

**ENDÜSTRİYEL TİP ISI POMPALI KURUTUCUDA, ÇEKİRDEKSİZ
ÜZÜMÜN KURUTULMASI VE ENERJİ ANALİZİNİN DENEYSEL
OLARAK YAPILMASI**

Mesut ABUŞKA

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2010
ANKARA**

Mesut ABUŞKA tarafından hazırlanan “ENDÜSTRİYEL TİP ISI POMPALI KURUTUCUDA, ÇEKİRDEKSİZ ÜZÜMÜN KURUTULMASI VE ENERJİ ANALİZİNİN DENEYSEL OLARAK YAPILMASI” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hikmet DOĞAN

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi A.B.D.

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Etem Sait ÖZ

Makine Eğitimi A.B.D., Karabük Üniversitesi

Üye: Prof. Dr. Hikmet DOĞAN

Makine Eğitimi A.B.D., Gazi Üniversitesi

Üye: Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN

Makine Eğitimi A.B.D., Gazi Üniversitesi

Üye: Doç. Dr. Sezayi YILMAZ

Makine Eğitimi A.B.D., Karabük Üniversitesi

Üye: Doç. Dr. Adem ACIR

Makine Eğitimi A.B.D., Gazi Üniversitesi

Tarih: 13/07/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mesut ABUŞKA

**ENDÜSTRİYEL TİP ISI POMPALI KURUTUCUDA, ÇEKİRDEKSİZ
ÜZÜMÜN KURUTULMASI VE ENERJİ ANALİZİNİN DENEYSEL
OLARAK YAPILMASI**

(Doktora Tezi)

Mesut ABUŞKA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2010**

ÖZET

Tarım ürünlerinin hasat sonrası teknolojisinde ürün kurutma, tarımsal işletmelerin ürün yıkama sonrası kurutma ve ısı işlem amaçlı ısı pompalı bir kurutucunun tanıtılıp önerilebilmesi; bu çalışmanın özünü teşkil etmiştir. Tasarlanan ve imal edilen kurutucu Türkiye'nin önemli dış satım ürünlerinden biri olan çekirdeksiz üzüm kurutulmasında test edilmiştir. Çekirdeksiz üzümün uluslar arası standartlarda kurutulmaması pazar kaybına ve meteorolojik etkenler de 1/3 oranında ürün kaybına yol açmaktadır. Bu çalışmada Türkiye'de ilk olarak endüstriyel tip, 10.000 kg kapasiteli tarımsal ürün kurutucusu tasarlanmış, imal edilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan kurutucunun kurutma deneyleri ve enerji analizleri yapılmıştır. Yapılan testlerde çekirdeksiz üzüm, kurutma sisteminde ortalama değerler ile kurutma havası sıcaklığı 60,2 °C, kurutma tünel sonu hava hızı 3,2 m/s şartlarında 52 saatte, % 76,66 nem oranından %14,79 nem oranına kadar kurutulmuştur. Kurutucunun COP_{ws} değeri 2,81, SMER_{ws} değeri 1,53 kg/kWh, MER değeri 99,15 kg/h elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 708
Anahtar Kelimeler : Kurutma, ısı pompası, çekirdeksiz üzüm, enerji analizi
Sayfa Adedi : 171
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Hikmet DOĞAN

**DRYING SEEDLESS GRAPE AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF
ENERGY IN INDUSTRIAL TYPE HEAT PUMP DRYER**

(Ph.D. Thesis)

Mesut ABUŞKA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2010

ABSTRACT

Drying of agricultural products in agricultural products of post-harvest technology, businesses after washing, drying and heat-pump dryer for heat treatment can be recommended to be introduced in this study constituted the essence. The dryers are designed and manufactured, one of Turkey's major export products have been tested for drying of seedless grapes. Seedless grapes is suggestive established in international standards and meteorological factors in the loss of market third rate leads to crop losses. In this study, 10.000 kg capacity as Turkey's first industrial-type dryers for agricultural products designed, manufactured and experimentally investigated. Made experiments and energy analysis of the dryer was drying. In tests seedless grapes, drying system average values of drying air temperature of 60,2 °C, drying tunnel, the last of the air velocity 3,2 m/s conditions 52 hours, % 76,66 humidity from % 14,79 humidity until dried. 2,81 COP_{ws} value of the dryer, SMER_{ws} value of 1.53 kg/kWh, MER value of 99,15 kg/h were obtained.

Science Code	: 708
Key Words	: Drying, heat pump, seedless grape, energy analysis
Page Number	: 171
Adviser	: Prof. Dr. Hikmet DOĞAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasındaki yardımlarından dolayı hocam sayın Prof. Dr. Hikmet DOĞAN'a, çalışmaya verdikleri destekten dolayı; AN-OK Proje Danışmanlık Limited Şirketi (www.anokdanismanlik.com.tr) ve YAVUZ Endüstriyel Soğutma Limited Şirketine (www.yavuzsogutma.com), S.S. ÜZÜM Tarım Satış Kooperatifleri Birliği Alaşehir Entegre Kuru Üzüm İşletmesine, TEMEL Gıda ve Toprak Ürünleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi Saruhanlı Kuru Üzüm İşletmesine, Celal Bayar Üniversitesi Alaşehir MYO Bağcılık Bölümü'nden Yrd. Doç. Dr. Harun ÇOBAN'a teşekkür ederim.

Teze konu çalışma, TÜBİTAK 1507 - Kobi Arge Başlangıç Destek Programı 7070571 numarası, "Endüstriyel Tip Isı Pompalı Tarımsal Ürün Kurutucusunun Geliştirilmesi" ismiyle desteklenmeye uygun görülüp, sözleşme imzalanmıştır. Proje kapsamında bir dönem faaliyetler sürdürülmüş olup, teknik nedenlerle proje tamamlanamamıştır. Bu kapsamda TÜBİTAK ve TÜBİTAK - Biyoteknoloji, Tarım, Çevre ve Gıda Teknolojileri Grubu (BİYOTEG) Bilimsel Programlar Başuzmanı Dr. Naci Sağlam'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
3. ÇEKİRDEKSİZ ÜZÜM, ÜRETİMİ VE KURUTULMASI.....	17
3.1. Çekirdeksiz Kuru Üzüm.....	17
3.2. Çekirdeksiz Üzümde Sınıflandırma ve Özellikler.....	18
3.2.1. Gruplar.....	18
3.2.2. Tipler.....	18
3.2.3. Sınıflar.....	18
3.2.4. Boylar.....	19
3.2.5. Genel özellikler.....	19
3.2.6. Çekirdeksiz kuru üzümün mikrobiyolojik özellikleri.....	20
3.3. Dünyada ve Türkiye’de Çekirdeksiz Üzüm Üretimi.....	20
3.4. Türkiye’de Çekirdeksiz Üzümün Kurutulması.....	24

4. KURUTMA TEKNİĞİ.....	28
4.1. Kuruma Hızını Etkileyen Faktörler.....	29
4.2. Nemlilik Ölçüsü.....	31
4.3. Kurumanın Statiği.....	33
4.4. Kurumanın Kinetiği.....	35
4.5. Kuruma Sırasında Isı ve Kütle Geçişi.....	42
4.6. İnce ve Kalın Tabaka Kuruma Teorisi.....	43
4.7. Sabit Hızda Kuruma Evresi.....	44
4.8. Azalan Hızla Kuruma Evresi.....	46
4.8.1. Azalan hızla kuruma evresi ile ilgili teorik modeller.....	47
4.8.2. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneySEL kuruma eşitlikleri.....	52
4.9. Kurutma Modellerinin Sınıflandırılması.....	55
4.9.1. Basit kurutma modelleri.....	56
4.9.2. Karmaşık kurutma modelleri.....	57
4.10. Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler.....	58
4.10.1. Fiziksel değişmeler.....	58
4.10.2. Kimyasal ve diğer değişmeler.....	62
4.11. Kurutma Yöntemleri.....	63
4.12. Kurutucu Seçimi.....	67
5. ISI POMPALI KURUTUCULAR VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ.....	71
5.1. Isı Pompaları ve Isı Pompalı Kurutmanın Geçmişi.....	71
5.2. Isı Pompası Çevrimleri.....	74
5.2.1. Ters Carnot çevrimi.....	74

5.2.2. İdeal çevrim.....	76
5.3. Isı Pompalı Kurutucular.....	77
5.4. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Şekli.....	79
5.5. Gelişmiş Isı Pompalı Kurutucular.....	83
5.5.1. Çok kademeli ısı pompalı kurutucu.....	83
5.5.2. İnfrared ısı pompalı kurutucu.....	86
5.5.3. Radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucu.....	87
5.5.4. Geliştirilmiş ısı pompası çevrimi.....	89
5.6. Isı Pompalı Kurutucuların Avantajları ve Sınırlamaları.....	90
5.6.1. Isı pompalı kurutucuların avantajları.....	90
5.6.2. Isı pompalı kurutucuların sınırlamaları.....	91
6. TEORİK ANALİZ.....	92
6.1. Kurutma İşlemi İçin Gerekli Enerji Miktarının Hesaplanması.....	92
6.2. Kütle Denkliği (Süreklilik Eşitliği).....	96
6.3. Enerji Dengesi (Termodinamiğin I. Kanunu).....	98
6.4. Ekserji Eşitliği (Termodinamiğin II. Kanunu).....	101
6.5. Isı Pompası Etkinlik Katsayısı.....	105
6.6. Kurutma Havaının Isı Taşınım Katsayısı.....	107
6.7. Özgül Nem Çekme Oranı, Kuruma Hızı ve Nem Alma Verimi.....	110
7. MATERYAL ve METOT.....	112
7.1. Materyal.....	112
7.1.1. Kurutulacak ürün.....	112
7.1.2. Kurutma yeri.....	112

7.1.3. Isı pompalı deney seti kurutucu	113
7.1.4. Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu.....	117
7.1.5. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları.....	122
7.2. Metot.....	124
7.2.1. Kurutulacak ürünün hazırlanışı ve ön işlemler.....	124
8. DENEYLERİN YAPILIŞI.....	126
8.1. Tam Kuru Ağırlığın Belirlenmesi.....	126
8.2. Çekirdeksiz Üzümlerin Kurutulması.....	126
8.3. Kurutma İşleminin Bitirilmesi.....	127
9. DENEY SONUÇLARI.....	128
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	135
KAYNAKLAR.....	141
EKLER.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	173

