınarak aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir (Choi and Okos, 1986;

Singh, 1992):

$$C = C_w X_w + C_{pr} X_{pr} + C_f X_f + C_c X_c + C_{fi} X_{fi} + C_a X_a \quad (5.22)$$

Su için;

$$C_w = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5} T + 5.4731 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.23)$$

Protein için;

$$C_{pr} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.24)$$

Yağ için;

$$C_f = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.25)$$

Karbonhidrat için;

$$C_c = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.26)$$

Lif için;

$$C_{fi} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.27)$$

Kül için;

$$C_a = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2 \quad (5.28)$$

şeklindedir.

Nemli havanın entalpisi, karışımda varolan her bir bileşenin katkısı

eklenerek hesaplanabilir; böylece nemli havanın entalpisi:

$$h = c_p T + \omega h_{fg} \quad (5.29)$$

Faz değişimine bağlı olarak ısı transfer akımı:

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{sb} h_{fg} \quad (5.30)$$

şeklinde yazılır. Burada, h_{fg} nemli malzemenin ortalama sıcaklığında suyun buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg).

Kurutma kabininden ısı kaybı akımı:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{da} q_k \quad (5.31)$$

Entropi Dengesi

Kütle ve enerji sistemde miktar olarak korunurken entropi korunmaz. Şekil 5.1'de verilmiş olan kontrol hacmi için entropi dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\dot{m}_m (s_{m2} - s_{m1}) = \frac{\dot{Q}_{evap}}{T_m} + \dot{m}_{da} (s_{da2} - s_{da1}) - \frac{\dot{Q}_k}{T_b} + \dot{S}_{üretilen} \quad (5.32)$$

Kurutulan ürün için entropi farkı denklemleri şu şekildedir:

$$s_{m1} - s_{m0} = C_m \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) \quad (5.33)$$

$$s_{m2} - s_{m0} = C_m \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \quad (5.34)$$

Buradan, ürün için birim entropi dengesi aşağıdaki gibi yazılır;

$$s_{m2} - s_{m1} = C_m \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (5.35)$$

Nemli havanın entropisi:

$$s_{nh} = s_{da} - R_{da} \ln \frac{P_{da}}{P_0} + \omega \left(s_b - R_b \ln \frac{P_b}{P_0} \right) \quad (5.36)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada R gaz sabiti ve P basınç değerlerini göstermektedir.

Ekserji Dengesi

Kurutma kabini için ekserji dengesi, enerji denkliği (5.17) ve entropi denkliği (5.25) birleştirilerek geliştirilmiştir:

$$\dot{E}x_{m2} - \dot{E}x_{m1} = \dot{E}x_{da1} - \dot{E}x_{da2} + \dot{E}x_{evap} - \dot{E}x_k - \dot{E}x_{yikim} \quad (5.37)$$

$$\frac{\dot{m}_{km} (\dot{E}x_{m2} - \dot{E}x_{m1})}{\Delta t} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \dot{Q}_{evap} + \dot{m}_{da} (h_{da2} - h_{da1}) - \left(1 - \frac{T_0}{T_b} \right) \dot{Q}_k - T_0 \dot{m}_{da} (s_{da2} - s_{da1}) - T_0 \dot{S}_{üretilen} \quad (5.38)$$

Burada, $\dot{E}x_m$, malzemenin ekserji transfer akımı, $\dot{E}x_{da}$, kurutma havasının ekserji transfer akımı, $\dot{E}x_{evap}$, kurutucunun buharlaşma ekserji akımı, $\dot{E}x_k$, çevreye ekserji kaybı akımı ve $\dot{E}x_{yikim}$, kurutucudaki ekserji yıkımıdır.

Kurutulan ürün için giren ve çıkan akımlardaki özgül ekserjiler:

$$\psi_{m1} = (h_{m1} - h_{m0}) - T_0 (s_{m1} - s_{m0}) \quad (5.39)$$

$$\psi_{m2} = (h_{m2} - h_{m0}) - T_0 (s_{m2} - s_{m0}) \quad (5.40)$$

Kurutma havası için giren ve çıkan akımlardaki özgül ekserjiler:

$$\psi_{da1} = (h_{da1} - h_{da0}) - T_0 (s_{da1} - s_{da0}) \quad (5.41)$$

$$\psi_{da2} = (h_{da2} - h_{da0}) - T_0 (s_{da2} - s_{da0}) \quad (5.42)$$

Sıkıştırılmayan sıvılar için giren ve çıkan akımlardaki özgül ekserjiler aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Bejan, 1988):

$$\psi_{ss} = C.(T - T_0 - T_0 (\ln \frac{T}{T_0})) \quad (5.43)$$

Kurutucudaki buharlaşmaya bağlı olarak gerçekleşen ekserji transfer akımı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{E}x_{evap} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \dot{Q}_{evap} \quad (5.44)$$

Çevreye ekserji kaybı akımını hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır, burada T_b , sınır veya yüzey sıcaklığıdır.

$$\dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T_b}\right) \dot{Q}_k \quad (5.45)$$

5.2 Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde ısı pompalı kurutma sistemlerinin ve diğer kurutma sistemlerinin performans değerlendirmesinde kullanılan yöntemler incelenmiştir.

IP ünitesinin (EK_{IP} veya COP_{IP}) ve tüm IPK sisteminin (EK_{sis} veya COP_{sis}) enerji-bazlı verimliliği, sırasıyla aşağıda gösterilmiştir:

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp}} \quad (5.46)$$

veya elektrik girişi terimi ile,

$$COP_{IP} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (5.47)$$

ve

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp} + \dot{W}_{pompa} + \dot{W}_{fan}} \quad (5.48)$$

veya elektriksel terimlerle,

$$COP_{sis} = \frac{\dot{Q}_{kond}}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{pompa,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (5.49)$$

Burada,

$$\dot{W}_{komp,elek} = \dot{W}_{komp} / (\eta_{komp,elek} \eta_{komp,mek}) \quad (5.50)$$

$$\dot{W}_{pompa,elek} = \dot{W}_{pompa} / (\eta_{pompa,elek} \eta_{pompa,mek}) \quad (5.51)$$

$$\dot{W}_{fan,elek} = \dot{W}_{fan} / (\eta_{fan,elek} \eta_{fan,mek}) \quad (5.52)$$

olmaktadır.

Özgül nem çekme oranı (ÖNÇÖ veya SMER), kWh enerji girdisine karşı alınan nemin kg oranı olarak belirtilmektedir (Hawlader and Jahangeer, 2006):

$$\text{ÖNÇÖ} = \frac{\text{Alınan nem (kg)}}{\text{Enerji girdisi (kWh)}} \quad (5.53)$$

$$\text{ÖNÇÖ}_{IPK} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{pompa,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (5.54)$$

Burada \dot{m}_s , bir saatte uzaklaştırılan suyun kg olarak miktarıdır.

Ekserji verimliliği farklı bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir, ancak genel olarak, $\text{verim} = \text{ürün} / \text{bedel}$ olarak ifade edilebilir. Ürün olarak buharlaştırılan suyun ve bedel olarak kurutma havasının alındığı bağıntı,

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{evap}}{\dot{E}x_{da,giren}} \quad (5.55)$$

Yaygın olarak kullanılan bir ekserji verimliliği bağıntısı da aşağıdaki gibidir:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{kayıp}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (5.56)$$

Ekserji verimliliği, ekserji çıktısının toplam ekserji girdisine oranı olarak da ifade edilebilir:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{çıkan}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (5.57)$$

Tez kapsamında ekserji analizi yapılan kurutma sistemlerinin karşılaştırılması için aşağıda belirtilen ekserji bağıntısı geliştirilmiştir. Bu formülde ürün olarak buharlaştırılan su ve bedel olarak kurutma havası, kurutulan ürün ve varsa havayı ısıtmak için kullanılan sıcak su veya buharın ekserjilerinin toplamı olan $\dot{E}x_{giren}$ değeri alınmıştır.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{evap}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (5.58)$$

TKIP ve tüm sistemin ekserjetik etki katsayısı, aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır (Sozen et al., 2002):

$$COP_{ex,IP} = \frac{\dot{Q}_{kond} (1 - T_0 / T_{kond})}{\dot{W}_{komp,elek}} \quad (5.59)$$

$$COP_{ex,IP} = \frac{\dot{Q}_{kond} (1 - T_0 / T_{kond})}{\dot{W}_{komp,elek} + \dot{W}_{pompa,elek} + \dot{W}_{fan,elek}} \quad (5.60)$$

Isı değiştiricinin (kondenser veya evaporatör) ekserji verimliliği, soğuk akışın ekserjisindeki artışın sıcak akışın ekserjisindeki azalmaya oranı ile hesaplanır.

$$\eta_{id} = \frac{\dot{E}x_{soğ,çikan} - \dot{E}x_{soğ,giren}}{\dot{E}x_{sıcak,giren} - \dot{E}x_{sıcak,çikan}} = \frac{\dot{m}_{soğ} (\psi_{soğ,çikan} - \psi_{soğ,giren})}{\dot{m}_{sıcak} (\psi_{sıcak,giren} - \psi_{sıcak,çikan})} \quad (5.61)$$

Van Gool (1997), bir proses veya sistemde ekserji verimliliğinin maksimum geliştirilmesinin ancak ekserji kayıpları veya tersinmezliğin ($\dot{E}x_{in} - \dot{E}x_{out}$) minimize edilmesi ile mümkün olacağını belirtir. Sonuç olarak, ekserjetik “iyileştirme potansiyeli”ni hesaplamanın faydalı olacağını belirtmektedir. Bu iyileştirme potansiyeli akımı, $\dot{I}P$, aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Hammond and Stapleton, 2001);

$$\dot{I}P = (1 - \eta)(\dot{E}x_{giren} - \dot{E}x_{çikan}) \quad (5.62)$$

5.3 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hata tiplerini üç ana grupta toplamak mümkündür (Holman, 1971). Birinci olarak; deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar, ikinci olarak; sebebi genellikle kesin olarak bilinmeyen, aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar, üçüncü olarak; deney ve gereçlerinde rasgele elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden vs. kaynaklanan rasgele hatalardır. Çoğu zaman sabit hatalar ile rasgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur (Holman, 1971). Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır ve uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabilir.

Ölçü aletinin imalatının da doğru yapıldığı kabul edilirse, hata analizi; sabit ve rasgele hataları belirleyerek bunların deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır (Midilli, 2001; Akpınar, 2002).

Bir dizi ölçüm yapıldığını ve her ölçümde belirsizliğin aynı olasılıklarla belirtildiği varsayılırsa, bu ölçümler, daha sonra, deneylerin istenen bazı sonuçlarının hesaplanmasında kullanılacaktır. R sonucu, bağımsız değişkenlerin $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ (Holman, 1994) bir fonksiyonudur.

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5.63)$$

w_R 'nin sonucun belirsizliği ve $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ 'lerin bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri olduğu varsayıldığında, eğer bağımsız değişkenlerdeki belirsizlikler aynı olasılıklarla belirtilirse, bu olasılıklara sahip sonuç belirsizliği, Kline and McClintock (1953) denklemiyle hesaplanabilir:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.64)$$

6. MATERYAL VE METOD

Bu bölüm, kurutulan ürünler dikkate alınarak 5 ana başlık altında incelenmiştir. Tüm ürünler için, kullanılan sistemlerin ve ölçüm aletlerinin tanıtımı, örneklerin özellikleri, deney ve ölçüm yöntemleri her bir alt bölümde anlatılmıştır. Sistemlere ait çizimler ve deneylerle ilgili fotoğraflar da sunulmuştur.

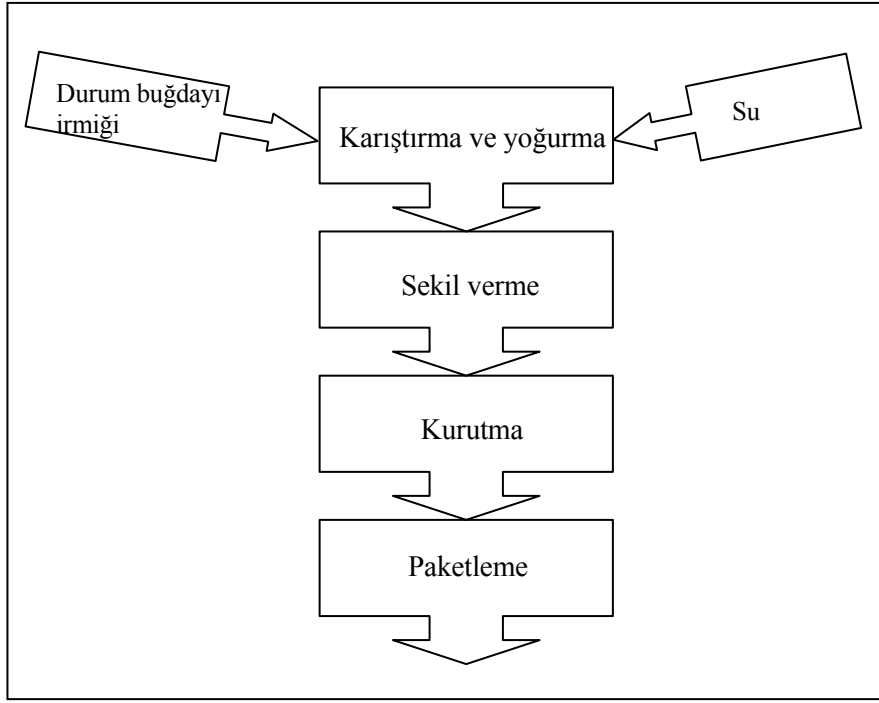
6.1 Makarna Kurutma

6.1.1 Deney düzeneği

Makarna kurutma, iki farklı sistemde gerçekleştirilmiştir. Birinci sistem, İzmir’de kurulu bulunan Pastavilla Makarna Fabrikasının fiyonk makarna üretim hattında yer alan 4 basamaklı döner kurutma sistemidir. Diğer sistem ise, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde kurulu bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı tepsili kurutma sistemidir.

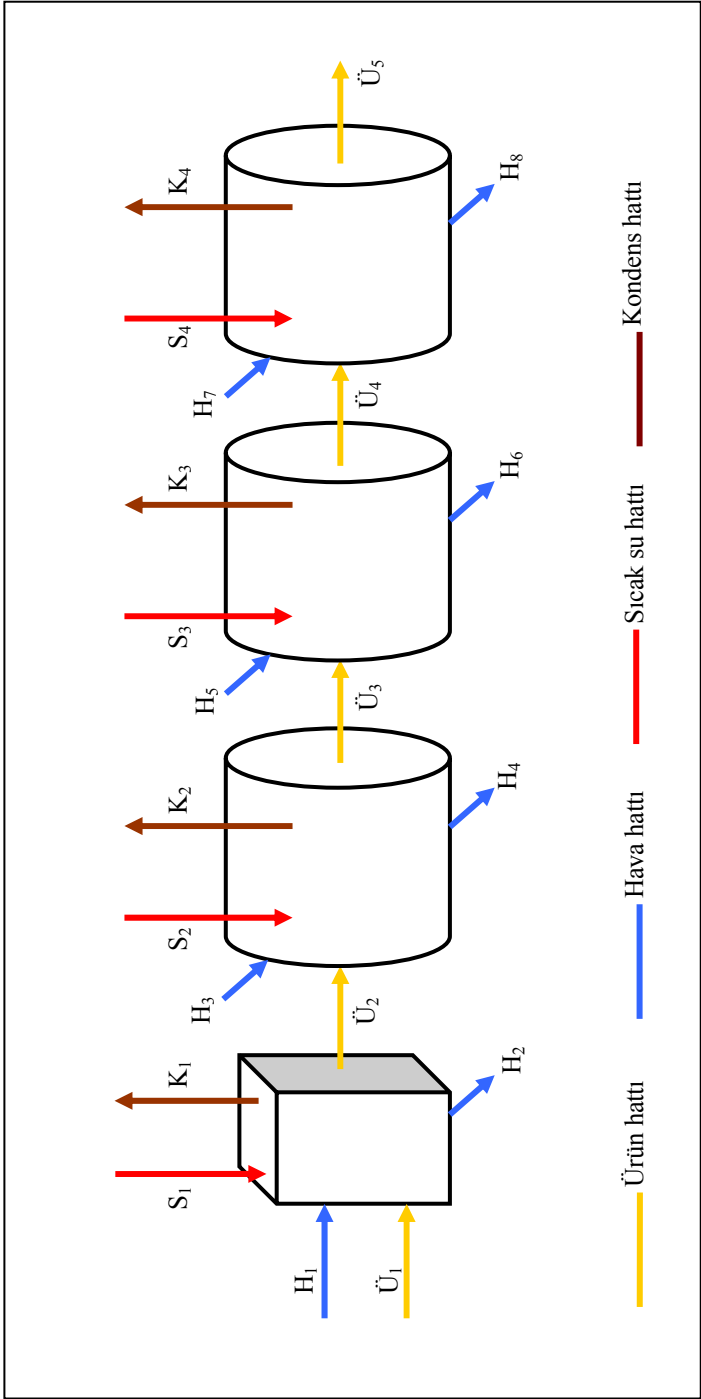
Fabrikada makarna üretiminin işlem akış şeması Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

Su ve durum buğdayı irmiği - 600 mm Hg vakum altında çekilerek karıştırılır ve nem içeriği yaklaşık % 29 (yaş baza göre) olana kadar yoğrulur. Bu işlemin ardından, elde edilen hamur ekstrüder’e gönderilir ve hamura istenilen şekil bu kısımda basınç altında verilir. Bu kısımdaki hamur basıncı 60 bar’dır. Basınç yükseldiği takdirde hamurun sertliği de artar. Ölçüm yapılan sistemde hamura fiyonk şekli verilmektedir. Buradan çıkan şekil verilmiş makarna hamuru kurutma sistemine girer.



Şekil 6.1 Makarna üretimi işlem akış şeması

Fabrika şartlarında makarna kurutma prosesi 4 basamakta gerçekleşmektedir. İlk olarak, ekstrüderde şekil verilmiş olan makarna hamuru titreşimli tepsiler üzerinde kurutulmak üzere ön kurutma bölümüne girer. Bu bölüme giren ürünün nem içeriği yaklaşık % 29 ve çıkan ön kurutulmuş ürünün nem içeriği % 23'tür. Buradan çıkan makarna hamuru üç bölümden oluşan döner kurutma sistemine giriş yapar. Birinci kurutucuda nem içeriği yaklaşık % 15 olana kadar kurutulan fiyonk makarna, ikinci kurutucudan ortalama % 14 nem içeriğine sahip olarak ayrılır. Son kurutucudan çıkan kurutulmuş makarnanın nem içeriği ise % 12 civarındadır. Ön kurutma ve 3 adet döner kurutucudan oluşan bu makarna kurutma sistemi Şekil 6.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu sistemde kurutma havası, 130 °C sıcaklığındaki ve 2 bar basınçtaki kızgın su kullanılarak ısıtılmaktadır.

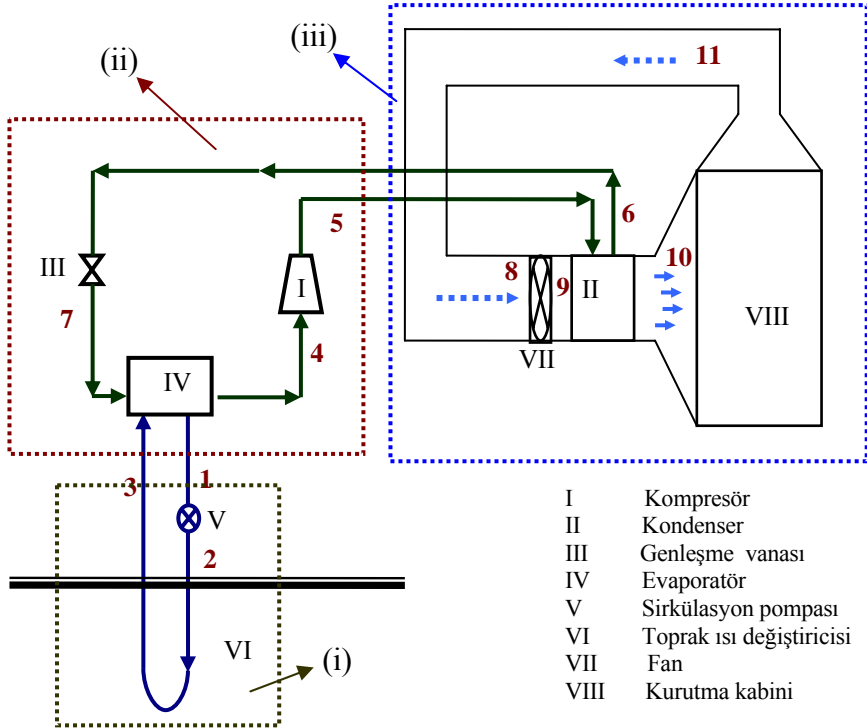


Şekil 6.2 Dört basamaklı makarna kurutma hattı

Fabrikada yukarıda şematik olarak gösterilen kurutma hattında nemli makarna hamurunun kurutulması toplam 6 saat 20 dakika sürmektedir. Sistemden saatte 250 kg kurutulmuş makarna elde edilmektedir.

Döner tambur kurutucuların çapları eşittir ve 1.9 m'dir. Uzunlukları ise toplam 6.5 m'dir. İlk kurutucunun uzunluğu 2.5 m, diğer iki kurutucunun ise eşit ve 2 m'dir.

Fabrikadan alınmış olan fiyonk makarna örnekleri, Şekil 6.3'de şematik olarak gösterilen, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'nde bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı tepsili kurutucuda kurutulmuştur. 1 numaralı örnek şekil verilmiş, 2 numaralı örnek ise şekil verildikten sonra fabrikadaki sıcak havalı kurutucuda 70 °C sıcaklık ve % 48 neme sahip hava ile ön kurutma uygulanmış makarna örnekleridir.



Şekil 6.3 Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi

Şekil 6.3'te gösterilmiş olan toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; (i) toprak ısı değiştiricisi devresi, (ii) ısı pompası devresi ve (iii) kurutma kabinidir.

(i) Toprak ısı değiştiricisi devresi: Toprak altına düşey olarak yerleştirilen 50 m derinliğinde, U-şeklinde 32 mm çapında polietilen borudan oluşmaktadır. Antifiriz-su karışımının sirkülasyonu için bir pompa, genişleme tankı, hava alma ve emniyet ventilinden oluşmaktadır. Ölçüm amacıyla; bir adet rotametre, ısı değiştiricisine giren ve çıkan suyun sıcaklıklarını ölçmek için 2 adet termometre bulunmaktadır.

(ii) Isı pompası devresi: İki adet plakalı ısı değiştiricisi, dört yollu vana, selenoid vana ve kılcal borudan oluşmaktadır. Soğutucu akışkan olarak R-22'nin kullanıldığı sistemde, ölçüm yapmak amacıyla, kompresörün emme ve basma hattına birer manometre konulmuştur.

