



**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ NEM ALMALI ISI POMPALI KURUTUCUNUN
TASARIMI VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Öner ATALAY

**Temmuz,2010
DENİZLİ**

**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ NEM ALMALI ISI POMPALI KURUTUCUNUN
TASARIMI VE TERMODİNAMİK ANALİZİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Öner ATALAY

Danışman: Prof. Dr. Rasim KARABACAK

**Temmuz, 2010
DENİZLİ**

DOKTORA TEZİ ONAY FORMU


Öner ATALAY tarafından Prof. Dr. Rasim KARABACAK yönetiminde hazırlanan “Güneş Enerjisi Destekli Nem Almalı Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı Ve Termodinamik Analizi” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Rasim KARABACAK

Jüri Başkanı (Danışman)


Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Mustafa ACAR

Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Yahya TÜLEK

Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. M. Fevzi KÖSEOĞLU

Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Halil KARAHAN

Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza :

Öğrenci Adı Soyadı : Öner ATALAY

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütülmesinde ve tamamlanmasında her türlü desteklerini gördüğüm başta danışmanım Prof. Dr. Rasim KARACAK ve Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Ali GÜNGÖR ve Yrd. Doç. Dr. Yahya TÜLEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca akademik hayata başlamamda büyük rolü olan ve zorlu geçen doktora hayatımın en zor günlerinde yanımda olan Prof. Dr. Mehmet ATILGAN'a, beni bu zor günlerimde en iyi anlayan oda arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Ahmet YILANCI, Araş. Gör. Çiğdem ERSAN ve Araş. Gör. Engin TAN'a, tez çalışmamın sonlandırılmasında zaman ayırıp emek harcayan Doç. Dr. Yusuf YILMAZ'a, deneysel setin kurulmasında büyük yardımları olan Yrd. Doç. Dr. Sinan KIVRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin 2008FBE001 nolu proje ile finansal olarak desteklenmesinde büyük katkıları olan Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne ve çalışanlarına ayrıca teşekkür ederim.

Beni bu yaşıma kadar sabırla destekleyen değerli anne ve babama, her zaman yanı başımda olan sevgili eşime, tezin stresli son günlerinde hayatımıza renk katan dünya tatlısı oğluma sonsuz teşekkürler.

ÖZET**GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ NEM ALMALI ISI POMPALI
KURUTUCUNUN TASARIMI VE TERMODİNAMİK ANALİZİ****ATALAY, Öner****Doktora Tezi****Makine Mühendisliği ABD****Tez Yürütücüsü: Prof. Dr. Rasim KARABACAK****Temmuz 2010, 88 Sayfa**

Yapılan bu çalışmada ısı pompası, güneş enerjisi destekli sistem ve doğal kurutma yöntemleriyle domatesler, kuruma zamanı, ürün geometrisi, enerji tüketimleri ve fiziksel görünüm bakımından deneysel olarak incelenmiştir. Domatesler kurutmadan önce dörtte bir ve yarım olmak üzere dilimlenmişlerdir. Kurutma deneylerinde 2 m/s ortalama kurutma havası hızında ısı pompalı nem almalı ve güneş enerjisi destekli sistem yanında ayrıca doğal olarak kurutma yapılmıştır. Isı pompalı sistemin kurutma performansı en yüksektir. Kurutma zamanı bakımından ısı pompalı sistem, doğal kurutmaya göre %50, güneş enerjisi destekli sisteme göre %30 daha iyidir. Çalışmada aynı sıcaklıktaki kurutma havası ile yapılan kurutmada hava hızının artmasıyla kurutma performansının arttığı görülmüştür. En yüksek Nem Alma Oranı (MER) 0,237 kg_w/h ile dörtte bir domateslerin ısı pompalı sistemde kurutulmasında, en düşük 0,125 kg_w/h ile dörtte bir domateslerin doğal olarak kurutulmasında elde edilmiştir. En yüksek Özgül Nem Alma Oranı (SMER) 1,573 kg_w/kWh ile dörtte bir domateslerin güneş enerjisi destekli sistemde kurutulmasında, en düşük 0,078 kg_w/kWh ile yarım domateslerin ısı pompalı sistemde kurutulmasında elde edilmiştir. Genel olarak SMER değeri aynı şartlar altında kurutulmuş dörtte bir domateslerde yarım domateslere göre daha yüksek olmaktadır. Çalışmada ayrıca ısı transferi ile kütle transferi arasındaki deneysel ilişki incelenmiş, hava hızının artmasıyla hem teorik hem de deneysel olarak bulunan Sherwood boyutsuz sayısının arttığı görülmüştür. Isı pompalı sistem diğer kurutma yöntemlerine göre hızlı kurutma, çevresel etkilerden en az etkilenme (yağmur, toz, böcek) ve çevresel şartlara en az bağlı olması gibi yüksek avantajlara sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Nem Alma, Isı Pompası, Güneş Enerjisi Destekli Kurutma, Doğal Kurutma

ABSTRACT**DESIGN OF A SOLAR-ASSISTED DEHUMIDIFIER HEAT PUMP DRYER
AND THERMODYNAMIC ANALYSIS****ATALAY, Öner****PhD Thesis in****Mechanical Engineering****Supervisor: Prof. Dr. Rasim KARABACAK****July 2010, 88 Pages**

In this study the effect of heat pump, solar assisted system and natural drying systems on the drying time, geometry, energy consumption and physical conditions of tomatoes was experimentally determined. Tomatoes were cut into either halves or quarters before drying. Besides heat pump dehumidifier and solar-assisted systems at the drying air speed of 2 m/s on average, natural drying was also used for drying experiments. Drying performance of heat pump system was the best. In terms of drying time, heat pump system was 50% better than natural drying and 30% better than solar-assisted system. In study it was seen that when air velocity increases, drying performance also increase under same temperature of drying air. The highest moisture extraction rate (MER) was 0.237 kg_w/h in tomato quarters dried in heat pump system, the lowest value was 0.125 kg_w/h tomato quarters dried in natural drying. The highest specific moisture extraction rate (SMER) (1.573 kg_w/kWh) was found for tomato quarters dried in solar-assisted system while the lowest (0.078 kg_w/kWh) was for tomato halves dried in heat pump system. In general, SMER values of tomato quarters were higher than those of tomato halves dried under same conditions. The experimental relationship between heat and mass transfer were also examined and Sherwood dimensionless number both theoretically and experimentally founded was increase with increase of air velocity. Heat pump system presents great advantages for tomatoes such as faster drying speed, less influence by environmental factors (rain, dust, insect) and less dependence on environmental conditions.

Keywords: Drying, Dehumidifier, Heat Pump, Solar-assisted Drying, Natural Drying

İÇİNDEKİLER	Sayfa
Teşekkür.....	i
Özet.....	ii
Abstract.....	iii
İçindekiler.....	iv
Şekiller Dizini.....	vi
Tablolar Dizini.....	ix
Simgeler ve Kısaltmalar.....	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ	16
3.1. Kurutma.....	16
3.2. Kurutma İle İlgili Temel Kavramlar.....	16
3.2.1. Nemli havanın özellikleri.....	16
3.2.2. Ürün ile ilgili özellikler.....	19
3.3. Kurutma Sistemleri.....	21
3.3.1. Direkt kurutucular.....	21
3.3.2. Özel kurutucular.....	25
3.3.3. İndirekt kurutucular.....	25
3.3.4. Güneş enerjili kurutucular.....	28
3.3.4.1. Güneş enerjili doğal kurutucular.....	29
3.3.4.2. Güneş enerjili fanlı kurutucular.....	30
3.3.4.3. Güneş enerjisi destekli kurutucular.....	32
3.4. Kurutucu Seçimi.....	33
4. ISI POMPALI KURUTUCULAR	36
4.1. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Şekilleri.....	36
4.2. Isı Pompalı Kurutucuda Verim Tanımı.....	39
4.2.1. Özgül Nem Alma Hızı(SMER).....	39
4.2.2. Nem Alma Hızı(MER).....	39
4.2.3. Nem alma verimi.....	39
4.2.4. Isı Pompası Etkinlik Katsayısı(COP).....	40
4.2.5. Isı pompalı kurutucuların avantajları ve sınırlamaları.....	41

4.2.5.1. Isı pompalı kurutucuların avantajları.....	41
4.2.5.2. Isı pompalı kurutucuların sınırlamaları.....	41
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
5.1. Materyal ve Metot.....	43
5.2. Deney Sonuçları.....	51
6. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ.....	57
6.1. Kurutma Parametrelerinin Hesaplanması.....	57
6.2. Özgül Nem Alma Hızı ve Nem Alma Hızının Hesaplanması.....	58
6.3. Nem Alma Verimi(η) ve Isı Pompası Etkinlik Katsayısı(COP_{ws}).....	60
6.4. Gıda Kurutma İşleminde Isı Transferi İle Kütle Transferi Arasındaki İlişki...	61
6.4.1. Kütle geçiş katsayısının tespiti.....	62
6.4.2. Laminer sınır tabakada ısı ve kütle geçişi.....	64
6.4.2.1. Süreklilik denklemi.....	64
6.4.2.2. Momentum denklemi.....	64
6.4.2.3. Termik sınır tabaka.....	65
6.4.2.4. Mutlak nem (derişiklik, yoğunluk) sınır tabakası.....	65
6.5. Isı Transferi İle Kütle Transferi Arasındaki Deneysel İlişki.....	70
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	78
KAYNAKLAR.....	81
EKLER.....	85
Ek-1: Psikrometrik diyagram.....	85
Ek-2: Doymuş su sıcaklık tablosu	86
Ek-3: Havanın termofiziksel özellikleri.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.2.1 Psikrometrik diyagram.....	19
Şekil 3.2.2 Bazı maddelerin denge nem içeriklerinin şematik değişimi.....	20
Şekil 3.3.1 Dikey turbo kurutucu.....	21
Şekil 3.3.2 Askı kurutucu.....	22
Şekil 3.3.3 Döner kurutucu.....	22
Şekil 3.3.4 Püskürtmeli kurutucu ünitesinin süreç şeması.....	23
Şekil 3.3.5 Bant tipi kurutucu.....	23
Şekil 3.3.6 Tünel kurutucu.....	23
Şekil 3.3.7 Tepsili kompartıman kurutucu.....	25
Şekil 3.3.8 Silindir kurutucu.....	26
Şekil 3.3.9 Mekanik olarak karıştırılan devamsız bir kurutucu.....	27
Şekil 3.3.10 Vakum altında çalışan tek silindirli kurutucu.....	28
Şekil 3.3.11 Raflı tip pasif sistem güneşle kurutucu.....	30
Şekil 3.3.12 Isı deposu olan bacalı-raflı pasif sistem güneşle kurutucu.....	30
Şekil 3.3.13 Fanlı tip güneşle kurutucu.....	31
Şekil 3.3.14 Sulu ısı deposuna sahip güneş enerjili kurutucu.....	31
Şekil 3.3.15 Absorpsiyonlu ısı pompası ve ısı deposu olan güneş enerjisi destekli kurutucu.....	32
Şekil 3.3.16 Isı pompası ve güneş enerjisiyle ısıtılan ısı depolu güneş enerjisi destekli kurutucu.....	32
Şekil 4.1.1 Isı pompalı kurutucu prensip şeması ve psikrometrik diyagramda gösterimi.....	36
Şekil 4.1.2 Basit nem alıcı ısı pompalı kurutucu.....	37
Şekil 4.1.3 Isı geri kazanımlı ısı pompalı açık hava çevrimli sistem.....	38
Şekil 4.1.4 Isı pompası ile bir atmosferik kaynaktan ısı çekimi ile kurutma havasının ısıtılması.....	38
Şekil 5.1 Toprak enerjili ısı evi, güneş enerjisi sıcak su sistemi ve meteoroloji istasyonu.....	43
Şekil 5.2 Kurutma kabini.....	44

Şekil 5.3 Sistem çalışma prensibi.....	45
Şekil 5.4 Kontrol panosu.....	46
Şekil 5.5 Hava hızı ölçer.....	47
Şekil 5.6 Dikdörtgen kanallarda ortalama hava hızının bulunabilmesi için ölçüm noktalarının tespiti.....	47
Şekil 5.7 Meteoroloji istasyonu iç ünite.....	48
Şekil 5.8 Mono ve üç fazlı elektrik sayaçları.....	48
Şekil 5.9 Hazırlanan domateslerin tepsilerle kabin içerisine yerleşimi.....	49
Şekil 5.10 Yarım ve dörtte bir domateslerin raflara yerleşimi.....	49
Şekil 5.11 Hassas terazi.....	50
Şekil 5.12 Etüv fırını.....	50
Şekil 5.13 Doğal ortamda kurutma.....	51
Şekil 5.14 Kurutma havası temas önceliğine göre farklı raflardaki 1/2 ürünlerin nem-içeriği-zaman grafiği(Isı Pompalı Sistem).....	52
Şekil 5.15 Kurutma havası temas önceliğine göre farklı raflardaki 1/2 ürünlerin nem-içeriği-zaman grafiği(Güneş Enerjili Sistem).....	52
Şekil 5.16 Üç farklı sistemde kurutulan 1/2 ürünlerin nem-içeriği-zaman grafiği.....	53
Şekil 5.17 Isı pompası sisteminde farklı geometride kurutulan ürünlerin nem-içeriği-zaman grafiği.....	54
Şekil 5.18 Isı pompalı sistemde aynı geometride olup kütleleri farklı ürünlerin nem-içeriği-zaman grafiği.....	54
Şekil 5.19 Üç farklı sistemde kurutulan ürünlerin ilk 24 saatteki nem-içeriği-zaman grafiği.....	55
Şekil 5.20 Güneş radyasyonu ile kurutma havası sıcaklık değişim grafiği.....	55
Şekil 5.21 Dış sıcaklığa bağlı olarak ürün yüzey sıcaklığı değişim grafiği.....	56
Şekil 5.22 Üç farklı hızda ortalama 40 °C sıcaklıktaki kurutma havası ile kurutulan ürünlerin ilk 12 saatteki nem içeriği-zaman grafiği.....	56
Şekil 6.1 Laminer akışta sınır tabaka içindeki sıcaklık ve su buharının kısmi basınçlarının değişimi.....	63
Şekil 6.2 Kurutma havası ile kurutulacak yüzey arasındaki sınır tabakaları.....	66

Şekil 6.3 1/2 ürünler için farklı kurutma havası hızlarında elde edilen Sherwood (Sh) değerleri.....	76
Şekil 6.4 1/4 ürünler için farklı kurutma havası hızlarında elde edilen Sherwood (Sh) değerleri.....	77
Şekil 7.1 Üç farklı sistemde kurutulan ürünlerin fiziksel görünüşleri.....	78

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.3.1 Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri.....	34
Tablo 3.3.2 Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler.....	35
Tablo 6.2.1 Üç farklı sistem için hesaplanan MER ve SMER değerleri.....	59
Tablo 6.5.1 Farklı hava hızları için deneysel verilerden elde edilen değerler.....	75
Tablo 6.5.2 Farklı hava hızları için literatürde verilen korelasyona göre hesaplanan teorik Sherwood değerleri.....	75
Tablo 6.5.3 Farklı hava hızları için düzeltilmiş korelasyona göre (deney koşullarında) hesaplanan teorik Sherwood değerleri.....	76

SİMGELER ve KISALTMALAR

A	Yüzey alanı	(m ²)
c	Özgül ısı	(kJ/kg°C)
COP	Isı Pompası Etkinlik Katsayısı	
C _s	Nemli ısı	(kJ/kg°C)
D _f	Difüzyon katsayısı	(m ² /h)
Gu	Gukman sayısı	
h	Entalpi	(kJ/kg)
k	Isı iletim katsayısı	(W/m°C)
m _{km}	Maddenin içerdiği nem kütlesi	(kg)
m _w	Kuru madde kütlesi	(kg)
MER	Nem Alma Hızı	(kg _w /h)
Nu	Nusselt sayısı	
P	Basınç	(kPa)
Pr	Prandtl sayısı	
Re	Reynold sayısı	
Sc	Schmidt sayısı	
Sh	Sherwood sayısı	
SMER	Özgül Nem Alma Hızı	(kg _w /kWh)
T	Sıcaklık	(°C)
v	Hava hızı	(m/s)
V _h	Nemli hacim	(m ³ /mol g)
V	Hacimsel debi	(m ³ /h)
w	Özgül nem	(kg _w /kg _a)
W _d	Nem içeriği(Kuru madde esası)	
W _w	Nem içeriği(Yaş madde esası)	
α	Isı taşınım katsayısı	(W/m ² °C)
η	Nem alma verimi	
μ	Dinamik viskozite	(kg/ms)
ν	Kinematik viskozite	(m ² /s)
φ	Bağıl nem	
ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan gıda kurutma yöntemlerinden çoğu uygun şartlar yerine getirilmediği için istenilen standartlarda ürünü sağlayamamaktadır. Çevre koşullarına maruz bırakılan ürünler hijyenik olarak kurutulamamaktadırlar. Bunun yanında konvansiyonel yakıtları kullanılarak kapalı sistemlerde yapılan kurutma işlemlerinde ise yüksek maliyetler ortaya çıkmaktadır. Jeotermal ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kullanan sistemler ise giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu tür enerji kaynaklarının oluşturduğu başlıca sorunlardan birisi sürekliliğinin sağlanamamasıdır. Kurutma işlemi tamamlanmadan oluşabilecek böyle bir problem ürünün bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden bu sistemlere ek olarak uygulamada yakıt veya elektrikle çalışan sistemler destek olmaktadır. Diğer taraftan kurutma sadece gıdaların kurutulmasında değil; tütün, çay yaprağı, fındık ve mısır gibi doğrudan tüketilebilecek gıda olmayan ürünler yanında, tekstil, deri, kauçuk, kereste ve fotoğraf endüstrisi gibi birçok alanlarda da kurutma yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ülkemizde çok yaygın olmamasına rağmen, sadece konfor amaçlı kullanılan ısı pompaları sanayileşmiş ülkelerde bir çok alanda kullanılmaktadır. Isı pompalarının kullanımının çok büyük enerji tasarrufu sağladığı bilinmektedir (Prasertson ve Saen-Saby, 1998). Kurutma sistemlerinde de ek enerji kaynağı kullanmak gerektiğinde veya yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yeterli olmadığı durumlarda ısı pompası uygulamalarının oldukça avantajlı olması beklenilmektedir. Çevre şartlarında kurutulan ürünler toza, yağmura, zararlı hayvanlara ve yüksek sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Böyle durumlarda ürünlerin kalite standartlarına ulaşamadığı bilinmektedir. Kurutma parametrelerin kontrol edilebildiği kapalı ortamlarda yapılan kurutma işlemi hem daha hijyenik hem de daha kaliteli ürünlerin elde edilmesini sağlayacaktır. Kurutmada ihtiyaç duyulan enerjinin de gerektiğinde güneşten, güneşin olmadığı zamanlarda da ısı pompası kullanılarak sağlanması, maliyetleri minimuma indirecektir. Isı pompalı kurutucular verimli olmasından dolayı sadece gıda kurutma amaçlı değil endüstriyel

ürünlerin kurutulmasında da kullanılabilir (Prasertson ve Saen-Saby, 1998, Kohayakawai vd., 2004).

Dünyada hızla önem kazanan kurutulmuş ürün piyasasında Türkiye'nin tam anlamıyla bu alanda başarı sağladığı söylenemez. Yüzlerce ürün çeşitliliğine sahip ülkemiz uygun olmayan kurutma şartlarından dolayı ihracatta sıkıntı çekmektedir. Bu da ülke ekonomisine kayıp olarak yansımaktadır. Kaliteli ve sağlıklı üretim yapılabilmesi için uygun şartlarda ve teknolojilerde üretim yapılmalıdır. Daha iyi ürünü daha ucuza mal edebilmek için enerjinin de en verimli şekilde kullanılması gerekir. Güneş gibi bedava enerjiyi kullanmak maliyetleri oldukça azaltmaktadır. Ancak güneş enerjisinin hem sürekliliği hem de şiddetinin sürdürülebilirliği yoktur. Bu nedenle kesintisiz olarak kurutma işlemini tamamlayabilmek için verimleri yüksek ek enerji desteklerine ihtiyaç vardır. Isı pompası uygulamaları hızla yaygınlaşmakta olduğundan bu sektörde de ilgi görmeye başlamıştır. Kurutma işleminin kontrollü şartlar altında yapılması ile standart kalitede kurutulmuş ürünler, elde edileceği gibi ürünlerin kurutulması konusunda bilimsel birtakım verilerin elde edilmesi ve diğer uygulayıcılara ulaşması sağlanmış olacaktır. Ülkemizde kurutma şartlarından kaynaklanan ürün kaybını en aza indirerek, hem iç hem de dış pazarda daha kaliteli ürünlerin müşteriye ulaştırılmasıyla ülke ekonomisine katkı sağlanabilecektir. Ülkemizde en yaygın olarak bulunan ürünlerin kontrollü şartlar altında kurutulması yapılarak standart kalitede kurutulmuş ürünler elde edilebilecektir. Aynı zamanda değişik kurutma koşulları kullanılarak kurutma konusunda uygulanabilir bilgilerin elde edilmesi ve bu bilgilerin üreticilere ışık tutması sağlanacaktır. Özellikle kurutma süresi ve kurutma miktarı güneş enerjisi destekli nem almalı ısı pompası uygulamasıyla ilişkili olarak önemli bilgilere ulaşılması beklenilmektedir.

Nem almalı ısı pompalı kurutma sistemlerinin verimli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada sisteme güneş enerjisi gibi yenilenebilir ve ekolojik bir enerji desteği sağlanarak kurutmanın daha hızlı, ekonomik ve hijyenik olarak yapılması amaçlanmaktadır. Bu maksatla kurutmaya tesir eden, kurutma havası hızı, sıcaklığı, çığlaşma koşulları, buharlaştırıcı ve yoğuşurucu çalışma koşullarına bağlı Isıtma Tesir Katsayısı (ITK) değişimi gibi kurutmaya tesir edecek faktörlerin etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca enerji kaynaklarına bağlı olarak ulaşılabilecek sıcaklıklardaki

kurutmada, kurutma kabiniinde farklı raf aralıklarında yerleştirilmiş ürünlerin kurutulma koşullarına getirilme süresi, bunun için harcanan toplam enerji belirlenecektir.

Sonuçlar Ficks'in difüzyon yasası temel alınarak kurutma kabiniinde kütle transferini karakterize eden Sherwood sayısı, akışı karakterize eden Reynold sayısı ile, akış ve ısı transferi arasındaki ilişkiyi gösteren Schmidt boyutsuz sayılarına göre incelenmiş, elde edilen bulgular Özgül Nem Uzaklaştırma Oranı (SMER) ve Nem Uzaklaştırma Oranı (MER) gibi kurutmada temel alınan değerler tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde gıda kurutma sistemleri ve kurutulmuş ürünler ile ilgili birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu konuda hem deneysel hem de matematiksel metotlarla kurutma parametreleri incelenmiştir. Gıda maddelerinin kurutulabilecekleri maksimum sıcaklık ve kuruma özellikleri birbirinden farklıdır. Herhangi bir kurutma işlemi sırasında kurutma koşullarına bağlı olarak kurutulan gıda maddelerinin neminde ve sıcaklığında değişimlerin belirlenmesi gerekir. Kurutmada kullanılan havanın sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve ürüne göre akım yönü, ısı ve kütle transferi olaylarının etkilerinin belirlenmesi gerekir. Kurutmada kullanılacak kurutucuların ürünün özelliklerine uygun olmanın yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yeterlilikte olması gerekir. Hava hızı, sıcaklık, bağıl nem, ürün geometrisi gibi birçok parametre özel koşullar altında tespit edilmiş ve sonuçlar literatürde karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu bilgiler endüstriyel üretim yapan firmalara yol göstermektedir. Konuyla ilgili aşağıdaki literatür çalışması yapılmıştır.

Güngör ve Özbalta (1997) çalışmalarında endüstride kullanılan kurutucuların sınıflandırılması, seçimine etki eden parametreler, kurutma sistemlerinde kütle ve enerji dengeleri, kuruma hızının belirlenmesi, malzemenin nem içeriği incelenmiş olup ayrıca kurutma sistemlerinde enerji tasarrufu ve kurutucu tasarımında dikkate alınması gereken önemli noktalar da ele alınmıştır. Kurutma yöntemleri ve kurutma sistemleri açıklanmış olup, kurutucuların sınıflandırılması ve seçimi ile ilgili detaylar literatür bilgisi altında ele alınmıştır.

Özek vd. (1997) yaptığı çalışmada hava ısıtıcı, kurutma ünitesi ve hava kurutma ünitelerinden oluşan farklı tip tasarımdaki güneş enerjili kurutma sistemleri tanıtılmış ve bu sistemleri oluşturan ünitelerin fonksiyonları ve ısıl analizleri incelenmiştir. Yazarlar güneşle kurutma sistemlerini, sistemin sınıflandırılmasını ve sistemlere etki eden parametreleri açıklamışlardır. Enerji maliyetlerini, sistemin üretim ve adaptasyon

kriterlerini teorik olarak incelemişlerdir. Son olarak da bir güneşli hava kolektörünün termik performansını tanımlamışlardır.

Prasertson ve Saen-Saby (1998), yaptıkları çalışma ile ısı pompalı kurutucuda kauçuk ve muz kurutmuşlardır. Çalışmada Nem Uzaklaştırma Oranı (MER) ve Özgül Nem Uzaklaştırma Oranı (SMER) incelenmiştir. Ağaç için son nem oranı %10, maksimum MER ve SMER değerleri 2,854 kg/h ve 0,572 kg/kWh olarak ölçülmüştür. Muz için maksimum yüklemde MER değeri 2,710 kg/h ve SMER değeri 0,540 kg/kWh olarak ölçülmüştür. Ekonomik olarak ısı pompasının, doğrudan ısıtıcı sistemlere oranla %30- %50 daha ucuz olduğu görülmüştür.

Nijmeh vd. (1998)'nin yaptığı çalışmada Ürdün'de yiyecek artıklarından iki farklı yöntemle hayvan yemi üretimi ele alınmıştır. Birinci yöntemde ışınlım ve taşınım yoluyla kurutulan doğal taşınımlı bir güneş enerjili sistem, diğer yöntemde güneş enerjili sulu sistemli bir kurutma kabini karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada hem besin değerleri hem de hayvan yemi olarak uygunluğu göz önüne alınmıştır. Yapılan testler sonucunda güneş enerjili kazan tipi kurutucunun diğerine göre daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır.

Bansal (1999) yaptığı çalışmada, Hindistan'daki güneş uygulamaları üzerinde durmuştur. Ülkede hala kömür ve biomasın enerji tüketiminde ön sırada bulunduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarla yenilenebilir enerjilerden de faydalanılmaya başlandığı vurgulanmıştır. Güneş enerjisinin en önde gelen uygulamalardan olduğu, su ve hacim ısıtılması dışında kurutma sistemlerinde de kullanılması için çalışmaların sürdüğü belirtilmiştir.

Hollick (1999) çalışmasında sanayi ölçekli güneş kurutma sistemlerini ele almıştır. Büyük ölçekli sistemlerin küçük ölçekli sistemlerden farklı olarak çok büyük enerji ihtiyaçları olduğu belirtilmektedir. Bu sistemlerde en küçük değişiklikler yapılabilmekte olup, sistemin geri ödeme süresinin iki yıl olduğu belirtilmiştir. Çalışma bir rapor şeklinde olup, güneş enerjili kurutma sistemlerinin geniş ürün yelpazesinde kullanılabilirliği belirtilmektedir. Bu çalışma yeni bir gelişmeye değinmemekte olup, sadece kurutma için güneş ısıtmasının hangi yollarla sağlandığını göstermektedir.