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1.	Çekirdeksiz kuru üzümün mikrobiyolojik özellikleri..... 20
Çizelge 3.2.	Çekirdeksiz kuru üzümün üretildiği ülkeler ve üretim durumu....21
Çizelge 3.3.	Türkiye'nin yıllar itibariyle kuru üzüm ihracatı..... 22
Çizelge 3.4.	Türkiye'nin kuru üzüm ihracatı..... 23
Çizelge 4.1.	Çeşitli geometrik şekiller için B_n ve μ_n ifadeleri..... 50
Çizelge 4.2.	Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri.....54
Çizelge 4.3.	Bir konvektif kurutucuda enerji tüketiminin dağılımı..... 66
Çizelge 4.4.	Değişik kurutucularda kurutma etkinlikleri 66
Çizelge 4.5.	Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerji..... 69
Çizelge 7.1.	Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları.....123
Çizelge 9.1.	IPK ve sergideki kurutma tam kuru madde ve nem oranları.....128
Çizelge 9.2	Deneyler sonucunda elde edilen bazı veriler.....134

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tünel kurutucunun şematik görünüşü.....	6
Şekil 2.2. Kurutma düzeneğinin şematik görünüşü.....	7
Şekil 2.3. Çekirdeksiz üzüm için teorik ve deneysel kuruma eğrileri.....	8
Şekil 2.4. Kurutma havası sıcaklığının üzümlerin kuruma hızına etkisi.....	8
Şekil 2.5. Kurutma havası hızının üzümlerin kuruma hızına etkisi.....	8
Şekil 2.6. Kurutma düzeneğinin şematik görünüşü.....	9
Şekil 2.7. Kurutma ve soğutma için kullanılan ısı pompası sistemi.....	10
Şekil 2.8. Elektronik kontrollü ısı pompalı kurutucu.....	10
Şekil 2.9. Isı pompalı tarımsal ürün kurutucusu.....	11
Şekil 3.1. Çekirdeksiz üzüm kurutma süreci	26
Şekil 3.2. Çekirdeksiz kuru üzüm pazarlama kanalları.....	26
Şekil 3.3. Örnek bir kuru üzüm işletmesi iş akım şeması.....	27
Şekil 4.1. Kurumada bitkisel hücredeki ısı ve nem hareketi.....	29
Şekil 4.2. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statüğü açısından anlamı.....	34
Şekil 4.3. Kurumanın kinetik eğrileri.....	36
Şekil 4.4. Kuruyan materyalde oluşan izotermal ve izopotansiyel çizgileri.....	37
Şekil 4.5. Kuruma eğrileri.....	40
Şekil 4.6. Kurutucu seçimi için işlem adımları.....	68
Şekil 5.1. Carnot soğutma makinesinin düzeni ve ters Carnot soğutma çevriminin T-s diyagramı.....	75
Şekil 5.2. İdeal buhar sıkıştırmalı soğutma çevriminin düzeni ve soğutma çevriminin T-s ve P-h diyagramı.....	76
Şekil 5.3. Isı pompalı kurutucuların sınıflandırma şeması.....	78

Şekil 5.4. IPK şeması ve Psikrometrik diyagramda gösterimi.....	80
Şekil 5.5. Basit nem alıcı ısı pompalı kurutucu.....	81
Şekil 5.6. Isı geri kazanımlı ısı pompalı açık hava çevrimli sistem.....	82
Şekil 5.7. Isı pompası ile bir atmosferik kaynaktan ısı çekimi ile kurutma havasının ısıtılması.....	82
Şekil 5.8. Farklı ısı pompası modellerinin etkinlik katsayıları.....	83
Şekil 5.9. Kurutma odasıyla birleştirilmiş iki kademeli ısı pompası sistemi.....	84
Şekil 5.10. İki kademeli ısı pompası çevriminin soğutma devresi.....	85
Şekil 5.11. Kızıl ötesi ışınlam destekli IPK'nun şematik diyagramı.....	87
Şekil 5.12. Radyo frekansı destekli IPK'nun şematik diyagramı.....	88
Şekil 5.13. En yüksek verimliliğin elde edilmesi amacıyla havadan havaya ısı değiştiricisi ile ısı pompası çevriminin şematik gösterilişi.....	89
Şekil 6.1. Isı pompası sisteminin log P-h diyagramı.....	94
Şekil 6.2. Kütle denkliği için tünel kurutucunun kontrol hacmi.....	97
Şekil 6.3. Süreksiz kurutmada enerji denkliği için kurutucunun kontrol hacmi...	100
Şekil 6.4. Ekserji denkliği için tünel kurutucunun kontrol hacmi.....	103
Şekil 7.1. Isı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusu deney seti resmi.....	114
Şekil 7.2. Isı pompalı üzüm kurutucu deney setinin şematik görünüşü.....	115
Şekil 7.3. Endüstriyel tip ısı pompalı üzüm kurutucusunun resmi.....	118
Şekil 7.4. Endüstriyel tip ısı pompalı üzüm kurutucusunun teknik resmi.....	119
Şekil 7.5. Endüstriyel tip ısı pompalı üzüm kurutucusunun şematik görünüşü....	120
Şekil 9.1. IPK'da kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi.....	129
Şekil 9.2. Beton sergide kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi.....	129
Şekil 9.3. IPK'da kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi.....	130
Şekil 9.4. Beton sergide kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi.....	130

Şekil 9.5. Kurutma denemelerinin yapıldığı 8 günlük dış hava sıcaklığı ortalaması.....	131
Şekil 9.6. Kurutulan ürünün yüzey sıcaklık değişimleri.....	131
Şekil 9.7. IPK çevriminin psikrometrik diyagramda gösterilişi.....	132
Şekil 9.8. IPK’da kurutma sürecinde kurutma havasının sıcaklık değişimi..	133
Şekil 9.9. IPK’da kuruma sürecinde kurutma havasının bağıl nem değişimi	133
Şekil 9.10. Kurutma süresince enerjinin kullanımı.....	134

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Ürün yüzey alanı (m^2)
A_t	Ürün sergi alanı (m^2)
a, b, c	Katsayı
c	Özgül ısı (kJ/kg K)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg K)
d	Tam diferansiyel olan sonsuz küçük değişim
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
E	Buharlaştırma için gerekli enerji (kJ)
Ex	Ekserji (kJ/kg)
F_w	Fanın harcadığı güç (kWh)
 Fo	Fourier sayısı
g	Yer çekim ivmesi (m/s^2)
h	Entalpi (kJ/kg)
h_s	Suyun ısı miktarı (kJ/kg)
h_{ss}	Suyun doymuş buhar halindeyken ısı miktarı (kJ/kg)
h₁	Soğutkanın kompresöre giriş entalpisi (kJ/kg)
h₂	Soğutkanın kompresörden çıkış entalpisi (kJ/kg)
h₃= h₄	Soğutkanın genleşme vanasından giriş çıkış entalpisi (kJ/kg)
h_D	Taşıyıcıla kütle taşınım katsayısı (m/s)

h_e	Evaporatif kütle transfer katsayısı ($W/m^2 K$)
h'	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2 K$)
K	Toplam ısı geçiş katsayısı ($W/m^2 K$)
k	Isı iletim katsayısı ($W/m K$)
K_h	Kurutma havasındaki su konsantrasyonu (kg/m^3)
kob	Koloni oluşturan birim
K_y	Ürünün yüzeyindeki su konsantrasyonu (kg/m^3)
L	Karakteristik boyut (m)
Le	Lewis sayısı
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
$\dot{m}_s$	Birim zamanda üründen ayrılan su buharı miktarı (kg/s)
m	Ürün içindeki toplam su miktarı (kg)
$\dot{m}_{ev}$	Üründen buharlaştırılan nem miktarı (kg)
M	Ürünün nemi (%)
M_{kb}	Kuru baza göre nem oranı (%)
M_{yb}	Yaş baza göre nem oranı (%)
M_d	Ürünün denge nemi (%)
M_{dk}	Ürünün en küçük denge nemi (%)
M_{ds}	Ürünün en yüksek denge nemi (%)
M_s	Suyun mol ağırlığı (kg/mol)
M_o	Ürünün başlangıçtaki nem içeriği ($kg_{su} / kg_{kuru\ madde}$)
M_e	Ürünün denge nem içeriği ($kg_{su} / kg_{kuru\ madde}$)
P	Basınç (Pa)
P_b	Havadaki su buharının kısmi basıncı (Pa)

P'_b	Ürünün yüzeyindeki suyun, havanın yaş termometre sıcaklığındaki buhar basıncı (Pa)
P''_b	Suyun T_s sıcaklığında buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
P_d	Havanın doyma basıncı (Pa)
$P_{\ddot{u}}$	Ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (Pa)
R	Evrensel gaz sabiti (J/mol K)
R_b	Su buharının gaz sabiti (461,39 J/kg K)
S	Toplam entropi (kJ/kg K)
s	Özgül entropi (kJ/kg K)
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$, K)
T_c	Kurutucudaki ürün üzerindeki hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_d	Dış hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_e	Çevre sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_h	Hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{iç}$	Kurutmaya başlamadan önceki iç hava sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_k	Kurutma havasının kuru termometre sıcaklığı (K)
T_m	Ortalama hava sıcaklığı (K)
$T_{\ddot{u}}$	Ürün sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_y	Kurutma havasının yaş termometre sıcaklığı (K)
v, V	Hız (m/s)
$\dot{V}_{kh}$	Kurutma havası debisi (m^3/h)
z	Yükseklik (m)
$\dot{Q}$	Birim zamandaki enerji miktarı (kJ/s)

$\dot{Q}_C$	Kompresör gücü (kJ/s)
Q_{VTOP}	Kurutma işlemi için gerekli toplam enerji miktarı (kJ)
$\dot{Q}_E$	Buharlaştırıcı kapasitesi (kJ/s)
$\dot{Q}_K$	Yoğuşturucu kapasitesi (kJ/s)
$\dot{Q}_{DT}$	Kurutma odasında kullanılan enerji miktarı (kJ/s)
$\dot{Q}_{ve}$	Yoğuşturucunun kurutma havasına verdiği enerji miktarı (kJ/s)
q	Enerji miktarı (W)
q_b	Suyun buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
q_g	Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)
q''_b	Suyun yaş termometre sıcaklığında buharlaşması için gerekli gizli ısı (kJ/kg)
w	Mutlak nem ($kg_{su} \text{ buharı} / kg_{kuru} \text{ hava}$)
W	Ağırlık (g)
W_F	Fan gücü (W)
W_s	Üründeki su ağırlığı (g)
W_k	Ürünün kuru ağırlığı (g)
ω_1	Havanın sisteme girişteki mutlak nemi ($kg_{su} \text{ buharı} / kg_{kuru} \text{ hava}$)
ω_2	Havanın sistemden çıkıştaki mutlak nemi ($kg_{su} \text{ buharı} / kg_{kuru} \text{ hava}$)
W_1	Ürünün ilk ağırlığı (g)
W_2	Ürünün son ağırlığı (g)
Z	Isıtma süresi (h)
ϕ	Bağıl nem (%)
∂	Tam diferansiyel olmayan büyüklüğün sonsuz küçük değişimi