(iii) Kurutucu devresi: Kabin 1 m x 1 m x 1 m ebatlarındadır. 0.5 m x 1 m ebatlarında 18 tepsi bulunmaktadır. Yoğuşturucu ve fan kurutma kanalı içine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen yoğuşturucu hava soğutmalı tiptir ve çalışma akışkanı olarak R-22 ve hava kullanmaktadır. Egsoz havası dışarı atılmayıp tekrar sisteme kurutma kanalı vasıtasıyla geri gönderilmekte ve böylece ısıdan geri kazanım sağlanmaktadır. Nem ölçer ve sıcaklık ölçerler giriş ve çıkış havalarını ölçmek amacıyla kanalın giriş ve çıkışlarına yerleştirilmiştir. Hava debisi anemometre ile ölçülmektedir.

Bu sistemde, düşük basınçtaki R-22 akışkanı evaporatörde toprak ısı değiştiricisi kullanılarak topraktan alınan ısı ile buharlaştırılır. Kompresörde entalpisi yükselen R-22 yüksek basınçta kızgın buhar olarak kondensere giriş yapar. Kondenserde soğutucu akışkanın ısısı proses havasına geçer. Buradan çıkan R-22 genişleme valfinden geçerek düşük basınç hattına kısılır ve döngüyü tamamlamak üzere evaporatöre giriş yapar. Kurutma kabininde ise kondenserden gelen sıcak hava bir fan yardımıyla

kurutulacak ürünlerin üzerinden geçirilir. Hava ısısını gıda maddelerine vererek kurutma için gerekli olan gizli ısının kazanılmasını sağlar. Kurutucudan ürünün nemini alarak çıkan havaya, sistemin çevresindeki atmosferden bir miktar taze hava karıştırılır ve bu karışım havası kondensere girerek hava döngüsünü tamamlar.

Yukarıda çalışma şekli detaylı bir şekilde anlatılan ve şematik gösterimi Şekil 6.3'te verilmiş olan TKIPK sisteminin çeşitli fotoğrafları Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da; ana elemanlarının teknik özellikleri ise Tablo 6.1'de verilmiştir.



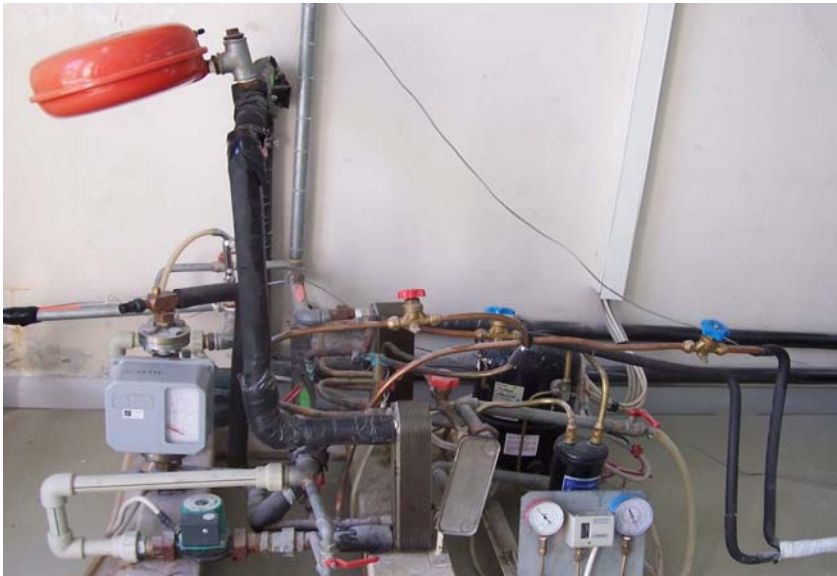
Şekil 6.4 TKIPK sisteminin bütününün görünümü

Tablo 6.1 TKIPK sisteminin ana bileşenlerinin teknik özellikleri

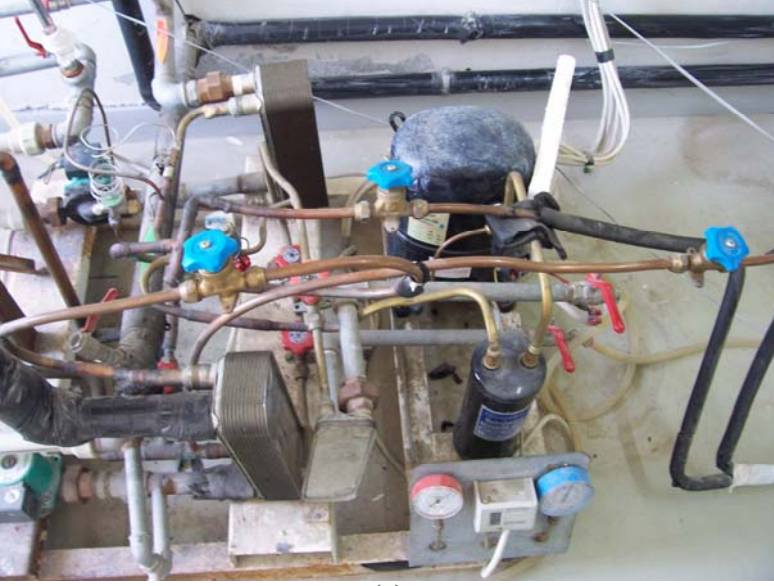
Ana Çevrim	Bileşen	Teknik Özellikler
Toprak Çevrimi	Toprak ısı değiştirici	50 m dikey 1.25 inch nominal çaplı U-tip alt dönmme polietilen boru
	Sirkülasyon pompaları	Marina tip KPM50, 360-2400 l/h debi 41-8 m basınç başlıklı, g 0,37 kW, 2800 rpm
Soğutucu Akışkan Çevrimi	Genleşme tankları	Zimmet tip 54 l/L, 12 l kapasiteli 100 kPa ön-şarjlı
	Kondenser	Friterm hava soğutmalı tip HS 10 / 3.770 kW ve ısı transfer alanı 10 m ² R-22 ve hava kullanan
	Evaporatör	Alfa Laval tip CB 26-34 / 8.2 kW kapasiteli ve ısı transfer alanı 0.8 m ²
	Kapiler tüp	Danfoss TEX 2(R 22) Diştan dengeli, değişebilir orifizli -40 ile +10 °C
	Desuperheater	Alfa Laval tip CB 14-6, ısı transfer alanı 0.06 m ²
	Kompresör	Tecumseh tip TFH 4524 F, 4.134 kW kapasiteli 0/45°C buharlaşma / yoğuşma sıcaklıklı ve R-22 kullanan
Kurutma Çevrimi	Kurutma kabini	1 x 1 x 1 m dış boyutlarında, 0.5 m x 1 m boyutlarında 18 tepsi
	Kurutma kanalı	1 m uzunluğunda kurutma kabine geri dönüşümlü ve iki klepeli
	Fan	2.350 m ³ /h akış debili



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.5 (a, b, c) Isı pompasının üç farklı görünümü



Şekil 6.6 Kurutma kabini

6.1.2 Deney Yöntemi

Fabrikada yapılan ölçümler sistemin ekserji analizini yapmaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Hava sıcaklıkları ve nem değerleri sistem üzerinde yerleşik olarak bulunan panolardan okunmuş, ayrıca termometre ile ölçüm yapılmıştır. Yüzey sıcaklıkları Fluke 61 infrared termometre ile bütünü yansıtacak şekilde ölçülmüş, hava hızları dijital anemometre yardımıyla her bir kurutucunun çıkış kısımlarında bulunan boşluktan ölçülmüştür. Fabrikada ölçümler 3 aylık bir zaman diliminde, sistem çalışırken ve farklı saatlerde gerçekleştirilmiştir. Fabrikadan örnek alma işlemleri de yaklaşık 2 aylık bir periyotta tamamlanmıştır. Üretim devam ederken şekil verilmiş makarna hamuru ve ön kurutma yapılmış makarna örnekleri alınmış ve üzeri nemli bir bezle kapatılmış, uygun saklama kapları yardımıyla Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde bulunan TKIPK düzeneğinde kurutulmak üzere hızla taşınmıştır.

Deneylere başlamadan önce, kararlı hale gelmesi için sistem en az bir saat çalıştırılmıştır.

Kurutma için, makarna örnekleri tepsi üzerine tek sıra halinde dizilmiş ve 50 °C sıcaklık ve % 16 nemdeki, 2 m/s hızdaki hava kullanılarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. 1 numaralı makarna hamurunun başlangıç nem içeriği yaklaşık % 29 ve 2 numaralı makarnanın nem içeriği % 23'tür. Kurutma sonunda ise makarnanın nem içeriği yaklaşık olarak % 12'dir.

Makarna örneklerinin kurutulması deneyleri 3 paralel adımda gerçekleştirilmiştir. Kurutma deneyleri boyunca 30 dakikada bir ürün tartılmış ve nem kaybı takip edilmiştir. Ürünün giriş ve çıkıştaki nem içeriği değerleri AOAC metodu ile 70 °C sıcaklık ve 400 mm Hg vakum altındaki etüvde belirlenmiştir. Makarnanın bileşim değerleri irmiğin

bileşimi kullanılarak belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Makarna örneklerinin bileşim değerleri

Bileşen	Değer (%)
Su	28.64
Protein	8.63
Yağ	0.25
Karbonhidrat	62.48

Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde yapılmış olan tüm deneyler boyunca belli aralıklarla aşağıdaki ölçümler gerçekleştirilmiştir:

- Rotametre kullanılarak toprak ısı değiştiricide sirküle olan su/antifriz çözeltisinin volumetrik akış oranı ölçülmüştür.
- Toprak ısı değiştiricisine giren ve çıkan çözeltinin sıcaklıkları, suyun giriş ve çıkışına yerleştirilen termokupl’lar kullanılarak ölçülmüştür.
- Bourdon tip manometre kullanılarak kondenser ve evaporatör basınçları ölçülmüştür.
- Barometre ile çevre atmosferik basıncı ölçülmüştür.
- Termokupl ile dış hava sıcaklıkları ölçülmüştür.
- Wattmetre ile kompresör ve sirkülasyon pompalarının giriş gücü ölçülmüştür.
- Nem ölçerler kullanılarak kurutucu kabine giren ve çıkan hava sıcaklıkları ve nemleri ölçülmüştür.
- Kurutma kabininin yüzey sıcaklığı infrared termometre

kullanılarak ölçülmüştür.

- Kurutma kabini içindeki ürün sıcaklığı termocouple kullanılarak ölçülmüştür.
- Kurutma boyunca ürünün miktarındaki değişim tartı kullanılarak ölçülmüştür.

Sistemin elektrik devresi, güç ve kumanda devresi olmak üzere iki bölümden oluşur. Güç devresi, kompresörü ve sirkülasyon pompalarını harekete geçiren kısımdır. Kumanda devresi, kontaktörler vasıtasıyla güç devresine kumanda eden kısımdır. Elektrik devresinde, sigortaların yanı sıra kompresöre aşırı yük bindiğinde kompresörü korumak amacıyla devreden çıkarabilecek aşırı akım yük röleleri ve termik röleler bulunur. Ayrıca, sistemin kolayca gözlenebilmesi için elektrik panosu üzerine sinyal lambaları konulmuştur. Kumanda elemanları ise elektronik sensör (mikroprosesör) ve basınç presostatıdır.

Yukarıda maddeler halinde sıralanmış olan, sıcaklık, nem ve basınç değerlerinin ölçüm noktaları Şekil 6.3 üzerinde görülebilmektedir.

Fabrikada kurutulan makarnada rutin olarak bazı kalite analizleri yapılmaktadır. Bunlar, nem tayini, renk tayini, kül tayini, çektiği su miktarı, pişme ve aroma özellikleridir. TKIPK sisteminde kurutulmuş olan iki farklı noktadan alınan makarna örneklerinin kalite analizi de fabrikanın laboratuvarında yapılmıştır.

Makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulması boyunca 30 dakika aralıklarla kaydedilen ürünün kütledeki değişim miktarları kullanılarak, zamana bağlı nem içeriğinin değişimi ve kuruma debisi grafikleri çizilmiştir.

Makarnanın ısı pompalı kurutucuda kurutulması ile ilgili fotoğraflar Şekil 6.7'de verilmiştir.



(a)



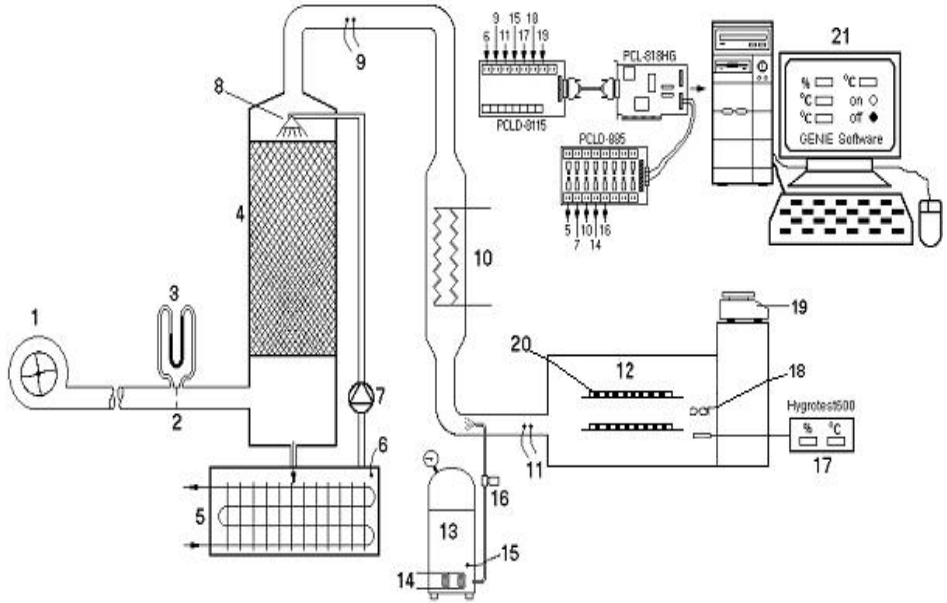
(b)

Şekil 6.7 (a,b) TKIPK sisteminde makarna kurutulması

6.2 Zeytin Kurutma

6.2.1 Deney düzeneği

Zeytin kurutma deneyleri iki farklı kurutma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlki Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümünde kurulu bulunan laboratuvar ölçekli tepsili bir kurutucudur. Bu sistemin şematik olarak gösterimi şekil 6.8’de sunulmuştur.



şekil 6.8 Tepsili kurutma sistemi

Yukarıdaki şekilde verilmiş olan kurutma sisteminin bileşenleri şunlardır; (1) santrifüj fan, (2) orifis plakası, (3) U manometre, (4) soğutma ve nemlendirme kulesi, (5) soğuk su tankı, (6) soğuk su tankı sıcaklık ölçüm termokapl, (7) soğuk su sirkülasyon pompası, (8) su fiskiyesi, (9)

kuru ve yaş termometre sıcaklıkları ölçümü için termokapl çifti, (10) elektrikli su ısıtıcı, (11) kuru ve yaş termometre sıcaklıkları ölçümü için termokapl çifti, (12) kurutma kabini, (13) buhar üretici, (14) ısıtıcı, (15) termokapl, (16) buhar enjektörü ve selenoid valf, (17) bağıl nem ve sıcaklık sensörü, (18) anemometre, (19) terazi, (20) tepsi, (21) ölçme kayıt ve kontrol cihazı.

Bu sistem üç ana bölümden meydana gelmiştir, bunlar, (a) hava sağlama ünitesi, (b) ısıtıcı ve nemlendirici ile kurutma ünitesi (c) ölçme kayıt ve elektronik kontrol ünitesi. Sıcaklık kontrolü, verilerin kaydedilmesi ve depolanması yanında elektrikli ısıtıcının açılıp kapatılması, hava akışının içine sıcak su enjekte edilmesi ve soğutma kulesinde soğuk su sirkülasyonu yapılması GENIE (Advantech Automation Corp., USA) veri kaydetme yazılımı ile yapılmaktadır.

Zeytin kurutmanın gerçekleştirildiği diğer sistem ise Bölüm 6.1’de detaylı olarak anlatılmış olan Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemidir.

6.2.2 Deney yöntemi

Kurutma için zeytin örnekleri olarak, İzmir’de yetiştirilen Domat türü yeşil zeytin kullanılmıştır. Örnekler, TC. Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı Zeytincilik Araştırma Enstitüsünden temin edilmiştir. Zeytinler kalibre edilmiş (140 – 180 partikül/kg) ve işlenmeden önce bir gece $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta bekletilmiştir. Kullanılan ürünün hazırlanması prosedürü, zeytin meyvelerinin % 2 NaOH çözeltisi (kostik) ile muamele edilmesini içerir. Bu işlem, zeytinde acılığa neden olan bir glikosid olan oleuropeinin hidrolize edilmesini ve zeytin yüzeyinin (en dış tabaka) geçirgenliğinin artmasını sağlar. Uygulama, fazla alkalinin uzaklaştırılması için yapılan suyla yıkama işlemi ile devam eder. Daha sonra, zeytin meyvelerinin

üzerine % 7'lik (w/v) bir NaCl (tuz) çözeltisi eklenir ve kendiliğinden laktik asit fermentasyonuna bırakılır (Fernandez-Diez et al., 1985). Fermentasyon işlemi tamamlandığında asitlik ve salamura konsantrasyonu depolama boyunca sabit olarak tutulmuştur. Bu işlemde sonra zeytinlerin çekirdekleri çıkarılmıştır. Kurutma işleminde kullanılan bu zeytinlerin ortalama boyutları, çap, yükseklik ve kalınlık olarak sırasıyla, 0.020 m – 0.025 m – 0.0035 m'dir.

Ölçümler, sistemlerin ekserji analizini yapmaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Her iki kurutma sisteminde de deneylere başlamadan önce kararlı hale ulaşması için sistem en az bir saat çalıştırılmıştır.

Kurutucu kararlı hale ulaştıktan sonra, çekirdekleri çıkarılmış olan zeytin örnekleri tepsiler üzerine tek sıra halinde yerleştirilerek kurutma işlemine başlanmıştır. Elektrikli kurutma sisteminde deneyler 4 farklı hava sıcaklığında (40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70 °C) gerçekleştirilmiştir. Kurutma havasının hızı 1 m/s'de sabit tutulmuş ve nispi nem değeri de % 15 olarak korunmuştur. Zeytin örneklerinin başlangıç sıcaklığı 18 °C ve su içeriği % 76.29 (yaş baza göre) olarak ölçülmüştür. Kurutma işlemi zeytin örneklerinde sabit tartıma ulaşılana kadar devam etmiştir. Deneyler süresince, çevre hava sıcaklığı ve nispi nemi, kurutma sistemine giren ve sistemden çıkan havanın sıcaklık ve nem değerleri kaydedilmiştir.

Aynı tür zeytin örnekleri toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde de tepsiler üzerine tek sıra olarak yerleştirildikten sonra kurutulmuştur. Bu sistemde, elektrikli kurutucuda elde edilen sonuçlar değerlendirilerek 50 °C hava sıcaklığı kullanılmıştır. Kurutma havasının hızı 1 m/s olarak sabitlenmiştir. Havanın nem içeriği de % 15'tir.

Her iki kurutma sisteminde de deneyler 3 paralel set olarak yapılmıştır. Ürünün kütledeki değişim 30 dakika ara ile yapılan tartımlarla belirlenmiştir.

Her iki sistemde kurutulmuş olan zeytin örneklerinde de çeşitli kalite analizleri yapılmıştır. Isı pompalı kurutma sisteminde 50 °C sıcaklık ve 1m/s hıza sahip hava kullanılarak kurutulan örneklerde kalite analizi yapılmış ve elektrikli kurutucuda elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Zeytin meyvesinin nem içeriği AOAC metodu kullanılarak 70 °C sıcaklık ve 400 mm Hg vakum altındaki etüvde belirlenmiştir. Yağ içeriği Abencor sistem kullanılarak analiz edilmiş ve yağın kütle fraksiyonu % olarak hesaplanmıştır. Protein (Nx6.25) tayini toplam nitrojen miktarının belirlenmesi esasına dayanan Kjeldahl yöntemi ile ve katalist olarak Kjeltabs ST eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Örneklerin tuz içeriği Mohr metodu (AOAC, 1975) kullanılarak tayin edilmiştir (Ongen et al., 2005). Renk tayini, spektral bir fotometre (Datacolor, Textflash, USA) kullanılarak örneklere ait L, a ve b renk değerlerinin ölçülmesi ile yapılmıştır. Taze ve kurutulmuş ürünlerde bu değerler belirlenmiştir. Ayrıca, renk değerleri (ΔE), renk yoğunluğu (kroma, ΔC) ve renk tonu değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir.

$$\Delta E = \sqrt{[(L - L_{ref})^2 + (a - a_{ref})^2 + (b - b_{ref})^2]} \quad (6.1)$$

$$\Delta C = \sqrt{[(a - a_{ref})^2 + (b - b_{ref})^2]} \quad (6.2)$$

$$\text{Renk tonu} = 1 / \tan(b/a) \quad (6.3)$$

Bu analizler sonucunda elde edilmiş olan ve zeytinin özgül ısı değerlerinin belirlenmesinde de kullanılmış olan bileşim değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Zeytin kurutma ile ilgili çeşitli fotoğraflar da Şekil 6.9'da sunulmuştur.

Tablo 6.3 Zeytin örneklerinin bileşim değerleri

Bileşen	Değer (%)
Su	76.29
Protein	1.13
Yağ	14.67
Karbonhidrat	3.32
Lif	4.09
Kül	0.50



(a)



(b)

Şekil 6.9 TKIPK sisteminde zeytin kurutma

6.3 Elma Kurutma

6.3.1 Deney düzeneği

Elma kurutma denemeleri, detaylı anlatımı Bölüm 6.1’de verilmiş olan, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda gerçekleştirilmiştir.

6.3.2 Deney yöntemi

Elma kurutma deneylerinde ölçümler ekserji analizi yapmaya yönelik olarak yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce kararlı hal şartlarına ulaşması için, sistem en az bir saat çalıştırılmıştır.

Denemelerde kullanılan elmalar Starking türü olarak seçilmiş, yerel

bir süpermarketten alınmış ve 4 °C'de saklanmıştır. Ortam sıcaklığına ulaşması için elmalar 2 saat bekletilmiştir. Kabukları bir bıçak yardımıyla soyulan elmaların iç kısımları da bıçak kullanılarak temizlenmiştir. Bu işlemlerin ardından eksene dikey olarak 5 mm kalınlığında silindirik dilimler elde edilecek şekilde dilimleme yapılmıştır. Elde edilen elma dilimleri % 5'lik limon çözeltisine 5 dakika daldırılarak örneklerde enzimatik olmayan kahverengileşme reaksiyonunun oluşması engellenmiştir. Bu işlemin ardından elmaların üzerindeki fazla suyun uzaklaştırılması için oda sıcaklığında 5 dakika kağıt havlu üzerinde bekletilmiştir (Sacilik and Elicin, 2005).