Adapa vd. (2002) yaptıkları çalışmada ginseng, ekinezya gibi bazı özel tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılan basit bir model hazırlamıştır. Sistem düşük ısı ısı pompalı bir kurutucudan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan sistem sürekli bantlı bir sistem olup ısı ve kütle transferi değerleri incelenmiştir. Bunun yanında SMER değerleri ve kurutma sonrası optimum nem oranları incelenmiştir. En iyi SMER değerinin nem oranının %40 olduğu durumda elde edildiği belirtilmiştir. Sistem için SMER değerleri 0,5 – 1,02 kg/kWh olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Coşkun (2002) çalışmasında basit nem alıcı ısı pompası destekli çapraz akımlı bir sürekli kurutucu incelemiştir. Sistem ısı pompası ve sürekli kurutucu ünitesi olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Sürekli kurutucu ünitesinin çıkış şartları, ısı pompası ünitesinin giriş şartları olarak kabul edilerek tüm sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistemin her noktasındaki sıcaklık, debi, nem değeri gibi değişkenler ve bu değişkenlere bağlı olarak sistemin performansı incelenmiş, sonuçlar literatürde mevcut deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Isıtma Tesir Katsayısı (ITK) değerinin by-pass oranı arttığında azaldığı görülmüştür. Sisteme geri kazandırılan hava debisine bağlı olarak 2,8-4,5 oranında değişmektedir. Tüm hava miktarları için %60 by-pass oranı SMER değerinin maksimum olduğu nokta olarak bulunmuştur.

Madhlopa vd. (2002) yaptığı çalışmada ikili absorber sistemi içeren düz levha kolektörlü güneş enerjili sistemi ele almışlardır. Sistem içinde kurutma çemberi de oluşturulmuştur. Çalışmada taze ve kurutulmuş olan mangoların, öncesinde ve sonrasındaki nem miktarları, pH ve askorbik asit miktarları analiz edilmiştir. Havalı ısıtıcı, güneş radyasyonunun %21,3'ünü termal güce çevirmektedir. Kurutucu hava ise 31,7 °C'den 40,1 °C sıcaklığına kadar çıkabilmektedir. Nem miktarını %85'ten %13'e kadar düşürülebilmekte ve askorbik asit miktarı da %74 olmaktadır. Çalışmada kurutucunun mango veya diğer taze ürünlerin korunmasında uygun olduğu tespit edilmiştir.

Pavon-Melendez vd. (2002) yaptıkları çalışmada Mango dilimleri üzerinde ölçülemeyen değerler üzerinde analizler yaparak ısı ve kütle transferi ile ilgili denklemler oluşturmuşlardır. Nem ve sıcaklık değişimi gözlemlemesi deneysel çalışmaların yanında, teorik olarak da ele alınmıştır. Hava hızı değerleri 0,5 – 1,75 m/s arasında alınmış ve sıcaklıklar 50 °C, 60 °C ve 70 °C olarak ayarlanmıştır. Hem

deneysel hem de teorik çalışmalarda mango dilimleri üzerindeki sıcaklığın kontrolü gıda-hava ara yüzeyinde, nem kontrolünde gıdanın içindeki suyun difüzyonu ile kontrol edildiğini göstermiştir.

Oktay (2003) çalışmasında kurutma ürünü olarak ıslak yün kullanmıştır. Deneylede hava oranı, geri dönüşüm ve by-pass hava oranları incelenmiştir. By-pass ve geri dönüşüm hava oranları %20-%80 oranında değiştirilerek COP ve SMER değerlerinin değişimi incelenmiştir. Bu değerlerin buharlaştırıcıdan geçen hava miktarının artmasıyla orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. COP değerlerinin 2-3,5 ve SMER değerlerinin 1,5-2,8 kg/kWh arasında değiştiği görülmüştür.

Pacco ve Menegalli (2004), yaptıkları çalışmada üç farklı sıcaklıkta (45 °C, 60 °C ve 75 °C) ve 1 m/s sabit hızda bir hava ile incir kurutulmasının esaslarını ele almıştır. Kimyasal ve fiziksel olarak farklı kriterlerde kurutulan incirin kurutma sonrası özellikleri karşılaştırılmıştır. Dilimlenmiş incirlerin bütün olarak kurutulanlara göre daha iyi kurduğunu ve optimum kurutma sıcaklığının yapılan deney için 60 °C olduğunu belirtmişlerdir.

Kohayakawai vd. (2004) çalışmalarında ısı pompalı destekli ısı ve nem kontrollü bir kurutucu incelemişlerdir. Isı pompası sistemi iki kondenser, hermetik kompresör, termostatik genişleme valfi ve buharlaştırıcıdan oluşmaktadır. Çalışma akışkanı olarak R22 kullanılmıştır. Kurutma sistemi akışkan yataklı olup mango dilimleri kurutulmuştur. Mango dilimleri farklı kalınlıklarda ve farklı hava hızı değerlerinde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu değerlerin değişiminin kurutma performansına etkisi incelenmiştir. Isı pompası etkinlik katsayısının (COP) 1,21 ile 1,71 arasında değiştiği görülmüştür.

Green ve Schwarz (2005) çalışmalarında güneş enerjili kurutmanın esaslarını ele alarak gelişen dünyada küçük üreticilerin teknik ihtiyaçlarına çözüm aramıştır. Gıdaların içerdikleri nem miktarları ve bunların nasıl uzaklaştırıldığı ve bu işlemler sırasında gerekli olan enerji miktarları ele alınmıştır. Güneş enerjili kurutmanın esasları, kurutucu tipleri, bunların sınıflandırılması ve kurutucu seçiminin nasıl yapılabileceği izah edilmiştir (WEB_1, 2005).

Kerr (2005) çalışmasında daha önce tasarlanmış olan sistemler ve elde edilen bulgular bir arada değerlendirmiştir. Kurutma sisteminin seçimi ve ürünlerin nasıl kurutulması gerektiğinin bugüne kadar yapılan çalışmaları inceleyerek açıklamıştır. Çalışmada ayrıca kurutulan ürünlerin organizmalardan nasıl korunabileceği ve paketleme esaslarından da söz edilmiştir (WEB_2, 2005).

Chua ve Chou (2005)'nin yaptıkları çalışmada çift kademeli buharlaştırıcı ısı pompalı kurutma sistemi incelenmiştir. Sistem düşük ve yüksek basınçlı buharlaştırıcı olup havayı hem soğutma hem de nemini almak üzere dizayn edilmiştir. Sistemin COP ve SMER değerleri incelenmiştir. Sistemde ısı geri kazanımının tekil buharlaştırmalı sisteme oranla performansı ele alınmıştır. %35'e varan daha fazla ısı geri kazanımı sağladığı görülmüştür. Her %20 lik by-pass oranında 0,6-0,8 kW geri kazanım sağlanmıştır. COP değerlerinde %12-20 ve SMER değerlerinde %25-50 oranında artış olduğu belirtilmiştir.

Chen vd. (2005) çalışmalarında fotovoltaik sistemli kapalı tip güneş enerjili kurutucu ele almışlardır. 60 °C sıcaklıkta hava verilerek kurutulan limon dilimleri incelenmiş olup, elde edilen parametrelerin daha önceden bilinen verilerle uyduğu tespit edilmiştir. Kurutma işlemi su aktivitesi değeri (a_w) 0,4 oluncaya kadar devam ettirilmiştir.

Ceylan vd. (2007)'nin yaptıkları çalışmada, kavak ve çam keresteleri 24 saatlik çalışma periyodunda ısı pompalı bir kurutucuda 1,28 kg su/kg kuru madde ve 0,60 kg su/kg kuru madde nem miktarlarından, 0,15 kg su/kg kuru madde nem miktarına kadar kurutulmuştur. Kerestelerin tamamındaki ağırlık değişimi fırın içerisindeyken takip edilebilmiş istenilen ağırlığa gelindiğinde kurutma sonlandırılmıştır. Başlangıç nem miktarı 1,28 kg su/kg kuru madde olan kavak keresteleri 0,15 kg su/kg kuru madde nem miktarına 70 saatte, 0,60 kg su/kg kuru madde de olan çam keresteleri ise aynı nem miktarına 50 saatte getirilmiştir. Kurutma esnasında, kurutma havası bağıl nemi, sıcaklığı ve kerestelerdeki ağırlık değişimi değerleri bilgisayarda toplanarak, daha sonra kurutma süresinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Erbil (2002), yaptığı çalışmasında güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı hibrit ısı pompası tesisinin enerji ve ekserji analizini teorik ve deneysel incelemiştir. Yapılan çalışmada mevcut toprak kaynaklı sistemde toprak ısı değiştiricisinin dönüş hattına bir

güneş kolektörü bağlamıştır. Nisan ayı içinde yapılan çalışmalarda güneş enerjisi devrede değilken sistemin Isıtma Tesir Katsayısı (ITK) 2,4 ile 3 arasında, ikinci yasa veriminin 0,01 ile 0,11 arasında olduğu görülmüştür. Güneş enerjisi devrede olduğunda ısı pompasının buharlaştırma bölgesinde sıcaklık 0,7-3,5 °C artmıştır. Ayrıca sistemin Isıtma Tesir Katsayısı (ITK) 2,9 ile 3,4 arasında, ikinci yasa veriminin 0,022 ile 0,117 arasında olduğu görülmüştür. Tersinmezliğin en yüksek olduğu bölgenin kompresör olduğu görülmüştür.

Kılıç (2006), yaptığı çalışmada 1 m²'lik düzlem yüzeyle güneş enerjisi destekli ısı pompasının tasarımını ve performans deneylerini incelemiştir. Güneş enerjisinin toplanmasında, siyah çelik borulardan yapılan güneş kolektörü aynı zamanda ısı pompasının buharlaştırıcısı olarak düzenlenmiştir. Isı pompası çevriminde ısıtıcı akışkan olarak 404a kullanılmıştır. Çalışmada ısı pompasının Isıtma Tesir Katsayısı (ITK) 3,79 olarak hesaplanmıştır. Güneş kolektöründen sisteme giren ısı enerjisi arttıkça sistemin ITK değerinin arttığı görülmüştür.

Mirza (2006), ısı pompalı kurutucunun ısı tasarımı ile ilgili çalışma yapmıştır. Çalışmada deri kurutulmuştur. Çalışma kapsamında pistonlu soğutma kompresörü, buharlaştırıcı, hava soğutmalı yoğuşturucu fan, ilave ısıtıcı ve kurutma kabininden oluşan deneysel bir ısı pompalı kurutucu tasarlanmıştır. Deneylerde ısıtma etkinlik katsayısı, kurutucu nem alma verimliliği ve özgül nem alma hızı gibi veriler termodinamik analizler ile hesaplanmıştır. Ayrıca matematiksel model analizleri ile kurutma eğrisi denklemleri oluşturulmuştur.

Oktay (1999), çalışmasında ısı pompası destekli mekanik açılı bir kurutucu ile yün kurutmasının optimizasyonunu incelemiştir. Sistemin matematiksel modeli ve benzeşimi bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Sistem performansının hesabında ve sistem parametrelerinin değerlendirilmesinde spesifik nem çekme oranı (SMER) ve performans katsayısı alınmıştır. Ayrıca bunlardan başka sistemde değişken olarak hava hızı, by-pass hava oranı ve soğutucu akışkan sıcaklıkları alınmıştır. Deneylerin yapıldığı kurutucu modelinde kritik nem miktarının çeşitli değişkenlere bağlı olarak 0,3 ile 0,40 kg nem/kg malzeme kabul edilebileceği bulunmuştur. Yapılan çalışmada by-pass hava oranı yükseldikçe buharlaştırıcıda gerçekleşen soğutma ve nem çekme kapasitesi azalarak, kurutucu giriş havasının bağıl neminin daha yüksek değerlere çıktığı görülmüştür. bu durumda SMER değerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca by-pass hava

oranının artırılması ile ısı pompalı kurutucunun Isıtma Tesir Katsayısının (ITK) da azaldığı görülmüştür.

Abdallah ve Nijmeh (2004), çalışmalarında iki eksenli güneş takip sisteminin sabit bir sistemle performanslarının karşılaştırılması deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada tek eksenli takip sisteminin kurulumunun daha basit ve ucuz fakat iki eksenliye göre veriminin az olduğu belirtilmiştir. Çalışmada PLC kontrol kullanılmıştır. Gün içindeki zaman dilimlere ayrılmış ve güneş takip açısı güneşin pozisyonuna göre ayarlanmış ve hareket kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Deneysel çalışmada iki adet pyranometre hem hareketli hem de sabit sisteme monte edilmiş ve güneş radyasyon değerleri kayıt altına alınmıştır. 32° lik sabit kurulumuna göre hareketli sistemde farklı güç değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda güneş enerjisi günlük toplamda sabit sisteme göre Kuzey-Güney, dik ve Doğu-Batı takip sistemleri sırasıyla %19,7, %23,3 ve %24,5 daha verimli olduğu görülmüştür.

Abu-Khader vd. (2008), yaptıkları çalışmada güneş takipli PV elektrik sistemi deneysel olarak incelemişlerdir. Ürdün'de yapılan çalışmada Kuzey-Güney ve Doğu-Batı yönlerinde güneş takibi elektromekanik olarak sağlanmıştır. PLC kontrollü sistemde pyranometre aracılığıyla güneş radyasyon miktarları ölçülmüştür. Tek eksenli takip sistemine göre çok eksenli bir sistemin avantajları araştırılmıştır. Güneş zaman dilimi dört parça olarak ayrılmış ve PLC kontrolünde zaman-açı değerleri girilerek takip gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar 10.06.2004 ve 02.07.2004 günleri arasında alınmıştır. Yapılan analizlerde Kuzey-Güney takip sistemi, Doğu-Batı ve sabit montajlı sistemlere göre %30 ile %70 arasında daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Güneşin batmaya yakın ve ilk parlamaya başladığı zamanlarda güç artışının yüksek olduğu görülmüştür. Gün ortasında sabit sistemde %10-15, sabah ve akşama yakın zamanlarda %70 daha az güç üretimi olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak çok eksenli güneş takip sisteminin 32° sabit yerleştirilmiş sisteme göre toplam güç üretiminde %30-45 daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Ceylan ve Aktaş (2008), Türkiye'de yaptıkları çalışmada Yapay Sinir Ağları tekniğini kullanmışlardır. Deneysel olarak yapılan çalışmada kurutma ürünü olarak fındık seçilmiştir. Fındık için kurutma havası sıcaklıkları 40 °C, 45 °C ve 50 °C olarak belirlenmiştir. Yapay Sinir Ağları yöntemi kullanılarak 42 °C, 44 °C, 46 °C ve 48 °C kurutma sıcaklıkları için kurutma hava hızları, ürün nem miktarları ve toplam kuruma

süreleri tespit edilmiştir. Kuruma süresinin kurutma hava sıcaklığı, kurutma havası nemi, kurutma hava hızı ve fındık nem oranı gibi faktörlere bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Fatouh vd. (2006), çalışma Mısır'da yapılmış olup farklı bitkiler için ısı pompalı kurutma sistemi tasarlanmış ve deneyler yapılmıştır. Isı pompası sisteminde R134a akışkanı kullanılmıştır. Çalışmada ebegümesi, maydanoz ve nane kullanılmıştır. Bitki türünün, yükleme miktarının, kurutma hava sıcaklığının ve hava hızının kurutmaya etkisi incelenmiştir. Küçük hacimli ürünlerin daha kısa kuruma süresine ve daha az enerji tüketimine sahip olduğu görülmüştür. en düşük özgül enerji tüketimine sahip bitki 3684 kJ/kg_{H2O} değeriyle maydanoz, daha sonra 3982 kJ/kg_{H2O} ile nane ve 4029 kJ/kg_{H2O} ile ebegümesi olmuştur. Kurutmaya etki eden en önemli faktörlerin yükleme miktarı, kurutma hava hızı ve sıcaklığının olduğu sonucuna varılmıştır.

Hawlader ve Jahangeer (2006), Yapılan çalışmada güneş destekli ısı pompası ile kurutma ve su ısıtma deneysel olarak incelenmiştir. Kurutma ürünü olarak taze fasulye seçilmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca matematiksel modelleme ile desteklenmiştir. Deneysel olarak kurutma kısmı için hava, ısı pompası kısmında ise R134a akışkanı kullanılmıştır. Sistemde sıcaklık, basınç, nem, hız ve solar radyasyon ölçümleri yapılmıştır. Spesifik Nem Alma Oranı (SMER) farklı parametrelerle yapılan ölçümler için ayrı ayrı incelenmiştir. COP değerinin gün içinde güneş radyasyonu ile paralel olarak değiştiği ortaya konmuştur. Ayrıca hem R134a ve hem hava için kollektör verimleri hesaplanmıştır.

Hawlader vd. (2008), Singapur'da yapılan çalışmada güneş enerjisi destekli ısı pompası kurutma sistemi tasarlanıp testleri yapılmıştır. Sistemde soğutucu akışkanı buharlaştırmak için dış ortam havası sıcaklığı kullanılmakta, ayrıca kurutma havasını ısıtmak için de havalı güneş kolektörü kullanılmıştır. Bunun dışında kurutucu girişine bir de harici ısıtıcı konmuştur. Isı pompası içinde kullanılan akışkan R-134a'dır. Sistem ile ilgili olarak sıcaklık, basınç, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgar hızı değerleri ölçümü yapılmıştır. Ölçüm cihazları için hata analizi metodu kullanılmış ve %±3,5 bulunmuştur. ASHRAE test standartlarına göre kollektör testleri yapılmış ve en yüksek verimin hava debisinin artmasıyla elde edildiği görülmüştür. Verim değerleri 0,036 kg/s ve 0,06 kg/s hava debileri için sırasıyla %69-73 ve %72-75 olarak elde edilmiştir. Havalı kollektör veriminin giren havanın neminin alınmasıyla arttığı görülmüştür.

Soğutucu akışkanın buharlaştırıcı kolektöre daha düşük sıcaklıkta girmesinden dolayı verimin havalı kolektör verimine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu verim %87 ve %76 değerlerindedir.

Söylemez (2006), yapılan çalışmada ilave ısıtıcılı bir ısı pompalı kurutma sistemi için basit bir ekonomik analiz yapılmış, ayrıca sistem elemanları için termal analiz ve tüm sistem için termoekonomik analiz yapılmıştır. Sistem deneysel olarak ele alınmamış sadece şematik olarak tasarlanmıştır.

Teeboonma vd. (2003), yapılan çalışmalarında deneysel daha önce yapılmış çalışmaların sonuçlarını kullanarak teorik model üzerinde papaya ve mango ürünlerinin kuruma ve ekonomik analizlerine yer vermişlerdir. En düşük maliyetle bir sistemde geri çevrim hava oranının, evaporatör by-pass hava oranının, hava debisinin ve kurutma sıcaklığı parametrelerinin etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Uzaklaştırılan birim su miktarını dikkate alarak ürün başlangıç nem miktarının, ürün geometrisinin ve ürüne ait difüzyon özelliklerinin etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Elde edilen sonuçlar her ürün için farklı şartların önem kazandığını ortaya çıkarmıştır, özellikle optimum hava debisi ve evaporatör by-pass havası. Maliyet analizi de yapılmış olup sonuçta ürünün fiziksel yapısının, hava debisi ve evaporatör by-pass oranının kesinlikle kurutma maliyetini etkilediği sonucuna varılmıştır.

Aghbashio vd. (2009), yaptıkları çalışmada yarı endüstriyel bir bantlı kurutucunun performans analizini incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmada havuç dilimleri kurutulmuştur. Enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Havuçlar 5 mm kalınlığında 50 °C, 60 °C ve 70 °C sıcaklıkta, 0,61, 1,22 ve 1,83 kg/s hava debisinde ve $2,98 \cdot 10^{-4}$, $3,48 \cdot 10^{-4}$ ve $4,16 \cdot 10^{-4}$ kg/s besleme oranlarında kurutulmuştur. Kurutma parametreleri, ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği şeklinde incelenmiştir. Her bantta 250 gram yaş ürün kullanılmış %51,6-84,4 oranında kütle kaybı izlenmiştir. Enerji kullanımı ve enerji kullanım oranı sırasıyla 3,78-25,57 kJ/s ve 0,1554-0,3752 dir. Ekserji kaybı ve ekserji verimi ise 0,6677-14,1577 ve 0,5527-0,9329 dur. Ayrıca çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Ürün kütle kaybı, enerji kullanımı, enerji kullanım oranı ve ekserji kaybı kurutma hava sıcaklığı arttıkça artmakta fakat ekserji verimliliği düşmektedir. Ürün kaybı, enerji

kullanımı, ekserji kaybı ve ekserji verimliliği kurutma hava hızıyla artmakta fakat enerji kullanım oranı düşmektedir.

Aktaş vd. (2009), Türkiye’de yaptıkları çalışmada iki farklı kurutma sisteminde elma kurutmuşlardır. Güneş enerjili kurutma kabini ve ısı pompalı bir sistemde kurutma performansları karşılaştırılmıştır. 4 mm kalınlığında elmalar 4,8 (g su/g kuru madde) nemlilikten 0,18 (g su/g kuru madde) oluncaya kadar önce ısı pompalı kurutucuda kurutulmuştur. Bu kurutucuda hava kütleli hızı 3,3 ile 2,4 kg/m²s olmuştur. Toplam kurutma süresi 3,5 saattir. Aynı zamanda elmalar güneş enerjili kurutucuda 4,8 (g su/g kuru madde) nemlilikten 1 (g su/g kuru madde) oluncaya kadar kuruyabilmiştir. Buradaki kütleli hava hızı 3,3 ile 2,9 kg/m²s olmuştur. Etkin nem difüzyonu ısı pompalı kurutucuda $2,36 \times 10^{-8}$ iken güneş enerjili kurutucuda $1,03 \times 10^{-8}$ m²/s olmuştur. Her iki sistem için nem oranı Statgraphic programıyla analiz edilmiş, gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Güneş enerjisinin ürün ön kurutmada kullanılabileceği ve güneş olmadığında ısı pompası gibi farklı bir kurutucuda kurutmanın devam etmesinin yada her iki sistemi birlikte kullanan kurutma ünitelerinin avantajlı olabileceğini vurgulamışlardır.

Chua vd. (2002), çalışmalarında ısı pompalı kurutucularda yeni gelişmeleri, gelecek tasarımlar ve yenilikleri inceleyerek ısı pompalı kurutucular hakkında geniş bilgi vermektedir. Ayrıca ısı pompalı kurutucuların genel çalışma prensipleri hakkında detaylı bilgi vermişlerdir. Isı pompalı kurutucuların limitlerinden ve avantajlarından da bahsetmektedir. Çalışmada iki farklı kurutucu detaylı olarak anlatılmıştır. Bunlar gıda ve kereste kurutucularıdır. Kurutma çevrimleri hakkında bilgi verilmiştir. Radyo frekanslı ve kızılötesi destekli ısı pompalı kurutucular gibi yeni teknolojilerden bahsetmişlerdir. Yeni gelişmeler kapsamında çok yönlü sistemler hakkında da çeşitli görüş belirtmişlerdir.

Lee ve Kim (2009), çalışmalarında ince dilimlenmiş kırmızı turpu ısı pompalı kurutucuda kurutmuşlardır. Ayrıca karşılaştırma için sıcak havalı ısıtıcı ile de kurutmuşlardır. Isı pompasında özgül nem alma oranı (SMER) 3,4 kg/kWh değerlerine ulaşılmıştır. Sıcak havalı kurutmaya göre 1-1,5 kat uzun sürmesine karşın ısı pompalı kurutucunun enerji kazancının yaklaşık üç kat daha iyi olduğu görülmüştür. çalışmada ayrıca kurutma havası sıcaklığı arttığında bağıl nemin düştüğü ve MER ile SMER değerlerinin arttığı görülmüştür. Kurutma hava debisi arttığında MER ve SMER

değerlerinde küçük bir düşüş olduğu gözlenmiştir. Çalışma ayrıca ısı pompalı kurutmanın, sıcak havalı kurutmaya göre %58,9-69,5 oranında enerji tasarrufu sağladığını göstermiştir.

Marfil vd. (2008), Brezilya'da yaptıkları çalışmada farklı metotlarla kurutulmuş domateslerde askorbik asit miktarının değişimini incelemiştir. Ayrıca ön hazırlıkta kullanılan solüsyonların ve kurutma sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Domatesler iki parçaya bölünmüş, bütün olarak soyulmuş, hem soyulup hem solüsyona tabi tutularak kurutulmuşlardır. Soyulmuş domateslerde askorbik asit kaybı %16 olurken, solüsyonla işlem görmüş domateslerde %45'e kadar çıkmıştır. İkiye bölünmüş domateslerde askorbik asit miktarında düşüş olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kurutmanın da ürünlerdeki C vitamini değerini düşürdüğü görülmüştür.

Pal vd. (2008), çalışmalarında ısı pompalı kurutucuda tatlı biber kurutmuşlardır. %19-55 nem oranlarında 30, 35, 40 ve 45 °C sıcaklıklarda kurutma deneyleri yapılmıştır. Nem miktarının kurutma zamanıyla orantılı olarak düştüğü görülmüştür. Page bağıntısının Lewis bağıntısına göre bu kurutma deneyi için daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. 40 °C sıcaklıkta kurutucunun en kısa kurutma süresini, yüksek kuruma oranı ve em alma oranını sağladığını görmüşlerdir. Toplam klorofil ve askorbik asit oranlarının sıcaklığın artmasıyla ters orantılı olarak düştüğünü belirtmişlerdir.

Queiroz vd. (2004), yaptıkları çalışmada elektrik rezistanslı ve ısı pompalı farklı iki kurutucuda domates kurutmuşlar ve performanslarını incelemişlerdir. Ayrıca kurutmayı matematiksel model ile desteklemişlerdir. Kurutma havasını paralel ve karşıt akışlı olarak iki farklı şekilde kullanmışlardır. Sıcaklık, hava hızı ve domates tiplerinin etkilerini incelemişlerdir. Isı pompalı kurutucunun efektif COP değerini 2,56-2,68 arasında hesaplamışlardır. Elektrik rezistanslı kurutucuya göre ısı pompalı kurutucunun enerji bakımından %40 ekonomik olduğunu göstermişlerdir. Matematiksel model olarak da Page modelini kullanmışlardır. Bu modelde parametrelerin en çok kurutma sıcaklığıyla etkilendiğini belirtmişlerdir.

Saensabai ve Prasertsan (2003), bilgisayar simülasyonu ile yaptıkları bu çalışmalarında beş farklı ısı pompalı kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Tam açık, yarı açık ve tam kapalı sistemler, harici kondenser ve harici soğutucu ile farklı kombinasyonlarda karşılaştırılmıştır. Isı pompalarının performansları yüksek ve düşük kurutma oranına ve

20 ile 40 °C çevre sıcaklıklarına göre incelenmiştir. Genel olarak tropik iklim ve yüksek kurutma oranlarında yarı açık sistemin en uygun olduğu fakat düşük kurutma oranlarında sistemin karmaşık olduğu ve çevre sıcaklığı değişimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Vazquez vd. (1997), İspanya'da yaptıkları deneysel çalışmalarında üzüm kurutmuşlardır. Isı pompalı kapalı çevrim bir kurutma düzeneği kurulmuştur. Bu kurutucuda farklı üzümler, değişik hava hızı ve sıcaklıklarında kurutulabilmektedir. Üzümlerin dış ortamda 40 gün gibi uzun sürelerde kurummasına karşın bu sistemde 24 saatte kurutma sağlayabilmişlerdir. Ayrıca zeytin yağı, K_2CO_3 gibi solüsyonlarla ön işlem yapılması kurutma süresinde azalmayı sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Renk ve üzüm kalitesinin bozulmadığını da bildirmişlerdir. Bu tür bir cihazın endüstriyel boyutta yapılmasının uygun olabileceğini söylemişlerdir.