η	Verim (%)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
Δ	Değişim
∇	Del operatörü
α	Isıl yayılım (difüzivite) katsayısı (m ² /s)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)

Alt İndisler Açıklama

b	Buhar (nem)
çh	Çıkan hava
çü	Çıkan ürün
çek	Çekilen
gh	Giren hava
gü	Giren ürün
h	Hava
K	Kurutucu
k	Kayıp
kb	Kuru baz
kh	Kuru hava
o	Çevre
s	Su
sat	Doymuş
ü	Ürün
yb	Yaş baz

1, g	Açık sisteme giriş hali
2, ç	Açık sistemden çıkış hali

Üst İndisler Açıklama

.	Birim zamandaki değişim
---	-------------------------

Kısaltmalar Açıklama

AHE	Azalan Hızla Kuruma Evresi
BKN	Birinci Kritik Nokta
COP	Isı Pompası Etkinlik Katsayısı
DBN	Denge Bağlı Nemi (%)
EKO	Enerji Kullanım Oranı
GA3	Gibberelik Asit (bitki gelişim düzenleyicisi)
GAP	Güneydoğu Anadolu Projesi
IE	Isınma Evresi
İKN	İkinci Kritik Nokta
İGEME	İhracatı Geliştirme Enstitüsü
MER	Kuruma Hızı
RAR	Yeniden kullanılan çevrim havası oranı
SASA	Sürekli Akışlı Sürekli Açık Sistem
SHE	Sabit Hızla Kuruma Evresi
SMER	Özgül Nem Alma Hızı
TARİŞ	Üzüm Tarım Satış Kooperatifleri ve Birliği
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Dünyada tarım ürünleri endüstriyel veya doğal şartlarda kurutulmaktadır. Açıkta ürün kurutma; ürünün sağlığa uygunluğu (bakteriyolojik), renk ve lezzet gibi özellikleri istenilen şartlarda olamaması dolayısıyla; ürünün kalitesi düşmekle birlikte zaman ve işçilikte de büyük kayıplara sebep olmaktadır. Ayrıca açıkta tabii kurutmada meteorolojik etmenler de ürün kayıplarına neden olmaktadır. Endüstriyel kurutmada ilk yatırım maliyeti ve enerji maliyeti girdileri yüksek olduğundan ürün maliyetleri artmaktadır. Ancak kurutmanın kapalı şartlarda kontrollü olması; ürün kalitesi, zaman, işçilik, mikro biyolojik ve ürün kaybının azaltılması yönünden büyük faydalar sağlamaktadır.

Türkiye'nin dış satımı yapılan en önemli tarım ürünlerinden biri olan üzümün, uygulanan en yaygın saklama ve değerlendirme yöntemi kurutmadır. Türkiye, 2008 yılında 825 bin tonluk dünya kuru üzüm üretimi içersinde 300 bin ton kuru üzüm üretimi ile dünyada en çok kuru üzüm üretimi yapan ülke konumundadır. Türkiye 2007 yılında 240 bin ton kuru üzüm dış satım miktarı ile 316 milyon \$ gelir elde etmiştir. Türkiye açısından önemi büyük olan çekirdeksiz kuru üzüm, Ege Bölgesinde 100.000'i aşkın aileye istihdam imkânı sağlamaktadır. Ortak Tarım Politikası çerçevesinde, pek çok üründe kendine yeterli düzeye ulaşan Avrupa Topluluğu, bazı ürünlerde uyguladığı çeşitli politikalarla yeterlilik düzeyini artırmıştır. Ancak meyvede henüz yeterli düzeye ulaşamamıştır. Topluluk bu açığını dış alım ile karşılamaktadır. Çekirdeksiz kuru üzüm de topluluğun dışalımını yaptığı ürünlerin en önemlileri arasında yer almaktadır.

Üzüm kurutma, Türkiye'de genellikle açık havada doğal olarak yapılmaktadır. Bu yöntem yüksek oranlarda kalite düşüklüğüne ve kayıplara sebep olmasına rağmen; ilk yatırım maliyetinin ucuz ve uygulamasının kolay olması sebebiyle hemen hemen bütün üreticiler tarafından tercih edilmektedir.

Özellikle gelişmiş ülkelerle birlikte Türkiye’de de sağlıklı gıdaların tüketimine yönelme eğilimleri gittikçe hız kazanmıştır. Tüketicilerce beslenme değeri yüksek, katkı maddesi içermeyen, kimyasal koruyuculardan ve zirai ilaç kalıntılarından uzak, aflatoksin (küf zehirlenmesi) ve okratoksin (küf ve mantar) içermeyen ve radyoaktiviteye maruz kalmamış güvenilir ürünler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu problemlerin varlığı özellikle dış pazarlarda satış sorunları oluşturmaya devam etmektedir. Türkiye’deki uygun iklim ve toprak koşulları sebebiyle, dünyada en kaliteli çekirdeksiz kuru üzümleri bazı hatalı uygulamalar sonunda istenilen temizlik sağlanamamakta bu durum da değerinin azalmasına sebep olup, istenilen fiyatta dış satım değerlerine ulaşamamaktadır.

Yukarıda bahsedilen problemlerin çözümü; binlerce ton üzümün üreticiye önemli bir külfet yüklemekten, kalitesi yüksek olacak şekilde, dış koşullardan korunabileceği sistemler içinde kısa sürede, kontrollü şartlar altında kurutulmasıdır. GAP projesi ile birlikte Avrupa Birliği’ne giriş sürecindeki Türkiye’nin bunları gerçekleştirmesi dış piyasalarda rekabet gücünü artıracak, dolayısıyla dış satım payının artırılarak ülke ekonomisine büyük katkıda bulunacaktır.

Türkiye’de çekirdeksiz üzüme en çok uygulanan kurutma yönteminin açıkta sergide kurutma olduğu dikkate alınır, gerek işleme zamanı gerekse de ürün kalitesini doğrudan etkileyen endüstriyel yapay kurutma işleminin doğru anlaşılması ve yaygınlaşması büyük önem taşımaktadır.

Endüstriyel kurutma yöntemleri; üzümlerin kontrolü şartlar altında, dış etkenlerden korunarak kurutulmasını sağlamaktadır. Bu yöntem ile sağlanabilecek faydalar şunlardır:

- Doğal şartlarda 8 gün - 2 hafta sürebilen kurutma, kurutucularda 20-24 saate inerek kurutma süresi kısılırken, kurutma kalitesi artmaktadır.
- Açık havada, yer sergilerde üzüm kurutulması esnasında sabahları çiy oluşması ve bazen yağmur yağmasıyla kuruma sürecinin uzamasına (12-20 gün) üzümün küflenmesine sebep olmaktadır. Örneğin; Manisa’da her yıl ürünün 1/3’ü yağmurlardan zarar görmektedir. Bu durum ürünlerin, özellikle maliyet ve kalite açısından dış piyasalardaki rekabet gücünü azaltmaktadır.
- Kurutma sezonu dışında başka bir amaçla kullanılamayan sergi yerleri ortadan kaldırılıp, bu alanların bağ alanlarına dahil edilmesi sağlanabilir veya sergi yerleri sera olarak kullanılabilir hale gelebilecektir (Geleneksel olarak üzüm kurutma yeri için bağın bir kenarında genellikle 10 dekar bağ için 250 m² hesabıyla yer ayrılır).
- Çiy oluşması ve yağmur yağması sonucu oluşan renk kararması ve küflenme dolayısıyla kalite düşümü ile ürün kaybı engellenmiş olunacaktır. Doğal kurutmada (güneş altında) oluşan vitamin kayıpları en aza inecektir.
- Üretici yağmurlara kalmak endişesiyle ürününü tam olgunlaşmadan hasada gittiğinden ciddi ürün kayıplarına neden olmaktadır. Endüstriyel kurutma ile bu endişe ortadan kalkacağından ürün kayıplarına engel olacaktır.

Endüstriyel kurutma yönteminin bu gibi avantajlarının yanında, ilk yatırım ve işletme masraflarının yüksek olması, kullanım alanını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Kurutma havasının ısı pompası ile ısıtılması ve büyük kapasiteli kurutucuların tesisi, bunun yanında tek bir ürünün kurutulması değil de başka ürünlerin de (incir, kayısı vb.) kurutulmasında da kullanımı; birim ürüne düşen kurutma maliyetini azaltacaktır. Avrupa Birliği’ne giriş sürecindeki Türkiye mevcut dış satımını muhafaza edip geliştirmek zorundadır. Günümüzde, artan rekabet şartlarında tarımsal ürünlerin iç ve dış satımında karşılaşılan sorunların aşılması büyük önem kazanmıştır. Üreticilerin ve işletmelerin kapalı sistemlerde kaliteli ürün elde etmeleri mecburiyet haline

gelmiştir. Uluslar arası ürün standartlarının yükselmesine paralel son yıllarda üreticilerin ve kaliteli kuru üzüm üretimine yönelik tarımsal işletmelerin endüstriyel kurutmaya talepleri giderek artmıştır. Kuru üzüm işleme paketlemesi yapan işletmeler ürün mikroorganizma yükünün azaltılmasına yönelik olarak, ürünün yıkamalı ve yıkamasız işleme sonrası kurutma veya noktasal sıcaklıkta ısıl işlem-sterilizasyon uygulamalarına yönelik talepleri; endüstriyel kurutma sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Tarımsal işletmelerin ve üreticilerin talebinde son yıllardaki iklim değişikliğinden dolayı, yüksek oranda kayıpların meydana gelmesi, yüksek kaliteli ürün talebi, açıkta sergide kurutmaya göre hızlı üretim isteği, sıcaklık-nem-hava hızı değerlerinin kontrol edilebilen kurutucu isteği etkili olmuştur.

Ayrıca endüstriyel kurutma sistemlerinin geliştirilmesinde; hasat zamanı yaz aylarına denk gelmeyen ürünleri kurutma ihtiyacı, katma değeri yüksek olan ürünlerin (kiraz, çeşitli tipteki çekirdekli üzüm vb.) kurusuna yurtiçi ve yurtdışı piyasalardan talebin artması ve son yıllarda sayıları hızla artmakta olan tarımsal ürün işleme yapan işletmelerin ihtiyaç ve talepleri gibi etkenler de etkili olmuştur.