Kurutma işlemi için yaklaşık 2 kg elma dilimi kullanılmıştır. Örneklerin başlangıç nem içeriği vakum etüvde 70 °C sıcaklık ve 400 mm Hg vakum altında AOAC metoduna uygun olarak belirlenmiştir. Elma örneklerinin başlangıçtaki su içeriği % 85.3 (yaş baza göre) olarak belirlenmiştir.

Ön hazırlıkları tamamlanmış olan elma dilimleri, kurutucunun tepleri üzerine ortalama yük 1.8 kg/m² olacak şekilde, ince tabaka halinde yerleştirilmiştir. Kurutma deneyleri % 20 nispi nem içeriğine sahip, 1 m/s hızdaki ve üç farklı sıcaklıktaki (45 °C, 50 °C ve 55 °C) kurutma havası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dış hava sıcaklığı ve bağıl nemi sırasıyla 28 °C ve % 70 olarak ölçülmüştür.

Kurutma prosesi boyunca nem kaybı, 30 dakika aralıklarla örneğin tartılması ile takip edilmiş ve kuruma eğrisi çizilmiştir. Kurutma işlemi, elma dilimlerinin nem içeriği yaklaşık % 20 (yaş baza göre) olana kadar sürdürülmüştür.

Kurutma süresince, Şekil 6.3 üzerinde işaretlenmiş olan ve Bölüm 6.1.2'de anlatılmış olan noktalarda gerekli ölçümler yapılmıştır.

Ürünün özgül ısı değerlerinin belirlenmesi için gerekli olan, Starking

türü elmanın genel bileşimi literatürden alınmış ve bu değerler Tablo 6.4'te verilmiştir (USDA, 2005).

Tablo 6.4 Starking elmanın bileşim değerleri (USDA, 2005)

Bileşen	Değer (%)
Su	85.3
Protein	0.3
Yağ	0.4
Karbonhidrat	11.8
Lif	1.9
Kül	0.3

Elma kurutma ile ilgili fotoğraflar Şekil 6.10'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.10 (a, b) TKIPK sisteminde elma kurutma

6.4 Havuç Kurutma

6.4.1 Deney düzeneği

Havuç kurutma deneyleri, Bölüm 6.1’de detaylı olarak anlatılmış olan, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda gerçekleştirilmiştir.

6.4.2 Deney yöntemi

Havuç kurutma deneylerinde ölçümler ekserji analizi yapmaya yönelik olarak yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce kararlı hal şartlarına ulaşması için, sistem en az bir saat çalıştırılmıştır.

Havuçlar (*Daucus carota* L.) İzmir’de bulunan yerel bir süpermarketten temin edilmiş kurutma deneylerine başlayana kadar 4

°C'de muhafaza edilmiştir. Kurutma işlemine hazırlık için öncelikle havuçların en dış yüzeyi soyulmuştur ve soğuk suyla yıkandıktan sonra, 2 mm kalınlığında dairesel diskler elde edilecek şekilde dilimlenmiştir.

Dilimlenmiş olan havuçlar kaynayan suyun (~100 °C) içinde 6 dakika tutularak (Ranganna, 1986) sıcak su ile blanşing işlemine tabi tutulmuş ve bu sayede de peroksidaz enziminin inaktive edilmesi sağlanmıştır. Kısa bir süre haşlanan örnekler soğuk su ile duşlanarak çok hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmuş ve kurutucunun tepsi üzerine tek tabaka halinde yerleştirilmiştir. Son aşamada ise yüzeylerindeki fazla su filtre kağıdı yardımıyla absorbe edilmiştir (Prakash et al., 2004).

Havuçların başlangıç nem içeriği etüvde kurutma metodu ile 105 °C \pm 1 °C sıcaklıkta (NUVE FN 500 Model) belirlenmiştir. Örneklerin başlangıç su içeriği % 91.06 (yaş baza göre) olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada kullanılmış olan havuçların bileşim değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir (USDA, 2007).

Tablo 6.5 Havucun bileşim değerleri (USDA, 2007)

Bileşen	Değer (%)
Su	91.06
Protein	0.42
Yağ	0.19
Karbonhidrat	5.41
Lif	2.23
Kül	0.69

Kurutma sisteminin kararlı hal şartlarına ulaşmasının ardından,

tepsiler üzerine ince tabaka halinde yerleştirilmiş olan havuç dilimleri kuruma işlemine bırakılır. Havucun ısı pompalı kurutucuda kurutulmasına ait deneysel veriler % 17 bağıl nem, 1 m/s hız ve iki farklı sıcaklıktaki (40 °C ve 45 °C) kurutma havası için elde edilmiştir. Çevre havasının sıcaklık ve nispi nem değerleri sırasıyla, 21 °C ve % 70 olarak ölçülmüştür.

Deneysel 3 paralel set olarak gerçekleştirilmiştir. Deney süresince nem kaybı, havuç örneklerinin 30 dakikada bir tartılması yoluyla takip edilmiş ve kuruma eğrileri kaydedilen veriler kullanılarak çizilmiştir. İki tartım arasında fark kalmayana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Bu şekilde elde edilen kurutulmuş havuçların nem içeriği yaklaşık % 10 (yaş baza göre) olarak belirlenmiştir.

Kurutma süresince, Şekil 6.3 üzerinde işaretlenmiş olan ve Bölüm 6.1.2’de anlatılmış olan noktalarda gerekli ölçümler yapılmıştır. Havuç kurutma ile ilgili çekilmiş olan fotoğraflar Şekil 6.11’de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6.11 TKIPK sisteminde havuç kurutma

6.5 Nane Kurutma

6.5.1 Deney Düzeneği

Nane kurutma deneyleri, Bölüm 6.1’de detaylı olarak anlatılmış olan, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda gerçekleştirilmiştir.

6.5.2 Deney Yöntemi

Nane kurutma deneylerinde ölçümler ekserji analizi yapmaya yönelik olarak yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce kararlı hal şartlarına ulaşması için, sistem en az bir saat çalıştırılmıştır.

Taze nane yaprakları İzmir’de bulunan yerel bir süpermarketten temin edilmiş ve kurutma deneyleri başlayana kadar 4 °C’de muhafaza edilmiştir. İşleme başlamadan önce yıkanan örneklerin fazla suyu kağıt havlu yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Yaprak kısımları saplarından kesilerek ayrılan örnekler kurutucunun tepsileri üzerine tek tabaka halinde yerleştirilmiştir.

Örneklerin başlangıç nem içeriği vakum etüvde 70 °C sıcaklık ve 400 mm Hg vakum altında AOAC metoduna uygun olarak belirlenmiştir. Diğer örneklerde olduğu gibi, nane örneklerinin nem içeriğinin belirlenmesinde de işlemler 3 tekrar olarak yapılmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Nane yapraklarının başlangıçtaki nem içeriği % 83 (yaş baza göre) olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılmış olan nanenin bileşim değerleri Tablo 6.6’da verilmiştir (USDA, 2007).

Tablo 6.6 Nanenin bileşim değerleri (USDA, 2007)

Bileşen	Değer (%)
Su	83.00
Protein	3.19
Yağ	0.80
Karbonhidrat	10.33
Lif	1.18
Kül	1.50

Tepsiler üzerine ince tabaka halinde yerleştirilmiş olan nane yaprakları, kurutma sisteminin kararlı hal şartlarına ulaşmasının ardından, kuruma işlemine bırakılır. Nane yapraklarının toprak kaynaklı ısı pompalı kurutucuda kurutulması % 16 nispi nem değerine sahip, üç farklı hava

sıcaklığında (40 °C, 45 °C ve 50 °C) gerçekleştirilmiştir. Hava hızı 1 m/s olarak belirlenmiştir. Çevre havasının sıcaklık ve nispi nem değerleri sırasıyla, 20 °C ve % 70 olarak ölçülmüştür.

Nane yapraklarında deney süresince gerçekleşen nem kaybı, örneklerin 30 dakikalık aralıklarla tartılması ve sonuçların kaydedilmesi yoluyla takip edilmiş ve kuruma eğrisi de bu veriler kullanılarak çizilmiştir. Kurutma işlemi ürünün nem içeriği yaklaşık % 15 (yaş baza göre) olana dek sürdürülmüştür.

Kurutma süresince, Şekil 6.3 üzerinde işaretlenmiş olan ve Bölüm 6.1.2'de anlatılmış olan noktalarda gerekli ölçümler yapılmıştır. Nane yapraklarının kurutulması ile ilgili çekilmiş olan fotoğraflar Şekil 6.12'de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6.12 TKIPK sisteminde nane kurutma

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında makarna, zeytin, elma, havuç ve nane gibi birbirinden farklı özellikte beş çeşit ürünün kurutma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde her bir ürün için kuruma eğrileri ve makarnanın fabrika şartlarında ve TKIPK sisteminde kurutulması, elektrikli bir kurutucuda ve TKIPK sisteminde zeytin kurutulması ve elma, havuç ve nanenin TKIP kurutucuda kurutulması ile ilgili ölçüm ve hesaplama sonuçları ile ekserji analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca ekserji analizi sonuçlarının hesaplanan belirsizlik değerleri de bu bölümde sunulmuştur.

7.1 Makarna Kurutma ile İlgili Sonuçlar

Makarnanın fabrika şartlarında kurutulduğu sistem Bölüm 6.1’de detaylı olarak anlatılmıştır. Şekil 6.2’de farklı renklerle belirtilmiş olan hava, sıcak su ve ürün akışları görülebilmektedir. Tüm sistem için, her bir akımın giriş ve çıkış noktalarında ölçülmüş olan değerler Tablo 7.1’de verilmiştir.

Kurutma havasının termal ve psikrometrik ve sıcak suyun termal özellikleri “Computer Aided Thermodynamic Tables 2” adlı program kullanılarak hesaplanmıştır.

Makarna örneklerinin özgül ısı değerleri Tablo 6.2’de verilmiş olan bileşim değerleri ile her bir kurutucudaki giriş – çıkış sıcaklıkları için, uzaklaştırılan su miktarları da göz önünde bulundurularak (5.22) – (5.28) eşitliklerinin kullanılması ile hesaplanmıştır. Ürün için entalpi değerleri (5.19) ve (5.20) denklemleri kullanılarak, entropi farkı değerleri ise (5.33) ve (5.34) eşitlikleri ile hesaplanmıştır.

Tablo 7.1 Makarnanın 4 basamaklı kurutucuda kurutulmasına ait ölçüm değerleri

Birim	Sıcaklık (°C)				Nem (%)				Debi (kg/s)		
	Hava	Ürün	Sıcak su	Hava	Ürün	Sıcak su	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Sıcak su
	Ön	82.0	34.0	129.0	46.0	28.6	100.0	1.670	0.086	1.420	1.420
Kurutma	78.2	76.0	117.0	48.0	22.9	100.0	1.670	0.080	1.420	1.420	1.420
1. Kurutma	Giren	53.0	70.0	129.0	47.0	22.9	100.0	6.270	0.080	1.420	1.420
	Çıkan	49.0	47.4	117.0	48.0	15.2	100.0	6.270	0.073	1.420	1.420
2. Kurutma	Giren	52.0	47.0	129.0	45.5	15.2	100.0	6.270	0.073	1.420	1.420
	Çıkan	50.0	49.6	117.0	46.3	14.3	100.0	6.270	0.072	1.420	1.420
3. Kurutma	Giren	50.6	49.0	129.0	42.0	14.3	100.0	5.350	0.072	1.420	1.420
	Çıkan	49.7	48.8	117.0	43.6	11.5	100.0	5.350	0.070	1.420	1.420

Tablo 7.1’de verilmiş olan ölçüm değerlerinin kullanılması ile sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Ürünün her bir kurutucuya giriş ve çıkışındaki özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

Kurutma havasının giriş ve çıkış akımları için entalpi ve entropi değerleri, sırasıyla (5.29) ve (5.36) denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Özgül ekserji değerleri (5.41) ve (5.42) eşitlikleri ile hesaplanırken, ekserji akımı (5.14) denkliği ile hesaplanmıştır.

Her bir kurutucuya giren ve çıkan sıcak su için özgül ekserji değerleri (5.43) eşitliği ile, ekserji akımı ise (5.14) eşitliği ile hesaplanmıştır.

Her bir kurutucunun giriş ve çıkış akımları için hesaplanan entalpi, entropi, özgül ekserji ve ekserji akımı değerleri Tablo 7.2’de verilmiştir.

4 basamaklı bu kurutma sisteminin içerdiği her kurutucu için, ekserji kayıpları, ekserji yıkım değerleri, ekserji verimliliği ve iyileştirilme potansiyeli değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, her bir kurutucudaki buharlaşmaya bağlı olarak gerçekleşen ekserji akımları da hesaplanmıştır.

Her bir kurutucudaki ekserji kayıpları Eşitlik (5.45) ile, buharlaşma ekserjileri Eşitlik (5.44) ile, iyileşme potansiyeli değerleri Eşitlik (5.62) ile ve ekserji verimliliği değerleri Eşitlik (5.58) ile hesaplanmıştır. Bu sonuçlar da Tablo 7.3’te sunulmuştur.

Hesaplamalar, Microsoft Excel programı kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 7.2 Kurutuculara giren – çıkan akımlar için entalpi, entropi, özgül ekserji ve ekserji akımı değerleri

Birim	Entalpi (kJ/kg)			Entropi (kJ/kg K)			Özgül ekserji kJ/kg s			Ekserji akımı kJ/s		
	Hava	Ürün	Sıcak su	Hava	Ürün	Sıcak su	Hava	Ürün	Sıcak su	Hava	Ürün	Sıcak su
Ön Kurutma	G.	81.06	542.0	8.10	0.03	1.62	552.95	8.75	232.10	923.42	0.75	329.58
	Ç.	784.96	490.9	7.95	0.32	1.49	449.14	92.67	193.72	750.06	7.41	275.08
1. Kurutma	G.	441.59	542.0	7.21	0.28	1.62	137.99	79.73	232.10	865.18	6.38	329.58
	Ç.	417.62	97.83	7.16	0.11	1.49	105.64	23.01	193.72	662.38	1.68	275.08
2. Kurutma	G.	430.94	96.96	7.18	0.11	1.62	127.34	22.21	232.10	798.41	1.62	329.58
	Ç.	420.12	101.33	7.16	0.13	1.49	108.07	26.12	193.72	677.58	1.88	275.08
3. Kurutma	G.	414.02	100.06	7.14	0.12	1.62	110.42	24.96	232.10	590.73	1.80	329.58
	Ç.	412.31	96.18	7.14	0.12	1.49	100.90	21.25	193.72	539.81	1.49	275.08

Tablo 7.3 Her bir kurutucu için $\dot{E}x_k$, $\dot{E}x_{buh}$, $\dot{E}x_{yikim}$, η_{ex} ve $\dot{I}P$ değerleri

Birim	$\dot{E}x_k$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{buh}$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)	η_{ex} (%)	$\dot{I}P$ (kJ/s)
Ön Kurutma	42.77	63.30	241.73	5.05	229.53
1. Kurutma	27.59	42.52	276.93	3.54	267.13
2. Kurutma	7.38	20.00	187.69	1.77	184.36
3. Kurutma	0.84	1.51	106.41	0.16	106.24
Tüm sistem	78.58	127.33	812.76	2.80	787.26

Makarnanın fabrika şartlarında kurutulduğu sistemde, ekserjetik verimliliği en yüksek olan bölüm ön kurutmanın yapıldığı tarabota iken, en verimsiz birim ise son kurutmanın yapıldığı döner kurutucudur.

Şekil 6.2’de de görüldüğü gibi, her kurutucu için kızgın su girişi ve kondens çıkışı vardır. Kurutulan makarnanın içerdiği su miktarı azaldıkça yüksek kalitedeki enerjinin kurutma havasını ısıtmak için kullanımına devam edilmektedir. Bir başka ifadeyle, daha az ürün için aynı bedel ödenmeye devam etmektedir. Bu nedenle sistemin bütününe bakıldığında, gittikçe azalan verimlilik değerleri görülmektedir.

Sistem bütün olarak ele alındığında ekserji verimlilik değeri % 2.80 olarak bulunmuştur.

Gerek bu sistem için, gerek tez kapsamında kullanılmış olan diğer kurutucular ve ürünler için kurutma denemelerinde yapılan ölçümlerin kabul edilen toplam belirsizlikleri Tablo 7.4’te verilmiştir.

Tablo 7.4 Ölçülen ve hesaplanan veriler için toplam belirsizlik değerleri

Değer	Birim	Belirsizlik (%)
Sıcaklık	°C	1.59
Kurutma havası debisi	kg/s	3.00
Ürün debisi	kg/s	1.00
Havanın nem içeriği	%	0.10
Ürünün nem içeriği	%	1.00
Entalpi değerleri	kJ/kg	0.10
Özgül ısı değerleri	kJ/kg K	0.10
Entropi değerleri	kJ/kg K	0.10

Fabrika şartlarında makarna kurutma için hesaplanan, Tablo 7.3'te yer alan parametrelere ait toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5 Dört aşamalı kurutucuda makarna kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri

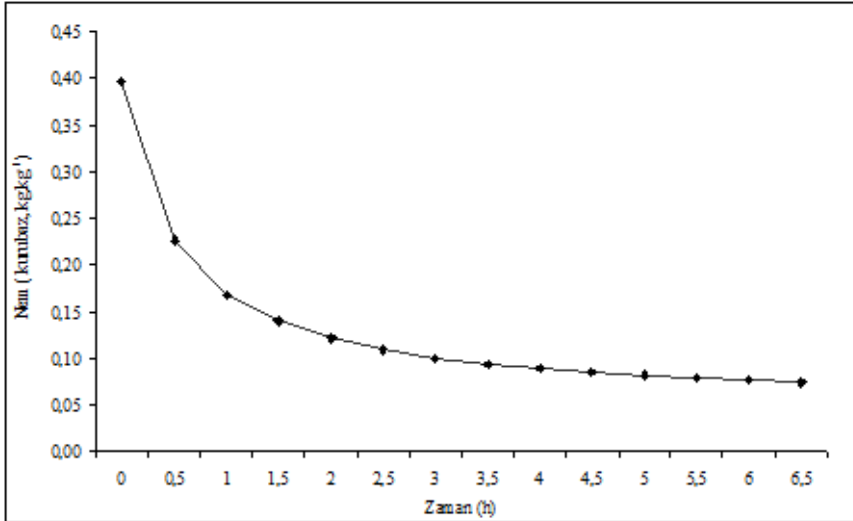
Değer	Birim	Toplam Belirsizlik (%)			
		Ön kurutma	1. Kurutma	2. Kurutma	3. Kurutma
$\dot{E}x_k$	kJ/s	1.92	1.36	0.42	0.20
$\dot{E}x_{buh}$	kJ/s	3.69	2.69	1.26	0.09
$\dot{E}x_{yikim}$	kJ/s	4.25	3.14	2.56	0.92
η_{ex}	%	0.03	0.02	0.01	0.01
$\dot{I}P$	kJ/s	0.13	0.06	0.03	0.01

Bölüm 6.1.2’de anlatıldığı gibi, TKIPK sisteminde makarna kurutulması iki çeşit örnek için gerçekleştirilmiştir. Şekil verilmiş makarna örnekleri 1 ile ön kurutma yapılmış örnekler ise 2 ile numaralandırılmıştır.

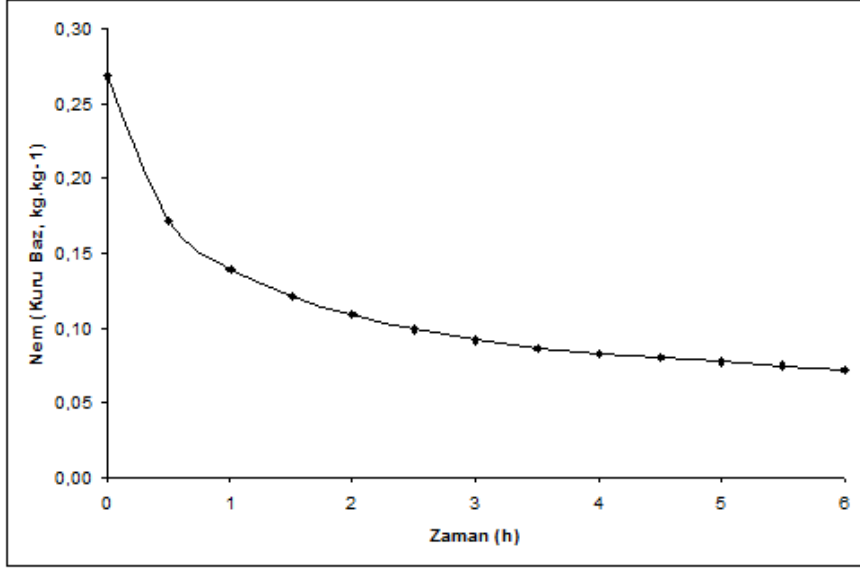
TKIPK sisteminde kurutulan 1 ve 2 numaralı makarna örneklerinin zamana bağlı nem içeriklerinin değişim grafiği Şekil 7.1’de, kuruma debisi grafiği de Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Makarna örneklerinin toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri 1 ve 2 numaralı örnekler için sırasıyla Tablo 7.6 ve Tablo 7.7’de verilmiştir.

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de görülen grafikler, makarna örneklerinin yaklaşık olarak fabrikadaki kuruma süresi kadar TKIPK sisteminde kurutulması durumu için çizilmiştir. Fabrikada elde edilen makarna ile benzer nem içeriğine sahip oluncaya kadar kurutma yapıldığı durumda kuruma süresi 2.5 h ile 3.5 h arasında olmaktadır.