3. KURUTMA VE KURUTMA SİSTEMLERİ

Kurutma

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Kurutma teriminin en yaygın kullanım yeri katı maddelerden ısı yöntemlerle su veya uçucu maddelerin buharlaştırılarak uzaklaştırılmasıdır. Kurutma uygulamalarında nemin buharlaştırılması için gereken ısı, kurutulacak maddeyi sıcak gazlarla doğrudan temas ettirerek taşınım veya ışınlama veya kurutulacak maddeyle temas eden katı yüzeyden iletimle transfer edilir. Kurutma proseslerinde ısı ve kütle transferi aynı anda meydana gelir. Kurutma ortamı hava koşulları ve malzeme özellikleri önemli parametredir. Bu nedenle nemli havanın ve kurutulacak malzemenin özellikleri bilinmelidir (Güngör ve Özbalta, 2009).

3.2. Kurutma İle İlgili Temel Kavramlar

3.2.1. Nemli havanın özellikleri

Nem alma ve nemlendirme işlemlerinde saf sıvı faz ve bu sıvı ile tepkimeye girmeyen gaz arasında madde transferi söz konusudur. Bu süreçlerdeki madde transferi bazı prosesler için kolay olmasına karşın bazılarında ise oldukça karmaşıktır. Kurutma işlemlerinde ısı ve madde transferi aynı anda meydana gelir. Sıcak gazdan kurutulan ürüne ısı transferi meydana gelirken kurutulan üründen de gaz akışkana madde transferi meydana gelir. Endüstriyel kurutma proseslerinin çoğunda, ön ısıtılmış hava, kurutma ortamı olarak kullanılır. Kurutulan üründe de nem olarak su bulunur. Kurutma sistemlerinin mühendislik tasarımında hesaplamalarının yapılabilmesi için bazı temel tanımlamaların yapılması gerekir (Güngör ve Özbalta, 2009):

Kuru hava: Su buharı içermeyen hava.

Nemli hava: Su buharı içeren hava.

Mutlak Nem: 1 m³ hava içerisindeki su buharı kütlesidir (kg/m³).

Özgül Nem (w): Herhangi bir durumda, incelenen nemli hava içinde 1 kg kuru havaya karşılık bulunan kg veya g olarak su buharı miktarıdır.

$$w = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg}_w/\text{kg}_a) \quad (3.1)$$

m_v : Su buharının kütlesi

m_a : Kuru havanın kütlesi

P_v : Su buharının kısmi basıncı

P : Toplam basınç.

Bağlı Nem (ϕ): Su buharının kısmi basıncının, gaz (hava) sıcaklığındaki suyun doyma buhar basıncına oranı olarak tanımlanır. Diğer bir tanımla, hava içindeki su buharı kütlesinin, doymuş hava içindeki buhar kütlesine oranıdır.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.2)$$

Yüzde bağlı nem ise:

$$\% \phi = 100 \cdot \frac{P_v}{P_g} \quad (3.3)$$

olarak hesaplanır.

Yüzde Nem (w_s): Mutlak nemin, gaz(hava) sıcaklığındaki doyumluk nemine oranı olarak tanımlanır.

$$w_s = 100 \frac{w}{w_s} = (\% \phi) \frac{(P - P_g)}{(P - P_v)} \quad (3.4)$$

Kuru Termometre Sıcaklığı: Nemli havanın, günlük kullanımlardan bildiğimiz alışılmış bir termometreyle ölçülen sıcaklığıdır.

Çiğleşme Sıcaklığı: Nemli havanın sabit mutlak nem ve sabit atmosfer basıncı koşullarında soğutulması durumunda, belli bir sıcaklık değerinden sonra hava, içinde bulunan su buharının hepsini taşıyamaz duruma gelir ve taşıyamadığı su buharı yoğunlaşarak havadan ayrılır. Yoğuşmanın başladığı andaki hava sıcaklığıdır (Yağcıoğlu, 1999).

Yaş Termometre Sıcaklığı: Yaş termometre sıcaklığı, Psikrometrik ve Termodinamik olmak üzere iki ayrı anlamda ifade edilir. Psikrometrik yaş termometre sıcaklığı, haznesinin üzeri, damıtık suyla sürekli olarak ıslatılan bir fitille kaplı termometre yardımıyla ölçülür. Doymamış durumdaki hava akımı, bu termometrenin haznesi üzerinden geçtiğinde, nemli fitilden su buharlaşır. Bunun sonucunda, fitilin ve dolayısıyla termometre haznesinin sıcaklığı, hava sıcaklığının altına düşer. Havadan, nemli fitile ısı geçişi, aralarında bir sıcaklık dengesi kuruluncaya kadar devam eder. Bu anda, konveksiyonla iletilen ısı, fitilden suyun buharlaşması için gerekli gizli ısıya eşittir. Bu sırada ölçülen denge sıcaklığı, Psikrometrik Yaş Termometre Sıcaklığı olarak adlandırılır. Termodinamik yaş termometre sıcaklığı, yeterli derinlikte ve ısıal açıdan yalıtılmış bir nemlendirme silindirin de ölçülür. Bu silindir, belirli bir sıcaklık ve mutlak nem değ erinde tutulur. Su silindirin üst kısmından alt kısmına doğru püskürtülerek akıtılırken, tersine olarak alttan üstte doğru hava akımı geçirilir. Hava, silindirin üst kısmından çıkarken, su akımının sıcaklığına eşit sıcaklıkta ve tamamen doymuş durumdadır. Havanın sıcaklığına, Termodinamik Yaş Termometre Sıcaklığı adı verilir (Yağcıoğlu, 1999).

Nemli Isı (C_s): Bir gram kuru hava ve onun iç erdiği su buharının sıcaklığını bir derece arttırmak için gereken enerjidir.

$$C_s = C_{pa} + w \cdot C_{pv} \quad (3.5)$$

Nemli Hacim (V_h): Kuru havanın birim kü tlesinin hacmi ile iç erdiği su buharının hacminin toplamıdır.

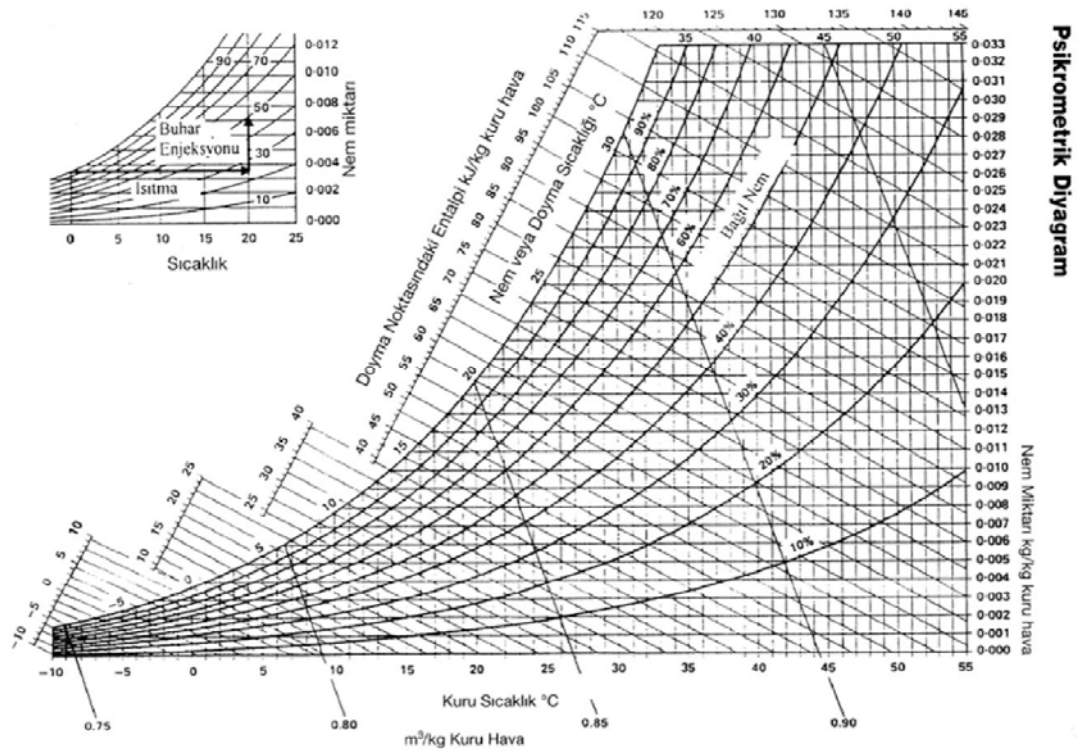
$$V_h = \frac{0,0224 \cdot T}{273} \left(\frac{1}{M_a} + \frac{w}{M_v} \right) \quad (\text{m}^3/\text{mol g}) \quad (3.6)$$

Toplam Entalpi: Kuru havanın birim kü tlesinin entalpisi ile onun iç erdiği su buharının entalpisinin toplamıdır.

$$h = C_s(T - T_0) + w \cdot ((h_{fg})_{T=T_0}) \quad (3.7)$$

Psikrometrik Diyagram: Kurutma ve nemlendirme süreçlerinin hem teorik hem de uygulama kısmında kullanılır. Bu diyagramdan, mutlak nem, yüzde doymunluk nemi,

nemli hacim, entalpi, adyabatik doygunluk doğruları, yaş termometre sıcaklıkları gaz sıcaklıklarının fonksiyonu olarak okunur (Şekil 3.2.1) .



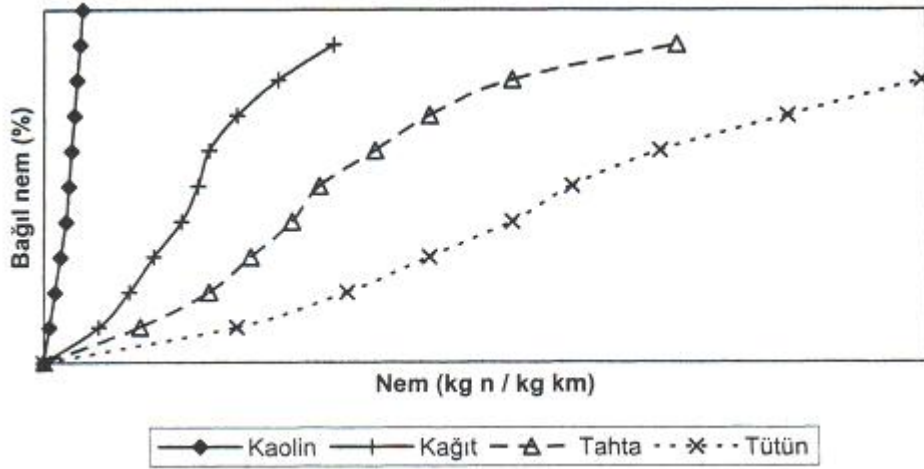
Şekil 3.2.1 Psikrometrik diyagram

3.2.2. Ürün ile ilgili özellikler

Katı Maddenin Nemi: Kurutma süreçlerinde ısı ve kütle transferi aynı anda gerçekleşir. Kurutulan maddeye kurutma ortamından değişik mekanizmalarla ısı transferi (iletim, taşınım, ışıınım gibi) meydana gelir. Kurutulan maddenin içerdiği nem, sıvı veya buhar halinde maddenin iç kısmından madde yüzeyine ve buradan da kurutma ortamına transfer olur. Kurutulan maddelerin çok değişik yapıya sahip olması (ağaç, kağıt, sebze, meyva gibi) kurutma mekanizmalarının farklı olmasını gerektirir. Kurutucu tasarımında, kurutulan ürünün başlangıç ve son nemliliklerinin bilinmesi önemlidir.

Denge Nemi: Sıcaklığı ve nemi sabit olan bir kurutma havası ile ürün temas haline geçirildiğinde temas süresinin yeterince uzun olması durumunda hava ile temas eden maddenin nemi belli bir değere ulaşır ve değişmez. Şekil 3.2.2'de değişik maddelerin denge nemlerinin bağıl nemle değişimi görülmektedir. Denge nem miktarı maddelerin

özellikleri ile yakından ilgilidir. Maddenin temas ettiği havanın bağıl nemi sabit tutulup, sıcaklığı arttırılırsa denge nemi azalır.



Şekil 3.2.2 Bazı maddelerin denge nem içeriklerinin şematik değişimi (Güngör ve Özbalta, 2009).

Serbest Nem: Maddenin denge nem miktarından daha fazla olarak içerdiği nemdir. Denge nem miktarı belirli koşullar altında kurutabileceği en düşük değerdir. Bu değer üzerinde maddenin içerdiği nem uzaklaştırılabilir. Maddelerin içerdikleri nem değerleri yaş ve kuru madde esasına göre tanımlanır (Güngör ve Özbalta, 2009).

Nem İçeriği(Yaş Madde Esası):

$$W_w = 100 \frac{m_w}{m_{km} + m_w} \quad (3.8)$$

Nem İçeriği(Kuru Madde Esası):

$$W_d = 100 \frac{m_w}{m_{km}} \quad (3.9)$$

m_w : Maddenin içerdiği nem kütlesi

m_{km} : Kuru madde kütlesi

3.3. Kurutma Sistemleri

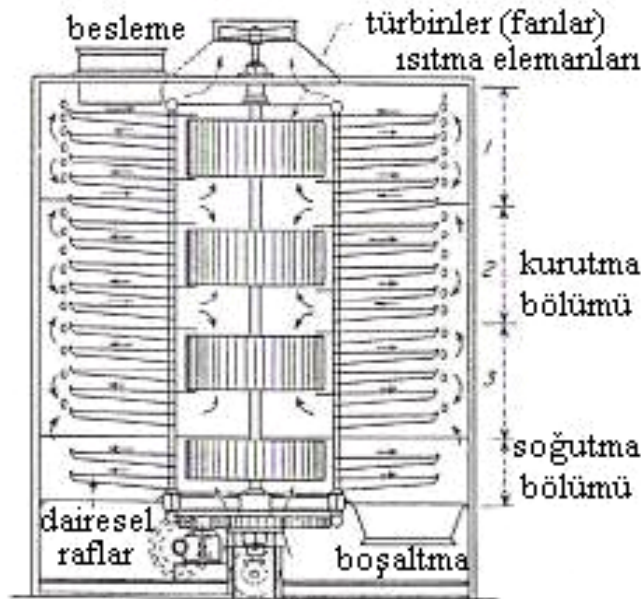
3.3.1. Direkt kurutucular

Bu tip kurutucularda kurutma için gerekli ısının transferi ıslak ürün ile sıcak gazlar arasında direkt temas yoluyla gerçekleşir. Buharlaşan sıvı ise kurutma ortamı olan sıcak gazlar tarafından kurutma hacminden uzaklaştırılır. Direkt kurutucular ayrıca taşınım kurutucuları olarak da adlandırılır (Mirza, 2006).

- Sürekli Kurutucular

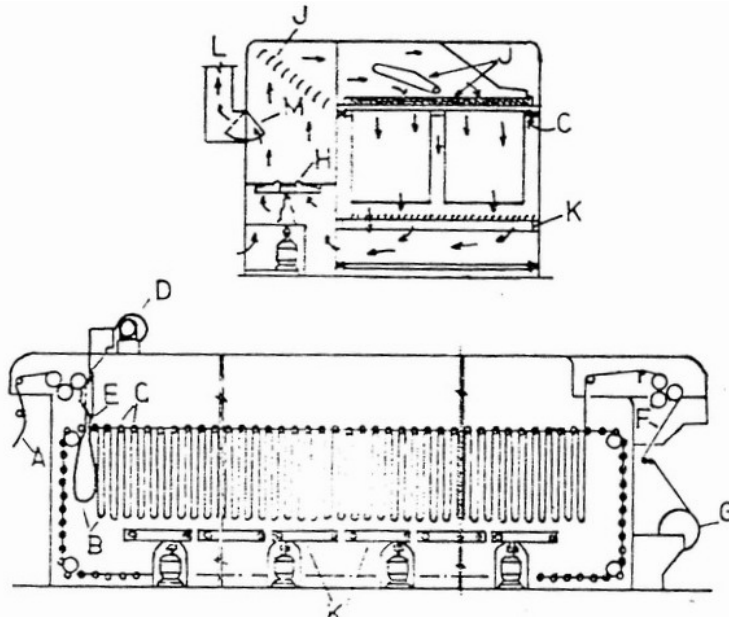
Kurutma işlemi, kurutulacak ıslak ürün beslendiği müddetçe devam eder. İstendiğinde bu tip kurutucular kesikli olarak da çalıştırılabilirler.

- Sürekli tepsi tipi kurutucular: Sürekli metal kayışlı, titreşimli, tepsili turbo kurutucu örnek olarak gösterilebilir (Şekil 3.3.1).



Şekil 3.3.1 Dikey turbo kurutucu (Mirza, 2006).

- Sürekli levha tipi malzeme kurutucuları: Özellikle tekstil ve bazı cins kağıtların kurutulmasında kullanılırlar (Şekil 3.3.2).

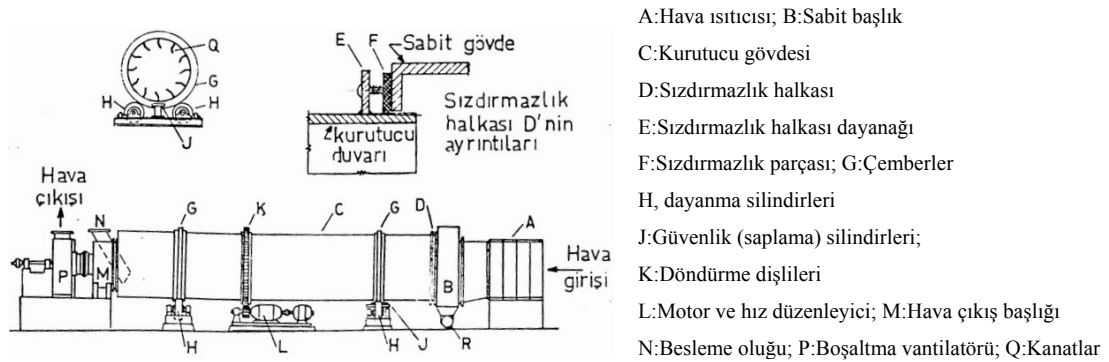


- A:Kurutucuya giren levha
 B:Askılar veya kolonlar
 C:Çapraz çubuklar
 D: Askı fanları
 E: Hava nozulu
 F:Levha çıkışı
 G:Ürün silindiri
 H:Vantilatörler
 J:Yön değiştirme levhaları
 K:Isıtıcılar
 L:Hava çıkışı
 M:Hava kontrol kapakları

Şekil 3.3.2 Askı kurutucu (Mirza, 2006).

- Pnömatik taşımalı kurutucular: Kurutma genellikle yüksek sıcaklıklı ve hızlı gazlarla öğütme işlemi ile birlikte yapılır.

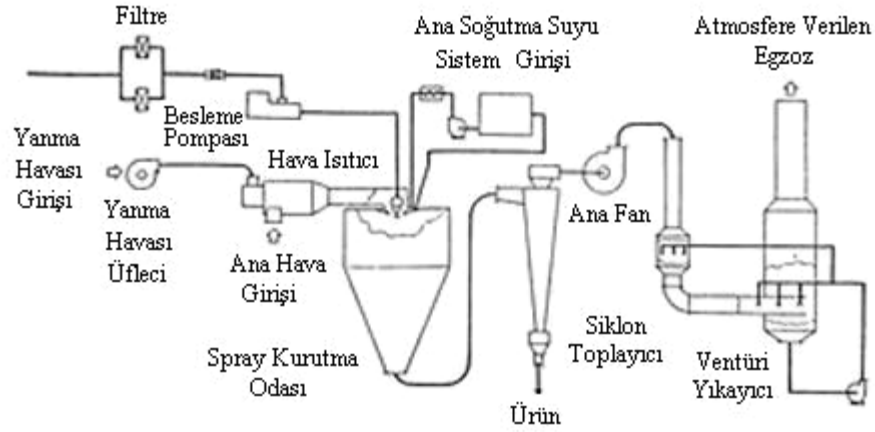
- Döner kurutucular: Malzeme, döner silindir içinde hem taşınır, hem de serbest düşmeyle silindir alt yüzeyine düşer (Şekil 3.3.3).



- A:Hava ısıtıcısı; B:Sabit başlık
 C:Kurutucu gövdesi
 D:Sızdırmazlık halkası
 E:Sızdırmazlık halkası dayanağı
 F:Sızdırmazlık parçası; G:Çemberler
 H, dayanma silindirleri
 J:Güvenlik (saplama) silindirleri;
 K:Döndürme dişlileri
 L:Motor ve hız düzenleyici; M:Hava çıkış başlığı
 N:Besleme oluğu; P:Boşaltma vantilatörü; Q:Kanatlar

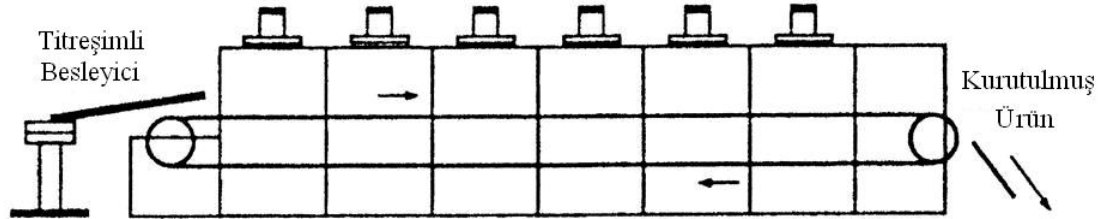
Şekil 3.3.3 Döner kurutucu (Mirza, 2006).

- Püskürtmeli (spray) kurutucular: Genellikle süt tozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılırlar (Şekil 3.3.4).



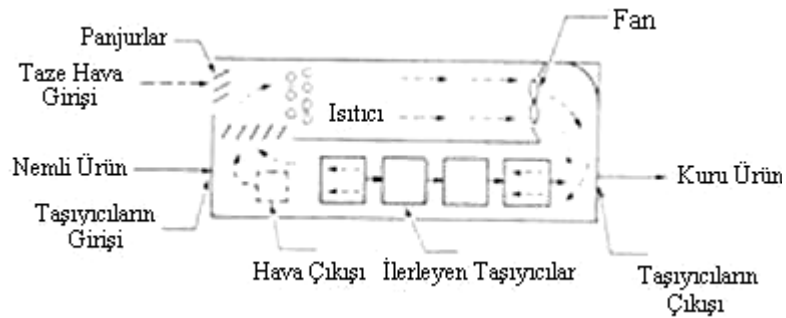
Şekil 3.3.4 Püskürtmeli kurutucu ünitesinin süreç şeması (Mirza, 2006).

- Ara dolaşimli kurutucular (bantlı kurutucular): Bu kurutucularda malzeme sürekli bir iletim bandı üzerinde kurutucu içinde hareket eder ve bu esnada arasından sıcak kurutma havası üflenir (Şekil 3.3.5).



Şekil 3.3.5 Bant tipi kurutucu (Mirza, 2006).

- Tünel kurutucular: Bu tip kurutucularda malzeme bir tünel içinde hareket eden kurutma vagonları içine uygun biçimde yerleştirilir. Vagon tüneli terk ederken başka bir vagon tünele girer (Şekil 3.3.6).



Şekil 3.3.6 Tünel kurutucu (Mirza, 2006).

- Akışkan yataklı kurutucular: Akışkanlaştırılmış yatakta tanecik yapısındaki maddeler arasından kurutma ortamı olarak gaz akımı geçirilir.

- Isı pompalı kurutucular: Isı pompalı kurutucular dördüncü bölümde geniş olarak incelenmiştir.

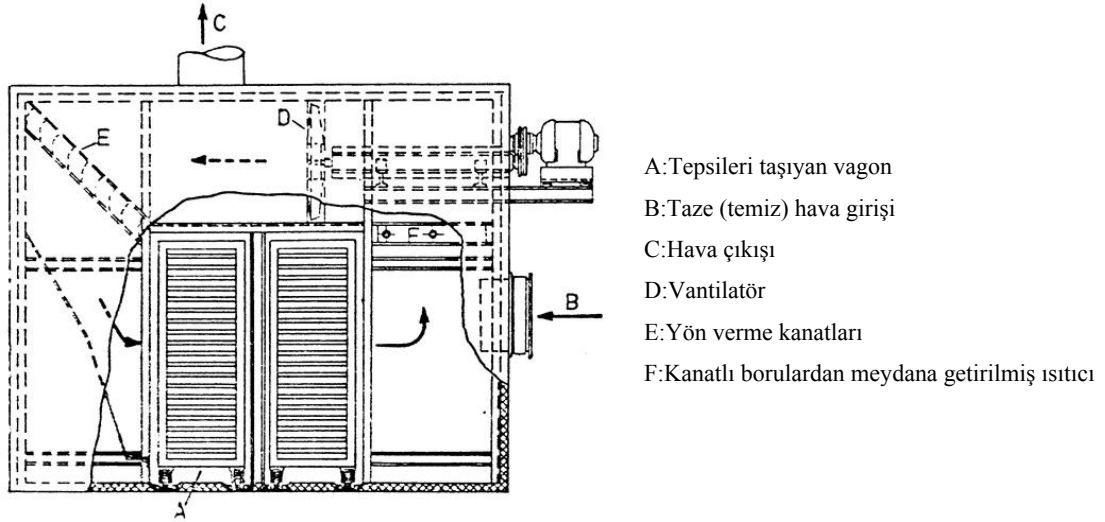
- **Kesikli Kurutucular**

Bu tip kurutucular belirli bir zaman aralığında belirli miktarda yaş ürünün kurutulması amaçlı tasarlanır. Kesikli kurutucularda nem miktarı ve sıcaklık koşulları kurutucunun herhangi bir noktasında sürekli olarak değişim gösterir.

- Kesikli çalışan malzeme arasından sirkülasyonlu kurutucular: Malzeme elek yapılı tepsiler üzerindeyken sıcak hava üflenir.

- Tepsi ve kabin tipi kurutucular: Cihaz esas itibariyle dikdörtgen şeklinde bir odadan ibaret olup, bu odanın duvarları uygun bir ısı yalıtım maddesi ile kaplanmıştır. Bu odaların içerisinde ya tepsilerin yerleştirildiği ve üzerlerinde kolayca kaydığı raflar vardır veya tamamen boş olup, tepsiler vagonlar üzerindeki raflara yerleştirildikten sonra, bu odalara konular ve kurutucunun kapıları kapatılır. Havayı tepsiler üzerinde ve kurutucu içerisinde dolaştıracak tedbirler alınmıştır. Bu tip kurutucularda havanın ısıtılması cihaz içerisindeki ısıtıcılar tarafından yapılır ve dışarıdan sıcak hava alınmaz. Oldukça yaygın böyle bir kurutucu Şekil 3.3.7'de görülmektedir.