Endüstriyel kurutma yapan çok az sayıdaki üretici ve tarımsal işletmeler, genellikle sistemlerinde kömür, fuel oil, mazot, lpg, elektrik vb. enerji kaynaklarını kullanmaktadırlar. Bu tür enerji kaynaklarından faydalanılması durumunda enerji girdileri maliyet olarak ısı pompasına göre yüksektir ve kullanım açısından da çeşitli zorlukları vardır.

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 kontrolüne olanak sağlarlar. Sürekli kontrol edilen kurutma koşulları ısıl hassas materyaller için fayda sağlarken açık bir şekilde daha iyi kalitede ürün elde edilir. Steril süreç şartları sağlanabilir.

Isı pompalı kurutma sistemiyle, kurutma havası istenilen şartlara (kurutma hava hızı-sıcaklığı-nem değerleri) ayarlanabilir olması ile her türlü meyve ve sebzeler her türlü dış hava şartlarında, yılın on iki ayı boyunca kurutulabilecektir. Böylelikle; tarımsal ürün kurutucularında meydana gelen ürün yakma ve çatlama sorununa çözüm getirilebilecektir. Ayrıca; kuru ürün işlemede yıkama sonrası kurutma ve mikroorganizma yükünün düşürülmesine yönelik noktasal sıcaklıkta ısıtma işlemi sterilizasyon uygulaması için rahatlıkla kullanılabilir.

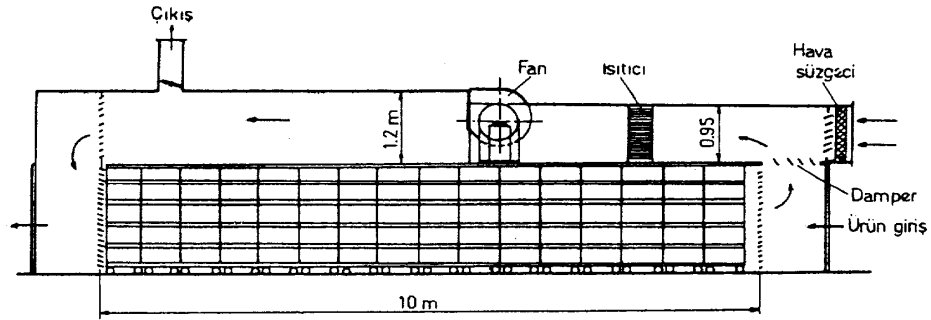
Yurtiçi ve yurtdışında ısı pompalarının kurutma alanında kullanımı hızla ilerlemekte olup özellikle ticari tip ısı pompalı kurutma sistemleri hızla gelişmektedir. Örneğin, Bloomberg, Panasonic, Siemens, Arçelik vb. firmalar ısı pompalı çamaşır kurutma makinelerini geçtiğimiz yıllarda piyasaya sürmüşlerdir. Yakın gelecekte ticari ve endüstriyel tip tarımsal ürün kurutucularının, Türkiye'nin tarımsal işletmeleri tarafından ithal edilmesi öngörülebilir bir sonuçtur. Isı pompası teknolojisine dayalı kurutucu sistemlerinin ülkemizde üretilmesi dünya ile rekabetimizi sağlayacak ve yurt dışına sermaye çıkışı engelleyecektir.

Bu çalışmada Sultaniye tip çekirdeksiz üzümün, sıhî, kapalı ve kontrollü şartlarda endüstriyel çapta kurutmanın yapılması amacıyla yönelik olarak, ısı pompası teknolojisi esas alınarak, Türkiye'de ilk olarak 10.000 kg kapasiteli endüstriyel tip ısı pompalı kurutma sistemi tasarımı ve imalatı yapılarak deneysel olarak incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yapılan literatür taramasında üzüm kurutma ve ısı pompalı kurutma konusunda birçok çalışma incelenmiştir. Bu çalışmalarda gerekli bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Aybers, N. (1954), Şekil 2.1.'deki çalışmasında üzüm kurutmanın bazı temel esaslarını vermiş ve örnek olarak 5 ton kurutma kapasiteli bir tünel kurutucunun hesaplamalarını yapmıştır. Projelemede hava sıcaklığı 74°C ve bağıl nemi % 29 olarak alınmış ve kuruma süresi 24 saat kabul edilmiştir [1].



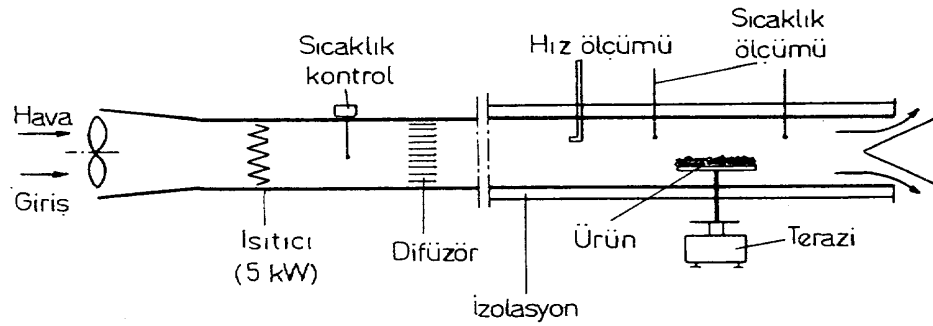
Şekil 2.1. Tünel kurutucunun şematik görünüşü [1]

Bu teorik çalışmada özetle şu görüşlere yer verilmiştir:

- Üzümler yapay olarak kurutulduklarında, yağmurdan doğabilecek zararlar önlenemediği gibi, daha temiz ve kaliteli ürün elde edilmektedir.
- Kurutma işlemi 10–20 gün yerine 20–30 saat sürmektedir.
- Üzümlerin kurutulmasında en uygun sıcaklık sınırları $65\text{--}82^{\circ}\text{C}$ arasında olmaktadır.
- Kurutma havasının tünel içinde 75°C kadar bir sıcaklıkta girmesi ve çıkış havası bağıl neminin %60 ile %70 olması iyi sonuç vermektedir.

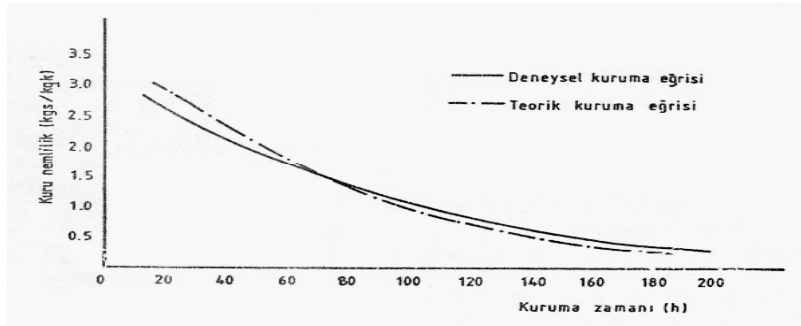
Eissen ve ark. (1985), üzümlerin kuruma karakteristikleri üzerine kurutma havası sıcaklığı, hızı ve kimyasal ön işlemlerin etkilerini incelemişlerdir. Kuruma sıcaklığının 70 °C'yi aşmaması gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan deneme sonuçları kurutma için en uygun sıcaklığın 60°C ve hava hızının 0,25–0,50 m/sn sonucuna varmışlardır [2].

Güngör, A. (1985), Şekil 2.2.'deki çalışmasında geliştirmiş olduğu laboratuvar tipi ve elektrik ısıtmalı bir kurutucu ile çekirdeksiz üzümün farklı kurutma koşullarında sabit hızla kuruma evresindeki kütle geçiş katsayılarını veren ifadeleri teori ve deney sonuçlarından yararlanarak türetmeye çalışmıştır. Sabit hızla kuruma evresinde ürün dış yüzeyinden havaya olan ısı geçişini durgun su yüzeyinden olan nem geçişine benzetmiş ve bu amaçla literatürde verilen geçiş eşitliklerinden yararlanarak bulduğu değerleri deneysel değerlerle karşılaştırmıştır. Denemeler TS 3411'e göre hazırlanan bandırma çözeltisine bandırılmış çekirdeksiz üzümler ile gerçekleştirilmiştir [3].

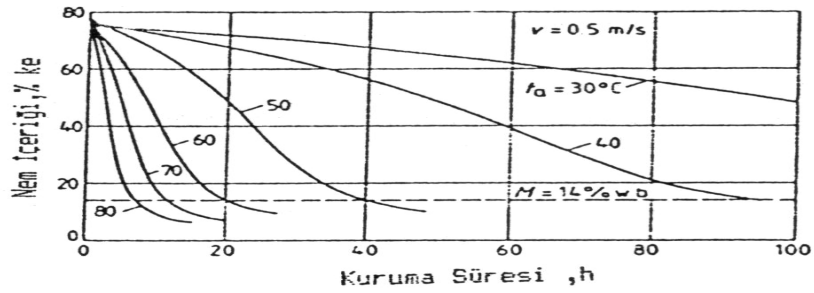


Şekil 2.2. Kurutma düzeneğinin şematik görünüşü [3]

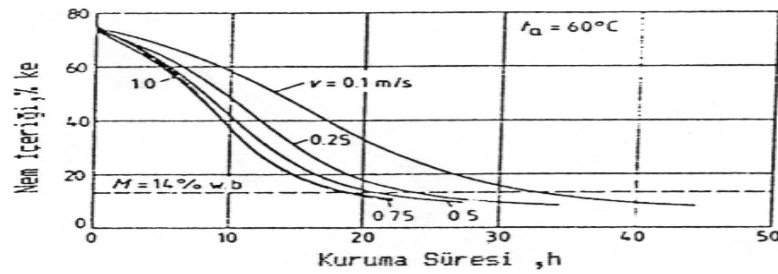
Ergüneş, G. (1990), çalışmasında çekirdeksiz üzümün değişik sıcaklık, hava hızı ve ön işlem koşullarındaki göstereceği kurutma karakteristiklerini saptamaya çalışmıştır (Şekil 2.3.-2.5.). Ayrıca en uygun kurutma havası sıcaklığının da 65°C civarı olduğunu belirtmiştir. 60°C sıcaklığında yapılan deneme sonuçlarına göre 0,3 m/s hava hızında kuruma süresi yaklaşık 31 saat iken, 2 m/s'de 17 saat kadardır [4].