(a)

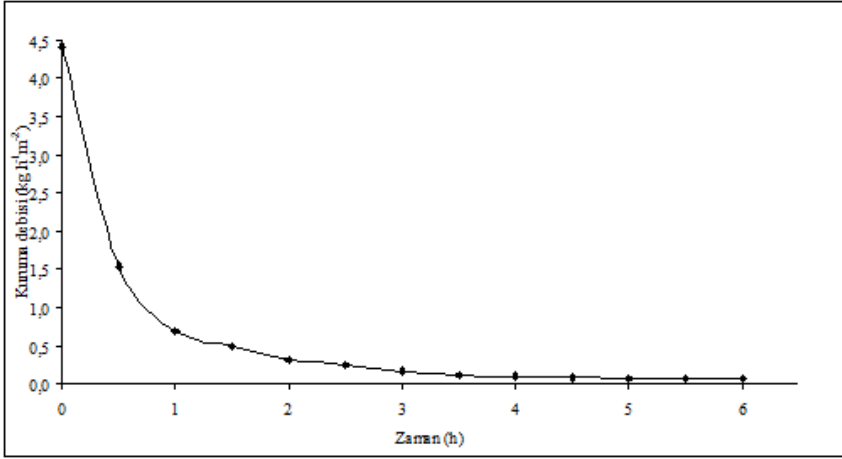


(b)

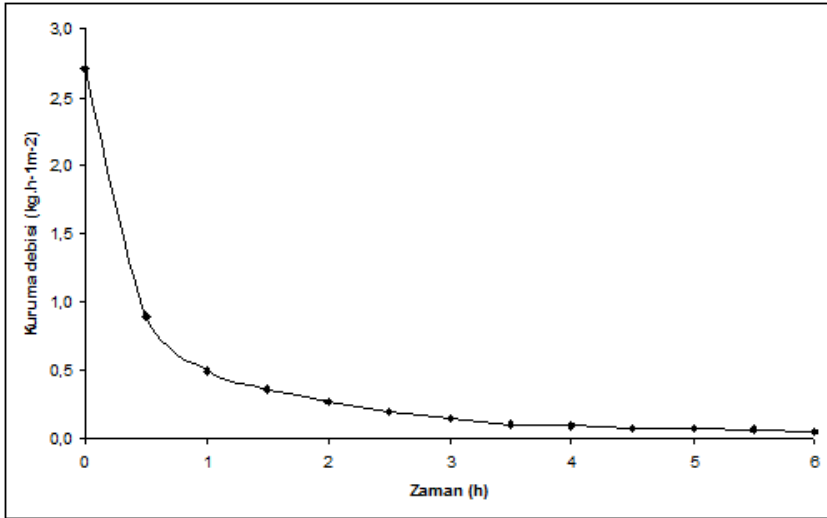
Şekil 7.1 (a) 1 numaralı örnek için, (b) 2 numaralı örnek için
zamana bağlı nem miktarı değişimi

Şekil 7.1'de görüldüğü gibi, 1 numaralı örneğin zamana göre nem içeriğindeki değişim eğrisi 2 numaralı örneğe göre daha diktir. Şekil 7.2'de yer alan kuruma debisi grafikleri ise iki örneğin başlangıç su içeriği miktarları farklı olmasına rağmen birbirine benzerdir.

Eğriler incelendiğinde, 2 numaralı örneğin ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmasının daha uygun olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.2 (a) 1 numaralı örnek için, (b) 2 numaralı örnek için
kuruma debisi eğrileri

Tablo 7.6 1 Numaralı makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri

Hal No	Tanım	Akışkan	Faz	T (°C)	P (bar)	ω (kgsu/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	\dot{m} (kg/s)
1	Evaporatörden çıkış	Su	Sıvı	19.80	101.32	-	83.10	0.2937	0.277
2	Sirkülasyon pompası çıkış	Su	Sıvı	19.85	101.32	-	83.31	0.2944	0.277
3	Evaporatöre giriş	Su	Sıvı	21.40	101.32	-	89.80	0.3165	0.277
0	-	Su	Ö.H.	25.00	101.32	-	104.90	0.3673	-
4	Evaporatör çıkış/Kompresör giriş	R-22	K.B.	2.10	4.40	-	407.80	1.7720	0.0183
5s	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	104.50	29.00	-	458.00	1.7720	0.0183
5a	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	117.50	29.00	-	470.60	1.8050	0.0183
6	Kondenser çıkış/Genleşme valfi giriş	R-22	S.S.	68.00	29.00	-	290.00	1.2860	0.0183
7	Evaporatöre giriş	R-22	Kar.	-3.80	4.40	-	290.00	1.3340	0.0183
0	-	R-22	Ö.H.	25.00	101.32	-	434.30	1.9870	-
8	Fana giriş	Hava	Gaz	38.72	-	0.01197	343.19	6.9576	0.2288
9	Kondensere giriş	Hava	Gaz	39.00	-	0.01204	343.67	6.9582	0.2288
10	Kurutucuya giriş	Hava	Gaz	49.92	-	0.01326	358.07	6.9622	0.2288
11	Kurutucudan çıkış	Hava	Gaz	47.07	-	0.01322	355.00	6.9630	0.2288
0	-	Hava	Ö.H.	25.00	-	0.01189	328.88	6.9648	-
Ü1	Kurutucuya giriş	Ürün	Katı	27.50	-	-	65.34	0.0198	0.055
Ü2	Kurutucudan çıkış	Ürün	Katı	46.00	-	-	90.53	0.1340	0.044
0	-	Ürün	Ö.H.	25.00	-	-	59.33	-	-

Ö. H.: Ölü hal, K.B.: Kızgın buhar, S.S.: Sıkıştırılmış sıvı, Kar.: Karışım

Tablo 7.7.2 Numaralı makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri

Hal No	Tanım	Akışkan	Faz	T (°C)	P (bar)	ω (kgsu/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	\dot{m} (kg/s)
1	Evaporatörden çıkış	Su	Sıvı	19.80	101.32	-	83.10	0.2937	0.277
2	Sirkülasyon pompası çıkış	Su	Sıvı	19.85	101.32	-	83.31	0.2944	0.277
3	Evaporatöre giriş	Su	Sıvı	21.40	101.32	-	89.80	0.3165	0.277
0	-	Su	Ö.H.	25.00	101.32	-	104.90	0.3673	-
4	Evaporatör çıkış/Kompresör giriş	R-22	K.B.	4.10	3.80	-	255.30	0.9700	0.0183
5s	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	121.90	33.00	-	315.20	0.9700	0.0183
5a	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	137.30	33.00	-	330.20	1.0070	0.0183
6	Kondenser çıkış/Genleşme valfi giriş	R-22	S.S.	74.76	33.00	-	260.00	1.2860	0.0183
7	Evaporatöre giriş	R-22	Kar.	-8.00	3.80	-	260.00	1.3340	0.0183
0	-	R-22	Ö.H.	25.00	101.32	-	257.90	1.9870	-
8	Fana giriş	Hava	Gaz	35.52	-	0.00919	232.78	6.9576	0.2288
9	Kondensere giriş	Hava	Gaz	35.60	-	0.00924	333.01	6.9582	0.2288
10	Kurutucuya giriş	Hava	Gaz	50.56	-	0.01310	358.27	6.9622	0.2288
11	Kurutucudan çıkış	Hava	Gaz	47.36	-	0.01307	354.91	6.9630	0.2288
0	-	Hava	Ö.H.	25.00	-	0.01189	328.88	6.9648	-
Ü1	Kurutucu içi	Ürün	Katı	27.00	-	-	60.24	0.0149	0.055
Ü2	Kurutucu içi	Ürün	Katı	47.00	-	-	92.54	0.1402	0.048
0	-	Ürün	Ö.H.	25.00	-	-	55.70	-	-

Ö. H.: Ölü hal, K.B.: Kızgın buhar, S.S.: Sıkıştırılmış sıvı, Kar.: Karışım

Tablo 7.7’de verilen değerler kullanılarak hesaplanmış olan iki çeşit makarna örneğinin TKIPK sisteminde kurutulmasının ekserji analizi sonuçları kurutma kabini için ve tüm sistem için olmak üzere Tablo 7.8 ve Tablo 7.9 da verilmiştir.

Her iki örneğin kurutucuya giriş ve çıkışındaki özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

Kurutma havasının giriş ve çıkış akımları için entalpi ve entropi değerleri, sırasıyla (5.29) ve (5.36) denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Özgül ekserji değerleri (5.41) ve (5.42) eşitlikleri ile hesaplanırken, ekserji akımı (5.14) denkliği ile hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği hesaplamaları için (5.58) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

Soğutucu akışkanın ısı pompasının her bir ünitesine giriş – çıkışındaki entalpi ve entropi değerleri “Computer Aided Thermodynamic Tables 2” adlı program kullanılarak hesaplanmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompasının elemanlarına ait ekserji analizi Bölüm 5.1.1’de verilmiş olan denklemler kullanılarak yapılmıştır.

Isı pompalı kurutucuda makarna kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.10’da verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Fabrikada, fiyonk makarna hattında ve toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulan makarna örnekleri için yapılmış olan kalite analizlerinin sonuçları Tablo 7.11’de verilmiştir.

Tablo 7.8 Kurutma kabini için ekserji analizi sonuçları

Hesaplanan değer	Örnek No	
	1	2
$(\dot{E}x_m)_{giren}$ (kJ/s)	0.30	0.23
$(\dot{E}x_m)_{çikan}$ (kJ/s)	1.23	1.60
$(\dot{E}x_{kh})_{giren}$ (kJ/s)	6.86	6.90
$(\dot{E}x_{kh})_{çikan}$ (kJ/s)	6.09	6.07
$\dot{E}x_{evap}$ (kJ/s)	2.81	1.83
$\dot{E}x_{kayıp}$ (kJ/s)	1.20	0.64
$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)	1.77	1.74
η_{ex} (%)	39.21	25.70
$\dot{I}P$ (kJ/s)	1.08	1.29

Tablodan da görüldüğü gibi, TKIPK sisteminde kurutma kabininin kontrol hacmi olarak seçildiği durumda ekserji verimliliği 1 numaralı örnek için % 39.21 ve 2 numaralı örnek için % 25.70 olarak bulunmuştur. Bu değerler fabrikada bulunan kurutucuların verimlilik değerleri ile kıyaslandığında oldukça yüksektir.

1 numaralı örneğin başlangıç su içeriği diğerine göre daha yüksek olduğu için, bu ürünün ısı pompalı sistemde kurutulması daha verimli bulunmuştur.

Tablo 7.9 TKIPK sisteminde makama kurutma için tüm sistemin ekserji analizi sonuçları

Birim	$\dot{E}x_{cikan}$ (kJ/s)		$\dot{E}x_{giren}$ (kJ/s)		$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)		η_{ex} (%)		$\dot{I}P$ (kJ/s)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Toprak ısı değiştirici	0.01	0.01	0.04	0.04	0.10	0.10	31.71	31.71	0.07	0.07
Evaporatör	0.73	5.54	0.94	3.61	0.26	4.34	77.86	65.22	0.06	1.51
Kompresör	1.66	6.67	0.69	5.50	2.12	2.54	84.33	85.27	0.33	0.37
Kondenser	8.04	10.76	5.49	8.06	2.55	2.70	68.29	74.92	0.81	0.68
Genleşme valfi	0.92	3.60	1.18	3.86	0.26	0.26	77.88	93.22	0.06	0.02
Fan	3.83	1.39	3.76	1.38	0.18	0.07	68.15	33.04	0.06	0.05
Kurutma kabini	7.32	7.67	7.16	7.13	1.77	1.74	39.21	25.70	1.08	1.29

1: 1 numaralı örnek; 2: 2 numaralı örnek

Tablo 7.10 TKIPK sisteminde makarna kurutma için hesaplanan değerlere ait toplam belirsizlikler

Değer	Birim	Toprak ısı değiştirici		Evaporatör		Kompresör		Kondenser		Genleşme valfi		Fan		Kurutma kabini	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$\dot{E}x_k$	(kJ/s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.70	0.70
$\dot{E}x_{evap}$	(kJ/s)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	0.14
$\dot{E}x_{yikim}$	(kJ/s)	1.04	1.04	1.20	1.20	1.04	1.04	1.20	1.20	0.85	0.85	1.04	1.04	1.16	1.14
η_{ex}	(%)	15.50	15.50	0.97	0.16	0.63	0.38	0.50	0.16	0.64	0.21	3.71	3.96	0.05	0.02
$\dot{I}P$	(kJ/s)	3.47	3.47	0.29	0.52	0.29	0.22	0.71	0.33	0.20	0.07	0.48	0.95	0.72	0.85

Tablo 7.11 Kurutulan makarna örneklerine ait kalite analizi sonuçları

Örnek	Nem (%)	Kül (%) (K.M.'de)	Protein (%) (K.M.'de)	Çektiği su miktarı (g)	Renk	Pişme	Aroma
Fabrikada kurutulan makarna	11.28	0.94	12.09	158	İyi	Dağılım yok	İyi
TKIPK'da kurutulan makarna	1	0.92	10.90	132	Hafif koyu	Çok dağılım var	İyi
	2	10.73	0.93	151	İyi	Çok dağılım var	İyi

Tablo 7.9’da verilmiş olan TKIPK sisteminin tüm birimleri için ekserji analizi sonuçları incelendiğinde makarna örneklerinin bu sistemde kurutulmasının verimli olduğu söylenebilir.

Kuruma eğrileri, ekserji analizi sonuçları ve kalite değerlendirmesi birlikte yorumlandığında; 2 numaralı örneğin TKIPK sisteminde kurutulmasının daha uygun olduğu söylenebilir.

Ön kurutma işlemi yapılmamış olan 1 numaralı örneğin ekserji verimliliği açısından daha iyi sonuç vermesine rağmen, kuruma eğrilerine bakıldığında 2 numaralı örnekle kuruma süresi açısından çok farklı değildir ve kuruma eğrisi daha dik bir eğime sahiptir. 1. bölümde de ifade edildiği gibi, dik bir kuruma eğrisi, çok hızlı kurutma dolayısıyla son üründe çatlama ve dağılmalar oluşmasını ifade eder.

Fabrikadan alındıktan sonra ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmuş olan her iki örnek de arzu edilen kalite özelliklerine sahip olamamıştır. Bunun birkaç nedeni olduğu düşünülmektedir, öncelikle makarna örnekleri fabrikadaki gibi şekil verildikten sonra hemen kurutma işlemine başlanamamıştır. 2 numaralı örnekte ön kurutma yapılmış olması, bu üründe diğerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Fabrikada döner tambur kurutucular kullanılırken, TKIPK sisteminin kurutucusu tepsilidir. Makarna, yapısı gereği tepsili kurutucuda kurutmaya çok uygun bir ürün değildir. Bu nedenle de kurutulmuş örneklerde çatlamlar oluşmuş olabilir.

Son üründe çatlamlar olması ve pişirirken çok dağılma meydana gelmesinin en önemli nedeninin kurutma havasının nem içeriğindeki farklılık olduğu düşünülmektedir. Tablo 7.1’de görüldüğü gibi, fabrikadaki kurutma sisteminde kurutma için kullanılan havanın nispi nem değeri % 40’ın üstündedir. Isı pompalı kurutma sisteminde kullanılan havanın nispi nem değeri ise % 16 civarındadır.

TKIPK sisteminde kurutulmuş olan makarna örneklerinin nem, kül ve protein miktarları Türk Standartları Enstitüsünün TS 1620 numaralı makarna standardına göre uygun değerdedir. 2 numaralı örnek için renk ve aroma değerleri de istenilen düzeydedir. Pişme özellikleri ise yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı iyi değildir.

Sonuç olarak, fabrika şartlarında ön kurutma işleminden sonraki kurutma bölümlerinde havayı ısıtmak için toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin uygun olduğu söylenebilir.

Yüksek kalitede (yüksek sıcaklıkta) fosil yakıtlar gibi enerji kaynakları, mekan ve su ısıtma veya soğutma, endüstriyel kurutma, endüstriyel buhar üretimi gibi nispeten düşük sıcaklık proseslerinde kullanılmakta ve bu da oldukça düşük ekserji verimi elde edilmesine yol açmaktadır. Bu bakımdan, enerji kaynağı ve kullanımının daha iyi birbirine eş olmasına olanak veren ekserji verimi, yüksek kaliteli enerjinin yüksek kaliteli işlerde kullanılması gerektiğini göstermektedir (Dincer, 2002).

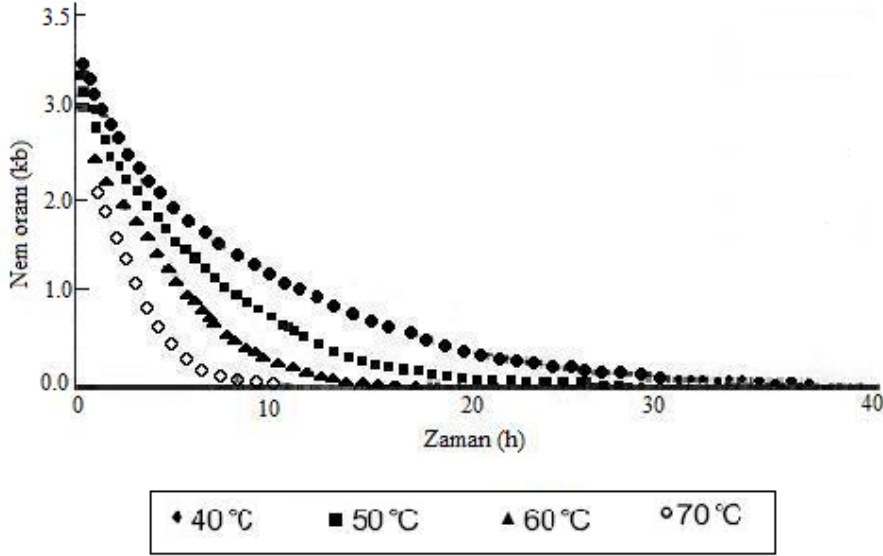
Fabrika şartlarında, ön kurutma hariç, 50 °C civarında kurutma havası sağlamak için kömürlü kazanlar kullanılırken, toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde toprağın 50 m derinliğindeki ısı kullanılmaktadır. Böylece düşük kalitedeki enerji kaynağı düşük sıcaklık uygulaması için kullanılmakta ve ekserji verimi yüksek olmaktadır.

Fabrikadaki sistemde enerji tasarrufu sağlamak için, her bir kurutucuya ayrı sıcak su girişi yerine kondens suyunun değerlendirilmesi ve takip eden kurutucuda havanın ısıtılması için kullanılması da düşünülebilir.

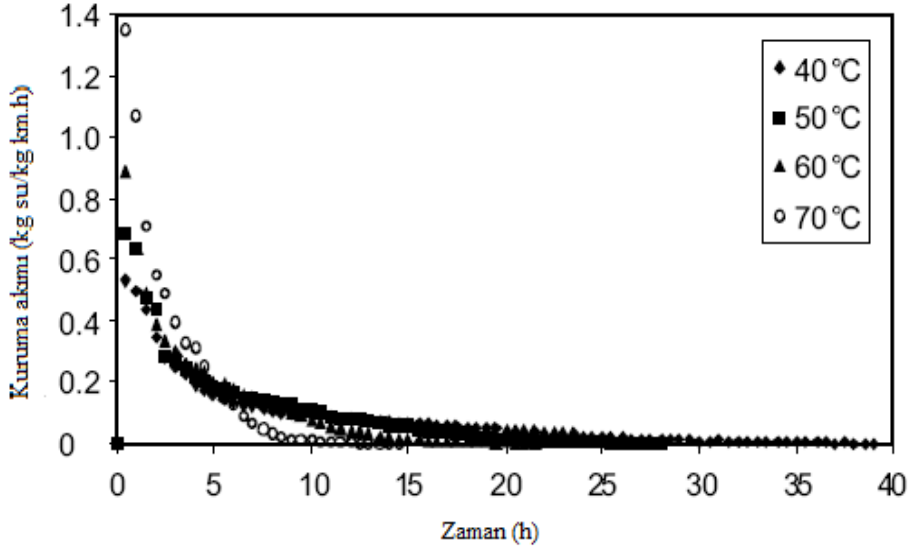
7.2 Zeytin Kurutma ile İlgili Sonuçlar

Yeşil zeytin örneklerinin kurutulduğu, elektrikli kurutma sistemi ve toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sistemi Bölüm 6.2.1’de ve deney prosedürü Bölüm 6.2.2’de detaylı olarak anlatılmıştır.

Elektrikli kurutucuda, dört farklı hava sıcaklığında kurutulan zeytin örneklerinin zamana bağlı nem içeriklerinin değişim grafiği Şekil 7.3’te, kuruma akımı grafiği de Şekil 7.4’te verilmiştir.



Şekil 7.3 Zeytinin elektrikli kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi



Şekil 7.4 Zeytinin elektrikli kurutucuda kurutulması için kuruma akımı grafiği

Elektrikli kurutucuda zeytin kurutulmasının ekserji analizini yapmak üzere ölçülen ve hesaplanan, ürün ve kurutma havasına ait değerler Tablo 7.12’de verilmiş; bu değerler kullanılarak hesaplanmış olan, zeytin örneklerinin dört farklı hava sıcaklığında kurutulmasının ekserji analizi sonuçları ise Tablo 7.13’te verilmiştir.