- Akışkan yataklı kurutucular: Katı kurutulan maddeler bir sabit tank içinde akışkanlaştırılır. Akışkanlaştırma sıcak gaz akımı ile yapılabileceği gibi ısıtma serpantinleri de kullanılabilir.



Şekil 3.3.7 Tepsili kompartıman kurutucu (Mirza, 2006).

3.3.2 Özel kurutucular

- İnfrared (kızılötesi) radyant ısı kurutucular: Isıl ışınım, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler tarafından sağlanır.
- Dielektrik ısıtıcı kurutucular: Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilirse, malzeme içinde ısı üretilir. Nemli bölgelerde kuru bölgelere göre daha fazla ısı üretilir. Bu şekilde malzeme içinde nem profili otomatik olarak düzenlenir. Su, malzeme aşırı derecede ısıtılmaksızın buharlaşır
- Morötesi radyasyon kurutma: Morötesi kurutmada elektromanyetik radyasyon kullanılır. Monomer yapılı kaplamalar ve boyar maddeler UV radyasyon etkisinde kurutulur. Morötesi kurutmanın uygulanmasında en büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir.
- Mikrodalga kurutma: Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik formu olarak nitelenenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır.

3.3.3 İndirekt kurutucular

Kurutmada kullanılan ısı bir ara duvardan geçerek nemli malzemeye ulaşır. Buharlaşan sıvı ise ısıtma ortamından bağımsız olarak kurutma ortamından

uzaklaştırılır. Kuruma hızı ıslak malzemenin sıcak yüzeyler ile temasına bağlıdır. İndirekt kurutucular ayrıca iletim (kondüksiyon) kurutucuları veya temaslı kurutucular olarak da isimlendirilir.

- **Sürekli kurutucular:** Kurutma malzemesinin sürekli olarak kurutucu içinden geçmesi ve yüzeylerle teması ile gerçekleşir.

- **Silindirik kurutucular:** Bu kurutucular devamlı bir tabaka halindeki kağıt ve tekstil gibi maddelerin kurutulmasında kullanılırlar (Şekil 3.3.8).

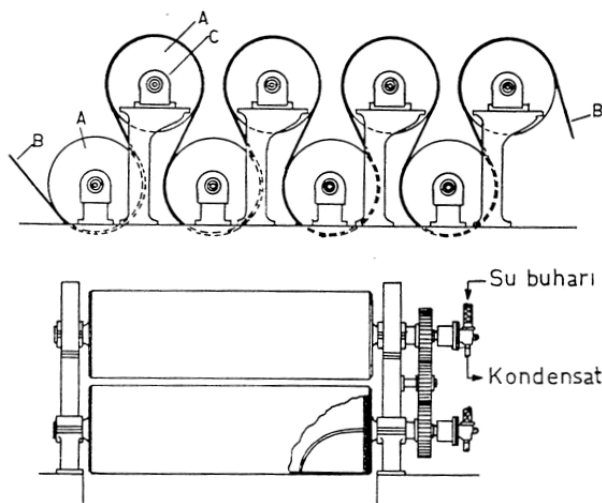
- **Drum kurutucular:** Bu kurutucularda ısıtma buhar veya sıcak su ile gerçekleştirilebilir.

- **Helezon ileticili kurutucular:** Bu kurutucularda süreklilik olmasına karşılık, vakum altında çalışma ekonomik olmaktadır. Kurutmada kullanılan çözücünün geri kazanımı olanaklıdır.

- **Buhar borulu döner tip kurutucular:** Buhar veya sıcak su kullanılabilir. Çalışma hayli düşük atmosfer altı basınçta ekonomiktir ve kurutmada çözücünün geri kazanımı gerçekleştirilebilir.

- **Titreşimli–tepsili kurutucular:** Bu kurutucularda ısıtma buhar veya sıcak su ile gerçekleştirilir.

- **Özel tipler sürekli:** Kumaş kayış hareket ederek buharla ısıtılan levhalar üzerinden ısıyı alır. Malzeme ise kayış üzerinde bulunurken ısıyı temasla alır ve kurutulur.



A:Silindirler

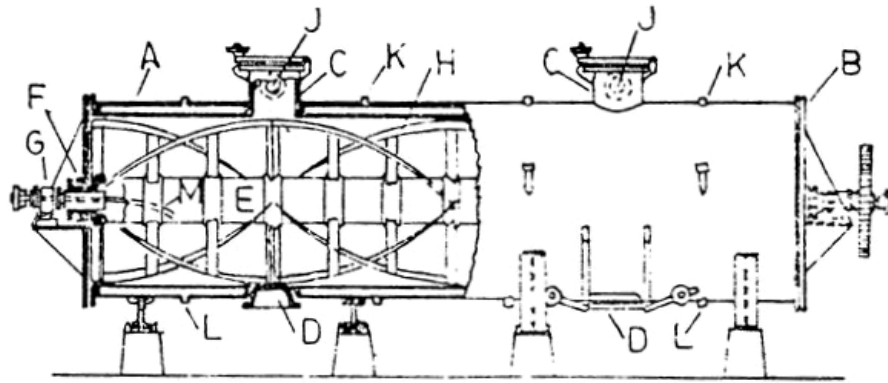
B:Levha yapısında kurutulacak madde

C:Mil yatakları

Şekil 3.3.8 Silindir kurutucu: (Mirza, 2006).

- **Kesikli kurutucular:** Kesikli indirekt kurutucular genellikle vakum altında çalışmaya iyi uyumludur. Bu tip kurutucular ayrıca karıştırmalı veya karıştımsız olarak da sınıflandırılabilirler.

- Karıştırmalı kaplı kurutucular: Bu kurutucular atmosferik veya vakum altında çalışmaya iyi uyumludur. Devamlı çalışan döner bir kurutucuda kurutulamayacak kadar yapışkan olan, tepsi veya kompartıman tipi kurutucuda kurutulacak kadar değerli olmayan pek çok maddenin kurutulmasında, çok değişik tipleri bulunan ve mekanik olarak karıştırılan kurutucular kullanılmaktadır. Bunların bir tipi Şekil 3.3.9'da gösterilmektedir.

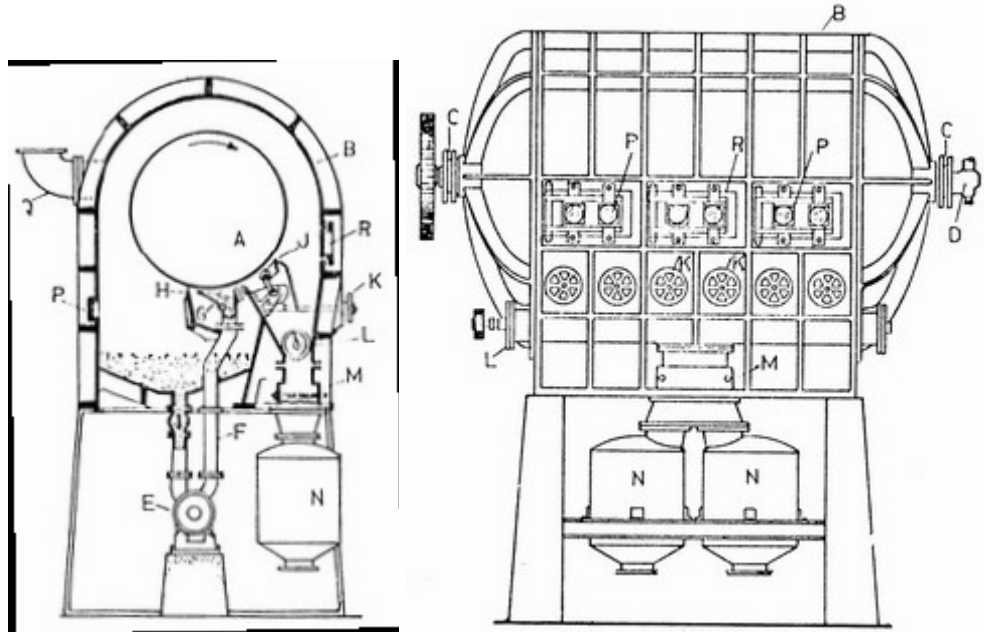


A:Ceketli silindir; B:Başlıklar; C:Doldurma bağlantıları; D:Boşaltma kapıları; E:Karıştırıcı şaftı;
F:Salmastra kutusu; G:Şaft yatağı; H:Karıştırıcı kolları; J:Buhar çıkışları; K:Su buharı girişleri;
L:Kondensat çıkışları; M:Şaftta meydana gelen yoğunlaşma için boşaltma sifonu

Şekil 3.3.9 Mekanik olarak karıştırılan devamsız bir kurutucu (Mirza, 2006).

- Dondurmalı kurutucular: Dondurarak kurutma farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze, kahve ve çay özlerinin eldesinde, et ve süt üretiminde uygulanabilir. Malzeme önce dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırucusu ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan malzemeye iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada uçucu element genellikle su süblimleşir ve yoğunlaşır, ya da nem alıcı madde tarafından absorplanır. Dondurarak kurutma genellikle $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında uygulanır. Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş yürüyen bir işlemdir, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur (Mirza, 2006).

- Vakumlu döner kurutucular: Atmosfer basıncı altında kaynama sıcaklığına kadar ısıtılmaları sakıncalı olan, hassas maddelerin kurutulması için Şekil 3.3.10’da görülen vakum altında çalışan tek silindirli bir kurutucu kullanılabilir.



A:Kurutma silindiri; B:Kaplama; C:Miller; D:Döner bağlantı; E:Besleme pompası; F:Besleme akımı için giriş borusu; G:Silindir besleme teknesi; H:Yayıcı; J:Kazıyıcı bıçak; K:Kazıyıcı bıçağı ayarlayan çark; L:Ürünü taşıyan konveyör; M:Ürün tanklarına ait açıp kapama vanası; N:Ürün depolama tankları; P:Gözetleme penceresi; Q:Buhar çıkışı; R:Bakım için giriş kapağı

Şekil 3.3.10 Vakum altında çalışan tek silindirli kurutucu (Mirza, 2006).

- Vakumlu tepsi kurutucular: Pek çok durumlarda maddenin, atmosfer basıncı altında suyun buharlaşacağı sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta ve kısa zamanda kurutulması istenebilir. Böyle bir durumda vakum altında çalışan raflı bir kurutucu kullanılır.

3.3.4. Güneş enerjili kurutucular

Tarım ürünlerinin kurutuldukları dönemlerde kurutma için gereken enerji, yeterli güneş enerjisi olan yörelerde, güneş enerjisinden yararlanılarak sağlanabilmektedir. Güneş enerjisiyle çalıştırılan kurutucuların, güneş enerjisinin günlük ve mevsimlik olarak değişkenlik göstermesi ve düşük enerji yoğunluğu gibi özellikleri nedeniyle geniş toplaç alanları ve güneş enerjisinin yetersiz olduğu saat ve mevsimlerde de

kullanılmak isteniyorsa büyük depolama hacimlerine gereksinim duyulması gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır (Yağcıoğlu, 1999).

Güneş enerjili kurutucular temel olarak aşağıda belirtilen şekilde üç ana gruba ayrılabilir:

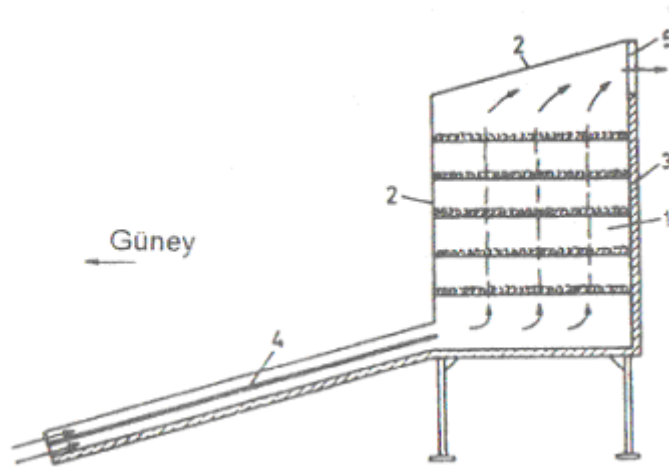
- Güneş enerjili doğal kurutucular
- Güneş enerjili fanlı kurutucular
- Güneş enerjisi destekli yapay kurutucular.

Güneş enerjili doğal kurutucularda, yalnızca güneş enerjisinden yararlanır. Herhangi bir yardımcı başka enerji kaynağı yoktur. Güneş enerjili fanlı kurutucularda, güneş enerjisi ile ısıtılan havanın kurutucu içinde dolanımının hızlanması için bir fan kullanılır. Güneş enerjisi destekli yapay kurutucularda ise, kurutma havasının ısıtılmasında diğer enerji kaynaklarından da yararlanılmakta, güneş enerjisinin yetersiz kaldığı ya da olmadığı zamanlarda yakıtla çalışan ısıtma düzenleri devreye girmektedir.

Kurutma işleminin güneşli kurutucularda yapılması düşünülüyorsa, karar vermeden önce, güneşli doğal kurutucular için güneşte serilerek yapılan kurutma ile; güneş enerjili fanlı veya güneş enerjisi destekli kurutucular için ise bilinen sıcak hava akımlı kurutucularla teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırma yapılmalıdır. Bu incelemeler sırasında, güneş enerjili kurutucuların kullanılmasına karar verilirse, düşük kapasiteli, kısa ömürlü, ucuz bir kurutucu mu, yoksa yüksek kapasiteli, uzun ömürlü ve pahalı bir kurutucu mu edinilmesi konusu da göz önünde bulundurulmalıdır.

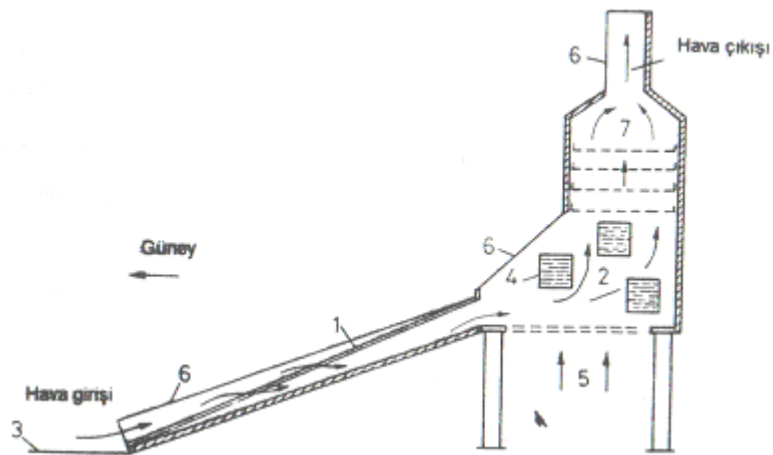
3.3.4.1. Güneş enerjili doğal kurutucular

Bu tip kurutucular herhangi bir yardımcı enerji kaynağına gereksinim göstermediklerinden kırsal kesimlerde rahatlıkla kullanılabilirler. Güneş enerjili doğal kurutucular kendi aralarında pasif ve aktif kurutucular olarak iki gruba ayrılabilir. Pasif tiplere, güneş kabinleri, çadır veya seraları ve baca tipi kurutucuları; aktif tiplere ise güneş pilli bataryalar veya rüzgar enerjisiyle çalışan fanlar sahip olanlar gösterilebilir. Şekil 3.3.11 ve Şekil 3.3.12’ de pasif tip güneş enerjili kurutuculara ait bazı örnekler verilmiştir.



1: Raf 2: Örtü(PE) 3: Yalıtım 4: Güneş Kolektörü 5: Hava çıkışı

Şekil 3.3.11 Raflı tip pasif sistem güneşle kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).

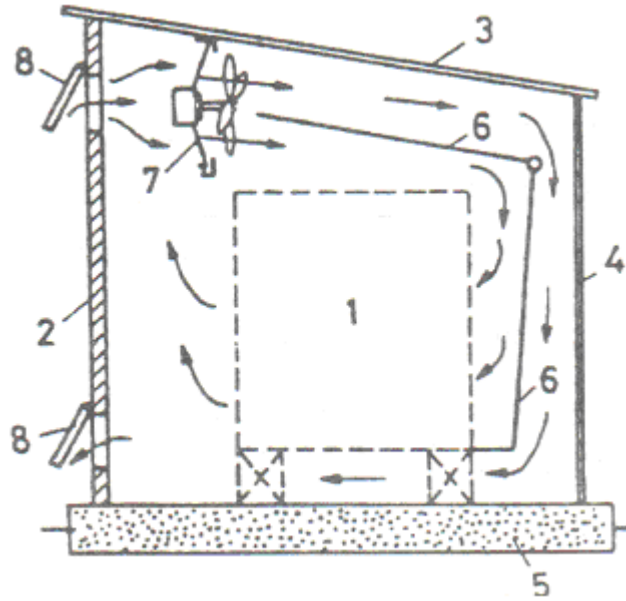


1- Güneş Kolektörü 2- Isı depolama hacmi 3- Yansıtıcı yüzey 4- Isı deposu su dolu variller 5- Gece hava giriş kesiti 6- Şeffaf örtü 7- Ürün rafları

Şekil 3.3.12 Isı deposu olan bacalı-raflı pasif sistem güneşle kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).

3.3.4.2. Güneş enerjili fanlı kurutucular

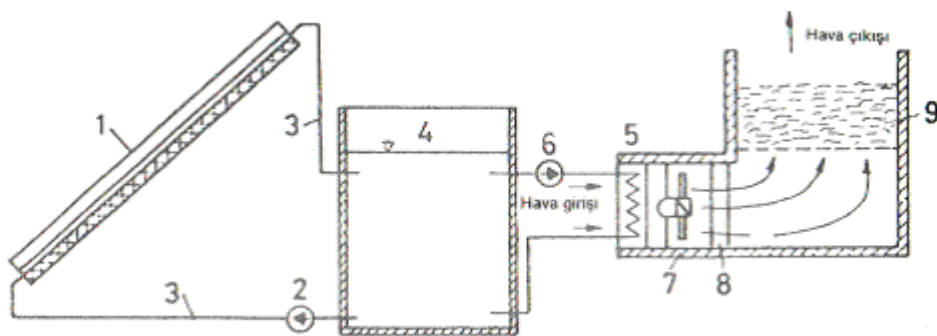
Bu tiplerde, ürünü kurutmada kullanılan havanın kurutucu içindeki dolaşımını elektrik motoruyla çalışan fan yardımıyla sağlanır. Hava giriş ve çıkış kesitleri damperlerle kontrol edilerek, kurutucunun ısıl etkinliği bir ölçüye kadar arttırılabilir. Güneşle kurutma yapan fanlı kurutuculara örnek Şekil 3.3.13’de gösterilmiştir.



1: Ürün 2: Duvar 3-4: Işık geçiren malzeme 5: Beton kaide 6: Siyah boyalı yüzey
7: Fan 8: Hava damperi

Şekil 3.3.13 Fanlı tip güneşle kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).

Güneş enerjisiyle kurutma yapan fanlı tip kurutucularda ısı depolarından da yararlanılabilir. Güneş enerjisinin yeterli olduğu dönemlerde toplanan ısının bir bölümü ısı depolarında depolanır ve gereksinim duyulduğunda, depolanan bu ısı kurutma havasının ısıtılmasında kullanılır. Isı depolama malzemesi olarak su, taş havuzları ve sentetik bazı materyaller kullanılabilir (Şekil 3.3.14).

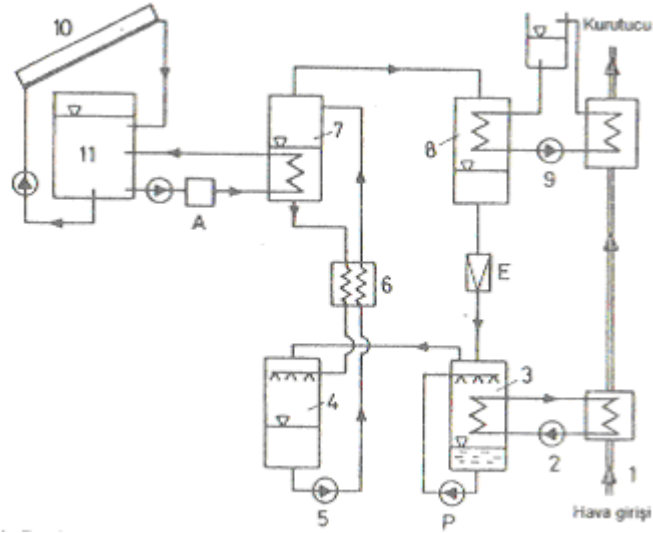


1: Güneş kolektörü 2-6: Pompa 3: Boru sistemi 4: ısı deposu 5: Isı değiştirici 7: Fan
8: Yardımcı ısıtıcı 9: Ürün

Şekil 3.3.14 Sulu ısı deposuna sahip güneş enerjili kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).

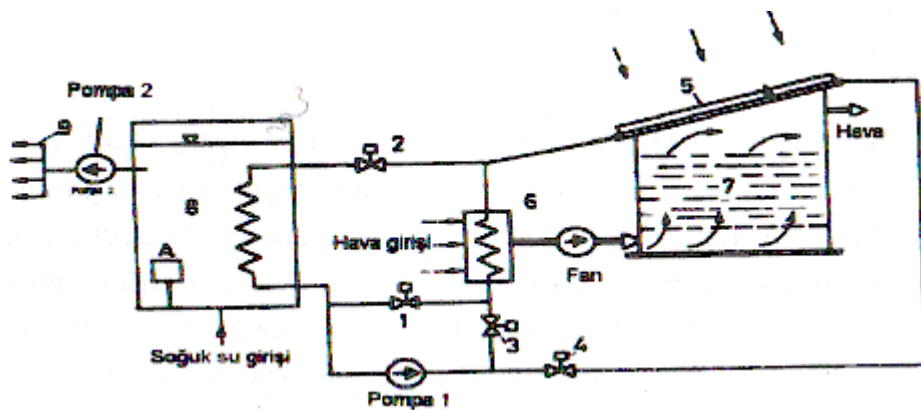
3.3.4.3. Güneş enerjisi destekli kurutucular

Bu tip kurutucularda güneş enerjisinin yeterli olduğu dönemlerde kurutma havası doğrudan güneş enerjisiyle ısıtılır. Güneş enerjisinin yetersiz olduğu dönemlerde ise havanın ön ısıtmasında güneş enerjisinden yararlanır. Şekil 3.3.15 ve Şekil 3.3.16'te bu tip sistemlere ait örnekler verilmiştir.



1: Dış hava 2: Fan 3: Evaporatör 4: Soğutucu su tankı 5-9: Pompa 6: Isı değiştirici 7: Boyler
8: Kondanser 10: Güneş kolektörü 11: Su deposu E: Genleşme valfi

Şekil 3.3.15 Absorpsiyonlu ısı pompası ve ısı deposu olan güneş enerjisi destekli kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).



1-2-3-4: Vana 5: Güneş kolektörü 6: Isı değiştirici 7: Ürün 8: Isı deposu 9: Dış kullanım
A: Ek ısıtıcı

Şekil 3.3.16 Isı pompası ve güneş enerjisiyle ısıtılan ısı depolu güneş enerjisi destekli kurutucu (Yağcıoğlu, 1999).

3.4. Kurutucu Seçimi

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin karlılığı açısından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilip kullanılmasına doğrudan bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, ilk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine en üst düzeyde önem verilmesi gerekir (Yağcıoğlu, 1999).

Yapılması istenen kurutma için uygun kurutucu seçimi, birçok faktörün dikkate alınmasını gerektiren çok zor ve karmaşık bir işlemdir. Kurutulacak materyalin özellikleri, ısıtıcı tipi, enerji kaynağı, kurutma havası ile materyal arasındaki hidrodinamik ilişkiler özellikle ele alınmalıdır. Seçim sırasında teknolojik gereksinimler, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriter olarak ele alınmalıdır. Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası materyal özelliklerinin belirlenmesiyle başlar. Kurutulacak materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri ve kurumuş üründen beklenen şekil ve dış görünüm özellikleri öncelikle belirlenmelidir. Materyalin kuruma özellikleri, sorpsiyon ve adsorpsiyon izotermi ile kritik nem, denge nemi, kurutma sıcaklığı, kuruma hızı gibi parametrelerin belirlenmesi için bilinmesi gereken önemli unsurlardır. Kurutma yöntemleri ve kurutucular alternatifli olarak belirlendikten sonra kesin seçim için aşağıdaki unsurlar dikkatle irdelenmelidir.

- Yıllık kurutulacak ürün miktarı
- Tesisin kuruluş ve işletme maliyeti
- İşlem sırasında materyalin verdiği fire
- Emniyetli çalışma
- Kurumuş ürünün kalitesinin uygunluğu
- Kurumuş ürünün dış görünüşünün isteğe uygunluğu
- Kurutucunun çeşitli kapasitelerde çalıştırılabilme esnekliği
- Çevre kirliliğine etkisi olup olmadığı
- Çalışma sırasında etkin kontrollerin yapılmasına olanak vermesi
- Tamir ve bakım kolaylığı
- Görünüş güzelliği

Değişik gereksinimler kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemli olup, kurutucuda kalma süresi de tasarım esasıyla

yakından ilgilidir. Ürünün başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granüler, levha vb.) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir. Tablo 3.3.1’de bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri, Tablo 3.3.2’de ise kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler görülmektedir (Güngör ve Özbalta, 2009).

Tablo 3.3.1 Bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri (Güngör ve Özbalta, 2009).

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklığı(°C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32-52	1-4		
Yumuşak Tahtalar	70-105		2-14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50-72			12-48
Kauçuk	36-60		2-6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92			4-20
Meşin ve Kösele	26-38		2-6	
Meyveler	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma	1.Kademe 70-88 2.Kademe 74			8
Şeftali, Armut	68			24-30
Şerbetçi Otu	50-65			6-12
Sebzeler	50-65			2-18
Havuç	1.Kademe 70 2.Kademe 65			14-24
Mantar	1.Kademe 44 2.Kademe 65			14-24
Soğan	1.Kademe 70-88 2.Kademe 55-60			10-15
Deriler	21-32			2-150
Fırın Boyaları	105-175			1/4-6
Sabun	38-52			12-72
Tütün Yaprakları	29-55			12
Çay Yaprakları(Fanaj veya ilk kurutma)	38			4-8
Çay Yaprakları(Kurutma)	70-110			1-2

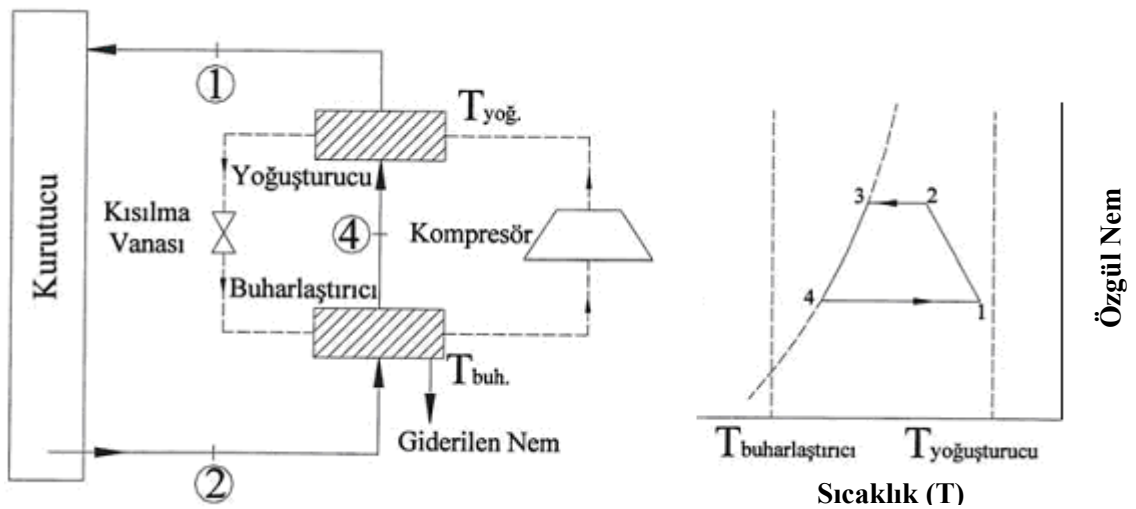
Tablo 3.3.2 Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler (Güngör ve Özbalta, 2009).