Şekil 2.3. Çekirdeksiz üzüm için teorik ve deneysel kuruma eğrileri [4]

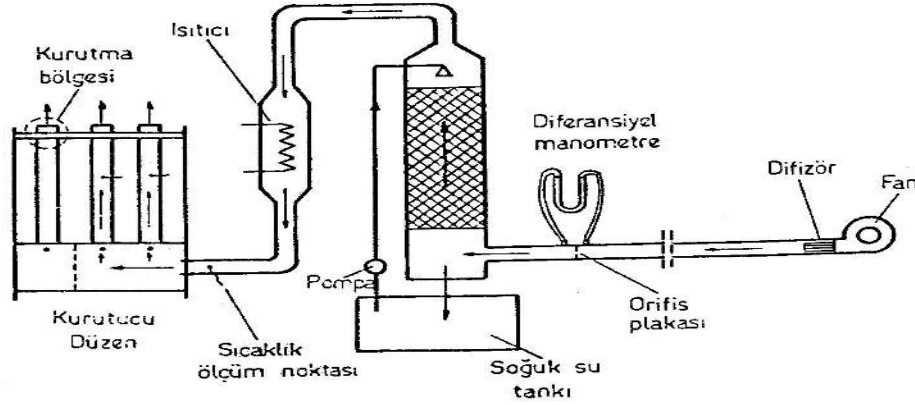


Şekil 2.4. Kurutma havası sıcaklığının üzümün kuruma hızına etkisi [4]



Şekil 2.5. Kurutma havası hızının üzümün kuruma hızına etkisi [4]

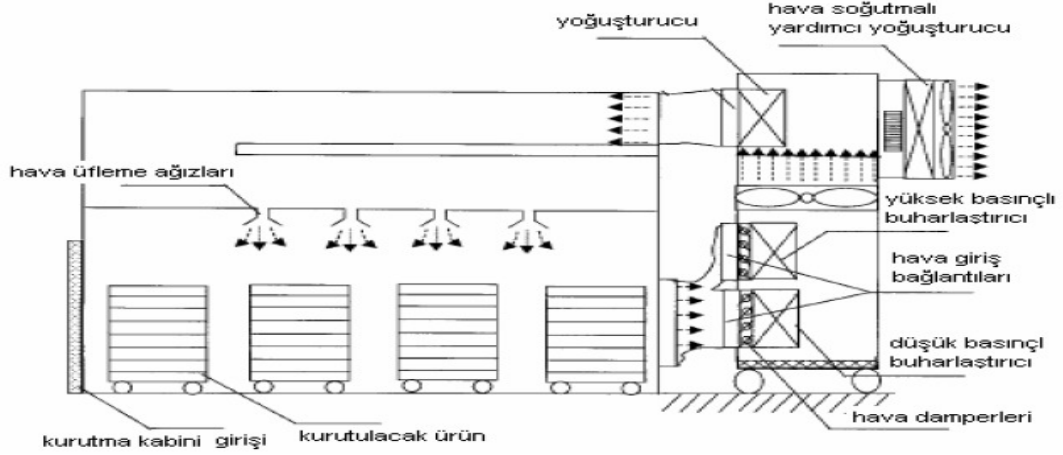
Sadeghian, E. (1992), Şekil 2.6.'daki çalışmasında çekirdeksiz üzümün 60 °C'de ve 2 m/s hava hızında, üzümün sahip olduğu difüzyon katsayısının belirlenmesine yönelik laboratuvar şartlarında deneysel bir çalışma yapılmıştır. Difüzyon katsayısının nemin azalmasıyla yükseldiğini, ancak belirli bir maksimum değerden sonra hızlı bir şekilde azaldığını belirlemiştir [5].



Şekil 2.6. Kurutma düzeneğinin şematik görünüşü [5]

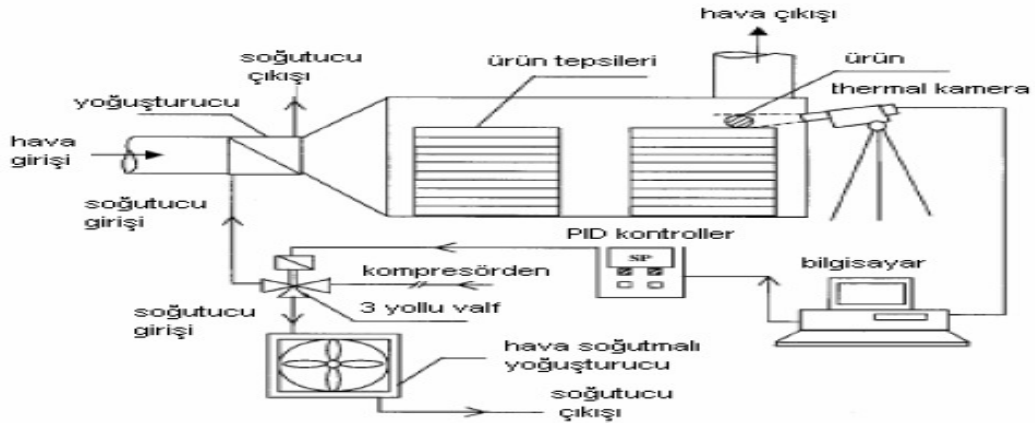
Yağcıoğlu, A. (1999), Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği adlı kitabında; tarım ürünleri ile nem arasındaki temel ilişkiler, nemli havanın özellikleri, kurutmayla ilgili temel teorik bilgiler, tarım ürünü kurutucular ve kurutma yöntemleri, tarım ürünlerinin kurutulması, ürün-hava ilişkileri ve kurutucu seçimi konularında faydalı bilgilere yer verilmiştir. Üzüm kurutulmasında esmerleşme (karamelizasyon) oluşmaması için kurutma havası sıcaklığının 65°C'yi geçmemesi gerektiğini belirterek, % 5-6'luk K_2CO_3 çözeltisine bandırılmış üzümlerin bu sıcaklıktaki hava akımına sahip şartlarda 20-22 saat içinde % 12-15 nem düzeyine gelebileceğini belirtmiştir [6].

Brunder ve Blundell (1980), Şekil 2.7’de yapılan çalışmada ısı pompası ile sistem soğutma ve depolama amacı için kullanılabileceğini belirtmişlerdir [7].



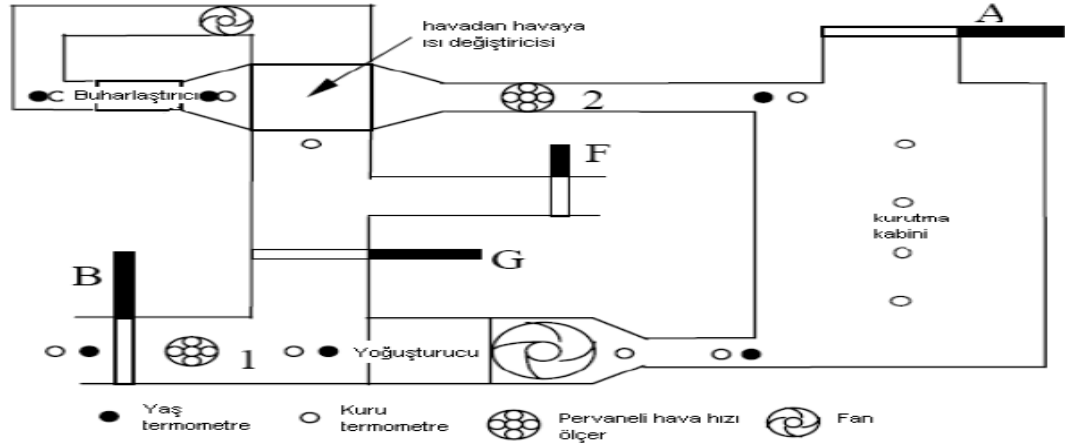
Şekil 2.7. Kurutma ve soğutma için kullanılan ısı pompası sistemi [7]

Karel (1988) tarafından Şekil 2.8.’de verilen ısı pompalı gıda kurutucusu yapılmıştır. Çalışmasında gıda ürünleri kurutulmasında, uygun hava sıcaklığının öneminden bahsederek yüksek kurutma sıcaklığındaki kurutmada gıda kalitesinin düşeceğini belirtmiştir. Sistemde kurutma havası sıcaklığında olabilecek dalgalanmaları önleyerek ürünlerdeki renk ve yüzey gerilimlerinin değişimini engellemiştir [8].



Şekil 2.8. Elektronik kontrollü ısı pompalı kurutucu [8]

Prasertsan ve Saen (1998) tarafından Şekil 2.9.'daki yaptığı çalışmada tarım ürünlerinin ısı pompalı kurutucuda kurutulması üzerinedir [9].



Şekil 2.9. Isı pompalı tarımsal ürün kurutucusu [9]

Coşkun (2002), basit nem alıcılı ısı pompalı sürekli kurutma sisteminin modellemesini (simülasyon) yapmıştır. Çalışmasında, ısı pompası sisteminin en verimli çalışma noktasının SMER değerinin en yüksek olduğu nokta olduğunu belirtmiştir. Dış ortam sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda yoğuşurucu sıcaklığındaki artışın soğutkanın kritik nokta sıcaklığı ile sınırlı olduğunu, ısı pompalarında yoğuşurucu sıcaklığının soğutkanın kritik sıcaklığına yaklaşmasının, soğutkanın kimyasal yapısını bozacağı hem de kompresörün zarar görmesine neden olacağını belirtmiştir [10].

Phani ve ark. (2005), kapalı çevrimli sürekli akışlı ısı pompası destekli kurutma sistemini test etmişlerdir. Çalışmada, sistemde ürün kalite optimizasyonu için düşük sıcaklıklarda (30–35 °C) kurutulması gereken bitkileri kurutmuşlardır. Özgül nem çekme oranını (SMER) 0,006–0,61 kg/kWh arasında hesaplamışlardır. Ürün kurutmasında elektrikli tel ısıtıcılı geleneksel sistem ile ısı pompası sistemi karşılaştırıldığında ısı pompalı sistemde kurutma süresinin % 65 ve kullanılan enerjinin de % 22 azaldığı görülmüştür [11].

Filho ve Strommen (1996), kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucuların düşük sıcaklıklarda çalışan konvansiyonel kurutuculara göre daha verimli çalışma potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, kapalı çevrimli ısı pompalı kurutucularda atık havadan duyulur ve gizli ısının çekilmesiyle sistem ısı performansının iyileşeceğini belirtmişlerdir [12].

Baines (1986), ısı pompalı kurutucular kullanıldığında, kurutucularda enerji kayıplarının azaldığını belirtmiştir. Araştırmacı, ısı pompalı sistemlerde SMER değerinin 1-6 kg/kWh arasında değiştiğini belirtmiştir [13].