Elektrikli kurutma sisteminde zeytin kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.14’te verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Tablo 7.12 Elektrikli kurutucuda zeytin kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler

T (°C)	ω (kgsu/kg) (Kurutma havası)	h (kJ/kg)		s (kJ/kg K)		\dot{m} (kg/s)	
		Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün
40	Giren	331.46	65.50	6.88	0.66	0.0098	0.00030
	Çıkan	335.35	75.85	6.90	1.85	0.0098	0.00007
50	Giren	370.36	65.50	6.96	0.66	0.0098	0.00040
	Çıkan	375.03	94.76	6.98	2.31	0.0098	0.00010
60	Giren	393.83	65.50	6.99	0.66	0.0098	0.00070
	Çıkan	398.50	115.92	7.01	2.73	0.0098	0.00020
70	Giren	420.08	65.50	7.01	0.66	0.0098	0.00100
	Çıkan	428.46	139.36	7.04	3.11	0.0098	0.00025

Tablo 7.13 Elektrikli kurutucuda zeytin kurutma için

 $\dot{E}x_k$, $\dot{E}x_{buh}$, $\dot{E}x_{yikim}$, η_{ex} ve IP değerleri

T (°C)	$\dot{E}x_k$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{evap}$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)	η_{ex} (%)	IP (kJ/s)
40	0.037	0.033	0.031	7.87	0.028
50	0.045	0.048	0.046	6.17	0.043
60	0.035	0.053	0.064	5.23	0.060
70	0.049	0.075	0.113	5.94	0.106

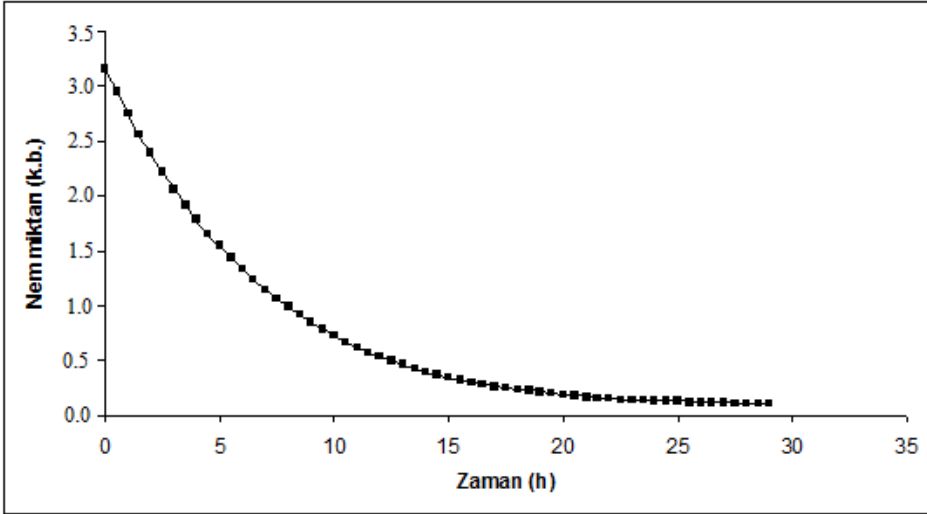
Tablo 7.14 Elektrikli kurutucuda zeytin kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri

Değer	Birim	Toplam Belirsizlik			
		Kurutma havası sıcaklığı (° C)			
		40	50	60	70
$\dot{E}x_k$	kJ/s	1.26	1.98	1.34	1.41
$\dot{E}x_{buh}$	kJ/s	0.05	0.07	0.08	0.08
$\dot{E}x_{yikim}$	kJ/s	1.55	2.17	1.61	1.68
η_{ex}	%	0.18	0.10	0.08	0.07
IP	kJ/s	1.45	2.03	1.51	1.58

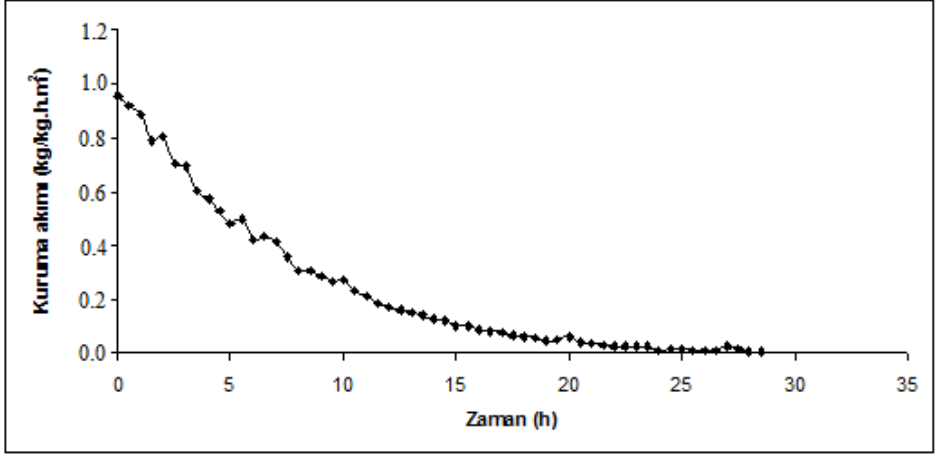
Yeşil zeytinin kurutucuya giriş ve çıkışındaki özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri Bölüm 5.1.2’de verilen eşitliklerle belirlenmiş; özgül ısı hesaplaması için Tablo 6.3’te verilmiş olan bileşim değerleri dikkate alınmıştır. Özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği hesaplamaları için (5.58) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

4 farklı sıcaklıktaki kurutma havasının sisteme giriş ve çıkış akımları için entalpi ve entropi değerleri, sırasıyla (5.29) ve (5.36) denklemleri kullanılarak belirlenmiştir. Özgül ekserji değerleri (5.41) ve (5.42) eşitlikleri ile hesaplanırken, ekserji akımı (5.14) denkliği ile hesaplanmıştır.

TKIPK sisteminde yeşil zeytin kurutma için nem miktarının zamanla değişimi ve kuruma debisi grafikleri sırasıyla Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.5 Zeytinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi



Şekil 7.6 Zeytinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma akımı grafiği

Yeşil zeytin örneklerinin toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri Tablo 7.15'te verilmiştir. Tablodaki değerler kullanılarak elde edilen, zeytinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ekserji analizi sonuçları kurutma kabini için Tablo 7.16'da, tüm sistem için Tablo 7.17'de verilmiştir.

Ürünün ve kurutma havasının ısı pompalı kurutucuya giriş ve çıkışındaki entalpi, entropi, özgül ekserji değerleri ve ekserji akımları elektrikli kurutucuda bahsedilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

Soğutucu akışkanın ısı pompasının her bir ünitesine giriş – çıkışındaki entalpi ve entropi değerleri “Computer Aided Thermodynamic Tables 2” adlı program kullanılarak hesaplanmıştır. Toprak kaynaklı ısı pompasının elemanlarına ait ekserji analizi Bölüm 5.1.1'de verilmiş olan denklemler kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 7.15 Yeşil zeytin örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçüm değerleri

Hal No	Tanım	Akışkan	Faz	T (°C)	P (bar)	ω (kgsu/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	\dot{m} (kg/s)
1	Evaporatörden çıkış	Su	Sıvı	14,40	101,32	-	60,47	0,2937	0,277
2	Sirkülasyon pompası çıkış	Su	Sıvı	16,50	101,32	-	69,27	0,2944	0,277
3	Evaporatöre giriş	Su	Sıvı	16,80	101,32	-	70,53	0,3165	0,277
0	-	Su	Ö.H.	15,00	101,32	-	62,98	0,3673	-
4	Evaporatör çıkış/Kompresör giriş	R-22	K.B.	2,80	3,80	-	255,30	0,9700	0,0183
5s	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	120,60	33,00	-	313,90	0,9667	0,0183
5a	Kondenser giriş/Kompresör çıkış	R-22	K.B.	135,90	33,00	-	328,78	1,0040	0,0183
6	Kondenser çıkış/Genleşme valfi giriş	R-22	S.S.	74,76	33,00	-	260,00	0,8200	0,0183
7	Evaporatöre giriş	R-22	Kar.	-8,00	3,80	-	246,90	0,9390	0,0183
0	-	R-22	Ö.H.	15,00	101,32	-	62,52	0,9100	-
8	Fana giriş	Hava	Gaz	34,59	-	0,0087	330,62	6,9576	0,22
9	Kondensere giriş	Hava	Gaz	35,00	-	0,0088	331,27	6,9582	0,22
10	Kurutucuya giriş	Hava	Gaz	50,09	-	0,0116	353,87	6,9622	0,22
11	Kurutucudan çıkış	Hava	Gaz	47,04	-	0,0171	365,04	6,9630	0,22
0	-	Hava	Ö.H.	15,00	-	-	288,60	6,9648	-
Ü1	Kurutucu içi	Ürün	Katı	23,00	-	-	83,70	0,0997	0,0004
Ü2	Kurutucu içi	Ürün	Katı	46,00	-	-	94,76	0,2105	0,0001
0	-	Ürün	O.H.	15,00	-	-	54,60	-	-

Ö. H.: Ölü hal, K.B.: Kızgın buhar, S.S.: Sıkıştırılmış sıvı, Kar.: Karışım

Tablo 7.16 Kurutma kabini için ekserji analizi sonuçları

Hesaplanan değer	Sonuç
$(\dot{E}x_m)_{giren}$ (kJ/s)	0.010
$(\dot{E}x_m)_{çikan}$ (kJ/s)	0.004
$(\dot{E}x_{kh})_{giren}$ (kJ/s)	14.520
$(\dot{E}x_{kh})_{çikan}$ (kJ/s)	16.930
$\dot{E}x_{evap}$ (kJ/s)	1.993
$\dot{E}x_{kayıp}$ (kJ/s)	0.263
$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)	4.138
η_{ex} (%)	13.710
$\dot{I}P$ (kJ/s)	3.571

Isı pompalı kurutucuda zeytin kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.18’de verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümünde bulunan elektrikli kurutucuda ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde bulunan toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde 50 °C sıcaklıktaki hava ile kurutulan yeşil zeytin örnekleri için yapılmış olan kalite analizlerinin sonuçları Tablo 7.19’da verilmiştir.

Tablo 7.17 TKIPK sisteminde zeytin kurutma için tüm sistemin ekserji analizi sonuçları

Birim	$\dot{E}x_{cikan}$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{giren}$ (kJ/s)	$\dot{E}x_{yikim}$ (kJ/s)	η_{ex} (%)	$\dot{I}P$ (kJ/s)
Toprak ısı değiştirici	6.15	7.56	1.42	81.29	0.27
Evaporatör	8.39	9.37	0.98	89.58	0.10
Kompresör	4.38	3.21	2.51	86.66	0.33
Kondenser	18.61	14.19	5.06	76.20	1.19
Genleşme valfi	3.22	4.09	0.87	78.79	0.18
Fan	9.81	9.69	0.26	77.49	0.06
Kurutma kabini	16.93	14.53	4.14	13.71	3.57

Tablo 7.18 TKIPK sisteminde zeytin kurutma için hesaplanan değerlere ait toplam belirsizlikler

Değer	Birim	Toprak ısı değiştirici	Evaporatör	Kompresör	Kondenser	Genleşme valfi	Fan	Kurutma kabini
$\dot{E}x_k$	(kJ/s)	-	-	-	-	-	-	1.68
$\dot{E}x_{evap}$	(kJ/s)	-	-	-	-	-	-	0.22
$\dot{E}x_{yikim}$	(kJ/s)	1.04	1.20	1.04	1.20	0.85	1.04	1.92
η_{ex}	(%)	0.10	0.10	0.40	0.07	0.18	3.30	0.02
$\dot{I}P$	(kJ/s)	0.20	0.12	0.20	0.30	0.18	0.35	1.73

Tablo 7.19 Kurutulan zeytin örneklerine ait kalite analizi sonuçları

Örnek	Nem (%)	Yağ miktarı (%)	Tuz miktarı (%)	Protein miktarı (%)	Renk					Su aktivitesi	
					L	a	b	Renk tonu	ΔE		ΔC
Elektrikli kurutucu için zeytin örnekleri	76.29	14.67	0.50	1.13	55.53	-0.98	35.48	-	-	-	0.99
Elektrikli kurutucuda kurutulmuş zeytin	4.95	65.30	2.00	4.15	34.70	3.14	18.87	80.37	28.76	17.13	0.69
TKIP kurutucu için zeytin örnekleri	77.14	14.19	0.50	0.76	57.77	-3.56	27.59	-	-	-	0.95
TKIP kurutucuda kurutulmuş zeytin	5.02	66.14	2.09	3.08	26.97	6.30	14.98	24.10	34.71	16.01	0.54

Geleneksel elektrikli kurutucuda ve ısı pompalı kurutucuda 50 °C sıcaklıktaki hava ile zeytin kurutma için çizilmiş olan kuruma eğrilerine bakıldığında, (Şekil 7.3 ve Şekil 7.5) kuruma süresinin yaklaşık aynı olduğu görülmektedir. Benzer özellikteki zeytinler iki sistemde de aynı sürede kurutulmuştur ve ısı pompalı kurutma sisteminin ekserji verimliliği elektrikli kurutucuya göre daha yüksek olarak bulunmuştur.

Kalite analizleri temel olarak alındığında, elektrikli kurutma sisteminde 50 °C sıcaklıkta kurutulan yeşil zeytin örneklerinin diğer sıcaklıklarda kurutulanlara göre daha iyi özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar dikkate alınarak, TKIPK sisteminde yeşil zeytin kurutma için hava sıcaklığı 50 °C olarak belirlenmiştir. Ekserji analizi bakımından kurutma havası sıcaklıklarına göre sistem verimliliği incelendiğinde, sistemin en verimli olduğu sıcaklığın 40 °C olduğu, diğer sıcaklıklarda da yakın sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

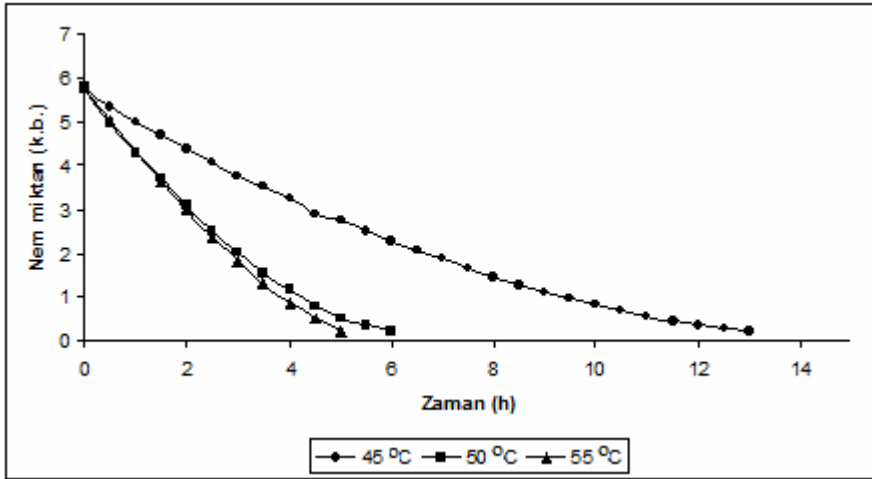
Zeytinin elektrikli ve ısı pompalı kurutucularda 50 °C hava sıcaklığında kurutulması sonucunda yapılan kalite analizi sonuçları incelendiğinde, nem, yağ, tuz ve protein içeriklerinin birbirine yakın olduğu, renk tayini sonucuna bakıldığında ise ısı pompalı kurutucuda kurutulmuş olan zeytin örneklerinde kahverengileşmenin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, su aktivitesi değeri IPK sisteminde kurutulan zeytin örneklerinde daha düşük bulunmuştur.

Isı pompalı kurutma sistemi için performans katsayısı (COP) değeri Eşitlik (5.49) kullanılarak hesaplanmış ve 1.45 olarak bulunmuştur. TKIP sisteminin COP değeri ise Eşitlik (5.48) kullanılarak 2.65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca bakarak, ısı pompalı sistemin elektrikli sisteme göre daha verimli olduğu söylenebilir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yeşil zeytinin ısı pompalı kurutucuda kurutulmasının daha uygun olduğu söylenebilir.

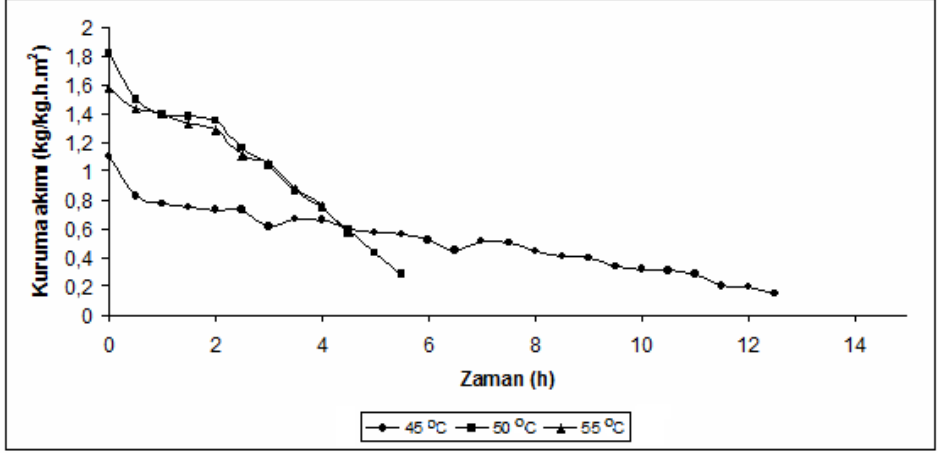
7.3 Elma Kurutma ile İlgili Sonuçlar

Elma dilimlerinin toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulması için kullanılan deney düzeneği ve deney yöntemi Bölüm 6.3'te detaylı olarak anlatılmıştır. 3 farklı hava sıcaklığında (45 °C, 50 °C ve 55 °C), TKIP kurutucuda elma kurutulması için çizilmiş olan, nem miktarının (k.b.) kurutma süresince değişim grafiği Şekil 7.7'de; kuruma debisi grafiği Şekil 7.8'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7 Elma dilimlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi

Şekil 7.7'den de görüldüğü gibi, 50 °C ve 55 °C hava sıcaklıklarında elma kurutma, sırasıyla 6 h ve 5 h sürmektedir ve elde edilen kuruma eğrileri birbirine çok yakındır, 45 °C'deki kuruma eğrisi ise daha yataydır ve kuruma süresi de 13 h'tir. Sacilik and Elicin (2006) tarafından, 40 °C, 50 °C ve 60 °C sıcaklıklarda 5 mm kalınlıktaki elma dilimlerinin kurutulması için çizilmiş olan zamana bağlı nem içeriği değişimi eğrilerinin Şekil 7.7'deki eğrilere benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7.8 Elma dilimlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma debileri grafiği

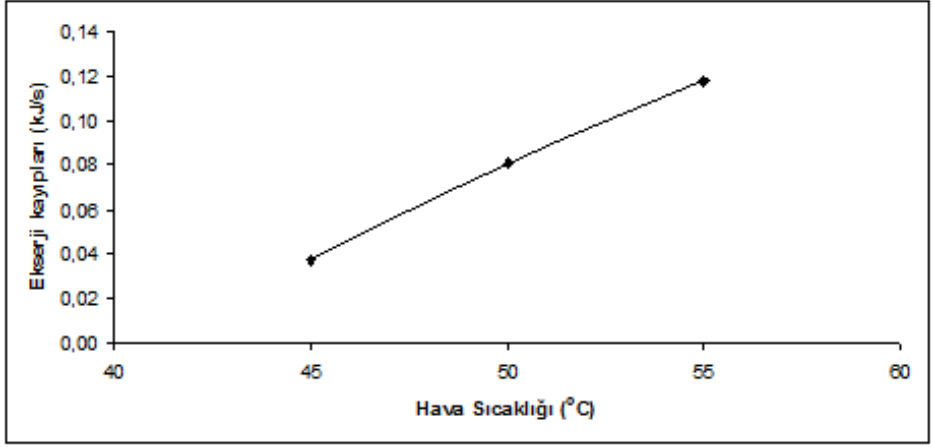
Elma dilimlerinin başlangıçtaki ve kurutulduktan sonraki özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri Bölüm 5.1.2’de verilen eşitliklerle belirlenmiş; özgül ısı hesaplaması için Tablo 6.4’te verilmiş olan bileşim değerleri dikkate alınmıştır. Özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği hesaplamaları için (5.58) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

Isı pompalı kurutucuda elma kurutma için ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo 7.20’de verilmiş, bu değerler kullanılarak ekserji analizi yapılmıştır. Ekserji kayıplarının hava sıcaklığı ile değişimi Şekil 7.9’da ve hava sıcaklığı ile ekserji verimliliği arasındaki ilişki Şekil 7.10’da verilmiştir.

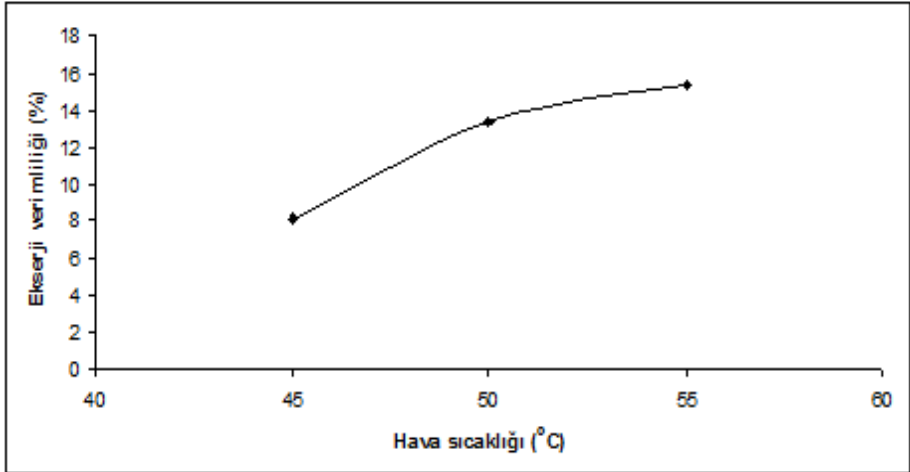
Isı pompalı kurutucuda elma kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.21’de verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Tablo 7.20 Elma örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler

T (°C)	ω_1 (g/g)	ω_2 (g/g)	h_1 (kJ/kg)		h_2 (kJ/kg)		s_1 (kW/K)		s_2 (kW/K)		\dot{m}_1 (kg/s)		\dot{m}_2 (kg/s)	
			Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün
45	0.012	0.015	349.28	102.74	354.96	126.46	6.95	1.14	6.98	2.27	0.01	0.0004	0.01	0.0001
50	0.016	0.022	364.77	102.74	377.20	138.19	6.98	1.14	7.03	2.52	0.01	0.0008	0.01	0.0002
55	0.020	0.028	380.35	102.74	399.04	152.85	7.01	1.14	7.07	2.81	0.01	0.001	0.01	0.0002



Şekil 7.9 Elma kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji kayıplarının değişimi



Şekil 7.10 Elma kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji verimliliğinin değişimi

TKIPK sisteminde elma kurutma için Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da verilen grafikler incelendiğinde, kurutma havası sıcaklığı arttıkça hem ekserji kayıplarının hem de ekserji verimliliğinin arttığı görülmektedir.

Tablo 7.21 Elma kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri

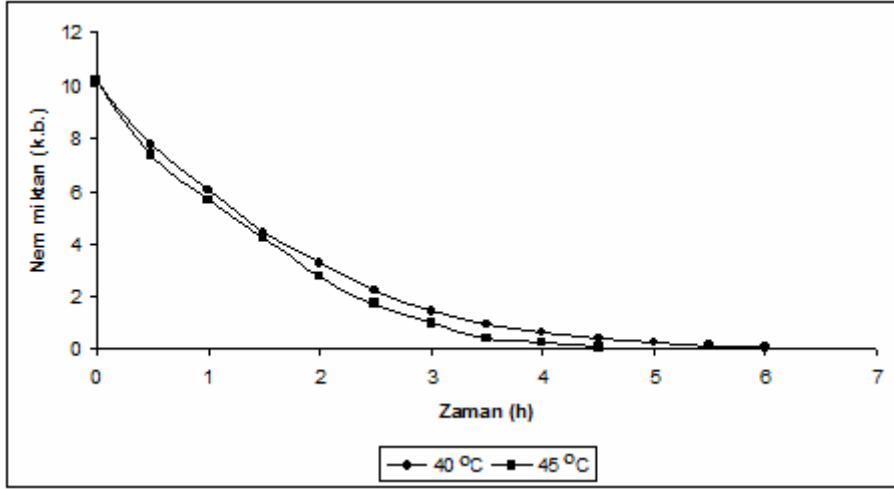
Değer	Birim	Toplam Belirsizlik (%)		
		Kurutma havası sıcaklığı (° C)		
		45	50	55
$\dot{E}x_k$	kJ/s	1.00	1.07	1.15
$\dot{E}x_{buh}$	kJ/s	0.06	0.06	0.06
$\dot{E}x_{yikim}$	kJ/s	1.34	1.39	1.46
η_{ex}	%	0.16	0.15	0.14
$\dot{I}P$	kJ/s	1.34	1.16	1.22

Ekserji analizi sonuçları değerlendirildiğinde, elma kurutma için, elde edilen en yüksek ekserji verimliliği değerinin 55 °C hava sıcaklığında olduğu görülmektedir.