Kurutucu Tipleri	MJ/kg Uzaklaştırılan Su
Isı Pompalı Kurutucu	0,5-0,8
Direkt Egzoz Gazları İle Çalışan Kurutucu	3,2-3,8
Hava İle Çalışan Kurutucu 70-110 °C	4,5-5,5
Kazandan Alınan Egzoz Gazları İle Kurutma (400 °C)	5-6
Kazandan Alınan Egzoz Gazları İle Kurutma (200 °C)	9-12
<u>Bantlı ve Tünel Kurutucular</u>	
Ters Akışlı Tepsili-Bantlı	8-16
Ters Akışlı Rafli-Tünel	6-16
Arasından Akışlı Tepsili-Bantlı	5-12
Vakumlu Tepsili-Bantlı-Levhalı	3,5-8

4. ISI POMPALI KURUTUCULARAR

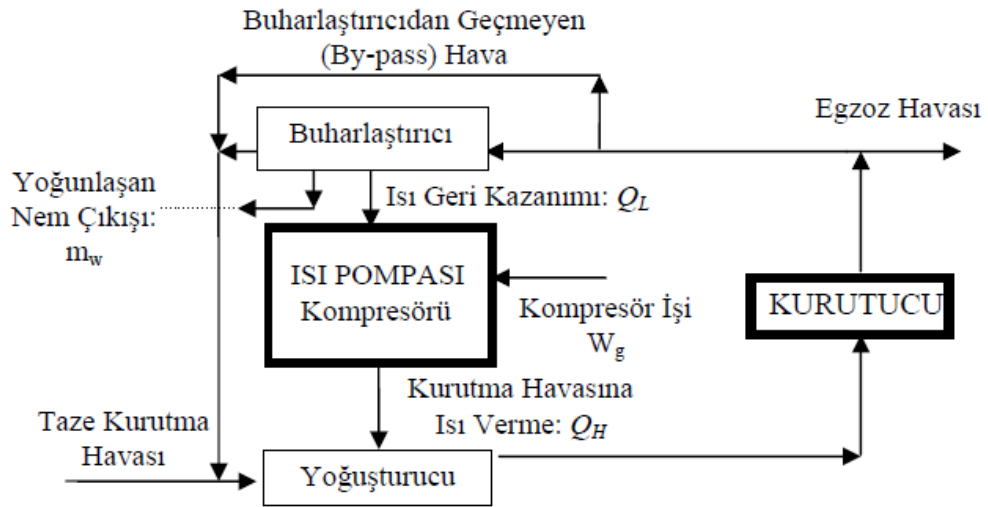
4.1. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Şekilleri

Kapalı sistem ısı pompaları uygulamasının temel prensibi Şekil 4.1.1'de görülmektedir. Burada kurutucudan gelen düşük sıcaklıktaki hava yardımıyla buharlaştırıcıda, ısı pompası devresindeki soğutucu akışkan buharlaşır. Aynı zamanda egzoz (kurutma) havasından yoğuşan nem uzaklaştırılır. Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırılır ve yoğuşturucudan geçirilerek taşıdığı enerji kurutma havasına transfer edilir. Sıcaklığı yükselen kurutma havası da kurutucuya verilir. Soğutucu akışkan ise adyabatik olarak buharlaştırıcı basıncına genişletilir. Bu uygulamada kurutucudan gelen egzoz havası, taşıdığı nemin uzaklaştırılabilmesi için yoğuşma sıcaklığının altına soğutulmalıdır. Bu sürecin izlediği yol psikrometrik diyagramda (Şekil 4.1.1) görülmektedir. Kurutucudan gelen egzoz havasının ısı pompası buharlaştırıcısına giriş koşulları 2 noktası ile belirlenir. Buharlaştırıcıda önce egzoz havasının sıcaklığı düşer (3), ardından içerdiği nem yoğuşarak 4 noktası ile gösterilen koşullara ulaşır. Nemi uzaklaştırılan egzoz havası ısı pompası yoğuşturucusunda kurutma sıcaklığına getirilerek 1 noktası ile gösterilen koşula getirilir (Güngör ve Özbalta, 2009).



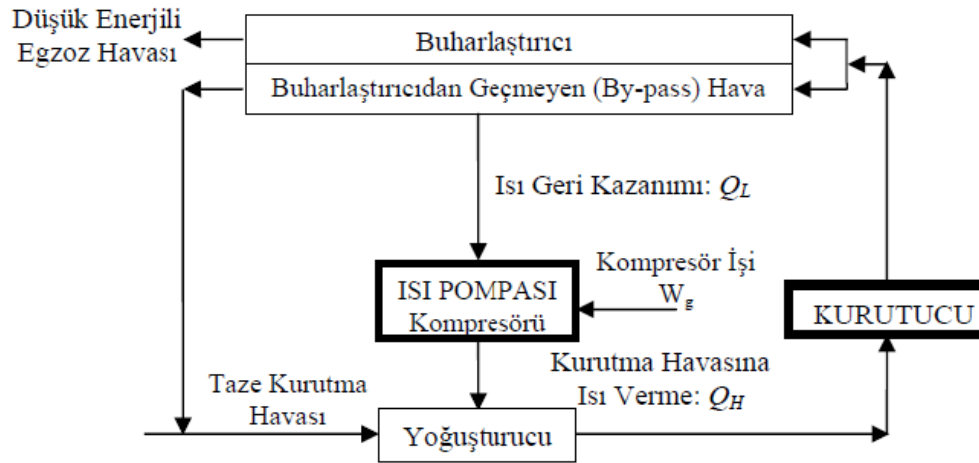
Şekil 4.1.1 Isı pompalı kurutucu prensip şeması ve psikrometrik diyagramda gösterimi (Güngör ve Özbalta, 2009).

Isı pompalı kurutma sistemlerinde, uygulamada farklı yerleşimler söz konusudur. Şekil 4.1.2’de nem almalı ısı pompalı kurutucu olarak adlandırılan kapalı çevrim görülmektedir. Kurutucu çıkışındaki nemli egzoz havasının bir kısmı buharlaştırıcıdan geçirilirken bir kısmı ise buharlaştırıcı çıkışına dışarıdan dolaştırılarak gönderilir. Buharlaştırıcıdan geçirilen egzoz havasının bünyesindeki mutlak nem azalır ve sıcaklığı düşer. Buharlaştırıcıdan geçen egzoz havası ile dışarıdan dolaştırılan nemli hava karıştırılarak ısı pompası yoğuşturucusundan geçirilerek ısıtılır ve kurutma odasına geri gönderilir (Güngör ve Özbalta, 2009).



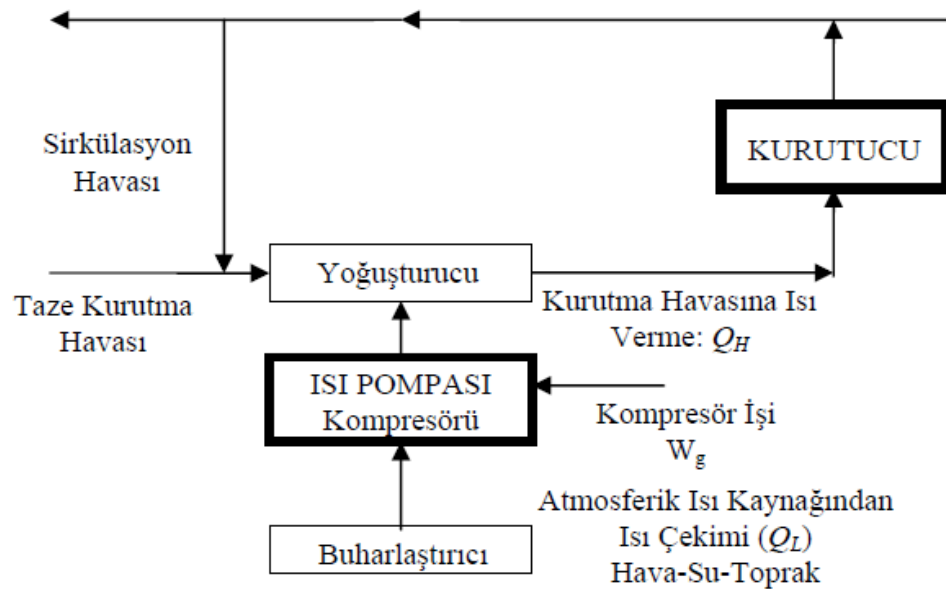
Şekil 4.1.2 Basit nem alıcı ısı pompalı kurutucu (Güngör ve Özbalta, 2009).

Şekil 4.1.3’de ısı geri kazanımının ana amaç olduğu açık çevrimli sistem şematik olarak gösterilmiştir. Isı pompası ünitesinin buharlaştırıcısı, kurutucu egzoz havasının çıktığı kanalın içerisine yerleştirilir. Kurutucu çıkışında nemli egzoz havasının bir kısmı buharlaştırıcıdan geçirilirken bir kısmı ise kurutucu girişine yerleştirilen yoğuşturucuya dışarıdan dolaştırılarak gönderilir. Buharlaştırıcıdan geçerken sıcaklığı düşen ve bünyesindeki mutlak nemi azalan egzoz havası dış ortama atılır. Kurutma odası girişinde ise dış ortamdan çekilen taze hava ile dışarıdan dolaştırılan nemli hava karıştırılarak, ısı pompasının yoğuşturucusundan geçirilerek ısıtılır ve kurutma odasına gönderilir.



Şekil 4.1.3 Isı geri kazanımlı ısı pompalı açık hava çevrimli sistem (Güngör ve Özbalta, 2009).

Atmosferik ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucuda ise ısı pompası direkt olarak dış bir atmosferik kaynaktan (atmosferik çevre havası kaynaklı, toprak kaynaklı, su kaynaklı) buharlaştırıcısı aracılığı ile çektiği ısıyı kurutma havasının ısıtılmasında kullanır. Tasarruflu bir elektrik enerjisi kullanımı sağlar. Şekil 4.1.4'de bu uygulama gösterilmiştir (Güngör ve Özbalta, 2009).



Şekil 4.1.4 Isı pompası ile bir atmosferik kaynaktan ısı çekimi ile kurutma havasının ısıtılması (Güngör ve Özbalta, 2009).

4.2. Isı Pompalı Kurutucularda Verim Tanımı

Isı pompası destekli kurutucularda sistemin etkinliğinin belirlenebilmesi için özgül nem alma hızı, kuruma hızı, nem alma verimi ve ısı pompası etkinlik katsayısı tanımlamalarından yararlanır (Tosun, 2009).

4.2.1 Özgül Nem Alma Hızı (SMER)

Bir ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma (SMER: Specific Moisture Extraction Rate) hızı ile belirlenir. Bu büyüklük, birim kWh enerji kullanımı başına, kurutulan üründen uzaklaştırılan su kütlesini gösterir. Bir kurutucunun işletme maliyetleri enerji verimliliği için önemli bir parametredir. SMER için $SMER_{hp}$ ve $SMER_{ts}$ şeklinde iki tanımlama yapılabilir.

$$SMER_{hp} = \left(\frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Enerji Girişi(Kompsesör)}} \right) \left[\frac{kg_w}{kWh} \right] \quad (4.1)$$

$$SMER_{ts} = \left(\frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Enerji Girişi(Tüm sistem)}} \right) \left[\frac{kg_w}{kWh} \right] \quad (4.2)$$

4.2.2 Nem Alma Hızı (MER)

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

$$MER = \left(\frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Kuruma Süresi}} \right) \left[\frac{kg_w}{h} \right] \quad (4.3)$$

4.2.3 Nem alma verimi (η)

Kurutma havası tarafından alınan nemin kurutma havasınca alınabilecek maksimum neme oranı olarak tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{(w_2 - w_1)}{w_a - w_1} \quad (4.4)$$

Burada;

w_2 = Kurutucu çıkışındaki özgül nem, (kg_w / kg_a)

w_1 = Kurutucu girişindeki özgül nem, (kg_w / kg_a)

w_a = Kurutucu çıkışındaki havanın doyma özgül nemi, (kg_w / kg_a)

Bir başka nem alma verimi de kütle ve hava debisi ölçümlerinden yararlanılarak yapılan tanımdır.

$$\eta = \frac{(m_0 - m_1)}{(\dot{V}\rho(w_{ady} - w_1))} \quad (4.5)$$

Burada;

m_0 : t=0 anında kurutulan ürün kütlesi, (kg)

m_1 : t=t anında kurutulan ürün kütlesi, (kg)

\dot{V} : Kurutma havası hacimsel debisi, (m^3/s)

ρ : Kurutma havası yoğunluğu, (kg/m^3)

t : Kuruma süresi, (s)

4.2.4. Isı Pompası Etkinlik Katsayısı (COP)

Yoğuşturucuda alınan ısının kompresörde verilen güce oranı olarak tanımlanır. COP_{hp} ve COP_{ws} şeklinde iki tanımlama yapılabilir.

$$COP_{hp} = \frac{(Yoğuşturucudan \cdot alınan \cdot ısı)}{(Kompresörde \cdot verilen \cdot güç)} = \frac{Q_H}{W_g} \quad (4.6)$$

$$COP_{ws} = \frac{(Yoğuşturucudan \cdot alınan \cdot ısı)}{(Sistem \cdot için \cdot verilen \cdot toplam \cdot güç)} = \frac{Q_H}{W_{sistem}} \quad (4.7)$$

Isı pompası için maksimum teorik verim Carnot verimliliği ile elde edilmektedir.

$$COP_{carnot} = \frac{T_{yoğuşturucu}}{T_{yoğuşturucu} - T_{buharlaştırıcı}} \quad (4.8)$$

COP_{carnot} değerine fiziksel olarak ulaşmak mümkün değildir. Fakat bu değer soğutma sisteminin ideal sistemden ne kadar uzak olduğuna dair ölçü olarak kullanılmaktadır. Pratikte ısı pompasının gerçek verimi genellikle Carnot veriminin %40'ı ile %50'si arasındadır (Mirza, 2006).

4.2.5. Isı pompalı kurutucuların avantajları ve sınırlamaları

Diğer mekanik sistemlerde olduğu gibi ısı pompalı kurutucuların da, kurutma uygulamaları için tercih edilmeden önce incelenmesi gereken bazı avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır (Mirza, 2006).

4.2.5.1. Isı pompalı kurutucuların avantajları

- Isı pompalı kurutucuların en büyük avantajı iyileştirilen enerji verimliliğidir. Isı geri kazanımının iyileştirilmesi sonucu elde edilen yüksek enerji verimliliği ile uzaklaştırılan her birim su için daha az enerji tüketilir.
- Isı pompalı kurutucular sıcaklık, nem ve hava akış değerlerinin tam ve bağımsız olarak kontrolüne olanak sağlarlar. Sürekli kontrol edilen kurutma koşulları ısı hassas materyaller için fayda sağlarken açık bir şekilde daha iyi kalitede ürün elde edilir.
- Tipik olarak -20 °C'den 100 °C'ye (ilave ısıtma ile) sıcaklık ve %15-80 (nemlendirme sistemiyle) bağıl nemliliğe kadar çok geniş kurutma şartları sağlanabilir.
- Kurutma işlemi sonunda aynı kalitede ürün elde edilir.
- Steril süreç şartları sağlanabilir.

4.2.5.2. Isı pompalı kurutucuların sınırlamaları

- Birçok ısı pompası sisteminde ozon tabakasına zararlı CFC'lerin kullanılması çevrecilerin bu konu ile ilgilenmelerine neden olmuştur. Bununla beraber, çevreyle dost HCFC'lerin ve hatta tamamen doğal olan amonyak ile suyun soğutucu akışkan olarak kullanıldığı ısı pompalı kurutucular bu dezavantajı ortadan kaldırmışlardır.

- Isı pompalı kurutucunun kompresörleri, soğutucu akışkan filtreleri, ısı değiştiricileri vb. elemanlarına kurutucuyu optimum çalışma şartlarında tutabilmek için düzenli bakım yapılmalıdır.
- Borularda bir çatlak oluşması halinde soğutucu akışkan çevreye sızabilir. Sızıntı olması durumunda ısı pompası çevriminin basıncı yavaş yavaş düşecektir ve kurutucunun performans değeri azalacaktır.
- Güneş enerjili kurutma gibi diğer kurutma sistemleriyle karşılaştırıldığında ısı pompalı kurutucuların ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olabilir. Bunun yanında ısı pompalı kurutucuların ısıyı geri kazanmaları çalışma maliyetlerini düşürür bu da yüksek maliyetleri dengeler.
- Bazı soğutucu akışkanların (rneğin R22 için 99,6 C) kritik basıncı seviyelerinden dolayı yüksek sıcaklıkta kurutma yapabilmesi için ilave ısıtmaya ihtiyaç duyulur.
- Arzu edilen kurutma şartlarına ulaşmak için sistem, kararlı hal periyoduna ihtiyaç duyar.
- Daha büyük soğutma sistemleri için üç fazlı güç ünitelerine ihtiyaç duyulabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Materyal ve Metot

Yapılan çalışma Pamukkale Üniversitesi kampus alanı içinde bulunan Toprak Enerjili Isı Evi'nde (Şekil 5.1) gerçekleştirilmiştir. Çalışma ayrıca Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından maddi olarak desteklenmiştir. Laboratuvar bünyesinde mevcut olan kurutma kabinine (Şekil 5.2) ilave olarak çatıya güneş enerjili sıcak su sistemi (Şekil 5.1) monte edilerek kabin içinde bulunan ısı değiştiricisine sıcak su hattı bağlanmıştır. Sistemin çalışma prensibi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

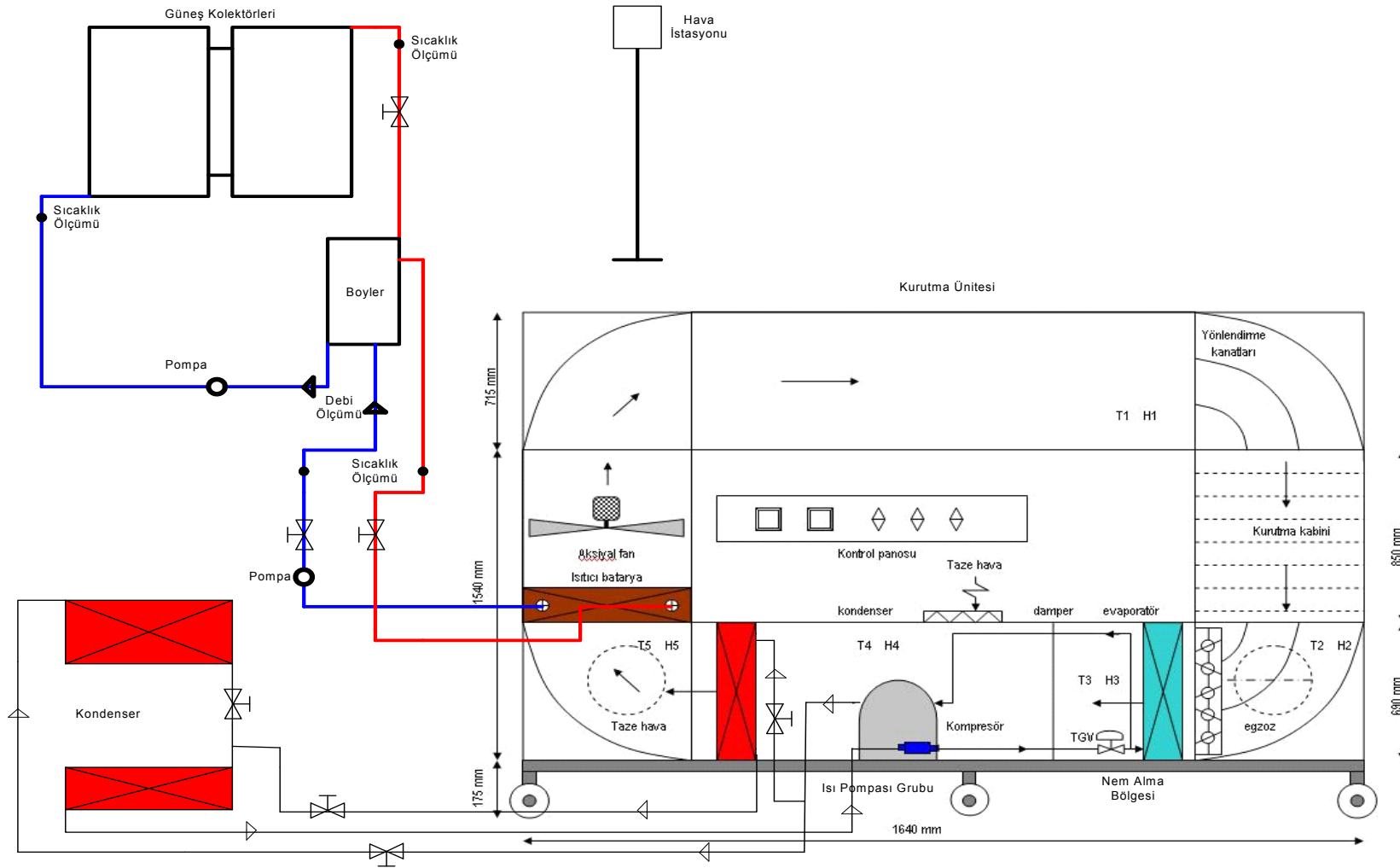


Şekil 5.1. Toprak enerjili ısı evi (1), güneş enerjisi sıcak su sistemi (2) ve meteoroloji istasyonu (3).



Şekil 5.2. Kurutma kabini.

Kurutma kabini içerisinde dolaşan kurutma havasının sıcaklık ve nem değerleri kabin içinde bulunan nem ve sıcaklık ölçerlerle tespit edilip kabin üzerinde bulunan kontrol panosu (Şekil 5.4) üzerinden anlık olarak okunmuştur. Ayrıca kurutma havasının ortalama hızı yine kabin üzerinde bulunan hava hızı ölçerle (Şekil 5.5) ölçülmüştür. Hava hızının ortalama değeri hesaplanırken, kurutma sisteminde dolaşan hava hızı değerlerinin belirlenmesinde ise Şekil 5.6’da gösterilen yöntem kullanılarak, dikdörtgen kanallarda, ortalama hava hızının bulunabilmesi için kanal içinde farklı noktalardan hız ölçümü yapılmış ve bu ölçüm sonuçlarının ortalaması alınmıştır (Güven Acar, 2009). Hava debisi kontrol panosu üzerinde bulunan fan hız kontrol yardımıyla kontrol edilmiştir. Kurutma kabini içinde Güneş Enerjili Sistemden gelen sıcak su ile kurutma havasını ısıtan ayrıca bir ısı değiştirici monte edilmiştir. Güneş enerjisi sistemi deneylerin yapıldığı Denizli ilinin enlemine uygun olarak 45° sabit açı ile monte edilmiştir. Kolektöre giren ve çıkan su sıcaklığı ile debisi anlık olarak ölçülmüştür. Ayrıca kurutma kabini içindeki ısı değiştiricisine giren ve çıkan suyun sıcaklık ve debi değerleri de ölçülmüştür.



Şekil 5.3. Sistemin çalışma prensibi.

Çatı üzerine kurulan Meteoroloji İstasyonu (Şekil 5.1) ve laboratuvar içine yerleştirilen iç ünite (Şekil 5.7) ile iç-dış hava sıcaklığı, iç-dış nem değerleri, rüzgar hızı, güneş ışınım değeri gibi karakteristik veriler ölçülüp bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Bunların yanında ısı pompası, fan ve pompaların enerji sarfiyatlarının belirlenmesi için laboratuvar içine mono ve üç fazlı sayaçlar monte edilmiştir (Şekil 5.8).

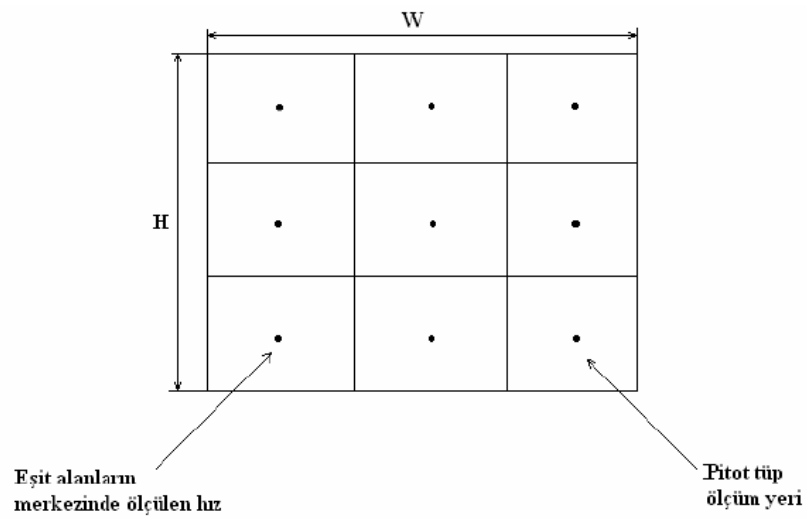
Deneyler Eylül-Ekim aylarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler için yaklaşık %95 oranında su içeren domatesler seçilmiş ve kurutma işlemleri su oranı yaklaşık %10 oluncaya kadar sürdürülmüştür. Domatesler buzdolabında saklandıktan sonra raflara (Şekil 5.9) yerleştirilmek üzere beş farklı tepsi üzerine yarım (1/2) veya dörtte bir (1/4) şeklinde doğranarak (Şekil 5.10) işleme hazır hale getirilmiştir. Her bir kurutma işlemi için yarım dizilen domateslerden yaklaşık 25 kg, dörtte bir dizilen domateslerden ise yaklaşık 20 kg kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Kontrol panosu.



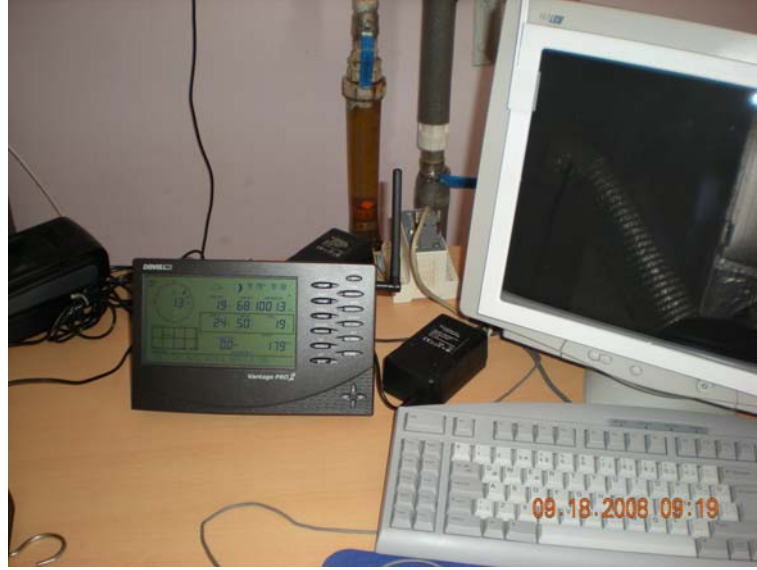
Şekil 5.5. Hava hızı ölçer.