Acharyaviriya ve ark. (2000), ısı pompalı kurutucuda papaya bitkisi kurutmuşlardır. Ürünü, 50 °C’ de % 40,4 (kuru baz) nem değerinden % 23,2 (kuru baz) nem değerine kadar kurutmuşlardır. Bu araştırmada, maksimum SMER değeri de 0,091 kg/kWh olarak hesaplanmıştır [14].

Söylemez (2006), kurutma sistemlerinde sistemdeki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Araştırmacı, sistemin termo-ekonomik analizi için sistem elemanlarının ısı analizi ile birlikte basit bir ekonomik analiz yapmış ve ısı pompası için en uygun sıcaklık değerlerini hesaplamıştır. Sistem için en uygun yoğunlaştırıcı çıkış hava sıcaklığı 50,13 °C, buharlaştırıcıdan ayrılan hava sıcaklığı 11,90 °C ve buharlaştırıcıya giren sistem havası sıcaklığını ise 37,68 °C olarak hesaplanmıştır. Sistem elemanları için en uygun çalışma şartlarında COP değerini 2,35 olarak hesaplanmıştır [15].

Chua ve Chou (2005), iki kademeli ısı pompalı kurutma sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan incelemede, tek kademeli sisteme göre bu sistemde % 35’den daha fazla ısı çekildiğini belirtilmiştir. Araştırmacılar sistemde, yüksek ve düşük basınçlı dış buharlaştırıcıları, kurutma havasını soğutma ve kurutma havasından nem çekme amaçlı olarak kullanmıştır [16].

Günerkan (2005), endüstriyel kurutma sistemlerini incelemiştir. Araştırmada, kuruma zamanının hesaplanması, kurutucu hesapları ve kurutma sistemi seçimi ile ilgili unsurlar ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir [17].

Oktay (1997), ısı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenleri araştırmıştır. Araştırmacı, “yan geçit (by-pass) hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisi; sistemin performansını etkileyen anahtar verilerdir” ifadesini kullanmıştır. Buharlaştırıcı etrafındaki by-pass havasının sistemin performansını %20 oranında iyileştirebileceği, bu iyileşmenin artan hava debisi ile artacağı, egzoz havasının %10 azaltılması ile özgül nem çekme oranının (SMER) %15 ve ürün geçişinin %50 oranında iyileşebileceği belirtilmiştir. Fakat bu iyileşmenin soğutkanın yüksek çalışma sıcaklığı ile sınırlı olduğunu belirtilmiştir [18].

Oktay (2003), mekanik ısı pompalı bir kurutucunun testini yapmıştır. Test materyali olarak ıslak yün kullanılmıştır. Yapılan deneylerde kütleli hava hızları 0,78 – 1,50 kg/m²s arasında değişmiştir. By-pass hava oranı ve dönüş havası oranı %20 - %80 arasında değişmiş ve tüm sistem SMER değeri dönüş havası oranına bağlı olarak 1,5 ve 2,8 kg/kWh arasında değişmiştir. Yapılan çalışmada, buharlaştırıcı hava oranları arttıkça hem tüm sistem performansı hem de SMER’in arttığı gözlemlenmiştir [19].

Rahman ve ark. (1998), bezelyenin ısı pompalı kurutucuda kuruma kinetiği ve desorpsiyon izotermi oluşturmuşlardır. Yapmış oldukları sistemde kurutma havası hızı 1,5 m/s, kurutma havası sıcaklığı 25 °C ile 65 °C arasında ve kurutma havası bağıl nemi de %20 ile %60 arasında değişmiştir. Nem desorpsiyon izotermi ve ürünün ince tabakada kuruma kinetiği pilot bir ısı pompalı kurutucuda modellenmiştir [20].

Teeboonma ve ark. (2002), ısı pompalı meyve kurutucularının optimizasyonunu yapmışlardır. Isı pompalı meyve kurutucularının en uygun şartları belirlenirken en önemli faktörlerin dönüş havası oranı, buharlaştırıcı by-pass oranı, kütleli debi ve kurutma havası sıcaklığı olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, “sonuç olarak kurutulacak ürünün fiziksel özellikleri en uygun hava debisini ve buharlaştırıcı by-pass hava oranını önemli bir biçimde etkilemektedir” ifadesini kullanmıştır [21].

Braun ve ark. (2002), ısı pompalı hava çevrimli kurutucuların enerji verimliliği analizini yapmışlardır. Araştırmacılar, hava çevrimli ısı pompalı kurutucuda elbise kurutarak, ekonomik analiz yapmıştır. Çalışmada, konvansiyonel kurutucularla karşılaştırıldığında hava çevrimli pratik ısı pompalı kurutucuların önemli verim iyileşmesine sahip olduğu saptanmıştır [22].

Oktay ve Hepbaşı (2003), mekanik ısı pompalı bir kurutucunun performans değerlendirmesini yapmışlardır. Yapılan çalışmada, yoğuşturucu ve buharlaştırıcı sıcaklıklarına bağlı olarak ısıtma tesir katsayısı 2,47 ile 3,95 arasında değişmiştir. Isı pompalı kurutucuda SMER’in 0,65 ile 1,75 kg/kWh arasında değiştiği saptanmıştır [23].

Akpınar (2004), kırmızıbiber dilimlerinin ince tabaka kurutma işleminin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. Araştırmada, konvektif tip kurutucuda 55 °C, 60 °C ve 70°C sıcaklık değerlerinde ve 1,5 m/s hava hızında kurutma işlemi gerçekleştirmiştir. Termodinamiğin I. kanunu kullanılarak enerji analizi ve termodinamiğin II. Kanunu uygulanarak ekserji analizi yapılmıştır [24].

Chua ve ark. (2002), ısı pompalı kurutucularda son gelişmeleri ve gelecekteki eğilimleri incelemişlerdir. Çalışmada, bazı mümkün yeni hibrid teknolojiler örneğin radyo frekansı ve enfraruj ısı pompalı kurutucular endüstriyel potansiyelleri bakımından tartışılmıştır. Ayrıca, ısı pompalı kurutucuların avantaj ve kısıtlı olduğu tarafları incelenmiş ve ısı pompalı kurutuculardaki yeni gelişmeler irdelenmiştir [25].

Ceylan ve ark. (2007), ısı pompası destekli kereste kurutucusunun enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Çalışmada, 40°C sıcaklık ve 0,8 m/s hava hızında yapılan kurutma işleminde kavak keresteleri 1,28 kg su/kg kuru madde nem oranından 0,15 kg su/kg kuru madde nem oranına 70 saatte ve çam keresteleri de 0,60 kg su/kg kuru madde nem oranından 0,15 kg su/kg kuru madde nem oranına 50 saatte indirgenmiştir [26].

Chua ve ark. (1998a, 1998b, 2000), ısı pompalı kurutucuda tarımsal ve deniz ürünlerini (mantar, meyveler ve istiridye) kurutmuşlardır. Araştırmacılar, “ısı pompalı kurutucularda planlanmış kurutma şartları ile tarımsal ve deniz ürünlerinin kalitesinin arttırılabileceğini” ifade etmişlerdir [27-29].

Prasertsan ve ark. (1997, 1998b), ısı pompalı kurutucuda tarımsal gıdaları (muz) kurutmuşlardır. Araştırmacılar, “ısı pompalı kurutucuların yüksek nem miktarına sahip materyaller için daha uygun olduğunu” ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışmada, ısı pompalı kurutucuların işletme maliyetlerinin onları ekonomik olarak daha mümkün kıldığı belirtilmiştir [30,31].

Strommen ve ark. (1994), ısı pompalı kurutucuda deniz ürünlerini (balık) kurutmuşlardır. Çalışmada, ısı pompalı kurutma sistemlerinin büyük avantajının kurutulmuş ürünlerin yüksek kalitede olmasını sağlaması ve kontrol edilebilen sıcaklık programı ile ürün özelliklerine (gözeneklilik, nem alma (rehidrasyon), renk, doku ve dayanıklılık) göre kurutma programının ayarlanabilmesinin mümkün kılınması olduğu belirtilmiştir [32].

Fatouh ve ark. (2006), ısı pompalı kurutucu kullanarak maydanoz, nane ve ebegümeci kurutmuşlardır. Sistemde R-134a gazı kullanılmıştır. Bu bitkilerin kurutulmasında gerek duyulan en düşük enerji tüketim değerleri maydanoz için 3.684 kJ/H₂O, nane için 3.982 kJ/H₂O ve ebegümeci için 4.029 kJ/H₂O olarak hesaplanmıştır [33].

Tosun (2009), ısı pompası destekli, ısı geri kazanımlı, raflı bir kurutucu bazı yüksek nemlilikteki tarım ürünlerinin kurutulması deneylerinde kullanılmak üzere tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Sistemde iki kademeli yoğuşturucu kullanılmıştır. Ön soğutucu olarak bir ısı değiştirici ilave edilmiş ve böylece ısı geri kazanımı sağlanmıştır. Çalışmada sarı elma (golden delicious) kurutulmuştur. Elma kurutma deneyindeki kuruma süreleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 435, 300, 300, ve 285 dakika sürmüştür. Aynı kurutma sıcaklıkları için sırasıyla kurutma havasının girişteki bağıl nemi %14, 16, 15, 11 ve çıkıştaki bağıl nemi %21, 23, 20, 21 olarak bulunmuştur. SMER değerleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.46, 0.68, 0.61 ve 0.81 olarak hesaplanmıştır. MER değerleri 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 0.65, 0.99, 0.94 ve 1.2 olarak bulunmuştur. COP değerleri de 40°C, 44°C, 48°C ve 50°C sıcaklıkları için sırasıyla 2.72, 2.62, 2.59 ve 2.81 olarak tespit edilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda ısı pompalı kurutucunun düşük nem ve sıcaklıkta çalışmasından dolayı kurutmanın ürün kalitesinde de olumlu etkisinin bulunduğu gözlenmiştir [34].

Majumdar ve ark. (2006), Endüstriyel Kurutmanın El Kitabı isimli kitabında; kurutma ve endüstriyel kurutucular hakkında çok ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir. Özellikle kitabının 47. bölümünde Isı Pompalı Kurutma Sistemleri hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir [35].

3. ÇEKİRDEKSİZ ÜZÜM ÜRETİMİ VE KURUTULMASI

3.1. Çekirdeksiz Kuru Üzüm

Üzüm, iklim ve toprak istekleri yönünden çok seçici olmayışı, çoğalma yöntemlerinin kolay oluşu ve çok çeşitli şekillerde tüketilebilmesi gibi sebeplerden dünyadaki en yaygın kültür bitkilerinden birisidir. Çekirdeksiz kuru üzüm, *Vitis vinifera* L. türüne giren bağların kurutulmuş meyveleridir. Türkiye’de genellikle Sultanî tipi çekirdeksiz üzüm yetiştirilmektedir. Sultani tipi çekirdeksiz üzüm, 18 yy. sonlarında yuvarlak çekirdeksiz üzümün ıslah edilmiş çeşididir. Nefaset yönüyle sultan sofralarını süslemesi nedeniyle sultanlara layık görüldüğünden “Sultani (Sultana)” adını almıştır.