Kurutulmuş elma örneklerinin su aktivitesi değeri 0.45 olarak ölçülmüştür. Bu değer, Şekil 4.2’de verilmiş olan grafikten de görüldüğü gibi, mikrobiyal aktivite ve enzim aktivitesi açısından güvenli bir değer olduğu söylenebilir.

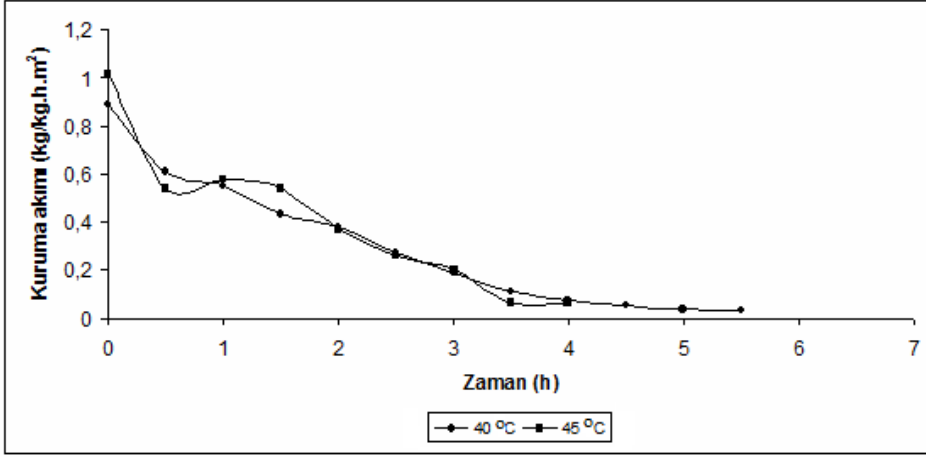
7.4 Havuç Kurutma ile İlgili Sonuçlar

Havuç örneklerinin toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulması için kullanılan deney düzeneği ve deney yöntemi Bölüm 6.4’te detaylı olarak anlatılmıştır. 2 farklı hava sıcaklığında (40 °C ve 45 °C), TKIP kurutucuda havuç kurutulması için çizilmiş olan, nem miktarının (k.b.) kurutma süresince değişim grafiği Şekil 7.11’de; kuruma debisi grafiği ise Şekil 7.12’de gösterilmiştir.



Şekil 7.11 Havuç örneklerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi

Şekil 7.11’de görüldüğü gibi, 40 °C sıcaklıktaki hava ile havuç kurutulması 4.5 s sürerken, 45 °C sıcaklıktaki hava ile 6 s sürmektedir. Kuruma eğrileri her iki sıcaklık için de benzer özellik göstermektedir.



Şekil 7.12 Havuç örneklerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması için kuruma debileri grafiği

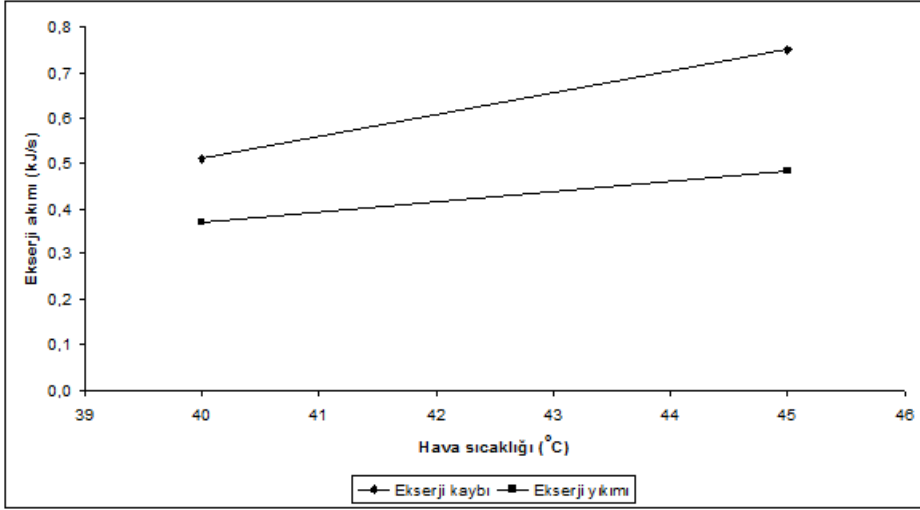
Havuç dilimlerinin kurutucu giriş ve çıkışındaki özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri Bölüm 5.1.2’de verilen eşitliklerle belirlenmiş; özgül ısı hesaplaması için Tablo 6.5’te verilmiş olan bileşim değerleri dikkate alınmıştır. Özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği hesaplamaları için (5.58) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

Isı pompalı kurutucuda havuç kurutma için ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo 7.22’de verilmiş, bu değerler kullanılarak yapılan ekserji analizi sonuçları Şekil 7.13’te ve Şekil 7.14’te yer alan figürlerle ifade edilmiştir.

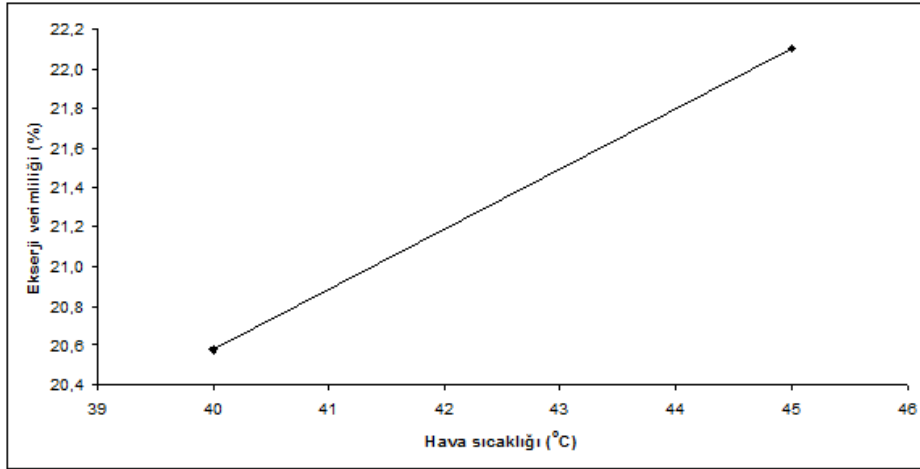
Elma kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.21’de verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Tablo 7.22 Havuç örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler

T (°C)	ω_1 (g/g)	ω_2 (g/g)	h_1 (kJ/kg)		h_2 (kJ/kg)		s_1 (kW/K)		s_2 (kW/K)		\dot{m}_1 (kg/s)		\dot{m}_2 (kg/s)	
			Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün
45	0.008	0.009	334.62	97.15	334.38	80.98	6.91	0.07	6.92	0.13	0.01	0.0008	0.01	0.00008
50	0.011	0.012	346.69	97.15	346.20	90.01	6.93	0.07	6.94	0.16	0.01	0.001	0.01	0.00010



Şekil 7.13 Havuç kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji kayıplarının ve ekserji yıkımlarının değişimi



Şekil 7.14 Havuç kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji verimliliğinin değişimi

Havuç örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulması için seçilmiş

olan iki farklı sıcaklıktan, 45 °C'de kurutmanın ekserji verimliliği 40 °C'dekine göre daha yüksek olarak bulunmuştur. 5 °C'lik sıcaklık farkı ile ekserji verimliliğinde % 7.39'luk bir artış sağlanmıştır.

Elde edilen kuru havuç dilimlerinin su aktivitesi değerleri 0.55 olarak ölçülmüştür. Kuru meyvelerin su aktivitesi değeri genel olarak 0.60 ile 0.65 arasında olmaktadır (Fontana, 1998). Bu açıdan bakıldığında kuru havuç örneklerinin su aktivitesi değerinin güvenli olduğu söylenebilir.

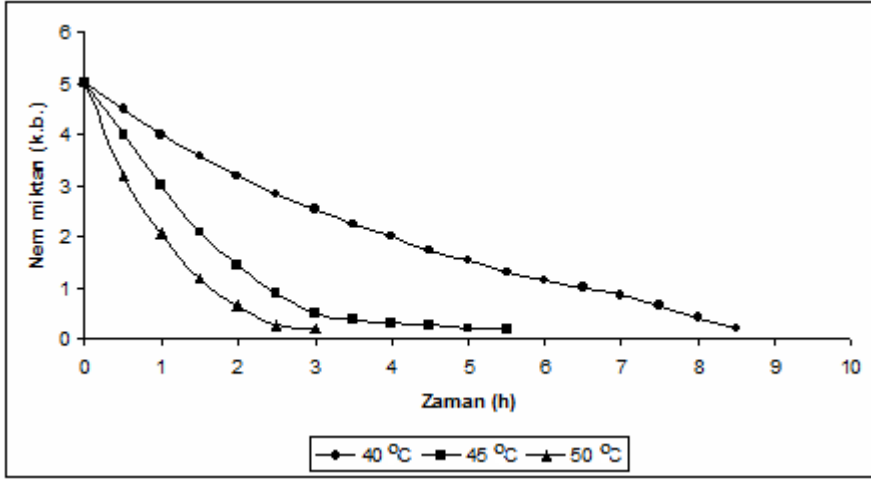
Sonuç olarak, havuç dilimlerinin ön işlem (haşlama) yapıldıktan sonra ısı pompalı kurutucuda 45 °C sıcaklıkta kurutulmasının uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 7.23 Havuç kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri

Değer	Birim	Toplam Belirsizlik	
		Kurutma havası sıcaklığı (° C)	
		40	45
$\dot{E}x_k$	kJ/s	0.91	1.06
$\dot{E}x_{buh}$	kJ/s	0.09	0.11
$\dot{E}x_{yikim}$	kJ/s	1.28	1.39
η_{ex}	%	0.04	0.03
$\dot{I}P$	kJ/s	1.28	1.39

7.5 Nane Kurutma ile İlgili Sonuçlar

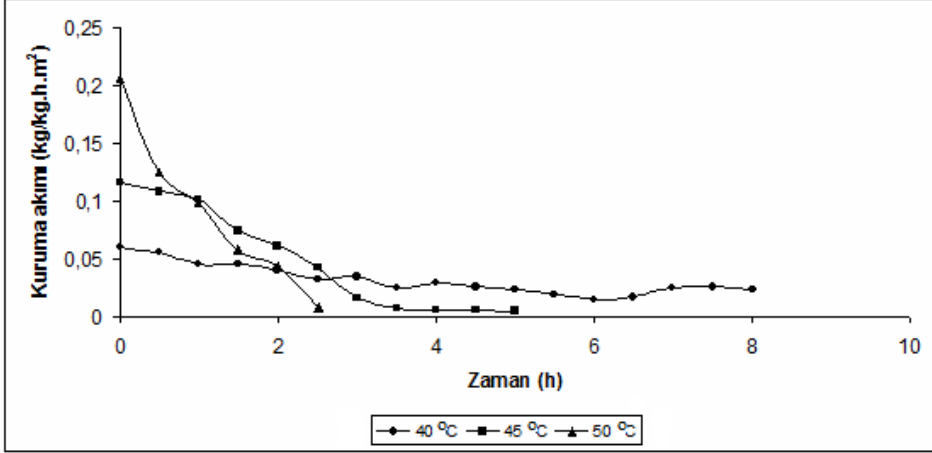
TKIPK sisteminde nane yaprakları kurutulması için kullanılan deney düzeneği ve deney yöntemi Bölüm 6.5'te detaylı olarak anlatılmıştır. 3 farklı hava sıcaklığında (40 °C, 45 °C ve 50 °C), nane kurutma için çizilmiş olan, nem miktarının (k.b.) kurutma süresince değişim grafiği Şekil 7.15'te; kuruma debisi grafiği ise Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.15 Nane yapraklarının ısı pompalı kurutucuda kurutulması için zamana bağlı nem içeriği değişimi

Şekil 7.15'te görüldüğü gibi, 40 °C sıcaklıktaki hava ile nane yapraklarının kurutulması işlemi 8.5 h sürerken, 50 °C sıcaklıktaki hava ile 3 h sürmektedir. 45 °C ve 50 °C için elde edilen kuruma eğrileri benzer özellik göstermektedir.

Şekil 7.16 Nane yapraklarının ısı pompalı kurutucuda kurutulması için



zamana bağlı kuruma debisi değişimi

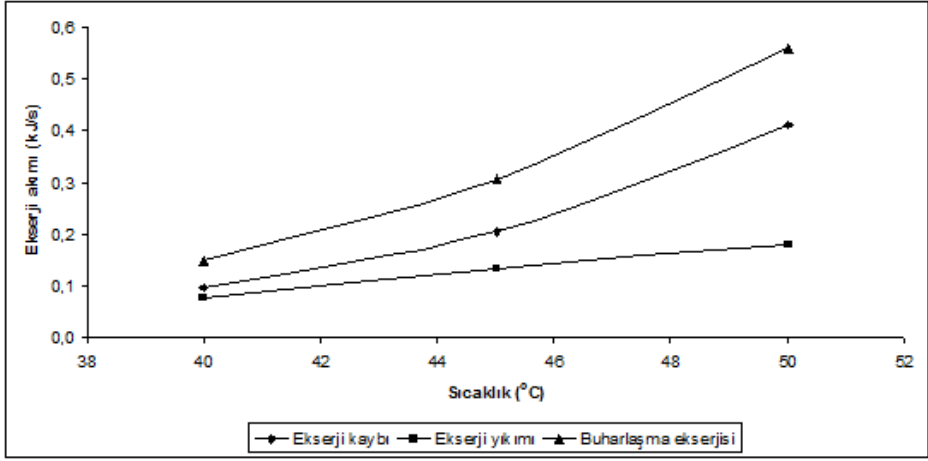
Kurutucu giriş ve çıkışındaki nane yapraklarının özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri Bölüm 5.1.2’de verilen eşitliklerle belirlenmiş; özgül ısı hesaplamaları Tablo 6.6’da yer alan bileşim değerleri dikkate alınmıştır. Özgül ekserji değerleri Denklem (5.39) ve (5.40) kullanılarak, ekserji akımı değerleri ise (5.14) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Ekserji verimliliği hesaplamaları için (5.58) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

Nane yapraklarının ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulması için ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo 7.24’te verilmiştir. Şekil 7.17’de farklı kurutma havası sıcaklıkları ile ekserji kaybı, ekserji yıkımı ve evaporasyon ekserjisi değerleri arasındaki ilişki sunulmuş, Şekil 7.18’de ise hava sıcaklığına bağlı olarak ekserji verimliliğinin değişimi gösterilmiştir.

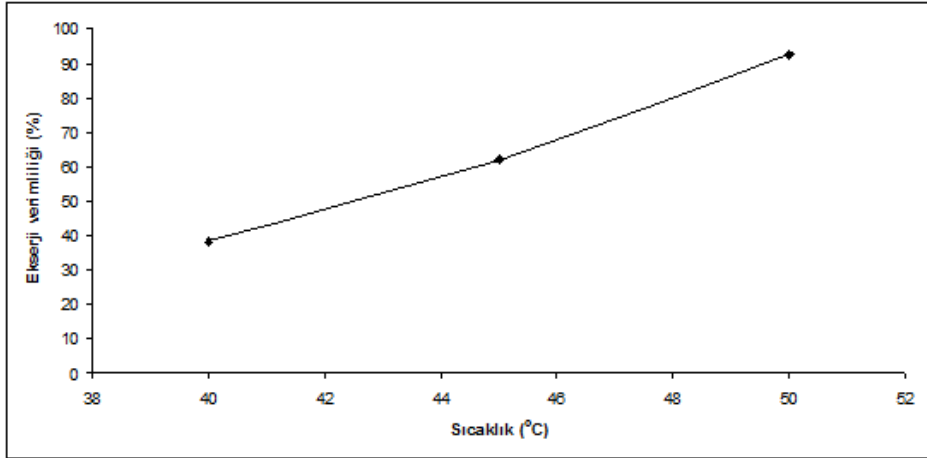
Nane kurutma için ekserji analizi sonuçlarının toplam belirsizlik değerleri (5.76) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.25’te verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan parametrelere ait belirsizlikler Tablo 7.4’te verilen değerler olarak kabul edilmiştir.

Tablo 7.24 Nane yapraklarının TKIPK sisteminde kurutulmasına ait ölçülen ve hesaplanan değerler

T (°C)	ω_1 (g/g)	ω_2 (g/g)	h_1 (kJ/kg)		h_2 (kJ/kg)		s_1 (kW/K)		s_2 (kW/K)		\dot{m}_1 (kg/s)		\dot{m}_2 (kg/s)	
			Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün	Hava	Ürün
40	0.0074	0.0076	332.83	97.63	331.13	78.62	6.90	0.08	6.91	0.12	0.01	0.0002	0.01	0.00004
45	0.0097	0.0099	343.75	97.63	341.32	87.11	6.92	0.08	6.92	0.15	0.01	0.0003	0.01	0.00006
50	0.0120	0.0124	354.80	97.63	352.77	97.76	6.93	0.08	6.94	0.18	0.01	0.0005	0.01	0.00010



Şekil 7.17 Nane kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji kaybı, ekserji yıkımı ve buharlaşma ekserjisi değişimi



Şekil 7.18 Nane kurutma için hava sıcaklığı ile ekserji verimliliğinin değişimi

Şekil 7.18’de görüldüğü gibi TKIPK sisteminde nane kurutma için ekserji verimliliği değerleri hava sıcaklığı arttıkça artmaktadır. 50 °C sıcaklıktaki kurutma havası kullanılması durumunda, ekserji verimliliği % 92.64 gibi oldukça yüksek bir değer olarak bulunmuştur.

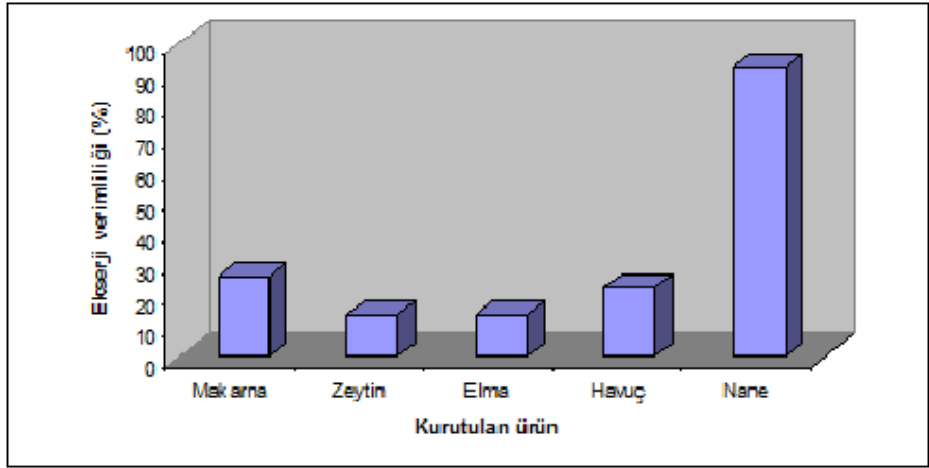
Kurutulmuş nane yaprakları için su aktivitesi değerleri 0.52 olarak ölçülmüştür. Baharatların su aktivitesi değeri genel olarak 0.5 civarındadır (Fontana, 1998). Bu açıdan bakıldığında elde edilen kuru nane örneklerinin su aktivitesi değerinin güvenli olduğu söylenebilir.

Tablo 7.25 Nane kurutma için hesaplanan parametrelerin toplam belirsizlikleri

Değer	Birim	Toplam Belirsizlik		
		Kurutma havası sıcaklığı (° C)		
		40	45	50
$\dot{E}x_k$	kJ/s	0.91	1.04	1.28
$\dot{E}x_{buh}$	kJ/s	0.05	0.06	0.07
$\dot{E}x_{yikim}$	kJ/s	1.28	1.37	1.56
η_{ex}	%	0.64	0.80	0.98
$\dot{I}P$	kJ/s	0.87	0.53	0.09

7.6 TKIPK'da Kurutulan Ürünlerin Karşılaştırılması

Toprak kaynaklı ısı pompalı kurutma sisteminde kurutulmuş olan tüm örnekler için ekserji verimliliği değerleri, makarna, zeytin, elma ve nane için 50 °C, havuç içinse 45 °C kurutma havası sıcaklığı için elde edilen sonuçlar dikkate alınarak Şekil 7.19'da yer alan grafikte karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.19 TKIPK sisteminde kurutulan tüm ürünlerin ekserji verimliliklerinin karşılaştırılması

Şekil 7.19'da da görüldüğü gibi TKIPK sisteminde nane kurutmanın ekserji verimliliği diğerlerine göre oldukça yüksektir. Ekserji verimliliği değerleri (5.58) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, benzer şartlarda, birim zamanda buharlaştırılan su miktarının artması ile ekserji verimliliği değerinin de artması beklenir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, TKIPK sistemi için en uygun ürünün nane olduğu söylenebilir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gıda üretimi için toprak ve su gibi doğal kaynaklar yanında, doğal kaynaklar tarafından sağlanan enerji de gereklidir. Tüm dünyadaki gıda gereksiniminin önümüzdeki 50 yıl içinde iki katına çıkması beklenmektedir. Bu nedenle, gıda üretiminin sürdürülebilirliğinin tartışılması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, gerek ülkemiz, gerek tüm dünya için önemli olan 5 farklı ürünün, yenilenebilir enerji kaynakları içinde gösterilen, geleneksel sistemlere göre verimliliği daha yüksek olan, toprak kaynaklı ısı pompalı bir kurutma sisteminde kurutulabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Makarnanın fabrika şartlarında kurutulduğu sistemde, ekserji verimliliği en yüksek olan bölüm ön kurutmanın yapıldığı tarabota iken, en verimsiz birim ise son kurutmanın yapıldığı döner kurutucudur.
- Kurutulan makarnanın içerdiği su miktarı azaldıkça yüksek kalitedeki enerjinin kurutma havasını ısıtmak için kullanımına devam edilmektedir. Bir başka ifadeyle, daha az ürün için aynı bedel ödenmeye devam etmektedir. Bu nedenle sistemin bütününe bakıldığında, gittikçe azalan verimlilik değerleri görülmektedir.
- Makarna örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulması durumunda ekserji verimliliği 1 numaralı örnek için % 39.21 ve 2 numaralı örnek için % 25.70 olarak bulunmuştur. Bu değerler fabrikada bulunan kurutucuların verimlilik değerleri ile kıyaslandığında oldukça yüksektir.
- Kuruma eğrileri, ekserji analizi sonuçları ve kalite değerlendirmesi birlikte yorumlandığında; ön kurutma yapılmış olan makarna

örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulmasının daha uygun olduğu söylenebilir.