H (mm)	W (mm) ve okuma sayısı							
	<200		200-500		500-900		>900	
	Düsey	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey	Yatay
<200	2	2	2	3	2	4	2	5
200-500	3	2	3	3	3	4	3	5
500-900	4	2	4	3	4	4	4	5
>900	5	2	5	3	5	4	5	5

Şekil 5.6. Dikdörtgen kanallarda ortalama hava hızının bulunabilmesi için ölçüm noktalarının tespiti (Güven Acar, 2009).

Kurutma öncesinde, belirli aralıklarla ve kurutma sonrasında ürünler hassas terazi yardımıyla tartılmışlardır (Şekil 5.11). Kurutma işlemi sonunda kurutulmuş ürünler deney numaraları yazılarak paketlenmişlerdir. Ürünün kuru madde miktarının tayini için numuneler Etüv fırını (Şekil 5.12) içinde 90 °C sıcaklıkta bir gün bekletilmiş daha sonra desikatör içinde oda sıcaklığına getirilip tartılarak ürünün kuru madde miktarı belirlenmiştir.



Şekil 5.7. Meteoroloji istasyonu iç ünite.



Şekil 5.8. Mono ve üç fazlı elektrik sayaçları.



Şekil 5.9. Hazırlanan domateslerin tepsilerle kabin içerisine yerleşimi.



(a)



(b)

Şekil 5.10. Yarım (a) ve dörtte bir (b) domateslerin raflara yerleşimi.



Şekil 5.11. Hassas terazi.



Şekil 5.12. Etüv fırını.

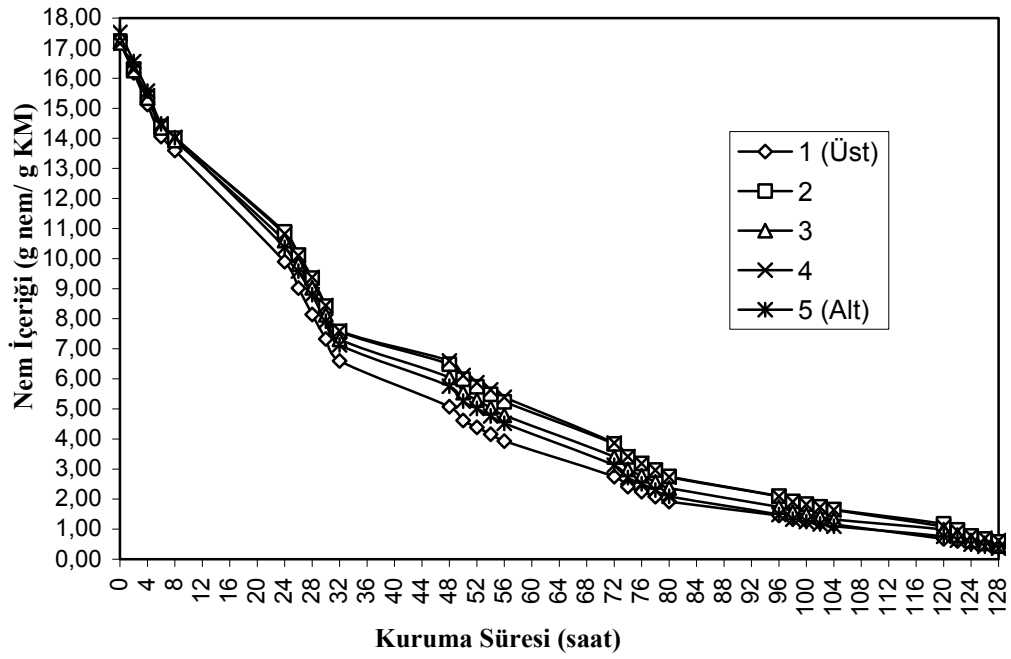
Nem almalı ısı pompalı ve güneş enerjili sistem ile ilgili kurutmalar kurutma kabini içinde iki farklı geometride (1/2 ve 1/4) gerçekleştirilmiş olup doğal ortamda kurutma çatı üzerine kurulan 1 m² alanlı kafesli bir düzenek (Şekil 5.13) içinde gerçekleştirilmiştir. Burada da ürünler iki farklı geometride eş zamanlı olarak kurutulmuşlardır. Deneyler sabah saat 10:00'da başlamış, akşam saat 18:00'e kadar her iki saatte bir ölçüm yapılmış ve gece periyodu boyunca kurutma devam etmiştir. Ertesi gün sabah 10:00'da ölçümler aynı şekilde devam etmiştir.



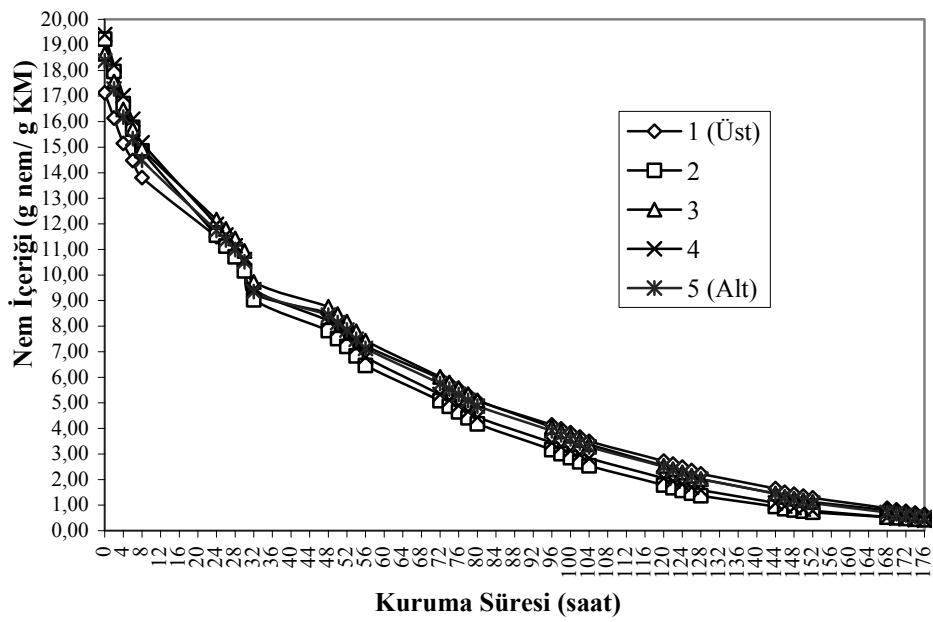
Şekil 5.13. Doğal ortamda kurutma.

5.2. Deney Sonuçları

Yapılan deneylerde kurutma kabini içinde farklı yükseklikteki raflarda kuruma hızı bakımından çok belirgin bir fark görülmemiş olup, ilk başlarda oluşan küçük farkların kuruma süresinin sonuna doğru azalarak benzer kuruma karakteristiği görülmüştür (Şekil 5.14, Şekil 5.15).

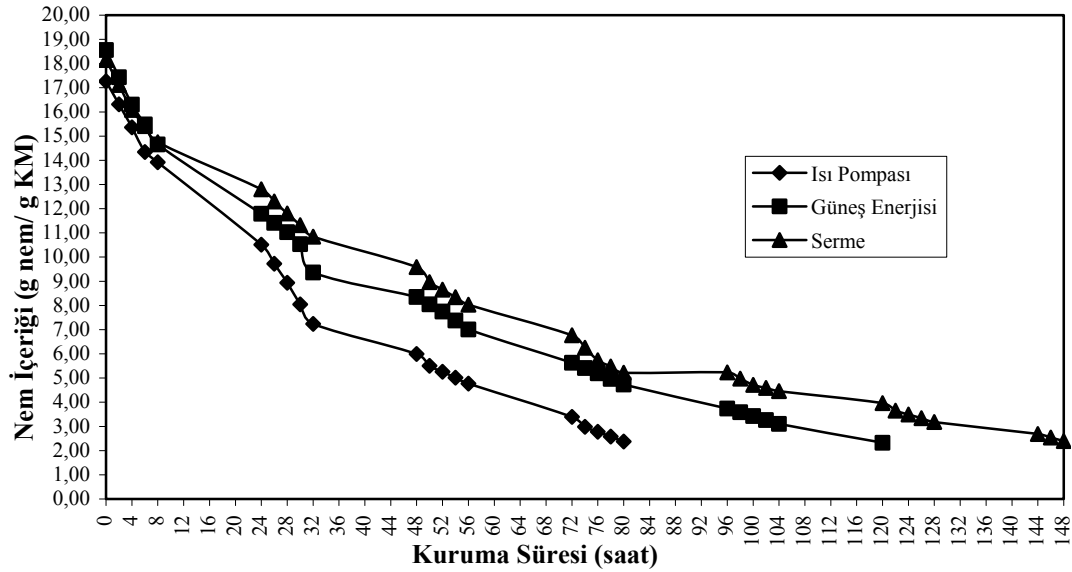


Şekil 5.14. Kurutma havası temas önceliğine göre farklı raflardaki 1/2 ürünlerin nem içeriği-zaman grafiği (Isı Pompalı Sistem).



Şekil 5.15. Kurutma havası temas önceliğine göre farklı raflardaki 1/2 ürünlerin nem içeriği-zaman grafiği (Güneş Enerjili Sistem).

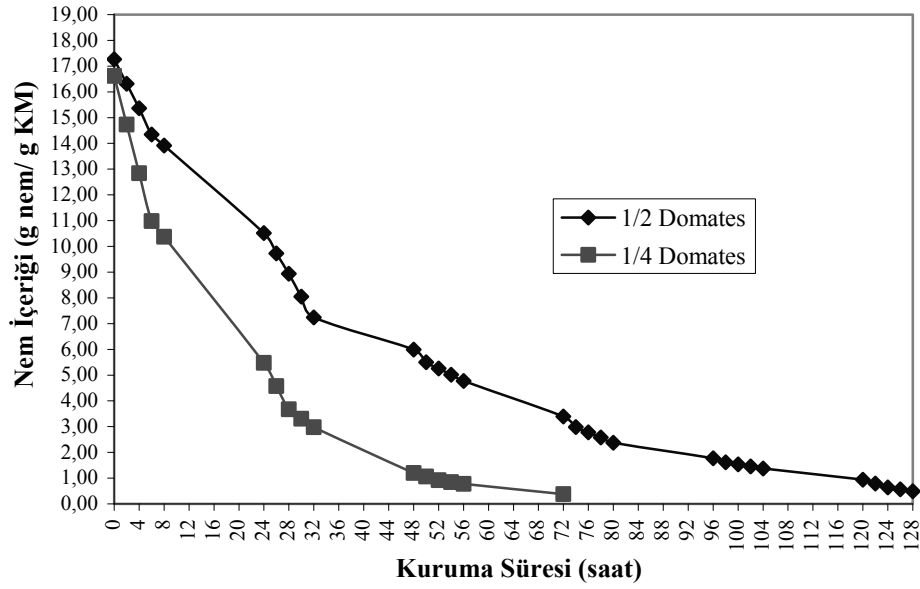
Farklı sistemlerde kurutulan ürünlerde ise ısı pompası kullanımının kurutma performansının diğer iki sisteme oranla daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Isı pompalı kurutmanın kurutma süresi bakımından yere sermaye yapılan doğal kurutmaya oranla yaklaşık %50, güneş enerjili sisteme oranla ise yaklaşık %30 daha iyi olduğu deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır (Şekil 5.16).



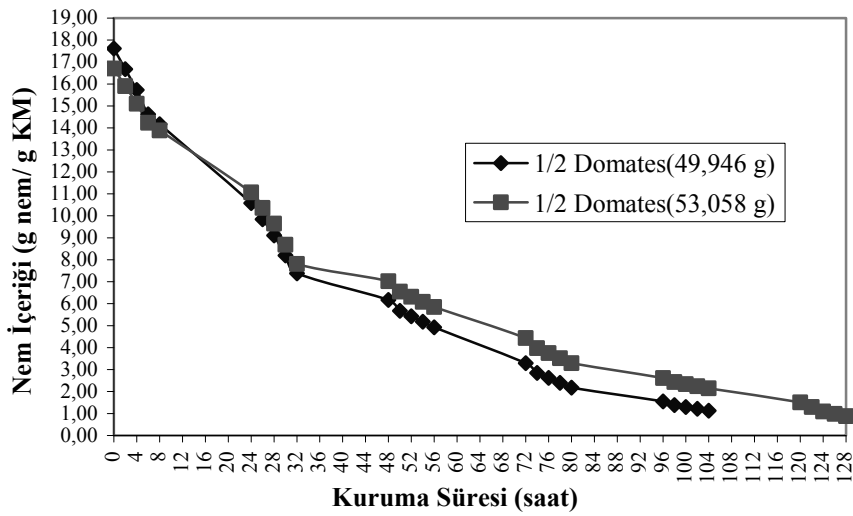
Şekil 5.16. Üç farklı sistemde kurutulan 1/2 ürünlerin nem içeriği-zaman grafiği.

Deneyler sonucunda her üç sistemde de ortak görülen nokta geometri farkının kuruma performansına etkisidir. Dörtte bir domateslerin kurutma süresi bakımından yarım dilimlenmiş domateslere göre yaklaşık %50 daha hızlı kurudukları görülmüştür (Şekil 5.17). Bununla birlikte aynı şekle sahip olmasına karşın kütleleri farklı olan domateslerin de kuruma hızlarının farklı olduğu, hafif olan domateslerin daha hızlı kuruduğu görülmektedir (Şekil 5.18).

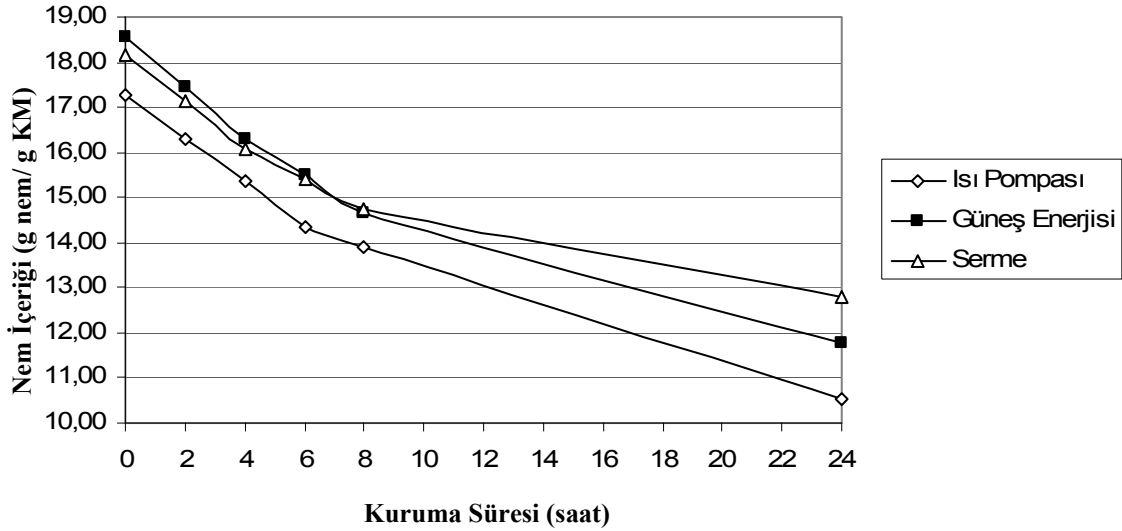
Yapılan deneylerde ayrıca ilk 24 saat içinde ürünlerin kuruma hızlarında belirgin farklılıklar görülmüştür. Isı pompalı sistemin kurutma süresine göre güneş enerjili sisteme oranla %40, doğal ortamda sermeye göre ise %60 daha performanslı olduğu görülmüştür (Şekil 5.19).



Şekil 5.17. Isı pompası sisteminde farklı geometride kurutulan ürünlerin nem içeriği-zaman grafiği.

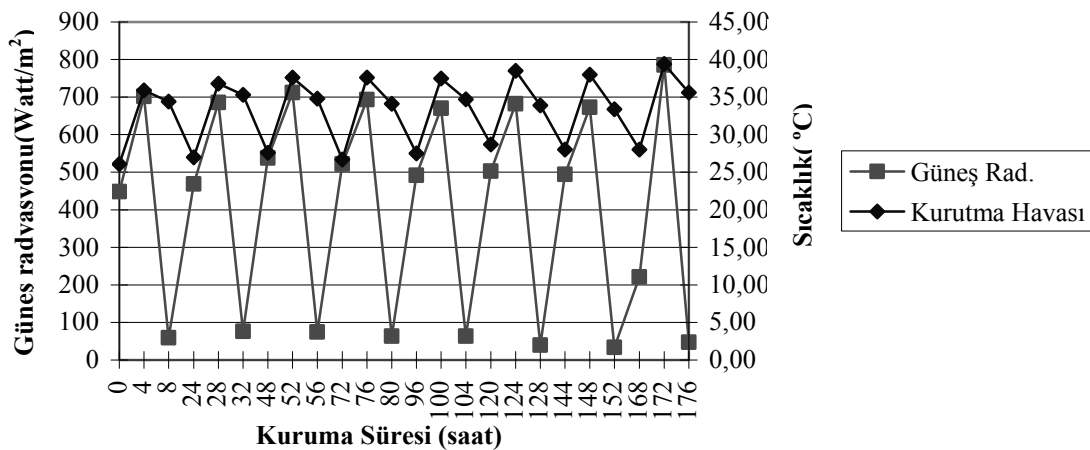


Şekil 5.18. Isı pompalı sistemde aynı geometride olup kütleleri farklı ürünlerin nem içeriği-zaman grafiği.

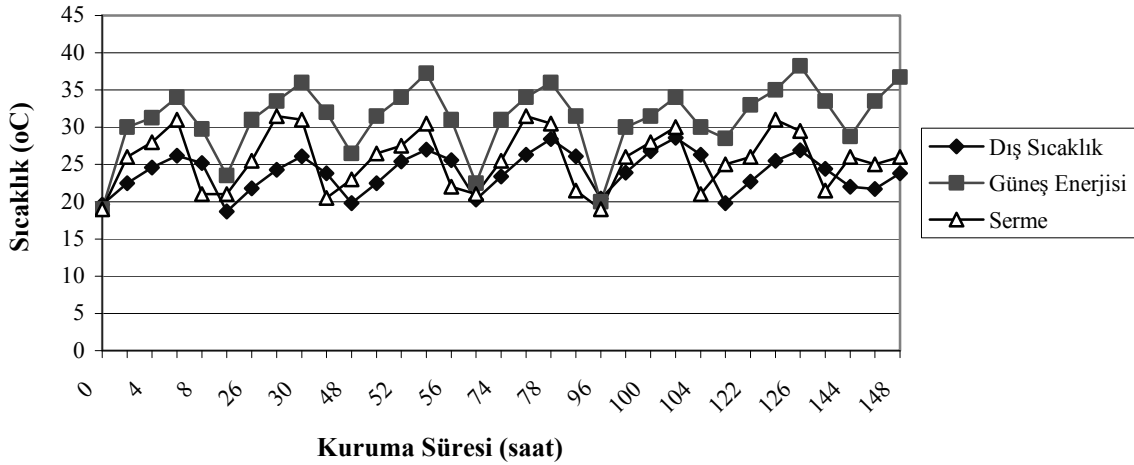


Şekil 5.19. Üç farklı sistemde kurutulan ürünlerin ilk 24 saatteki nem içeriği-zaman grafiği.

Yapılan çalışmada ayrıca güneş enerjili sistem ve doğal ortamda yere serilerek yapılan kurutmada güneş radyasyonu ve dış sıcaklığın etkileri de gözlemlenmiştir. Güneş enerjili sistemde kurutma havası sıcaklığının güneş radyasyonu değeri ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür (Şekil 5.20). Ayrıca ürün yüzey sıcaklığı bakımından güneş enerjili sistemde kabin içinde kurutulan ürünlerin yüzey sıcaklıklarının doğal ortamda serme yöntemiyle kurutulan ürünlerin yüzey sıcaklıklarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 5.21).

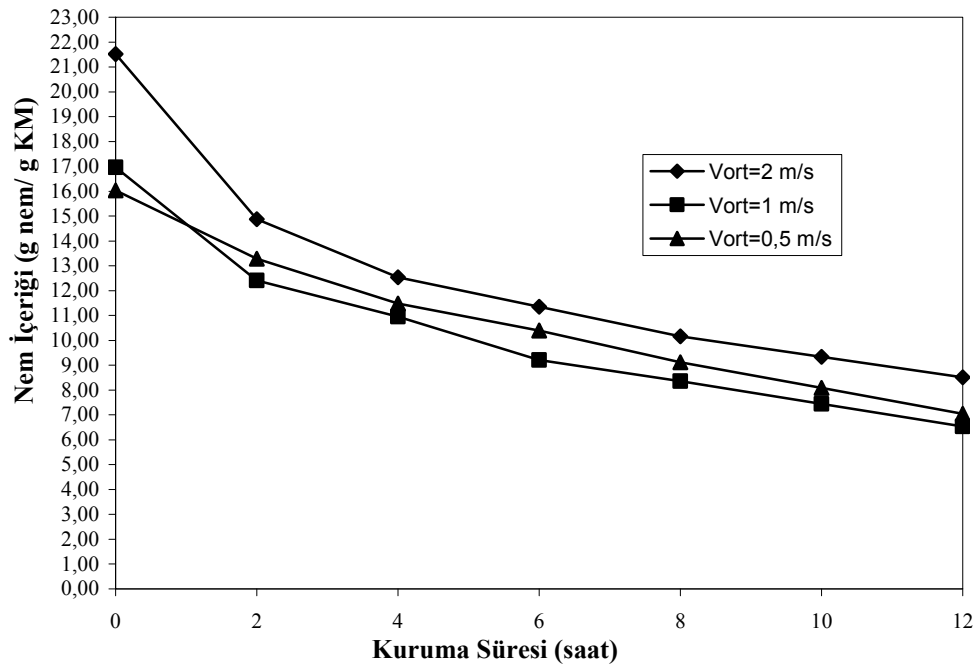


Şekil 5.20. Güneş radyasyonu ile kurutma havası sıcaklık değişim grafiği.



Şekil 5.21. Dış sıcaklığa bağlı olarak ürün yüzey sıcaklığı değişim grafiği.

Yapılan çalışmada ayrıca hava hızı etkisinin kurutma sürecine etkisini göstermek için 40 °C ortalama sıcaklıktaki kurutma havasında üç farklı hızda yapılan deneylerde hızın artmasıyla kurutma performansında artma meydana gelmiştir. Hızın 2 m/s olduğu durumda kuruma performansı 0,5 m/s'ye göre %15, 1 m/s'ye göre %5 daha iyi olmaktadır.



Şekil 5.22. Üç farklı hızda ortalama 40 °C sıcaklıktaki kurutma havası ile kurutulan ürünlerin ilk 12 saatteki nem içeriği-zaman grafiği.

6. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

6.1. Kurutma Parametrelerinin Hesaplanması

Yapılan örnek hesaplama 1/2 domatesin kurutma raflarına 25kg olarak dizilme esasına göre yapılmıştır. Domatesler ilk nemliliği %95 (yaş baza göre) ve son nemliliği %10 olacak şekilde kurutulmuşlardır.

Isı Pompalı kurutmada kabin ve buharlaştırıcı giriş-çıkış değerleri aşağıdaki gibidir;

$T_1=41$ °C ve %18 bağıl nem

$T_2=40,3$ °C ve %20 bağıl nem

$T_3=10,8$ °C ve %55 bağıl nem

Kurutulacak ürünün kurutma sonrası kütlelerinin hesaplanması (Tosun, 2009):

$$M_2 = [(100 - m_{b,1}) / (100 - m_{b,2})] \cdot M_1 \quad (6.1)$$

$$M_2 = [(100 - 95) / (100 - 10)] \cdot 25 = 1,388kg$$

Kurutma işlemi sırasında uzaklaştırılacak toplam nemin hesaplanması:

$$M_{su} = M_1 - M_2 \quad (6.2)$$

$$M_{su} = 25 - 1,388 = 23,612kg$$

Kurutma havası miktarının hesaplanması:

$$M_a = M_{su} / (w_2 - w_1) \quad (6.3)$$

(w değerleri Ek-1'den okunur)

$$M_a = 23,612 / (0,0092 - 0,0089) = 78706,66kg - kuruhava$$

Kurutmanın 128 saatte bitirildiği göz önüne alınarak hacimsel debinin hesaplanması:

$$\dot{m}_a = 78706,66 \text{ kg} / 128 \text{ h} = 614,9 \text{ kg kuruhava} / \text{ h}$$

$$\dot{v}_a = 0,885 (\text{m}^3 / \text{ kg kuruhava}) \cdot 614,9 (\text{ kg kuruhava} / \text{ h})$$

$$\dot{v}_a = 544,18 \text{ m}^3 / \text{ h}$$

Duyulur soğutma ve nem alma için gerekli enerjinin hesaplanması:

$$Q_b = M_a (h_1 - h_3) + M_{su} \cdot h_{su} \quad (6.4)$$

$$h_1 = 64 \text{ kJ} / \text{ kg kuruhava} \quad (\text{Ek-1})$$

$$h_3 = 22,5 \text{ kJ} / \text{ kg kuruhava} \quad (\text{Ek-1})$$

$$h_{su} = h_{f@10,8} = 45,36 \text{ kJ} / \text{ kg} \quad (\text{Ek-2})$$

$$Q_b = 78706,66(22,5 - 64) + (23,612 \cdot 45,36) = -3265255,35 \text{ kJ}$$

Kurutma işleminin 128 saatte tamamlandığı göz önünde bulundurularak, ısı pompasının buharlaştırıcı ısı yükü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{q}_b = 3265255 / (128 \cdot 3600) = 7,086 \text{ kW}$$

6.2. Özgül Nem Alma Hızı ve Nem Alma Hızının Hesaplanması

Özgül Nem Alma Hızı (SMER), bir ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma hızı ile belirlenir. Nem Alma Hızı (MER) ise kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütlesi olarak tanımlanır.

$$SMER = \left(\frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Enerji Girişi}} \right) \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{kWh}} \right] \quad (6.5)$$

$$MER = \left(\frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Kuruma Süresi}} \right) \left[\frac{\text{kg}_w}{\text{h}} \right] \quad (6.6)$$

Her üç sistem için toplam kuruma süreleri ve uzaklaştırılan su miktarları deneyler sonunda belirlenmiştir. Elektrik sayaçları kullanılarak sistemlerin elektrik sarfiyatları belirlenmiş, MER ve SMER değerleri de hesaplanarak Tablo 6.2.1'de gösterilmiştir. Doğal ortamda serme ile kurutmada herhangi bir elektrik sarfiyatı olmamıştır.

Tablo 6.2.1. Üç farklı sistem için hesaplanan MER ve SMER değerleri.