Bir protein ve karbonhidrat kaynağı olan kuru üzüm, içeriğindeki demir, fosfat, kalsiyum ve diğer mineral maddeler ile A, B1, B2, B6, C vitaminlerinden dolayı dünyada gittikçe artan oranlarda talep görmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde, sağlıklı gıda tüketimi konusundaki bilincin yüksek olması beslenme alışkanlıklarında bu tip ürünlerin daha fazla yer almasına sebep olmaktadır. Bu açıdan kuru üzüm, gelecek yıllarda dünya organik gıda pazarından daha büyük paylar alabilecek bir üründür.

Çekirdeksiz kuru üzüm ile ilgili; “TS 3411 Çekirdeksiz Kuru Üzüm” ve “TS 9856 Üzüm Kurutma Yerleri – Sınıflandırma, Özellikler ve Kurutma Kuralları” olmak üzere iki standard bulunmaktadır. Bu standartlar, çekirdeksiz kuru üzümün özellikleri, numune alma, muayene, deneyler, piyasaya arz şekli esasları ve üzüm kurutma yerleri konularını içermektedir.

3.2. Çekirdeksiz Üzümde Sınıflandırma ve Özellikler

TS 3411 ve 9856'ya göre çekirdeksiz kuru üzümün sınıflandırılması ve taşınması gerekli özellikleri aşağıda verilmiştir. Çekirdeksiz kuru üzümler hazırlanma şekillerine göre gruplara, renklerine göre tiplere, özelliklerine göre sınıflara ve iriliklerine göre de boylara ayrılır [36,37].

3.2.1. Gruplar

Çekirdeksiz kuru üzümler;

- Ağartılmış,
- Ağartılmamış bandırmazsız,
- Ağartılmamış bandırmalı,

olmak üzere üç gruba ayrılır.

3.2.2. Tipler

Çekirdeksiz kuru üzümler, renklerine göre 7, 8, 9, 10 ve 11 tip numaraları ile beş tipe ayrılır.

3.2.3. Sınıflar

Çekirdeksiz kuru üzümler;

- Ekstra,
- Sınıf I,
- Sınıf II,
- Endüstriyel,

olmak üzere dört sınıfa ayrılır. Bu dört sınıf çekirdeksiz kuru üzümün taşınması gereken en fazla nem değerleri ise;

- Ekstra % 18,
- Sınıf I % 18,
- Sınıf II % 18,
- Endüstriyel ise % 20'dir.

3.2.4. Boylar

Çekirdeksiz kuru üzümler iriliklerine göre;

- Çok iri,
- İri (Standard),
- Orta,
- Küçük,
- Çok küçük

olmak üzere beşe ayrılır.

3.2.5. Genel Özellikler

Çekirdeksiz kuru üzümlerde;

- Canlı böcek, ölü böcek, kurt ve bunların kalıntıları bulunmamalıdır.
- Gerektiğinde kütlege % 1,0'den fazla olmamak üzere ürünün özelliklerini bozmayan mevzuatına uygun yemeklik bitkisel sıvı yağlar kullanılabilir.
- Çekirdeksiz kuru üzümler sağlam, bütün, temiz olmalı, bunlarda yabancı tat ve/veya koku bulunmamalıdır (hafif kükürt kokusu ve hafif yağ tadı yabancı koku ve tat sayılmaz).
- Çekirdeksiz kuru üzümlerin işlenmesinde kullanılan katkı maddeleri ürünün raf ömrünü ve özelliklerini bozmayan ve mevzuatında bildirilen maddeler olmalıdır.
- Çekirdeksiz kuru üzüm, en fazla 10 µg/kg okratoksin A (küf) ihtiva etmelidir.

3.2.6. Çekirdeksiz Kuru Üzümün Mikrobiyolojik Özellikleri

Çizelge 3.1. Çekirdeksiz kuru üzümün mikrobiyolojik özellikleri

Mikrobiyolojik özellikler**	N	c	m	M
E. coli*	5	2	< 3	9
Küf, maya (kob/g)	5	2	1×10^3	1×10^4
* En Muhtemel Sayı Tekniği, (adet/ml) **n; analize alınacak numune sayısını, c; “M” değeri taşıyabilecek en fazla numune sayısını, m; (n-c) sayıdaki numunede bulunabilecek en fazla değeri, M; “c” sayıdaki numunede bulunabilecek en fazla değeri ifade eder.				

3.3. Dünyada ve Türkiye’de Çekirdeksiz Üzüm Üretimi

Dünya çekirdeksiz kuru üzüm üretiminde, her ne kadar büyük ölçüde iklim şartlarına bağlı olarak azalmalar veya artışlar görülmekte ise de bu miktarlar yıllar itibari ile 665.500 ton ile 825.000 ton arasında değişiklik arz etmektedir. Yine üretilen bu kadar üzümün 450.000 ton ile 500.000 ton arasındaki miktarı çeşitli ülkelere dış satım yapılmakta ve ortalama 255.000 tonu ise üretici ülkeler tarafından iç tüketimlerinde kullanılmaktadır. Çizelge 3.2.’de çekirdeksiz kuru üzümün üretildiği ülkeler ve üretim durumu verilmiştir. Türkiye 'de 2006 yılı verilerine göre 861.560 dekar alanda çekirdeksiz kuru üzüm üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim Ege Bölgesi’nden ve özellikle Manisa, İzmir, Denizli illerinden sağlanmaktadır. Türkiye, dünya çekirdeksiz kuru üzüm üretiminde önemli bir yere sahiptir. Türkiye, 2008 sezonunda 825.000 tonluk dünya üretimi içinde 300 bin tonluk kuru üzüm üretim miktarı ile dünya toplam kuru üzüm üretiminin % 36,3’ünü tek başına karşılamıştır [38].

Çizelge 3.2.Çekirdeksiz kuru üzümün üretildiği ülkeler ve üretim durumu (ton) [38]

Ülkeler	2006	2007	2008
Türkiye	<u>274.000</u>	<u>220.000</u>	<u>300.000</u>
A.B.D.	265.000	295.000	300.000
Şili Cum.	1.000	60.000	60.000
İran	150.000	120.000	50.000
G. Afrika	33.000	40.000	40.000
Yunanistan	0	25.000	35.000
Arjantin	1.000	23.000	30.000
Avustralya	500	12.000	10.000
Toplam	<u>724.500</u>	<u>795.000</u>	<u>825.000</u>

Çekirdeksiz kuru üzümün Türkiye'nin tarım ürünleri dış satımı içinde önemli bir yeri vardır. Üretilen çekirdeksiz kuru üzümün büyük bir çoğunluğu dış satıma konu olmaktadır. 2006 sezonunda 244.212 tonluk dış satım gerçekleştirilmiştir. 2006 yılına göre dış satımın toplam üretime oranı % 89'dur. Ülke açısından önemi büyük olan çekirdeksiz kuru üzüm, Ege Bölgesi açısından ayrı bir önem arz etmektedir. Ege Bölgesinde 100.000'i aşkın aileye istihdam imkânı sağlamaktadır. Bunun yanında üretim sonrasında; iç ve dış pazarlama sırasında değişik aşamalarda, ülke içinde çeşitli kuruluş ve kişilerin uğraşı alanına girmesi yönünden de ekonomik önemi bulunmaktadır. Bu nedenlerle 1962/63 sezonundan itibaren çekirdeksiz kuru üzüm 1963/64 ve 1964/65 yılları hariç Devlet Destekleme kapsamına alınmıştır. Tarım Satış Kooperatifleri ve Birlikleri kanunlarına göre Üzüm Tarım Satış Kooperatifleri ve Birliği, destekleme organı olarak görevlendirilmiştir. Günümüzde de bu görevini zaman zaman üstlenmektedir. 1994/95 sezonundan itibaren TARİŞ özel bünye alımları ağırlık kazanmıştır. Şekil 3.3.'de Türkiye'nin yıllık kuru üzüm dış satımı verilmiştir [38].

Çizelge 3.3. Türkiye'nin yıllar itibariyle kuru üzüm dış satımı [38]

Yıllar	Miktar (Ton)	Değer (1.000 \$)
2000	201.525	196.673
2001	225.743	163.051
2002	205.209	156.255
2003	196.020	183.959
2004	211.893	231.400
2005	226.597	239.728
2006	244.212	289.230
2007	240.599	316.827

Kuru üzüm, Cumhuriyetin ilk yıllarından itibaren Türkiye'nin dış satımındaki önemini korumuş ve geleneksel dış satım ürünlerinin arasında önemli bir yer almıştır. Türkiye'nin kuru üzüm dış satımının hemen hemen tamamını çekirdeksiz kuru üzümler oluşturmaktadır. Türkiye'nin 2007 yılı kuru üzüm dış satımı, 240 bin ton civarında olup, karşılığında ise yaklaşık 316 milyon dolarlık gelir elde edilmiştir. Bu rakam kuru üzüm dış satımımızda bugüne kadar ulaşılan en yüksek seviyedir. Türkiye'den çekirdeksiz kuru üzüm dış satımını 100 civarında ülkeye gerçekleştirmektedir. En önemli pazarlarımız; başta İngiltere, Almanya, Hollanda olmak üzere Avrupa Birliği ülkeleridir. Aşağıdaki Çizelge 3.4.'de Türkiye'nin yıllar itibariyle kuru üzüm dış satımı verilmiştir.

Çizelge 3.4. Türkiye'nin kuru üzüm dış satımı (Miktar: Ton, Değer: ABD \$) [38]

	KURU ÜZÜM	2006		2007	
Sıra	Ülke Adı	Miktar	Dolar Değeri	Miktar	Dolar Değeri
1	İngiltere	62.503	76.639	63.301	84.652
2	Almanya	45.642	52.833	40.314	52.635
3	Hollanda	31.685	36.278	32.413	42.064
4	İtalya	21.794	25.595	18.964	26.829
5	Fransa	15.542	18.697	16.498	21.212
6	Avustralya	14.454	16.527	16.960	20.575
7	Belçika	8.611	10.016	9.473	12.401
8	Kanada	3.760	4.456	5.900	7.332
9	İrlanda	6.590	7.218	5.872	7.117
10	Yeni Zelanda	4.182	4.923	4.254	5.460
11	Diğer	29.444	36.043	26.645	36.544
	TOPLAM	244.212	289.230	240.598	316.826

AB'ye çekirdeksiz kuru üzüm dış satımında en önemli konu olarak AB'nin insan sağlığına yönelik aldığı önlemler ve bu çerçevede belirlediği standartlar gelmektedir. Bunların başında ağır metaller, mikotoksinler (aflatoksin, okratoksin A, küf ve mayalar gibi) ve kükürt dioksit konuları için belirlenen limitler gelmektedir. Türkiye üretim koşulları itibarıyla AB veya diğer ülkelerin istediği limitlerin yanı sıra Türk Gıda Kodeksi'ne dahi uyamamanın sıkıntısını çekmektedir [38].