- Kalite analizleri temel olarak alındığında, elektrikli kurutma sisteminde 50 °C sıcaklıkta kurutulan yeşil zeytin örneklerinin diğer sıcaklıklarda kurutulanlara göre daha iyi özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar dikkate alınarak, TKIPK sisteminde yeşil zeytin kurutma için hava sıcaklığı 50 °C olarak belirlenmiştir. Ekserji analizi bakımından kurutma havası sıcaklıklarına göre sistem verimliliği incelendiğinde, sistemin en verimli olduğu sıcaklığın 40 °C olduğu, diğer sıcaklıklarda da yakın sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.
- Yeşil zeytin örneklerinin geleneksel kurutucuda ve ısı pompalı kurutucuda kurutulması için, elde edilen kuruma eğrileri, ekserji analizi sonuçları ve kalite değerlendirmesi birlikte yorumlandığında, yeni bir ürün olan kurutulmuş yeşil zeytin için TKIPK sisteminin önerilebilir olduğu belirlenmiştir.
- Elma kurutma için, ekserji analizi sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek ekserji verimliliği 55 °C hava sıcaklığının kullanıldığı durumda elde edilmiştir.
- TKIPK sistemi elma kurutma için uygun bir sistemdir. Yüksek sıcaklıklar için uygun olmasa da, 55 °C civarı sıcaklıklarda elma kurutma için bu sistem önerilebilir.
- Havuç örneklerinin TKIPK sisteminde kurutulması için seçilmiş olan iki farklı sıcaklıktan, 45 °C'de kurutmanın ekserji verimliliği 40 °C'dekine göre daha yüksek olarak bulunmuştur. 5 °C'lik sıcaklık farkı ile ekserji verimliliğinde % 7.39'luk bir artış sağlanmıştır.
- TKIPK sisteminde nane kurutma için ekserji verimliliği değerleri

hava sıcaklığı arttıkça artmaktadır. 50 °C sıcaklıktaki kurutma havası kullanılması durumunda, ekserji verimliliği % 92.64 gibi oldukça yüksek bir değer olarak bulunmuştur.

- TKIPK sisteminde kurutulan tüm ürünler için, elde edilen ekserji verimliliği değerleri dikkate alındığında, 5 ürün içinden bu sistemde kurutmaya en uygun ürünün nane olduğu söylenebilir.

İşletmelerde gittikçe artan enerji tüketimi, işletmelerin enerjyi ellerinden geldiğince verimli kullanmalarını gerektirmektedir. Fakat ne yazık ki pek çok işletme gereğinden fazla enerji tükettiğinin ve bu tüketimi bir takım basit önlemlerle azaltılabileceğinin farkında değildir.

Pek çok sektörde olduğu gibi, gıda sektöründe de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, petrol dış bağımlılığını ve çevre kirlenmesini azaltacak, aynı zamanda ürün maliyetinin azalmasını sağlayacaktır. Gıda sanayinde, kurutma sektöründe, güneş enerjisi ve ısı pompası kullanan modern tesislerin kurulması, atık ısıların değerlendirilmesi için ısı pompası sistemlerinden yararlanılması ve gıda fabrikalarından çıkan organik atıkların biyoyakıt veya biyagaz hammadde olarak kullanımını sağlayan sistemlerin kurulması bu alanda yapılabilecek işlemlerden bazılarıdır.

Yapılacak çalışmalarda faydalı olabileceği inancıyla, aşağıda çeşitli önerilerde bulunulmuştur:

- Çalışmalarda kullanılmış olan TKIPK sisteminin ekserji verimliliğinin artırılması için yüzey ısı kayıplarının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılması önerilir.
- Daha farklı ürünler için ve farklı hava sıcaklıkları, bağıl nem değerleri, hava hızı değerleri ve farklı ürün miktarları için ekserji analizi yapılabilir.
- Endüstriyel boyuttaki sistemler için ekserji analizinin yanı sıra

eksergoekonomik analiz ve optimizasyon yapılması da önerilir.

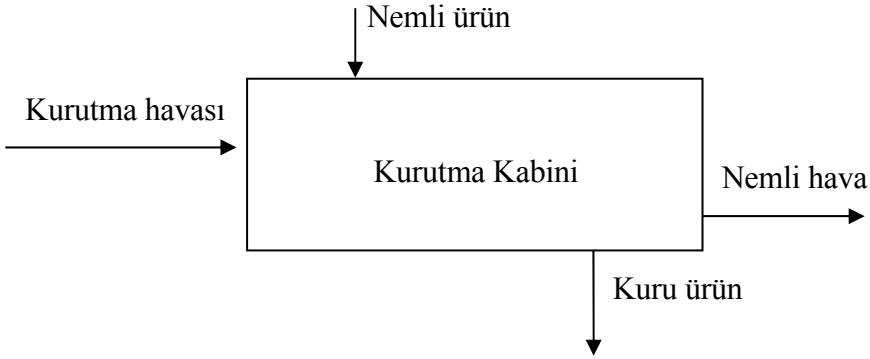
- Endüstriyel olarak ısı pompalarının gıda kurutma sistemlerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılması önerilir.

Üniversite-sanayi ortak projeleri oluşturularak, gıda sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım olanakları geniş kapsamlı olarak incelenmeli, tüm ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak, ülkemiz koşullarına uygun sistemlerin yaygın kullanımına ivme verilmelidir.

EK AÇIKLAMALAR – A

KURUTMA KABİNİ İÇİN EKSERJİ ANALİZİ

Şekil A1’de verilmiş olan temel bir kurutma kabini için örnek ekserji analizi denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil A1. Basit bir kurutma kabininin şematik gösterimi

Ekserji, giren ve çıkan tüm noktalar için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\dot{E}x = \dot{m}.\psi \quad (\text{A.1})$$

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (\text{A.2})$$

Burada, ψ akış ekserjisini (kJ/kg), $\dot{E}x$ zamana bağlı olarak ekserjiyi (kJ/s=kW), \dot{m} kütleli debiyi (kg/s), h özgül entalpiyi (kJ/kg) ve s özgül entropiyi (kJ/kgK) göstermektedir. T_0 referans sıcaklık (ölü hal), h_0 ve s_0 referans sıcaklık için, sırasıyla, entalpi ve entropi değerleridir.

Nemli havanın entalpisini belirlemek için aşağıdaki formül

kullanılabilir:

$$h = c_p T + \omega \cdot h_{fg} \quad (\text{A.3})$$

Burada, c_p kurutma havasının özgül ısısı (kJ/kg K), T kurutma havası sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), ω özgül nem ve h_{fg} doymuş buharın entalpi değeridir (kJ/kg).

Nemli havanın entropisi:

$$s_{nh} = s_{da} - R_{da} \ln \frac{P_{da}}{P_0} + \omega \left(s_b - R_b \ln \frac{P_b}{P_0} \right) \quad (\text{A.4})$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada R gaz sabiti ve P basınç değerlerini göstermektedir.

Gıda maddesinin entalpi değeri ise aşağıdaki formülle hesaplanabilir;

$$h = \sum h_i X_i = \sum \int_{T_1}^{T_2} C_i X_i dT \quad (\text{A.5})$$

Burada, C gıda maddesi bileşenlerinin özgül ısısı ve X kütle fraksiyonudur. İntegral C değeri sıcaklığa bağlı olarak sabit kabul edilip denklem çözülürse,

$$h = \sum C_i X_i (T_2 - T_{ref}) \quad (\text{A.6})$$

yukarıdaki denklem elde edilir. Burada T_{ref} referans sıcaklık (0°C) ve T_2 ise, gıda maddesinin sıcaklığıdır.

Kurutulan gıdanın özgül ısı değerleri saf bileşenler dikkate alınarak aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir (Choi and Okos, 1986; Singh, 1992):

$$C = C_w X_w + C_{pr} X_{pr} + C_f X_f + C_c X_c + C_{fi} X_{fi} + C_a X_a \quad (\text{A.7})$$

Su için;

$$C_w = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5} T + 5.4731 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.8})$$

Protein için;

$$C_{pr} = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3} T - 1.3129 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.9})$$

Yağ için;

$$C_f = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3} T - 4.8008 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.10})$$

Karbonhidrat için;

$$C_c = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3} T - 5.9399 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.11})$$

Lif için;

$$C_{fi} = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3} T - 4.6509 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.12})$$

Kül için;

$$C_a = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3} T - 3.6817 \times 10^{-6} T^2 \quad (\text{A.13})$$

şeklindedir.

Gıda maddesi için özgül entropi değeri,

$$s_{m2} - s_{m1} = C_m \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (\text{A.14})$$

bağıntısından hesaplanabilir.

Belirtilen kurutma kabini için ekserji eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{E}x_{m2} - \dot{E}x_{m1} = \dot{E}x_{da1} - \dot{E}x_{da2} + \dot{E}x_{evap} - \dot{E}x_k - \dot{E}x_{yikim} \quad (\text{A.15})$$

Burada $\dot{E}x_{m1}$, $\dot{E}x_{m2}$, $\dot{E}x_{da1}$, $\dot{E}x_{da2}$ değerleri yukarıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir. $\dot{E}x_{evap}$ ve $\dot{E}x_{loss}$ aşağıdaki formüllerle hesaplandıktan sonra $\dot{E}x_{dest}$ formül (A.15)'ten bulunabilir.

$$\dot{E}x_{evap} = \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \dot{Q}_{evap} \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{E}x_k = \left(1 - \frac{T_0}{T_y}\right) \dot{Q}_k \quad (\text{A.17})$$

Burada, T_m gıda maddesinin sıcaklığını ve T_y kurutma kabini yüzey sıcaklığını ifade etmektedir.

Kurutma kabininin ekserji verimliliği farklı bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir, aşağıda, bu çalışmada kullanılmış olan ekserji verimliliği denklemi yer almaktadır.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{evap}}{\dot{E}x_{giren}} \quad (\text{A.18})$$

EK AÇIKLAMALAR – B

ÖRNEK BELİRSİZLİK ANALİZİ DENKLEMLERİ

Ek A1’de verilmiş olan örnek ekserji analizi denklemleri için belirsizlik analizi hesaplaması bu bölümde anlatılmıştır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.1})$$

Burada, $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ’ler bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri ve w_R sonucun belirsizliğidir.

Ölçülen ve hesaplanan çeşitli veriler için belirsizlik değerleri Tablo B.1’de verilmiştir.

Tablo B.1 Ölçülen ve hesaplanan veriler için toplam belirsizlik değerleri

Değer	Birim	Belirsizlik (%)
Sıcaklık (T_0, T_m, T_{da}, T_b)	°C	1.59
Kurutma havası debisi (m_{sb}, m_{da})	kg/s	3.00
Ürün debisi (m_m)	kg/s	1.00
Havanın nem içeriği	%	0.10
Ürünün nem içeriği	%	1.00
Entalpi değerleri (h_0, h_m, h_{da}, h_{fg})	kJ/kg	0.10
Özgül ısı değerleri	kJ/kg K	0.10
Entropi değerleri (s_0, s_m, s_{da})	kJ/kg K	0.10

Ekserji verimliliğinin belirsizliği aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\frac{w_{\eta}}{\eta} = \left[\left(\frac{w_{Ex_{evap}}}{Ex_{evap}} \right)^2 + \left(\frac{w_{Ex_{giren}}}{Ex_{giren}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.2)$$

Evaporasyon ekserjisi için belirsizlik şu şekilde hesaplanır;

$$\frac{w_{Ex_{evap}}}{Ex_{evap}} = \left[\left(\frac{w_{T_{m2}}}{T_{m2}} \right)^2 + \left(\frac{w_{Q_{evap}}}{Q_{evap}} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_0}}{T_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.3)$$

$$w_{Q_{evap}} = (w_{m_{sb}} \cdot w_{h_{fg}}) \quad (B.4)$$

$$w_{Ex_{giren}} = \left[(w_{Ex_{m1}})^2 + (w_{Ex_{da1}})^2 \right]^{1/2} \quad (B.5)$$

$$w_{Ex_{m1}} = (w_{\psi_{m1}} \cdot w_{m1}) \quad (B.6)$$

$$w_{\psi_{m1}} = \left[(w_{h_{m1}})^2 + (w_{h_0})^2 + (w_{s_{m1}})^2 + (w_{s_0})^2 \right]^{1/2} \quad (B.7)$$

$$w_{Ex_{da1}} = (w_{\psi_{da1}} \cdot w_{m_{da1}}) \quad (B.8)$$

$$w_{\psi_{da1}} = \left[(w_{h_{da1}})^2 + (w_{h_0})^2 + (w_{s_{da1}})^2 + (w_{s_0})^2 \right]^{1/2} \quad (B.9)$$