System Type	Kuruma Süresi (h)	Uzaklaştırılan Su Miktarı (kg)	Enerji Sarfıyatı (kWh)	MER (kg _w /h)	SMER (kg _w /kWh)	SMER _T * (kg _w /kWh)
Isı Pompası (1/4 Domates)	78	18,54	177,04	0,237	0,105	0,105
Isı Pompası (1/2 Domates)	128	22,95	294,38	0,179	0,078	0,078
Güneş Enerjisi (1/4 Domates)	104	18,33	11,65	0,176	1,573	0,180
Güneş Enerjisi (1/2 Domates)	148	22,27	16,57	0,150	1,343	0,154
Serme (1/4 Domates)	148	18,5	0	0,125	∞	0,144
Serme (1/2 Domates)	148	20,55	0	0,138	∞	0,160

SMER_T: Bu değer hesaplanırken kolektörlere düşen güneş enerjisinin toplam miktarı dikkate alınmıştır.

Tablo 6.2.1’de görüldüğü gibi en yüksek MER değeri 0,237 kg_w/h ile ısı pompalı sistemde dörtte bir ürün kurutmada, en düşük değeri ise 0,125 kg_w/h ile doğal ortamda serme yönteminde 1/4 ürün kurutmada elde edilmiştir. Dörtte bir ürünlerin MER değerleri ısı pompalı ve güneş enerjili sistemde aynı şartlarda kurutulan yarım ürünlere göre daha yüksektir. Doğal ortamda dörtte bir kurutmanın MER değerinin yarım ürünleri kurutmaya oranla daha düşük olmasının sebebi metrekareye daha az ürün yerleştiriliyor olmasıdır. SMER değerinin doğal ortamda serme yönteminde sonsuz çıkması herhangi bir elektrik sarfıyatı olmamasından kaynaklanmaktadır. Güneş enerjili serme yönteminde harcanan elektrik sıcak suyun sirkülasyonunda kullanılan pompa ve hava sirkülasyonu sağlayan fanın dolayısıdır. En iyi SMER değeri 1,573 kg_w/kWh ile güneş enerjili sistemde dörtte bir ürün kurutmada , en düşük SMER değeri ise 0,078 kg_w/kWh ile ısı pompalı sistemde yarım ürün kurutmada elde edilmiştir. Ayrıca dörtte bir dilimlenen ürünlerin SMER değerleri aynı şartlarda kurutulan yarım ürünlere göre daha yüksektir. SMER_T değerlerinden de görüldüğü gibi güneş kolektörlerine düşen toplam güneş enerjisi dikkate alındığında güneş enerjili sistemin SMER değerinde büyük bir azalma olduğu görülmektedir. Doğal serme ile kurutmada SMER_T ifadesinin güneş enerjili sistemden daha düşük olduğu görülmektedir.

6.3. Nem Alma Verimi (η) ve Isı Pompası Etkinlik Katsayısı (COP_{ws})

Konuyla ilgili bağıntılar Bölüm 4.2.3. ve Bölüm 4.2.4.'te verilmişti. Nem Alma Verimi, kurutma havası tarafından alınan nemin kurutma havasınca alınabilecek maksimum neme oranı olarak tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{(w_2 - w_1)}{w_a - w_1} \quad (6.7)$$

Burada;

w_2 = Kurutucu çıkışındaki özgül nem, (kg_w / kg_a)

w_1 = Kurutucu girişindeki özgül nem, (kg_w / kg_a)

w_a = Kurutucu çıkışındaki havanın doyma özgül nemi, (kg_w / kg_a)

Örnek hesaplamanın yapıldığı deneyde:

$$w_2 = 0,0092 (kg_w / kg_a) \text{ (Ek-1)}$$

$$w_1 = 0,0089 (kg_w / kg_a) \text{ (Ek-1)}$$

$$w_a = 0,0168 (kg_w / kg_a) \text{ (Ek-1)}$$

$\eta = 0,04$ olarak hesaplanır.

Tüm sistem için hesaplanan COP yoğuşturucuda alınan ısının sisteme verilen güce oranı olarak tanımlanır ve COP_{ws} şeklinde tanımlama yapılabilir.

$$COP_{ws} = \frac{(Yoğuşturucudan \cdot alınan \cdot ısı)}{(Sistem \cdot için \cdot verilen \cdot toplam \cdot güç)} = \frac{Q_H}{W_{sistem}} = \frac{\dot{q}_H}{\dot{w}_{sistem}} \quad (6.8)$$

$$\dot{q}_H = M_a (h_4 - h_3) \quad (6.9)$$

$$h_4 = 58kj / kgkuru hava \text{ (Ek-1)}$$

$$h_3 = 22,5kj / kgkuru hava \text{ (Ek-1)}$$

$$\dot{q}_H = 78706,66(58 - 22,5) = 2794086,43kj$$

Kurutma işleminin 128 saatte tamamlandığı göz önünde bulundurularak, ısı pompasının yoğuşturucu ısı yükü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{q}_H = 2794086,43 / (128 \cdot 3600) = 6,06 kW$$

Toplamda 128 saatlik süre içinde sisteme 294,38 kW enerji girişi sayaçlardan okunduğuna göre:

$$COP_{ws} = \frac{6,06}{294,38 / 128} = 2,63$$

olarak hesaplanır.

Aynı şekilde işlemler 1/4 domatesler için tekrarlandığında (Denklem 6.9);

$$\dot{q}_H = M_a (h_4 - h_3)$$

$$h_4 = 58 kJ / kg \text{ kuruhava} \quad (\text{Ek-1})$$

$$h_3 = 22,5 kJ / kg \text{ kuruhava} \quad (\text{Ek-1})$$

$$\dot{q}_H = 62040(58 - 22,5) = 2202420 kJ$$

Kurutma işleminin 78 saatte tamamlandığı göz önünde bulundurularak, ısı pompasının yoğuşturucu ısı yükü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{q}_H = 2202420 / (78 \cdot 3600) = 7,84 kW$$

Toplamda 78 saatlik süre içinde sisteme 177,04 kW enerji girişi sayaçlardan okunduğuna göre:

$$COP_{ws} = \frac{7,84}{177,04 / 78} = 3,45$$

olarak hesaplanır.

6.4. Gıda Kurutma İşleminde Isı Transferi İle Kütle Transferi Arasındaki İlişki

Kurutmanın farklı hava hızlarında yapılması durumunda gerçekleştirilen kurutma süresi ile enerji tüketim değerleri için veri oluşturulması maksadıyla, kurutma işlemlerindeki kütle transferi ile ısı transferi arasındaki benzeşimden yararlanılabilir. Çünkü, ısı transferinin oluşum koşulları yani hava hızına bağlı akış karakteristiği (laminer ya da türbülanslı akış) belirlendiğinde, ısı transferi yapılan yüzey üzerindeki havanın hidrodinamik sınır tabakadaki hız dağılımı ile kütle transferindeki hız dağılımı

birbirlerine benzerdir. Diğer taraftan taşınım ile ısı transferinde ısı geçişi, sıcaklık farklarına bağlı olarak gerçekleşirken, kütle transferi ise su buharı konsantrasyon farkına göre gerçekleşmektedir. O halde bu irdelemeye göre, ısı transferi karakteristik denklemini bilindiğinde, bu karakteristik denklemden yararlanarak kütle transferi denklemine geçilebilir ve kütle transferi miktarı hesaplanabilir (Güven Acar, 2009).

6.4.1. Kütle geçiş katsayısının tespiti

Islak bir üründen buharlaşan kütle miktarı (Güven Acar, 2009),

$$\dot{m}_b = \alpha_d \cdot A \cdot (\zeta_i - \zeta_\infty) = \alpha_d \cdot \rho \cdot A \cdot (w_i - w_\infty) \quad (6.10)$$

$$\zeta_i = \frac{P_{b,i}}{R_b T_f} \quad (6.11)$$

$$\zeta_\infty = \frac{P_{b,\infty}}{R_b T_f} \quad (6.12)$$

ile tanımlı olup, burada;

ζ_i : Kurutulan ürün üzerindeki doymuş havada film tabakasındaki su buharının derişikliği (kg/m^3)

ζ_∞ : Kurutma havasındaki su buharının derişikliği (kg/m^3)

w_i : Kurutulan ürün üzerindeki doymuş havanın özgül nemi (kgsu/kg hava)

w_∞ : Kurutma havasının özgül nemi (kgsu/kg hava)

$P_{b,i}$: Kurutulan ürün üzerindeki doymuş havada mevcut su buharının kısmi basıncı (kPa)

$P_{b,\infty}$: Kurutma havasındaki su buharının kısmi basıncı (kPa)

α_d : Kütle geçiş katsayısı (m/h)

R_b : Kurutma havasındaki subuharı sabiti ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

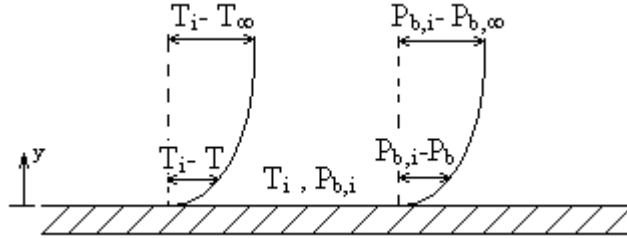
A : Kütle transferi yapılan ürünün yüzey alanı (m^2)

T_f : Film sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)

olmaktadır. Denklemler (6.11) ve (6.12)'daki ζ_i ve ζ_∞ değerleri denklem (6.10)'da yerine yazılırsa;

$$\frac{\dot{m}_b}{A} = \alpha_d \cdot \frac{P_{b,i} - P_{b,\infty}}{R_b T_f} \quad (6.13)$$

olur.



Şekil 6.1 Laminer akışta sınır tabaka içindeki sıcaklık ve su buharının kısmi basınçlarının değişimi (Güven Acar, 2009).

Şekil 6.1’de gösterilen sınır tabakada, kurutma havası ile kurutulacak yüzey arasındaki ısı, iletimle geçmektedir. Bunun için,

$$\frac{Q}{A} = -k \cdot \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} \quad (6.14)$$

olup, yüzeye iletimle olan ısı transferi yüzeyden taşınım ile olan ısı transferine eşittir şeklindeki sınır koşulundan, Newton’un soğuma kanununa göre;

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dy} \Big|_{y=0} = \alpha(T_i - T_\infty) \quad (6.15)$$

yazılır. Burada;

k: Isı iletim katsayısı (W/m⁰C)

α : Isı taşınım katsayısıdır (W/m²0C).

Isı transferine benzer ifade kütle geçişi için de yazılabilir. Kurutulacak maddenin yüzeyinden serbest akışa (kurutma havasına) geçen su buharı miktarı su-hava ara yüzeyinde yayılım ile gerçekleşmektedir. Ficks’ in difüzyon kanununa göre bunun değeri de, D, kütle difüzyon katsayısı (kg/m²h) olmak üzere,

$$\dot{m}_b = -D.A. \frac{d\zeta}{dy} \Big|_{y=0} \quad (6.16)$$

olup, bu ifade taşınımıyla kütle geçişi sınır koşulu altında yazılıp düzenlendiğinde, buharlaşan su miktarı için,

$$\dot{m}_b = \frac{\alpha_d A}{R_b T} (P_{b,i} - P_{b,\infty}) \quad (6.17)$$

ifadesi yazılabilir. Bu irdelemeyi akış karakteristikleri içerisinde inceleyebilmek için laminer sınır tabakada ısı ve kütle geçişine ilişkin incelemenin yapılması yerinde olacaktır.

6.4.2. Laminer sınır tabakada ısı ve kütle geçişi

6.4.2.1. Süreklilik denklemi

Sınır tabaka içinde hacimsel elemana giren ve çıkan kütleler için \vec{c} , mutlak hız olmak üzere,

$$\vec{c} = u\vec{x} + v\vec{y} + w\vec{z} \quad (6.18)$$

olarak ifade edildiğinde, kütle korunumu kanununa göre, iki boyutlu akış için, süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6.19)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

u: \vec{c} , mutlak hızın x eksenine yönündeki bileşeni

v: \vec{c} , mutlak hızın y eksenine yönündeki bileşeni

w: \vec{c} , mutlak hızın z eksenine yönündeki bileşenidir.

6.4.2.2. Momentum denklemi

Sınır tabakada ele alınan hacimsel elemanda momentum korunumu yazıldığında, iki boyutlu akış için,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (6.20)$$

yazılabilir. Burada;

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6.21)$$

ν : kinematik viskozite (m^2/s)

μ : dinamik viskozite ($kg/m.s$)

ρ : yoğunluk (kg/m^3)

dur.

6.4.2.3. Termik sınır tabaka

Ele alınan sınır tabaka içinde seçilen diferansiyel elemana giren ve çıkan enerjilerin dengesi yazıldığında, bu hacimsel elemanda ısı üretimi olmadığı da ele alınırsa ve ayrıca ikinci mertebeden diferansiyel ifadeler ihmal edilirse enerji denklemi;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (6.22)$$

olur. Denklemdaki a değeri, birimi m^2/s olarak termal yayılım katsayısıdır ve

$$a = \frac{k}{\rho c} \quad (6.23)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada,

k : ısı iletim katsayısı ($W/m^{\circ}C$)

c : özgül ısı ($kJ/kg^{\circ}C$)

dır.

6.4.2.4. Mutlak nem (derişiklik, yoğunluk) sınır tabakası

Sınır tabaka içinde ele alınan diferansiyel bir hacim elemanına giren ve çıkan kütlelerin mutlak nem (yoğunluk) farkına göre olan ifadesi yazılır, bunun hız ve

difüzyonla ilişkili olduğu dikkate alınır, mutlak nem (derişiklik, yoğunluk) sınır tabakası için de,

$$u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = D \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \quad (6.24)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada D, kütle difüzyon katsayısıdır (kg/m²h). Burada sıcaklık sabit alındığında, mutlak nem ζ (yoğunluk) de,

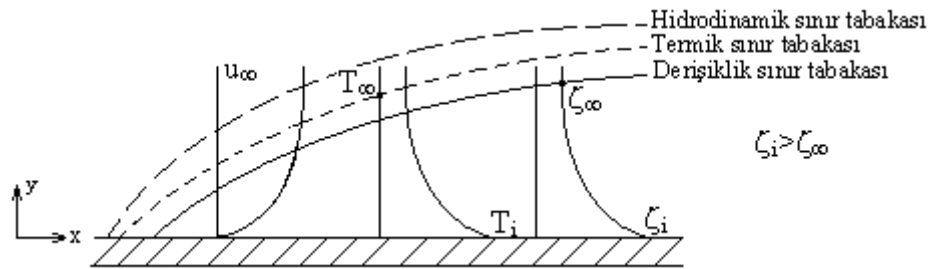
$$\zeta = \frac{m_b}{V} = \frac{P_b}{R_b T_f} \quad (6.25)$$

eşitliği ile yazılabilir ve bunun denklem (6.25)'deki değeri, (6.24) denkleminde mutlak nem yerine kısmi basınçlar yazılabilir. Yani,

$$u \frac{\partial P_b}{\partial x} + v \frac{\partial P_b}{\partial y} = D \frac{\partial^2 P_b}{\partial y^2} \quad (6.26)$$

olur.

Yukarıda incelenen hidrodinamik, termik ve mutlak nem sınır tabakaları aşağıda şematik olarak Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Kurutma havası ile kurutulacak yüzey arasındaki sınır tabakaları (Güven Acar, 2009).

Sınır tabakaları için elde edilen denklemler (Denklem (6.20), Denklem (6.22) ve Denklem (6.24)) bir arada düşünülürse,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{(a)}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \text{(b)}$$

$$u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = D \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \quad \text{(c)}$$

ve bu durumda sınır şartları ise,

$$y = 0 \text{ da; } u = 0, T = T_i, \zeta = \zeta_i$$

$$y = \infty \text{ da; } u = u_\infty, T = T_\infty, \zeta = \zeta_\infty$$

olur. Bu üç denklemdeki büyüklükler boyutsuz hale getirilir ve (*) ile gösterilirse;

$$u^* = \frac{u}{u_\infty} \quad (6.27)$$

$$y^* = \frac{y}{L} \quad (6.28)$$

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (6.29)$$

olur. Burada L, karakteristik uzunluktur. Boyutsuz ifadeler diferansiyel denklemlerde yerine konursa,

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Re}_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.30)$$

$$u^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Re}_L \cdot \text{Pr}} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.31)$$

$$u^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial y^*} = \frac{1}{\text{Re}_L \cdot \text{Sc}} \frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial y^{*2}} \quad (6.32)$$

olur. Burada,

$$\theta^* = \frac{T - T_i}{T_\infty - T_i} \text{ ve } \zeta^* = \frac{\zeta - \zeta_i}{\zeta_\infty - \zeta_i}$$

olmaktadır. Bu durumda sınır şartları yeniden düzenlenirse,

$$y = 0 \text{ da; } u^* = 0, \theta^* = 0, \zeta^* = 0$$

$$y = \infty \text{ da; } u^* = u_\infty, \theta^* = 1, \zeta^* = 1 \text{ olur.}$$

Burada Re; Reynold sayısı, Pr; Prandtl sayısı ve Sc; Schmidt sayısını ifade etmekte olup, bu değerler,

$$Re_L = \frac{u.L}{\nu} \quad (6.33)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (6.34)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (6.35)$$

eşitlikleri ile tanımlıdır.

Belirtilen sınır şartları altında bu diferansiyel denklemlerin çözümü Blasius tarafından yapılmıştır. Denklemlere bakıldığında,

$$u^* = f(Re_L), \theta^* = f(Re_L \times Pr), \zeta^* = f(Re_L \times Sc)$$

$$q = -k \frac{dT}{dy} = \alpha(T_i - T_\infty) \text{ idi. Buradan,}$$

$$\alpha = -k \frac{\partial T / \partial y}{(T_i - T_\infty)} \quad (6.36)$$

bulunur.

$$\theta^* = \frac{(T - T_i)}{(T_\infty - T_i)} \text{ ve } y^* = \frac{y}{L} \text{ olduğundan,}$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = \frac{L}{T_\infty - T} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_i = - \frac{L}{T - T_\infty} \Big|_i = - \frac{L}{T - T_\infty} \frac{\alpha(T - T_\infty)}{-k} \quad (6.37)$$

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = \frac{\alpha L}{k} = Nu \quad (6.38)$$

Burada Nu, Nusselt sayısıdır. Benzer işlem konsantrasyon için yapılırsa,

$$\frac{\partial \zeta^*}{\partial y^*} = \frac{\alpha_d L}{D} = Sh \quad (6.39)$$

olur. Sh, boyutsuz Sherwood sayısıdır. Bunlar özetlenirse,

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = Nu = f(Re, Pr)$$

$$\frac{\partial \zeta^*}{\partial y^*} = Sh = f(Re, Sc)$$

olup, bu iki fonksiyonun yani ısı taşınımı ile kütle taşınımı bağıntılarının da aynı karakterde olduğu görülmektedir. Bu irdelemeye göre,

1. Eğer olaya ait ısı geçiş denklemi biliniyorsa bu denklemden hareket edilerek, kütle geçişine ait denklem bulunabilir. Bu denklemde, Nu yerine Sh ve Pr yerine Sc sayısı yazılır.

$Sh = \frac{\alpha_d \cdot L}{D}$ idi. Buradan α_d bulunur.

2. $m_b = \alpha_d A (\zeta_i - \zeta_\infty)$ denkleminde ise buharlaşan miktar bulunur.

Burada temel amaç, yapılan deneysel sonuçlardan yararlanarak ele alınmayan ancak, pratikte kullanılabilecek farklı hava hızlarında, buharlaştırılacak su buharı kütlesini belirleyebilmektir. Bu maksatla deneysel verilerden yola çıkılarak literatürde verilen ilgili denklemin, deneysel verilere uygunluğu incelenmiştir. Bu korelasyonun ortaya konmasından sonra, deneylerin yapılamadığı farklı hızlardaki buharlaşma miktarlarının ne olabileceğinin belirlenmesi mümkün olabilecektir.

6.5. Isı Transferi İle Kütle Transferi Arasındaki Deneysel İlişki

Isı transferi ile kütle transferi arasındaki ilişkinin ortaya konmasındaki temel amaç, yapılan deneysel sonuçlardan yararlanarak ele alınmayan ancak, pratikte kullanılabilecek farklı hava hızlarında, buharlaştırılabilecek su buharı kütlesini belirleyebilmektir. Bu maksatla deneysel verilerden yola çıkılarak kütle transferine ilişkin literatürde verilen ilgili denklemin (6.40) deneysel bulgularımıza uygunluğu burada incelenmiştir (Güven Acar,2009).

$$Sh = \frac{\alpha_d \times d_h}{D_f} = 0,87 \times Re^{0,54} \times Sc^{0,33} \times Gu^{0,135} \quad (6.40)$$

Denkleminde, Reynold sayısı (Re), Schmidt sayısı (Sc) ve Gukman sayısı (Gu) olup aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir.

$$Re = \frac{u_\infty \times d_h}{\nu_f} \quad (6.41)$$

$$Sc = \frac{\nu_f}{D_f} \quad (6.42)$$

$$Gu = \frac{T_\infty - T_y}{T_\infty} \quad (6.43)$$

Burada,

u_∞ : Kurutma havasının ortalama hız değeri (m/s)

D_f : Havanın film sıcaklığındaki difüzyon katsayısı (m^2/h)

d_h : Kurutulan ürün için hidrolik çap (m)

ν_f : Havanın film sıcaklığındaki kinematik viskozitesi (m^2/s)

T_∞ : Kurutma havasının ortalama sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_y : Kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı ($^{\circ}C$)

olmaktadır.

Domatesin kurutulması, 0,5 m/s, 1 m/s, ve 2 m/s olmak üzere üç farklı hava hızı için yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre literatürde verilen,

$$Sh = 0,87 \times Re^{0,54} \times Sc^{0,33} \times Gu^{0,135}$$

bağıntısının deney koşullarındaki kurutma bulgularına uygunluğunu araştırmak için, örnek olarak 0,5 m/s hava hızındaki deneysel verileri ele alalım.

Bu maksatla 0,5 m/s ortalama hızda kütle transferi verileri için gerekli, Re, Sh, Sc ve Gu boyutsuz sayıları hesaplanmalıdır.

Çalışmada kurutma anında, domatesin yüzey sıcaklığı, $T_y=33,2$ °C olarak ölçülmüştür. Deney koşullarında bu sıcaklıkta havadaki subuharının doyma basıncı, $P_d=5,13$ kPa olarak Ek-2' den alınmıştır.

Domates-hava temas yüzeyindeki hava doymuş hava olarak alınabilir, bu durumda havanın bağıl nemi $\varphi_i \approx 1$ (%100) olur. Bağıl nem denklem aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\varphi = \frac{P_b}{P_d} \quad (6.44)$$

Denklemden,

P_b : Havadaki su buharının kısmi basıncı (kPa)

P_d : Havadaki su buharının doyma basıncını (kPa)

ifade etmektedir.

$$P_{atm} = P_b + P_h \quad (6.45)$$

Burada,

P_h , hava basıncıdır (kPa).

Atmosfer basıncı ise $P_{atm} = 100$ kPa olarak alınmıştır.

(6.44) ve (6.45) numaralı denklemlerden P_b ve P_h hesaplanarak denklem (6.46)'de yerine yazılırsa, ürün-hava yüzeyindeki subuharının özgül nem değeri (w_y),

$$w = 0,622 \times \frac{P_b}{P_h} \quad (6.46)$$

den

$w_y = 0,0336$ kg su/kg hava değeri bulunur.

Kurutma deneyi sırasında, kurutma havasının sıcaklığı (T_{∞}) ve bağıl nem değerleri (ϕ_{∞}) ölçülmüş ve sırasıyla, 39,6 °C ve %23 değerleri bulunmuştur. Denklem (6.46)'dan kurutma havasının özgül nemi de, $w_{\infty} = 0,0105$ kg su/kg hava olarak bulunur.

Kurutma havasının yoğunluğu ise,

$$\rho = \frac{3,484 \times P_{atm} - 1,318 \times \phi \times P_d}{T_{\infty}} \quad (6.47)$$

denklemini ile bulunur (Güven Acar, 2009). Burada, ϕ , havanın bağıl nemini ifade etmektedir. Denklem (6.47)'den havanın yoğunluk değeri,

$$\rho = 1,107 \text{ kg/m}^3 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Diğer taraftan deneylerde kurutulan yarım domatesin ortalama çapı 5 cm olduğundan, yüzey alanı $A = 0,002 \text{ m}^2$ olarak bulunmuştur. Buna göre, kurutma işlemi süresince kurutulan üründen buharlaşan su miktarı,

$$\dot{m}_b = \alpha_d \cdot \rho \cdot A \cdot (w_i - w_{\infty}) \quad (6.48)$$

denklemini ile hesaplanır. 0,5 m/s hava hızında yapılan deneyde yarım domates başına olan toplam buharlaşan kütle için toplam buharlaşma miktarının kurutma süresine bölünerek, domatesten bir saatte buharlaşan kütle miktarı bulunur. Kurumanın etkin olduğu kurutma süresine göre yarım domatesten saatte buharlaşan su miktarı;

$$\dot{m}_b = \frac{0,0114}{12} = 0,0011 \text{ kg/h}$$

olarak tespit edilmiştir.

Buharlaşan kütleyi denklem 9.45'de yerine yazarsak, kütle geçiş katsayısı,

$$0,0011 = \alpha_d \times 1,107 \times 0,002 \times (0,0336 - 0,0105)$$

eşitliğinden,

$$(\alpha_d)_{deneysel} = 21,5 \text{ m/h olarak bulunur.}$$

Kurutma havasının kurutma kabinindeki ortalama hızı Bölüm 5'te açıklandığı gibi belirlenmiştir. Bu yöntemle belirlenen hız değeri $u_{\infty} = 0,5$ m/s olarak bulunmuştur. Kütle transferi bağıntısında (Denklem (6.13)) kullanılan film sıcaklığı ise,

$$T_f = \frac{T_{\infty} + T_y}{2} \quad (6.49)$$

olup, buradan $T_f = 36,4$ °C olarak bulunmuştur. Ek-3' den bu film sıcaklığındaki havanın kinematik viskozitesi; $\nu_f = 16,83 \times 10^{-6}$ m²/s olarak alınmıştır.

Havadaki su buharı için difüzyon katsayısı ise;

$$D = 0,216 \times (T/273)^{1,8} \quad (6.50)$$

olarak verildiğinden bu eşitlikten,

$$D_f = 0,270 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,0972 \text{ m}^2/\text{h} \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Böylece, deneysel veriler için Sherwood sayısı denklem (6.40)'dan,

$$Sh = \frac{\alpha_d \times d_h}{D_f} \text{ eşitliği ile hesaplanır. Domates için ortalama çap } 5 \text{ cm olduğundan}$$

değerler yerine yazılırsa,

$$(Sh)_{\text{deneysel}} = \frac{21,5 \times 0,05}{0,0972} = 11,05 \text{ olarak bulunur.}$$

Bu deneysel bulgunun, literatürde verilen bağıntıyla (denklem (6.40)) uyumunu görebilmek için, ilgili bağıntıdaki Re, Sc ve Gu sayılarının da deneysel çalışma koşullarındaki değerleri hesaplanmalıdır.

Reynold sayısı (6.41) numaralı eşitlikten,

$$Re = \frac{u_{\infty} \times d_h}{\nu_f} \text{ olduğundan, burada bilinenler yerine konduğunda,}$$

$$Re = \frac{0,5 \times 0,05}{16,83 \times 10^{-6}} = 1485,44 \text{ olarak bulunur.}$$

Schmidt sayısı ise denklem (6.42)'den,

$$Sc = \frac{v_f}{D_f} \text{ ile tanımlı olduğundan deney koşullarındaki değeri,}$$

$Sc = 0,62333$ olarak bulunur.