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abrahamsson K, Stenstrom S, Aly G, Jernqvist A.,** 1997, Application of heat pump systems for energy conservation in paper drying. *International Journal of Energy Research*, 21:631-642.
- Achanta S, Okos MR.,** 2000, Quality changes during drying of food polymers. *Developments in Drying*, Mujumdar AS, Suvachittanont S (eds.), Vol. II, Kasetsart University Press, Thailand, 195-203.
- Achariyaviriya S, Saponronnarit S, Terdyothin A.,** 2000, Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer. *Drying Technology*, 18(1&2):479-491.
- Adapa PK, Schoenau GJ.,** 2005, Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis. *International Journal of Energy Research*, 29:961-972.
- Adapa PK, Schoenau GJ, Sokhansanj S.,** 2002, Performance study of a heat pump dryer system for specialty crops-Part 1: Development of a simulation model. *International Journal of Energy Research*, 26:1001-1019.
- Akpınar E.K.,** 2002, Tarımsal Ürünler İçin Siklon Tipi Bir Kurutucunun Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- Akpınar, E.,** 2004, 'Energy and exergy analyses of drying red pepper slices in a convective type dryer', *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31.
- Akpınar Kavak, E., Midilli, A., Bicer, Y.,** 2005b, 'Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer', *Energy Conversion and Management*, 46, 2530–2552.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y.,** 2005a, Thermodynamic analysis of the apple drying process. *Proc. IMechE Part E: J. Process Mechanical Engineering*, 219:1-14.
- Akpınar, E. K., Midilli, A. and Bicer, Y.,** 2006, The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. *Journal of Food Engineering*, 72(4): 320-331.
- Alves-Filho O, Thorbergesen E, Strommen I,** 1998, A component model for simulation of multiple fluidized bed HPDs. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium*, A:94-101.
- Alves-Filho O, Strommen I,** 1996, Performance and improvements in heat pump dryers. *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, 405-416.
- Alves-Filho O, Eikevik T, Mulet A, Garau C, Rossello C.,** 2007, Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. *Drying Technology*, 25:1155-1161.
- Alves-Filho O, Strommen I, Thorbergesen E.,** 1997, Simulation model for heat pump dryer plants for fruits and roots. *Drying Technology*, 15:1369-1398.
- Alves-Filho O, Thorbergen E, Strømnen I,** 1998, A component model for simulation of multiple fluidized bed heat pump dryers. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium*, A:94-101.
- Alves-Filho O.,** 2002, Combined innovative heat pump drying technologies and new cold extrusion techniques for production of instant foods. *Drying Technology*, 20(8):1541-1557.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Alves-Filho O, Eikevik TM, Goncharova-Alves SV.,** 2008, Single- and multistage heat pump drying of protein. *Drying Technology*, 26:470-475.
- Ameen A, Bari S.,** 2004, Investigation into the effectiveness of heat pump assisted clothes dryer for humid tropics. *Energy Conversion and Management*, 45:1397-1405.
- Andrieu, J. and Stamatopoulos, A.,** 1986, Moisture and heat transfer modeling during durum wheat pasta drying. In *Drying '86*, Vol 2. London: Hemisphere Publishing Corporation.
- AOAC.,** 1990, Dry matter content. In K. Helrich (Ed.) *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Method No.920.151. USA: AOAC, Inc.
- Ayensu, A.,** 1997, Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *J. Solar Energy*, 59(4-6):121-126.
- Bannister P, Bansal B, Carrington CG, Sun ZF.,** 1998, Impact of kiln losses on a dehumidifier dryer. *International Journal of Energy Research*, 22:515-522.
- Barneveld N, Bannister P, Carrington CG.,** 1996, Development of the ECNZ electric heat pump dehumidifier drier pilot-plant. *Annual Conference of the Institute of Professional Engineers of New Zealand*, 2(1):68-71.
- Bejan A.,** 1988, *Advanced Engineering Thermodynamics*, Wiley, NewYork, NY.
- Birchall S.,** 1993, Heat pump drier-investigating energy efficiency, *Proceedings Development and Application of Heat Pump Drier*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Birchall, S.**, 1994, “Heat pump dryers-Investigating energy efficiency. Seminar on The Development and Application of Heat Pump Dryers”. *Pacific Power Energy Services*, 21-31.
- Braun JE, Bansal PK, Groll EA.**, 2002, Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. *International Journal of Refrigeration*, 25:954-965.
- Britnell, P.**, 1994, “Microbiological Consideration for Heat Pump Drying”, Seminar on The Development and Application of Heat Pump Dryers. *Pacific Power Energy Services*, pp.61,
- Cardona TD, Driscoll RH, Paterson JL, Szrednicki GS, Kim WS.**, 2002, Optimizing conditions for heat pump dehydration of Lactic Acid Bacteria. *Drying Technology*, 20(8):1611-1632.
- Carrington CG, Bannister P, Liu Q.**, 1995, Performance analysis of a dehumidifier using HFC-134a. *International Journal of Refrigeration*, 18:477-485.
- Cemeroğlu, B., Acar, J.**, 1986, Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. *Gıda Teknolojisi Derneği Yayını*, Yayın No:6, Ankara.
- Ceylan, I., Aktaş, M. and Doğan, H.**, 2006, Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump, *Applied Thermal Engineering*, article (in press).
- Chang H.**, 2001, Exergy analysis and exergoeconomic analysis of an Ethylene process. *Journal of Science and Engineering*, 4(2):94–104.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Choi, Y., Okos, M.R.**, 1986, Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. *Food Engineering and Process Applications*, Vol.1, Transport Phenomenon, Maguer L and Jelen P (ed.); Elsevier, New York; 93-101
- Chou SK, Hawlader MNA, Ho JC, Chua KJ.**, 1999, The contact factor for dryer performance and design. *International Journal of Energy Research*, 23:1277-1291.
- Chua KJ, Mujumdar AS, Chou SK.**, 2003, Intermittent drying of bioproducts – an overview. *Bioresource Technology*, 90:285-295.
- Chua, K.J, Mujumdar, A.S, Hawlader, M.N.A, Chou, S.K ve Ho, J.C.**, 2001, ‘Batch Drying of Banana Pieces-effect of Stepwise Change in Drying Air Temperature on Drying Kinetics and Product Colour’, *Food Research International*, Sayı: 34, 721-731.
- Chua KJ, Chou SK, Ho JC, Mujumdar AS, Hawlader MNA.**, 2000, Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 78:72-78.
- Chua KJ, Chou SK.**, 2005, A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying. *Applied Thermal Engineering*, 25:1363-1379.
- Chua KJ, Chou SK, Ho JC, Hawlader MNA.**, 2002, Heat pump drying: recent developments and future trends. *Drying Technology*, 20(8):1579-1610.
- Claussen IC, Ustad TS, Strommen I, Walde PM.**, 2007, Atmospheric freeze drying – a review. *Drying Technology*, 25:957-967.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Clements S, Jia X, Jolly P.**, 1993, Experimental verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model. *International Journal of Energy Research*, 17:19-28.
- Colak N, Hepbasli A.**, 2005, Exergy analysis of drying of apple in a heat pump dryer. *2nd International Conference of the Food Industries & Nutrition Division on; Future Trends in Food Science and Nutrition*, 145-158.
- Colak N, Hepbasli A.**, 2007, Performance Assessment of Drying of Blanched Carrot in a Ground-Source Heat Pump Dryer, *The Third International Exergy, Energy and Environment Symposium*.
- Colak N., & Hepbasli A.**, 2007, Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. *Journal of Food Engineering*, 20, 1188-1193.
- Colak N., Kuzgunkaya E., & Hepbasli A.**, 2008, Exergetic assessment of drying of mint leaves in a heat pump dryer. *Journal of Food Process Engineering*, 31, 281-298.
- Colak N and Hepbasli A.**, 2009, A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies, *Energy Conversion and Management*, (incelemede).
- Coogan RC, Wills RBH.**, 2008, Flavor changes in Asian white radish (*Raphanus sativus*) produced by different methods of drying and salting. *International Journal of Food Properties*, 11(2):253-257.
- Cummings, D.A., Litchfield, J.B. and Okos, M.R.**, 1993, Stress and failure prediction for the drying, tempering and cooling of extruded durum semolina, *Drying Technol.*, 11, 1809-1836.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Cunney MB, Williams P.**, 1984, An engine-driven heat pump applied to grain drying and chilling. *Proceedings 2nd International Symposium on the Large Scale Applications of Heat Pumps*,; 283-294.
- Dandamrongrak R, Young G, Mason R.**, 2002a, Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. *Journal of Food Engineering*, 55:139-146.
- Dandamrongrak R, Mason R, Young G.**, 2003, The effect of pretreatments on the drying rate and quality of dried bananas. *International Journal of Food Science and Technology*, 38:877-882.
- Dexter J.E., Matsuo, R.R. and Kruger J.E.**, 1981, The spaghetti making quality of commercial durum wheat samples with variable α -amylase activity, *Cereal Chemistry*, 67, 405-412.
- Dincer I.**, 2002, On energetic, exergetic and environmental aspects of drying systems. *International Journal of Energy Research*, 26: 717-727.
- Dincer I. and Sahin A.Z.**, 2004, 'A new model for thermodynamic analysis of a drying process', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004) 645-652.
- Dincer I.**, 1998, 'Moisture transfer analysis during drying of slab woods', *Heat and Mass Transfer*, 34:317-320.
- Donelli B.J.**, 1991, Pasta: raw materials and processing. *In Handbook of Cereal Science and Technology* , ed. K.J. Lorenz & K. Pulp, Ch. 19, Marcel Dekker, New York.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Driscoll R.**, 2004, Food dehydration. *In Food Processing: Principles and Applications*, ed. Smith J.S. & Hui Y.H., Ch. 2, Blackwell Publishing.
- Eisa MAR.**, 1996, Applications of heat pumps in chemical processing. *Energy Conversion & Management*, 37(3):369-377.
- FAO**, 2007, Food and Agriculture Organization of The United Nations. *FAO Statistical Databases*, <http://faostat.fao.org>
- Fatouh M, Metwally MN, Helali AB, Shedid MH.**, 2006, Herbs drying using a heat pump dryer. *Energy Conversion and Management*, 47:2629-2643.
- Fellows, P.**, 1988, Food Processing Technology. Ellis Harwood Ltd., England.
- Fernandez-Diez, M. J., Castro, R., Garrido, A., Cancho, F. G., Pellisso, F. G., Vega, M. N., et al.**, 1985, *Biocnologia de la aceituna demesa*. Madrid, Spain: CSIC, Ed.
- Fernandez-Golfin Seco JI, Fernandez-Golfin Seco JJ, Hermoso Prieto E, Conde Garcia M.**, 2004, Evaluation at industrial scale of electric-driven heat pump dryers. *Holz Roh Werkst.*; 62:261-267.
- Fiala M, Guidetti R.**, 2008, Drying of medicinal plants with a closed-circuit heat pump dryer. *Zeitschrift fur Arznei- & Gewurzpflanzen*, 13(1):29-35.
- Fontana A.J.**, 1998, Water activity: Why it is important for food safety. *NSF International Conference on Food Safety*, Albuquerque, NM.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Fortes, M. and Ferreira, W.R.**, 2004, Second law analysis of drying: modeling and simulation of fluidized bed grain drying, *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, (pp. 301-308), Sao Paulo, Brazil.
- Friedel W.**, 1984, The large scale applications of heat pumps. 2nd International Symposium, York, U.K.
- Geeraert B.**, 1976, Air drying by heat pumps with special reference to timber drying, in Camatini E and Kester T (Ed.), *Heat Pumps and Their Contribution to Energy Conservation*, Leydon, Noordhoff, 219-246.
- Gehrmann D, Zank J, Kempkes DI.**, 2004, Gentle drying methods in the pharmaceutical and food industry. Dewatering Laboratory NTNU – SINTEF, Eikevik TM (ed.), Trondheim, Norway, 38.
- Goetz V, Elie F, Spinner B.**, 1991, The structure and performance of single effect solid-gas chemical heat pumps. *Heat Recovery Systems & CHP*, 13(1):79-96.
- Gopalnarayanan G, Radermacher R.**, 1997, Heat pump assisted dryer using refrigerant mixtures – batch mode drying. *ASHRAE Trans*, 2:888-895.
- Gorling P.**, 1958, Physical phenomena during the drying of foodstuffs. In *Fundamental Aspects of the Dehydration of Foodstuffs*, Macmillan Co., New York.
- Hammond, G.P. and Stapleton, A.J.**, 2001, Exergy analysis of the United Kingdom energy system. *Proc Instn Mech Engrs* 215(2):141-162.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hawladar MNA, Chou SK, Ho JC, Chua KJ.**, 1998, On the development of a heat pump dryer to maximize heat recovery. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium*, A:616-623.
- Hawladar, M. N. A., Chou, S. K., Jahangeer, K. A., Rahman, S.M. A. Lau K. W., E.**, 2003, Solar-assisted heat-pump dryer and water heater, *Applied Energy*, 74, 185–193
- Hawladar MNA, Jahangeer KA.**, 2006a, Solar heat pump drying and water heating in the tropics. *Solar Energy*, 80:492-499.
- Hawladar MNA, Perera CO, Tian M.**, 2006b, Properties of modified atmosphere heat pump dried foods. *Journal of Food Engineering*, 74:392-401.
- Hawladar MNA, Perera CO, Tian M, Yeo KL.**, 2006c, Drying of guava and papaya: impact of different drying methods. *Drying Technology*, 24:77-87.
- Hawladar MNA, Rahman SMA, Jahangeer KA.**, 2008, Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer. *Energy Conversion & Management*, 49:1612-1619.
- Heldman DR and Singh RP.**, 1989, *Gıda İşleme Mühendisliği*, (Çev: Evranuz Ö. ve Çataltaş İ.), İnkılap Kitabevi, İstanbul, 436s.
- Hesse, B.**, 1994, Heat pump driers: Some basic principles, design considerations and energy efficiency, Seminar on The Development and Application of Heat Pump Dryers, Pacific Power Energy Services, pp.7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hepbasli A., Erbay Z., Icier F., Colak N., Hancioglu E.,** 2009, A review of gas engine driven heat pumps (GEHPs) for residential and industrial applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 85-99.
- Hills B.P., Godward J. and Wright K.M.,** 1997, Fast radial NMR microimaging studies of pasta drying, *Journal of Food Engineering* 33 (3-4), 321-335.
- Ho JC, Chou SK, Mujumdar AS, Hawlader MNA, Chua KJ.,** 2001, An optimization framework for drying of heat sensitive products. *Applied Thermal Engineering*, 21:1779-1798.
- Hodgett DL.,** 1976, Efficient drying using heat pump. *Chemical Engineer*, 510-612.
- Holman J.P.,** 1971, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw- Hill Book Company, 37-52.
- Holman, J.P.,** 1994, *Experimental Methods for Engineers*, 2nd edn. McGraw-Hill. New York.
- Invernizzi C, Angelino G.,** 1990, General method for the evaluation of complex heat pump cycles. *International Journal of Refrigeration*, 13(1):31-40.
- Islam MR, Ho JC, Mujumdar AS.,** 2003, Convective drying with time varying heat input: simulation results. *Drying Technology*, 21:1333-1356.
- Jangam SV, Joshi VS, Mujumdar AS, Thorat BN.** 2008, Studies on dehydration of sapota (*Achras zapota*). *Drying Technology*, 26:369-377.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jia X, Jolly P, Clements S.**, 1990, Heat pump assisted continuous drying part 2:simulation results. *International Journal of Energy Research*, 14:771-782.
- Jia X, Clements S, Jolly P.**, 1993, Study of heat pump assisted microwave drying. *Drying Technology*, 11(7):1583-1616.
- Jolly P, Jia X, Clements S.**, 1990, Heat pump assisted continuous drying part 1: simulation model. *International Journal of Energy Research*, 14:757-770.
- Kline SJ and McClintock FA.**, 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mech. Eng.*, pp. 3.
- Klocker K, Schmidt EL, Steimle F.**, 2001, Carbon dioxide as a working fluid in drying heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 24:100-107.
- Kotas, T.J.**, 1986, Exergy method of thermal and chemical plant analysis, *Trans IChemE*, 64, 212-229.
- Krokida MK, Kiranoudis CT, Maroulis ZB, Marino K.**, 2000, Drying related properties of apple. *Drying Technology*, 18(6):1251-1267.
- Kudra T, Mujumdar AS.**, 2002, *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker, Inc.
- Kuzgunkaya EH, Hepbasli A.**, 2007a, Exergetic evaluation of drying of laurel leaves in a vertical ground-source heat pump drying cabinet. *International Journal of Energy Research*, 31:245-258.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kuzgunkaya EH, Hepbasli A.**, 2007b, Exergetic performance assessment of a ground source heat pump drying system. *International Journal of Energy Research*, 31:760-777.
- Labuza TP, Mc Nally L, Gallagher D, Hawkes J and Hurtado F.**, 1972, *J Food Sci.*, 37:154-159.
- Lawton J.**, 1978, Drying: the role of heat pumps and electromagnetic fields. *Physics Technology*, 9:214-220.
- Lazzarin R Longo G.**, 1994, Open cycle absorption heat pump for convection drying. *IEA Heat Pump Centre Newsletter*, 12(4):22-25.
- Lee DE.**, 1983, Thermal drying and dryers. In: Bhatia MV (ed.), *Transfer Operations in Process Industries*. Technomic Publ., Lancaster, PA.
- Lopez-Villalta LC.**, 1998, *The olive tree, the oil, the olive*. Madrid: International Olive Oil Council Publication.
- Lostec BL, Galanis N, Baribeault J, Millette J.**, 2008, Wood chip drying with an absorption heat pump. *Energy*, 33:500-512.
- Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA.**, 1996, The thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29:75-97.
- Madhlopa, A., Jones, S.A., Kalenga Saka, J.D.**, 2002, A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27:27-37.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Marshall MG, Metaxas AC.**, 1998, Modeling the radio frequency electric field strength developed during the RF assisted heat pump drying of particulates. *International Microwave Power Institute*, 33(3):167-177.
- Matsuda H, Ishizu T, Lee SK, Hasatani M.**, 1985, Kinetic study of $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ reversible thermochemical reaction for thermal energy storage by means of chemical reaction. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 11(5):542-547.
- Mbaye M, Aidoun Z, Valkov V, Legault A.**, 1997, Analysis of chemical heat pumps (CHPS): basic concepts and numerical model description. *Applied Thermal Engineering*, 18(3):138-146.
- Metaxas AC, Meredith R.**, 1983, Industrial microwave heating, Peter Peregrinus Ltd., London.
- Meyer JP, Greyvenstein GP.**, 1992, The drying of grain with heat pumps in South Africa: a techno-economic analysis. *International Journal of Energy Research*, 16:13-20.
- Midilli A.**, 2001, Wastewater distillation via natural vacuum technique. PhD thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- Midilli, A. and Kucuk, H.**, 2003, Energy and exergy analysis of solar drying process of pistachio, *Energy*, 28: 539-556.
- Midilli, A., Küçük, H.**, 2003, Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy, *Energy Conversion & management*, 44, 1111-1112.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Migliori, M., Gabriele, D., De Cindio, B., Pollini, C.M.,** 2005, Modelling of high quality pasta drying: quality indices and industrial application, *Journal of Food Engineering*, 71(3), 242-251.
- Moran, M.J.,** 1989, Availability analysis: a guide to efficient energy use, ASME Press, New York, US.
- Moreira R, Chenlo F, Chaguri L, Vazquez G.,** 2005, Mathematical modeling of the drying kinetics of chestnut: Influence of the natural shells. *Food and Bioproducts Processing*, 83(4):306-314.
- Namsanguan Y, Tia W, Devahastin S, Soponronnarit S.,** 2004, Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two stage drying processes. *Drying Technology*, 22(4):759-778.
- Nathakaranakule A, Kraiwanichkul W, Soponronnarit S.,** 2007, Comparative study of different combined superheated-steam drying techniques for chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 80:1023-1030.
- Newbert GJ.,** 1985, Energy efficient drying, evaporation and similar processes. *Journal of Heat Recovery Systems*, 5:551-559.
- Ogura H, Hamaguchi N, Kage H, Mujumdar AS.,** 2004, Energy and cost estimation for application of chemical heat pump dryer to industrial ceramics drying. *Drying Technology*, 22(1&2):307-323.
- Ogura H, Mujumdar AS.,** 2000, Proposal for a novel chemical heat pump dryer. *Drying Technology*, 18(4&5):1033-1053.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ogura H, Yamamoto T, Kage H, Matsuno Y, Mujumdar AS.,** 2002, Effects of heat exchange condition on hot air production by a chemical heat pump dryer using $\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaction. *Chemical Engineering Journal*, 86:3-10.
- Ogura H, Yamamoto T, Otsubo Y, Ishida H, Kage H, Mujumdar AS.,** 2005, A control strategy for chemical heat pump dryer. *Drying Technology*, 23:1189-1203.
- Oktay Z.,** 2003, Testing of a heat pump assisted mechanical opener dryer. *Applied Thermal Engineering*, 23:153-162.
- Oktay, Z. ve Hepbaşlı A.,** 2003, Performance Evaluation of a Heat Pump Assisted Mechanical Opener Dryer, *Energy Conversion and management*, Sayı: 44, 1193-1207.
- Oliver TN.** 1982, Process drying with a dehumidifying heat pump. Proceedings International Symposium on the Industrial Application of Heat Pumps, 73-88.
- Ongen, G., Sargın, S., Tetik, D., Kose, T.,** 2005, Hot air drying of green table olives. *Food Technology and Bitechology*, 43(2), 181–187.
- Öztekin, S. ve Soysal, Y.,** 1998, Tarım ürünlerini kurutma tekniğine giriş.
- Payne SF.,** 1994, Dried mangoes applications of a heat pump drier. Seminar on the Development and Application of Heat Pump Dryers, Pacific Power Energy Services, 39-43.
- Yapar S.,** 1999, Kurutma Teorisi, Peker S ve Yapar S (ed.), Kurutma, Temel İlkeleri ve Endüstriyel Uygulamaları, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Peregrina C, Rudolph V, Lecomte D, Arlabosse P.**, 2008, Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge: An economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 86:246-261.
- Perera CO, Rahman MS.**, 1997, Heat pump demuhidifier drying of food. *Trends in Food Science & Technology*, 8:75-79
- Perera CO.**, 2001, Modified atmosphere heat pump drying of food products. *Proceedings of the Second Asia-Oceania Drying Conference*, 469-476.
- Prakash S, Jha SK and Data N**, 2004, Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers, *Journal of Food Engineering*, 62: 305-313.
- Prasertsan S, Saen-saby P, Prateepchaikul G, Ngamsritrakul P.**, 1996, Effects of drying rate and ambient air conditions on the operating modes of heat pump dryer. *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, 529-534.
- Prasertsan S, Saen-saby P.**, 1998, Heat pump dryers: research and development needs and opportunities. *Drying Technology*, 16(1&2):251-270.
- Prasertsan, S. and Saen-saby, P.**, 1998, Heat Pump Drying of Agricultural Materials, *Drying Technology*, Sayı: 16(1-2), 235-250.
- Queiroz R, Gabas AL, Telis VRN.**, 2004, Drying kinetics of tomato by using electric resistance and heat pump dryers. *Drying Technology*, 22(7):1603-1620.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rahman, M. S., Perera, C. O., & Theband, C.,** 1998, Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas', *Food Research International*, 30, 485-491.
- Rahman SMA, Islam MR, Mujumdar AS.,** 2007, A study of coupled heat and mass transfer in composite food products during convective drying. *Drying Technology*, 25:1359-1368.
- Ranjan R, Irudayaraj J, Reddy JN, Mujumdar AS.,** 2004, Finite-element simulation and validation of stepwise drying of bananas. *Numerical Heat Transfer Part A*, 45:997-1012.
- Ranganna S.,** 1986, Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetable products, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Rockland LB.,** 1969, Water activity and storage stability, *Food Technol.*, 23: 1241.
- Rolf R, Corp R.,** 1990, Chemical heat pump for drying of bark. Annual Meeting: Technical Section, Canadian Pulp and Paper Association, 307-311.
- Rossi SJ, Neues LC, Kicokbusch, TG.,** 1992, Thermodynamic and energetic evaluation of a heat pump applied to the drying of vegetables. *Drying'92*, Mujumdar AS (ed.), Elsevier Science, 1475-1478.
- Sacilik, K. and Elicin, A.K.,** 2006, The thin layer drying characteristics of organic apple slices. *Journal of Food Engineering*, 83(3): 281-289.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sannino, A., Capone, S., Siciliano, P., Ficarella, A., Vasanelli, L. and Maffezzoli, A.**, 2005, Monitoring the drying process of lasagna pasta through a novel sensing device-based method. *Journal of Food Engineering*, 69 (1), 51-59.
- Schmidt, E.L., Klöcker, K., Flacke, N. and Steimle, F.**, 1998, Applying the transcritical CO₂ process to a drying heat pump, *Int. J. Refrig.* Vol. 21, No.3, pp.202-211.
- Shi QL, Xue CH, Zhao Y, Li ZJ, Wang XY.**, 2008, Drying characteristics of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier. *Journal of Food Engineering*, 84:12-20.
- Silveira JL, Tuna CE.**, 2003, Thermo-economic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 29, pp. 479-485.
- Singh, R.P.**, 1992, Handbook of Food Engineering, Heldman D.R. and Lund D.B. (ed.); Marcel Dekker Inc, New York; 247-276.
- Singh, R.P., Heldman, D.R.**, 1993, Introduction to Food Engineering. Second Edition. Academic Press, Inc., USA.
- Sokhansanj S.**, 1984, Grain drying simulation with respect to energy conservation and quality. In: Mujumdar AS (Ed.), *Advance in Drying*, vol 3, Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC, 121-180.
- Sokhansanj S, Jayas DS.**, 1987, Drying of foodstuffs. *Handbook of Industrial Drying*, Mujumdar AS (ed.), Marcel Dekker, New York, 517-554.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Nathakaranakule, A., Swadisevi, T. and Rukprang, P.**, 1998, Papaya glace drying using heat pump, Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), vol B, pp. 1373-1380.
- Sosle VR, Raghavan GSV, Kittler R.**, 2000, Low temperature drying process for heat sensitive agri-food products. *ASAE Annual International Meeting*.
- Sosle V, Raghavan GSV, Kittler R.**, 2003, Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier. *Drying Technology*, 21(3):539-554.
- Soylemez MS.**, 2006, Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery. *Journal of Food Engineering*, 74:292-298.
- Sozen A, Altiparmak D, Usta H.**, 2002, Development and testing of a prototype of absorption heat pump system operated by solar energy, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp.1847-1859.
- Sun L, Islam MR, Ho JC, Mujumdar AS.**, 2005, A diffusion model for drying of a heat sensitive solid under multiple heat input modes. *Bioresource Technology*, 96:1551-1560.
- Sunthonvit N, Srzednicki G, Craske J.**, 2007, Effects of drying treatments on the composition of volatile compounds in dried nectarines. *Drying Technology*, 25:877-881.
- Stawczyk J, Li S, Witrowa-Rajchert D, Fabisiak A.**, 2007, Kinetics of atmospheric freeze-drying of apple. *Transp Porous Med*, 66:159-172.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Strommen I.**, 1980, Drying of heavily salted codfish. Ph.D. Thesis, The Norwegian Institute of Technology, Division of Refrigeration Engineering, Trondheim, Norway.
- Strommen I, Alves-Filho O, Eikevik TM.**, 2005, Atmospheric freeze drying with heat pumps – a new alternative for high quality dried food products. In 3rd Nordic Drying Conference.
- Strommen I, Eikevik TM, Alves-Filho O, Syverud K, Jonassen O.**, 2002, Low temperature drying with heat pumps new generations of high quality dried products. 13th International Drying Symposium.
- Strommen I, Jonassen O.**, 1996, Performance tests of a new 2-stage counter-current heat pump fluidized bed dryer. *Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, 563-568.
- Strommen I, Kramer K.**, 1994, New applications of heat pumps in drying processes. *Drying Technology*, 12(4):889-901.
- Strumillo, C., Jones, P.L. and Zylla, R.**, 1995, Energy aspects in drying, In *Handbook of Industrial Drying Volume 2*, ed. A.S. Mujumdar, Marcel Dekker, New York.
- Strumillo, C., Kudra, T.**, 1986, Drying: Principles, application and Design, Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland.
- Syahrul, S., Hamdullahpur, F. and Dinçer I.**, 2002, 'Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles', *Exergy, an International Journal*, 2, 87-98.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tai KW, Devotta S, Watson RA, Holland FA.,** 1982, The potential for heat pumps in drying and dehumidification systems – III: an experimental assessment of the heat pump characteristics of a heat pump dehumidification system using R114. *International Journal of Energy Research*, 6:333-340.
- Teeboonma U, Tiansuwan J, Soponronnarit S.,** 2003, Optimization of heat pump fruit dryers. *Journal of Food Engineering*, 59:369-377.
- Tekin, T. and Bayramoglu, M.,** 1998, Exergy loss minimization analysis of sugar production process from sugar beet, *Food and Bioproducts Processing*, 76(3), 149-154.
- Toledo RT.,** 2007, *Fundamentals of Food Process Engineering*, 3rd edn, Springer Science+Business Media, LLC, New York.
- Topic R.,** 1995, Mathematical model for exergy analysis of drying plants. *Dry. Technol.* 13(1 and 2), 437–445.
- Uengkimbuan N, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S, Nathakaranakule A.,** 2005, Drying kinetics and physical properties of dried por using two-stage techniques. *Proceedings of the 2nd International Conference on Innovations in Food Processing Technology and Engineering*, 320-328.
- UN.A.F.P.A.,** 2007, Associations of Pasta Manufacturers of the European Union.
- U.S.D.A.,** 2005, 2007, United States Department of Agriculture, <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Van Blarcom A, Mason RL.**, 1988, Low humidity drying of macadamia nuts. *Proceedings of the 4th Australasian Conference on Tree and Nut Crops*, 239-248.
- Van Gool W.**, 1997, Energy policy: fairly tales and factualities, in: *Innovation and Technology*).
- Van't Land C.M.**, 1991, *Industrial Drying Equipment Selection and Application*, Marcel Dekker Inc., New York.
- Vazquez G, Chenlo F, Moreira R, Cruz E.**, 1997, Grape drying in a pilot plant with a heat pump. *Drying Technology*, 15:899-920.
- Xanthopoulos G, Oikonomou N, Lambrinos G.**, 2007, Applicability of a single layer drying model to predict the drying rate of whole figs. *Journal of Food Engineering*, 81:553-559.
- Walas MS**, 1988, *Chemical Process Equipment*, Butterworths.
- Wood A.**, 1994, "Flavor Quality Assessment of Heat Pump Dried Ginger", Seminar on The Development and Application of Heat Pump Dryers. Pacific Power Energy Services, pp.45.
- Zhang X, Mao Z, Sun L.**, 2004, Heat pump fluidized bed drying of agricultural materials. ASAE Annual International Meeting.
- Zbicinski I, Jakobsen A, Driscoll JL.**, 1992, Application of infra-red radiation for drying of particulate material. *Drying '92*, Mujumdar AS (ed.), Elsevier Science Publisher B.V., 704-711.
- Zylla R, Abbas P, Tai KW, Devotta S, Watson FA, Holland FA.**, 1982, The potential for heat pumps in drying and dehumidification systems I: theoretical considerations. *Energy Research*, 6:305-322.

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

Ulusal Bildiriler

Çolak N. ve Hepbaşlı A., 2005, Gıda kurutma sistemlerinde ekserji uygulamaları, III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı, Antalya.

Çolak N. ve Hepbaşlı A., 2005, Yenilenebilir enerji kaynaklarının gıda üretim sistemlerinde kullanımı, 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi (YEKSEM 2005), Mersin, s. 69-73.

Çolak N. ve Hepbaşlı A., 2007, Isı pompalı bir kurutucuda makarna kurutulmasının ekserji analizi, Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi (ULIBTK'07), Kayseri, s. 1040-1045.

Uluslararası Bildiriler

Colak, N. and Hepbasli, A., 2005, Exergy Analysis of Drying of Apple in a Heat Pump Dryer, Second International Conference of the Food Industries & Nutrition Division on; Future Trends in Food Science and Nutrition, Cairo, Egypt, pp 145-158.

Colak, N. and Hepbasli, A., 2007, Performance Assessment of Drying of Blanched Carrot in a Ground-Source Heat Pump Dryer, The Third International Exergy, Energy and Environment Symposium, 1 – 5 July, Evora, Portugal.

Makaleler

- Colak N. and Hepbasli A., 2007, Performance Analysis of Drying of Green Olive in a Tray Dryer, *Journal of Food Engineering*, 80:1188-1193.
- Colak N., Kuzgunkaya E., Hepbasli A., 2008, Exergetic Assessment of Drying of Mint Leaves in a Heat Pump Dryer, *Journal of Food Process Engineering*, 31:281-298.
- Colak N. and Hepbasli A., 2009, A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, models and studies, *Energy Conversion and Management*, (incelemede).
- Colak N. and Hepbasli A., 2009, A review of heat pump drying (HPD): Part 2 – Applications and performance assessments, *Energy Conversion and Management*, (incelemede).

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan ÇOLAK GÜNEŞ, 04 Şubat 1978 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Denizli'de tamamladı. 1999 yılında Pamukkale Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümünü bitirdi. 2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2003 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Ana Bilim Dalında doktora programına başladı.

1999-2003 yılları arasında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2003 yılından bu yana Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.