Gukman sayısı ise (6.43) numaralı denklemden,

$$Gu = \frac{T_\infty - T_y}{T_\infty} \text{ olduğundan, deney koşulları için değeri,}$$

$Gu = 0,0204$ olarak bulunur.

Bulunan değerler ilgili bağıntıda yerine konduğunda, literatürde (deney koşullarında), kullanılması önerilen teorik denklemle elde edilebilecek Sherwood sayısı da bulunur. Denklem (6.40)'dan;

$$Sh = 0,87 \times Re^{0,54} \times Sc^{0,33} \times Gu^{0,135}$$

$$Sh = 0,87 \times 1485,44^{0,54} \times 0,62333^{0,33} \times 0,0204^{0,135}$$

$Sh = 22,692$ olarak bulunmuştur.

Sh sayısı değerleri 0,5 m/s hava hızı için yapılabenzer şekilde deneylerdeki diğer hava hızları için de yapılmış, ayrıca dörtte bir domatesler için de hesaplanmıştır. Deney koşullarında deneysel olarak elde edilen bulgular Tablo 6.5.1'de ve deney koşullarında teorik olarak önerilen bağıntıyla elde edilen bulgular ise Tablo 6.5.2'de verilmiştir. Çalışmada ısı transferi ile kütle transferi arasındaki deneysel ilişki incelenmiş, hava hızının artmasıyla hem teorik hem de deneysel olarak bulunan Sherwood boyutsuz sayısının arttığı görülmüştür. Bu sonuca göre deneysel bulgulara ait Sh korelasyonunun teorik (9.37) korelasyona göre sadece Re boyutsuz üs katsayısının teorik denklemde 1/2 domatesler için 0,54 yerine 0,41 ve 1/4 domatesler için 0,54 yerine 0,36 olması gerektiği tespit edilmiştir. Yeni denkleme göre hesaplanan teorik Sherwood değerleri Tablo 6.5.3'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te iki farklı geometrideki ürünler için, deneysel verilerden, literatürdeki denklem ve düzeltilmiş denklem olmak üzere üç farklı yöntem ile elde edilen Sherwood değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.5.1 Farklı hava hızları için deneysel verilerden elde edilen değerler.

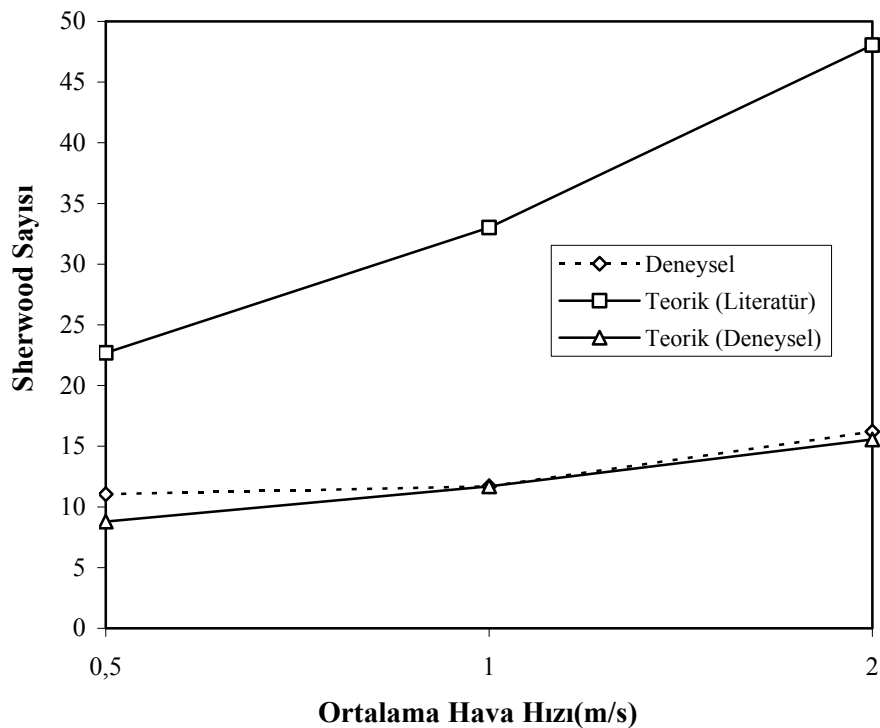
1/2 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_y (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı $Sh_{deneyse}$ bulgular
0,5	39,6	33,2	36,4	1485,44	0,62333	0,0204	11,05
1	39,9	33,4	36,6	2967,35	0,62215	0,0207	11,7
2	39,3	32,8	36	5955,9	0,62185	0,0208	16,2
1/4 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_y (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı $Sh_{deneyse}$ bulgular
0,5	39,6	33,2	36,4	1782,53	0,62333	0,0204	8,14
1	39,9	33,4	36,6	3560,8	0,62215	0,0207	8,30
2	39,3	32,8	36	7147,11	0,62185	0,0208	9,32

Tablo 6.5.2 Farklı hava hızları için literatürde verilen korelasyona göre (Denklem (6.40) (deney koşullarında) hesaplanan teorik Sherwood değerleri.

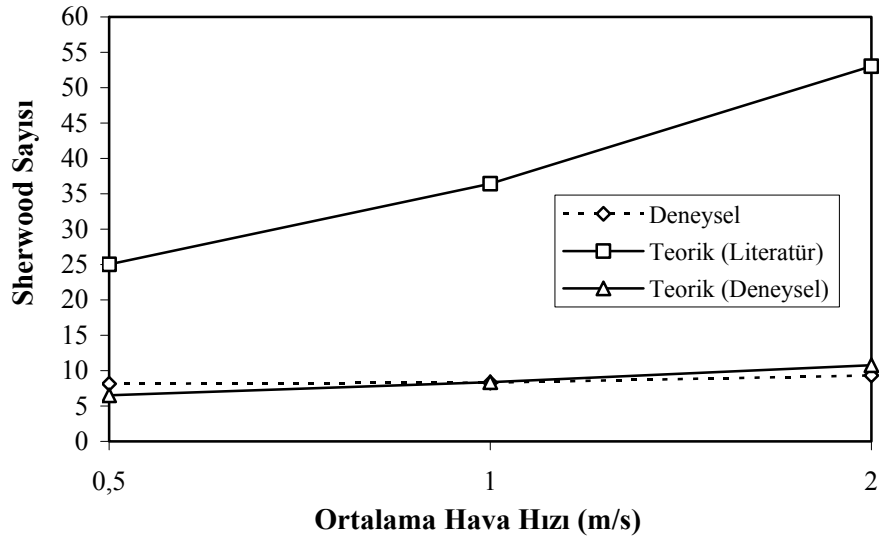
1/2 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_s (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı Sh_{teorik}
0,5	39,6	33,2	36,4	1485,44	0,62333	0,0204	22,69
1	39,9	33,4	36,6	2967,35	0,62215	0,0207	33,02
2	39,3	32,8	36	5955,9	0,62185	0,0208	48,05
1/4 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_s (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı Sh_{teorik}
0,5	39,6	33,2	36,4	1782,53	0,62333	0,0204	25,03
1	39,9	33,4	36,6	3560,8	0,62215	0,0207	36,43
2	39,3	32,8	36	7147,11	0,62185	0,0208	53,03

Tablo 6.5.3 Farklı hava hızları için düzeltilmiş korelasyona göre (deney koşullarında) hesaplanan teorik Sherwood değerleri.

1/2 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_s (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı Sh_{teorik}
0,5	39,6	33,2	36,4	1485,44	0,62333	0,0204	8,79
1	39,9	33,4	36,6	2967,35	0,62215	0,0207	11,69
2	39,3	32,8	36	5955,9	0,62185	0,0208	15,56
1/4 Domates İçin							
Hava hızı v (m/s)	Kurutma havası sıcaklığı T_{∞} (°C)	Ürün yüzey sıcaklığı T_s (°C)	Film sıcaklığı T_f (°C)	Reynold sayısı Re	Schmidt Sayısı Sc	Gukman sayısı Gu	Sherwood sayısı Sh_{teorik}
0,5	39,6	33,2	36,4	1782,53	0,62333	0,0204	6,51
1	39,9	33,4	36,6	3560,8	0,62215	0,0207	8,36
2	39,3	32,8	36	7147,11	0,62185	0,0208	10,76



Şekil 6.3. 1/2 ürünler için farklı kurutma havası hızlarında elde edilen Sherwood (Sh) değerleri.



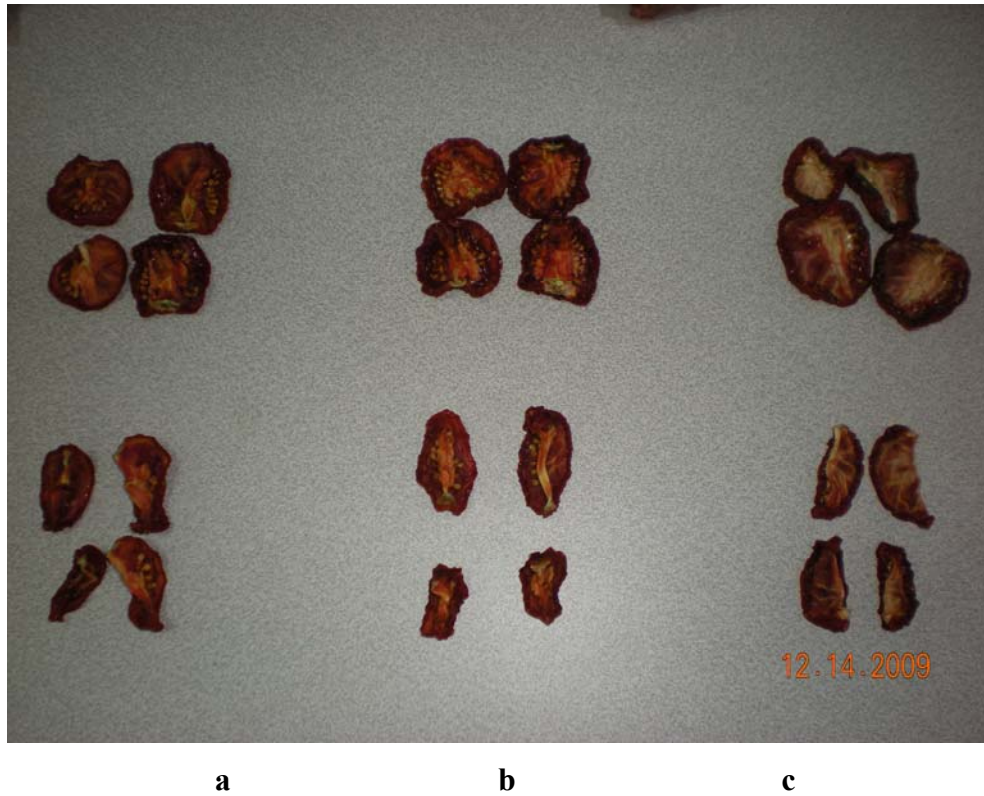
Şekil 6.4. 1/4 ürünler için farklı kurutma havası hızlarında elde edilen Sherwood (Sh) değerleri.

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışmada nem almalı ısı pompalı sistem hem kesintisiz sıcak kurutma havası sağlamakta hem de kurutma kabininden sonra buharlaştırıcıda nemli havayı soğutarak içindeki suyu dışarı atmaktadır. Böylece kurutma havası nemi azalmış olarak tekrar yoğuşturucuya girerek kompresör işi ile ısınmakta ve kurutma kabinine dönmektedir.

Isı pompalı sistemlerin güneş enerjili sisteme ve doğal yöntemlerle kurutmaya göre ilk maliyetleri yüksektir. Aynı zamanda elektrik sarfiyatları da her iki sisteme göre yüksektir. Fakat hem ürünün hızlı kuruması hem de dış faktörlerden (yağmur, toz, böcek vs.) etkilenmemesi büyük bir avantajdır. Doğal ortamda kurutulan ürünlerin deney sırasında uçan hayvanların etkisi altında görüldüğü hatta gece periyodunda soğumasıyla ürün üzerinde küçük kurt ve sinek larvalarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Kurutulan ürünler deneyler sonunda örnekler alınarak havası alınmış paketlerde buzdolabında saklanmıştır. Isı pompalı sistem ve güneş enerjisi sistemi ile kurutulan ürünlerin fiziksel görünümünün doğal ortamda kurutulan ürünlere göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Buzdolabında bekletildikten sonra incelenen ürünlerden doğal ortamda kurutulan ürünlerin daha nemli olmasından dolayı bozulmaya başladığı görülmüştür (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Üç farklı sistemde kurutulan ürünlerin fiziksel görünüşleri (a: ısı pompası, b: güneş enerjisi, c: serme).

Kurutma zamanı bakımından ısı pompalı sistem, doğal kurutmaya göre %50, güneş enerjisi destekli sisteme göre %30 daha iyidir. Çalışmada aynı sıcaklıktaki kurutma havası ile yapılan kurutmada hava hızının artmasıyla kurutma performansının arttığı görülmüştür. En yüksek Nem Alma Oranı (MER) 0,237 kg_w/h ile dörtte bir domateslerin ısı pompalı sistemde kurutulmasında, en düşük 0,125 kg_w/h ile dörtte bir domateslerin doğal olarak kurutulmasında elde edilmiştir. En yüksek Özgül Nem Alma Oranı (SMER) 1,573 kg_w/kWh ile dörtte bir domateslerin güneş enerjisi destekli sistemde kurutulmasında, en düşük 0,078 kg_w/kWh ile yarım domateslerin ısı pompalı sistemde kurutulmasında elde edilmiştir. Genel olarak SMER değeri aynı şartlar altında kurutulan dörtte bir domateslerde yarım domateslere göre daha yüksek olmaktadır. Bölüm 2’de incelenen literatürlerde MER değerlerinin 0,5-3 kg/h aralığında, SMER değerlerinin de 0,1-3,5 kg/kWh aralığında olduğu görülmüştür. Bu geniş aralıkta olmasının sebebi ürün farklılıkları, kurutma süreleri, kurutma şartları ve yükleme kapasiteleri bu değerleri etkilemektedir. Çalışmada mevcut ısı pompası sisteminin güç kapasitesinin fazla olması dolayısıyla elektrik sarfiyatının yüksek olması ve ürün yükleme kapasitesinin kısıtlı olmasından dolayı deneyler sonucu elde edilen MER ve

SMER değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. İlerideki çalışmalarda sistem üzerinde yapılacak ürün kapasitesi arttırımının, elde edilen MER ve SMER değerlerini arttıracadı düşünülmektedir. Yükleme kapasitesinin iyileştirildiği durumda SMER değerinin en yüksek ısı pompalı sistemde, sonra güneş enerjili sistemde ve en düşük de doğal yere serme ile kurutmada olması beklenmektedir.

Çalışmada ayrıca ısı transferi ile kütle transferi arasındaki deneysel ilişki incelenmiş, hava hızının artmasıyla hem teorik hem de deneysel olarak bulunan Sherwood boyutsuz sayısının arttığı görülmüştür. Isı pompalı sistem diğer kurutma yöntemlerine göre hızlı kurutma, çevresel etkilerden en az etkilenme (yağmur, toz, böcek) ve çevresel şartlara en az bağlı olması gibi yüksek avantajlara sahiptir.

Deneylerdeki nem alma veriminin düşük olması yüklenen ürün miktarının az olması ile açıklanabilir. Sistem daha önceden kurulu olduğundan bu çalışma için herhangi bir müdahale yapılamamıştır. İleride yapılacak çalışmalarda yükleme kapasitesinin arttırılmasıyla sistemin nem alma veriminin artması beklenilmektedir. Ayrıca kurutma kabini çıkışında buharlaştırıcıda kurutma havasının soğutulması ile elde edilen yoğuşan suyun miktarının sağlıklı olarak ölçülememiş olması, hem kayıp kaçaklardan dolayı hem de yoğuşan suyun buharlaştırıcı üzerinden kontrolsüz olarak akmasından kaynaklanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abdallah, S., Nijmeh, S., (2004) Two axes sun tracking system with PLC control, *Energy Conversion and Management*, Cilt 45, Sy 1931-1939.
- Abu-Khader, M. M., Badran, O. O., Abdallah, S., (2008) Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 12, Sy 864-873.
- Adapa, P.K., Schoenau, G.J., Sokhansani, 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*, Cilt 26, Sy 1001-1019.
- Aghbashio, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A., (2009) Performance Analysis Of Drying Of Carrot Slices In A Semi-Industrial Continuous Band Dryer, *Journal Of Food Engineering*, Cilt 91, Sy 99-108.
- Aktaş, M., Ceylan, İ., Yılmaz, S., (2009) Determination Of Drying Characteristics Of Apples In A Heat Pump And Solar Dryer, *Desalination*, Cilt 239, Sy 266-275.
- Bansal, N.K., (1999) Solar Air Heater Applications In India, *Renewable Energy*, Cilt 16, Sy 618-623.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., (2008) Modeling of a hazelnut dryer assisted heat pump by using artificial neural Networks, *Applied Energy*, Cilt 85, Sy 841-854.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., (2007) Isı Pompalı Bir Kurutucuda Kerestelerin Kurutma Süresinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 22, No 4, Sy 847-854.
- Chen, H., Hernandez, C.E., Huang, T., (2005) A Study of The Drying Effect On Lemon Slices Using A Closed-type Solar Dryer, *Solar Energy*, Cilt 78, Sy 97-103.
- Chua, K.J., Chou, S.K., (2005) A Modular Approach to Study The Performance of a Two-stage Heat Pump System For Drying, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 25, Sy 1363-1379.
- Chua, K. J., Chou, S. K., Ho, J. C., Hawlader, M. N. A., (2002) Heat Pump Drying: Recent Developments And Future Trends, *Drying Technology*, Cilt 20, Sy 1579-1610.
- Coşkun, S., (2002) Basit Nem Alıcı Isı Pompalı Sürekli Kurutma Sisteminin Simülasyonu, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt 4, Sayı 2, Sy 79-96.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. (1996) Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 867 s.

- Erbil, T., (2002) Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı Hibrit Isı Pompası Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, **Yüksek Lisans Tezi**, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Fatouh, M., Metwally, M. N., Helali, A. B., Shedid, M. H., (2006) Herbs drying using a heat pump dryer, **Energy Conversion and Management**, Cilt 47, Sy 2629-2643.
- Güngör, A., Özbalta, N., (1997) Endüstriyel Kurutma Sistemleri, **III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir.
- Güngör, A., Özbalta, N., (2009) Kurutmanın Temelleri ve Endüstriyel Kurutucular Kurs Notları , **IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir.
- Güven Acar, Ş., (2009) Denizli Havzasındaki Jeolojik Formasyonlarda Sıcaklık ve Isı Depolama Kapasitesi Değişiminin İncelenmesi ve Isı Pompası Uygulamalarının Araştırılması, **Doktora Tezi**, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Hawlader, M. N.A., Rahman, S. M. A., Jahangeer, K. A., (2008) Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer, **Energy Conversion and Management**, Cilt 49, Sy 1612-1619.
- Hawlader, M. N.A., Jahangeer, K. A., (2006) Solar heat pump drying and water heating in the tropics, **Solar Energy**, Cilt 80, Sy 492-499.
- Hollick, J.C., (1999) Commercial Scale Solar Drying, **Renewable Energy**, Cilt 16, Sy 714-719.
- Kılıç, H., (2006) Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompasının Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneyleri, **Yüksek Lisans Tezi**, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Kohayakawa, M.N., Silveira-Junior, V., Telis-Romero, J., (2004) Drying of Mango Slices Using Heat Pump Dryer, **14th International Drying Symposium**, Sy 884-892, Sao paulo, Brasil.
- Incropera, F. P., De Witt, D. P., (2001) Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, (Derbentli, T., Genceli, O., Güngör, A., Hepbaşı, A., İlken, Z., Özbalta, N., Özgüç, F., Parmaksızoğlu, C. Ve Uralcan, Y.), **Literatür Yayıncılık**, İstanbul, 960 s.
- Lee, K. H., Kim, O. J., (2009) Investigation On Drying Performance And Energy Savings Of The Batch-Type Heat Pump Dryer, **Drying Technology**, Cilt 27, Sy 565-573.
- Madhlopa, A., Jones, S.A., Saka, J.D.K., (2002) A Solar Air Heater With Composite-Absorber Systems for Food Dehydration, **Renewable Energy**, Cilt 27, Sy 27-37.
- Marfil, P. H. M., Santos, E. M., Telis, V. R. N., (2008) Ascorbic Acid Degradation Kinetics In Tomatoes At Different Drying Conditions, **LWT-Food Science And Technology**, Cilt 41, Sy 1642-1647.

- Mirza, M., (2006) Isı Pompalı Kurutucun Isıl Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Nijmeh, M.N., Ragab, A.S., Emeish, M.S., Jubran, B.A., (1998) Design and Testing of Solar Dryers for Processing Food Wastes, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 18, Sy 1337-1346.
- Okday, Z., (2003) Testing of a Heat-pump-assisted Mechanical Opener Dryer, *Applied Thermal Engineering*, Cilt 23, Sy 153-162.
- Okday, Z., (1999) Isı Pompası Destekli Mekanik Açılı Bir Kurutucu İle Yün Kurutmasının Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Özek, N., Üçgül, İ., Fişek, S., (1997) Güneş Enerjili Kurutma Sistemleri ve Isıl Analizleri, *Çevre-Enerji Kongresi Sempozyumu*, Antalya.
- Pacco, H. C., Menegalli, F.C., (2004) Drying of Sliced Figs of “Gigante De Valinhos” Variety(Ficus Carical), *International Drying Symposium(IDS 2004)*, Brezilya.
- Pal, U. S., Khan, M. K., Mohanty, S. N., (2008) Heat Pump Drying Of Gren Sweet Pepper, *Drying Technology*, Cilt 26, Sy 1584-1590.
- Pavon-Melendez, G., Hernandez, J.A., Salgado, M.A., (2002) Garcia, M.A., Dimensionless Analysis of The Simultaneous Heat and Mass Transfer In Food Drying, *Journal of Food Engineering*, Cilt 51, Sy 347-353.
- Prasertson, S., Saen-Saby, P., (1998) Heat Pump Drying of Agricultural Materials, *Drying Technology*, Cilt 16, Sy 235-250.
- Queiroz, R., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., (2004) Drying Kinetics Of Tomato By Using Electric Resistance And Heat Pump Dryers, *Drying Technology*, Cilt 22, Sy 1603-1620.
- Saensabai, P., Prasertsan, S., (2003) Effects Of Component Arrangement And Ambient And Drying Conditions On The Performance Of Heat Pump Dryers, *Drying Technology*, Cilt 21, Sy 103-127.
- Söylemez, M. S., (2006) Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery, *Journal of Food Engineering*, Cilt 74, Sy 292-298.
- Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., (2003) Optimization of heat pump fruit dryers, *Journal of Food Engineering*, Cilt 59, Sy 369-377.
- Tosun, S., (2009) Bazı Tarımsal Ürünler İçin Isı Pompalı Bir Kurutucunun Geliştirilmesi ve Termodinamik Analizi, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Vazquez, G., Chenlo, F., Moreira, R., Cruz, E., (1997) Grape Drying In A Pilot Plant With A Heat Pump, *Drying Technology*, Cilt 15, Sy 899-920.

WEB_1. (2005). Solar Drying Technology for Food Preservation. <http://www.gtz.de/gate/>.

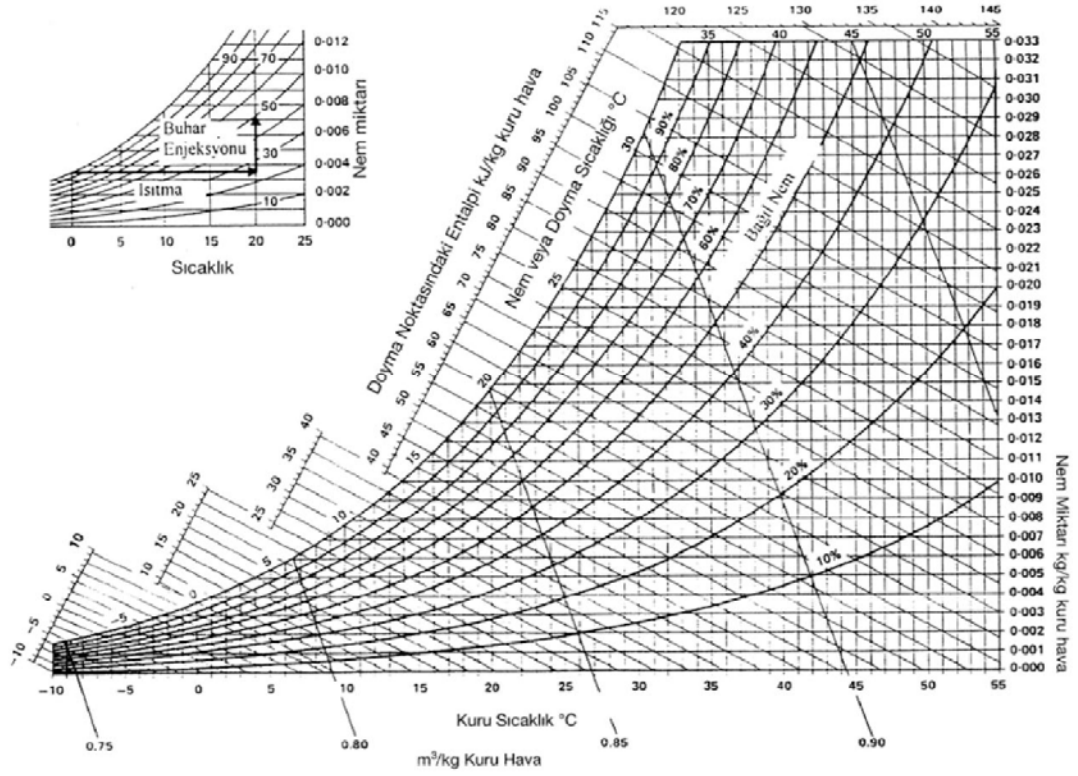
WEB_2. (2005). Solar Drying. <http://www.nri.org>.

WEB_3. (2005). A Review of Solar Food Drying. <http://www.solarcooking.org/dryingreview>.

Yağcıoğlu, A., (1999) Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği, *Yardımcı Ders Kitabı*, Ege Üniversitesi Yayını, İzmir.

EKLER

Ek-1 Psikrometrik diyagram



Ek-2 Doymuş su sıcaklık tablosu (Çengel ve Boles, 1996)

Sıcak. °C T _{doyma}	Doyma basıncı kPa p	Özgül hacim m ³ /kg		İç enerji kJ/kg			Entalpi kJ/kg			Entropi kJ/kgK		
		Doymuş sıvı v _f	Doymuş buhar v _g	Doymuş sıvı u _f	Doymuş buhar u _g	Doymuş sıvı h _f	Doymuş buhar h _g	Doymuş sıvı s _f	Doymuş buhar s _g			
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001005	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159

Ek-3 Havanın termofiziksel özellikleri (Incropera ve De Witt, 2001)

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Hava							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Amonyak (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Adana'da doğdu. İlkokulu Antalya'nın Manavgat ilçesinde, ortaokul ve lise öğrenimini Alanya ilçesinde tamamladı. 1997 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. Lisans eğitimini 2001 yılında tamamlayarak aynı yıl Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2002 yılında aynı üniversitede Makine Mühendisliği Enerji Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2004 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Halen aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak çalışan Öner ATALAY, evli ve bir çocuk babasıdır.