3.4. Türkiye’de Çekirdeksiz Üzümün Kurutulması

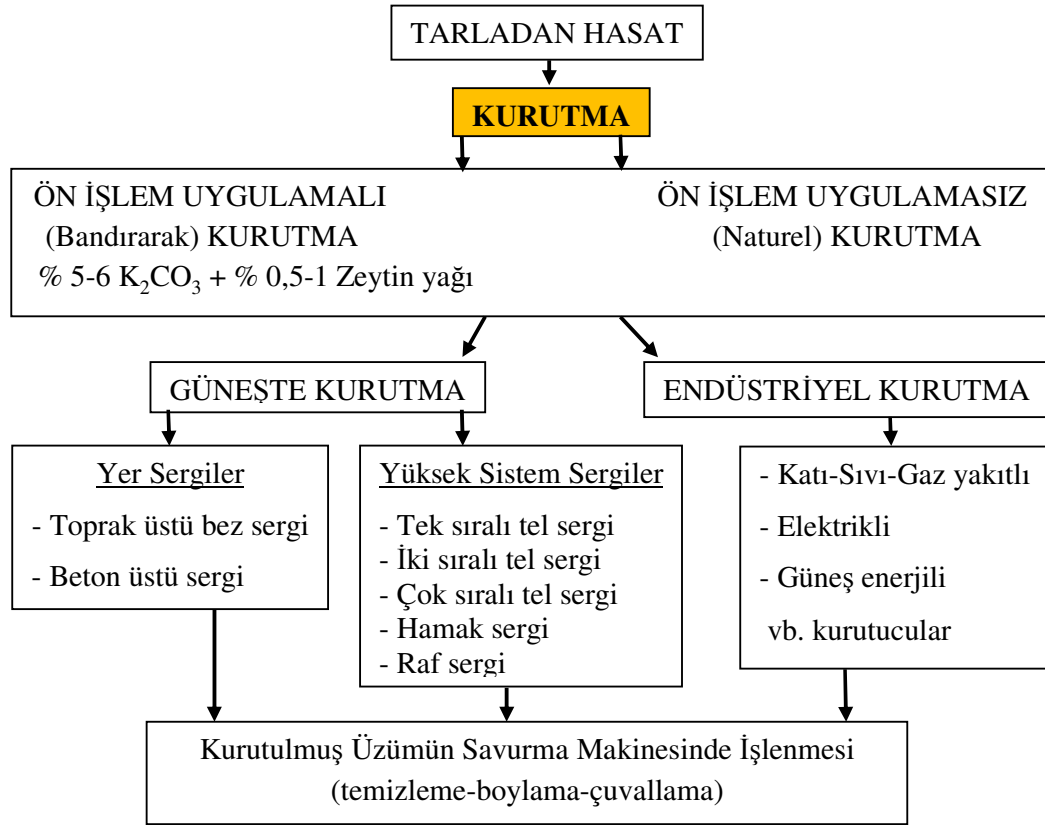
Türkiye’de üreticiler üzümü açık havada doğal usulle güneş enerjisinden faydalanarak; toprak üstü kanaviçe bez üzeri yer sergilerde, beton üzerinde ve raf şeklinde gerilmiş tellere asarak kurutmaktadırlar. Bunun sonucu olarak, yer sergi alanları bağlarda geniş yer kaplamakta ve bu durum tarım alanlarında önemli tarım alanı kaybı oluşturmaktadır. Yer sergilerin en önemli sakıncası; kurutma sırasında üzüme yapışan toz, çöp, taş, toprak parçalarıdır. Ayrıca kuru üzümün kalitesini düşüren yabancı maddelerin varlığına ilaveten, kuruma esnasında üzümün üzerine yerleşen mikro organizmalar daha sonraki muhafaza sırasında, şekerli üzüm üzerinde üreyerek çoğalmaktadır. Çekirdeksiz kuru üzümün önemli bir dış satım ürünü olarak hak ettiği yeri alması için yabancı madde ihtiva etmemesi, mikro bakteriyolojik yük bakımından dünya standartlarının üstüne çıkması, ayrıca renk, koku, tat ve nem bakımından da uluslararası standartları tutturması gerekmektedir.

Açık havada, yer sergilerde üzüm kurutulması esnasında sabahları çiy oluşması ve bazen yağmur yağmasıyla kuruma sürecinin uzamasına (12-20 gün) üzümün küflenmesine sebep olmaktadır. Örneğin; Manisa’da her yıl ürünün 1/3’ü yağmurlardan zarar görmektedir. Anayol kenarlarındaki sergilerde araba egzoz gazlarının bıraktığı kurşunun bir miktarının kuru üzümlere yüklenmesi de önemli sakıncalar arasındadır [39, 40].

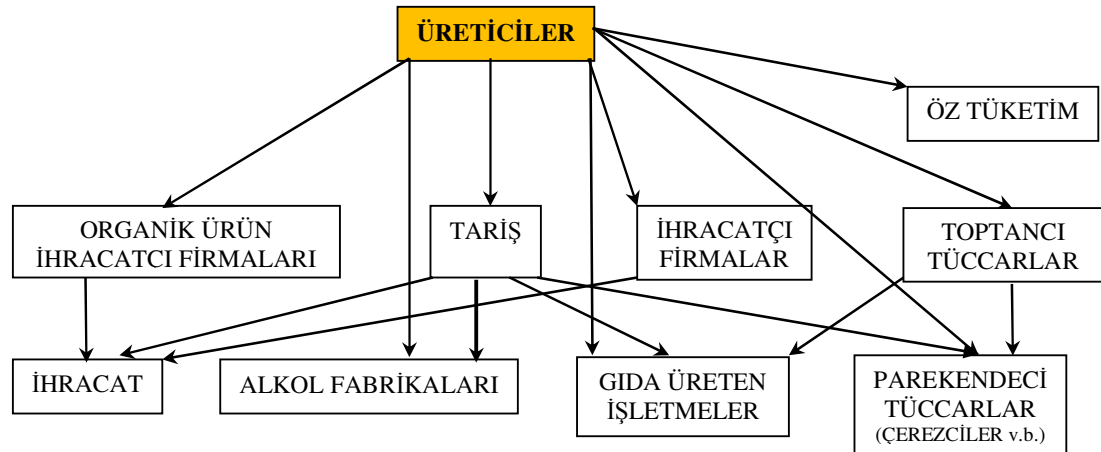
Açık havada, sergide kurutmanın sakıncalarını göz önüne alan ve ekonomik gücü olan ve kendi başına dış satım yapan birkaç tane denecek kadar az sayıdaki üretici bağlarında, kapalı ortamda cebri kurutma sistemleri kurmuşlardır. Bu kurutma sistemleri kabin, tünel ve güneş enerjili sera tipindedir. Bu yerlerde elektrik ya da sıvı veya katı yakıt enerjisinden faydalanılmaktadır. Bu gibi kurutma sistemlerinin kuruluş ve işletme maliyetleri oldukça yüksek olmaktadır. Bu nedenle üreticilerin hemen hepsi bu gibi sistemlere itibar etmemektedir.

Üzümler kurutulmadan önce üzerlerindeki mum tabakasının uzaklaştırılabilmesi için “potasa” adı verilen %5-6’lık K_2CO_3 çözeltisine bandırılır. Bu çözelti içersine % 0,5 zeytinyağı eklenerek bir emülsiyon haline getirilir. Kurutulacak ürünler potasa çözeltisine daldırılıp, kısa bir süre tutulduktan sonra (4–5 sn.) süzülür ve kurutma alanına serilirler. Bandırma işleminin yapılmaması durumunda üzümlerin kuruma kalitesi çok düşük olup, kuruma süresi de iki katına uzamaktadır. Çekirdeksiz üzüm kurutma süreci ve kuru üzüm pazarlama kanalları Şekil 3.1.’de verilmiştir.

Bandırılmış üzümler 1 m²’ye yaklaşık 15–20 kg. ürün düşecek şekilde serilir ve uygun hava şartlarında 9–10 gün içinde yaklaşık %15 nem oranına gelecek şekilde kururlar. Üzümün kurutulması sırasında karemelizasyon oluşmaması için kurutma hava sıcaklığının 65 °C’yi geçmemesi gerekir. Bandırılmış üzümler bu sıcaklıktaki hava akımına sahip şartlarda 20–24 saat içinde %15 nem düzeyine kadar kuruyabilmektedir. Çekirdeksiz üzümün olgunlaşma oranına bağlı olarak kuruma sonrası gerçekleşen kütle kaybı %75 oranındadır. Taze halde iken yaklaşık %75 neme sahip olan üzümleri dışarıdan ısı uygulamak suretiyle yaklaşık %15 nem seviyesine düşüncüye kadar kurutmak gerekmektedir. Türkiye’de kuru üzüm işletmesi iş akış şeması Şekil 3.2.’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çekirdeksiz üzüm kurutma süreci.



Şekil 3.2. Çekirdeksiz kuru üzüm pazarlama kanalları [41].

KURU ÜZÜM İŞLETMESİ
İşletmeye Hammadde Girişi
Ön Eleme ve Kalburlama
Naturel Kalburlama
Kaskadlı Yıkama (taş alma)
Zenepkıran [zenep (tane sapı) alma]
Kurutma
Yağlama (bitkisel yağ ile yağlama)
Kasalama
Dinlendirme (en az 2 gün ürünü bekletme)
Mamul Kalburlama
Lazerli Ayıklama
X-Ray ile Ayıklama
Sterilizasyon (ısıl işlem – Ör: 60 °C'de 40 dak.)
Metal Detektöründen Geçirme (ürün dökme olarak metal detektöründen geçirilir)
Kutulama ve Tartım (10-14 kg'lık karton kutulara konup tartılır)
Metal Detektöründen Geçirme ve Kutu Kodlama
İstifleme ve Mamulü Depoya Taşıma

Şekil 3.3. Örnek bir kuru üzüm işletmesi iş akım şeması [42, 43].

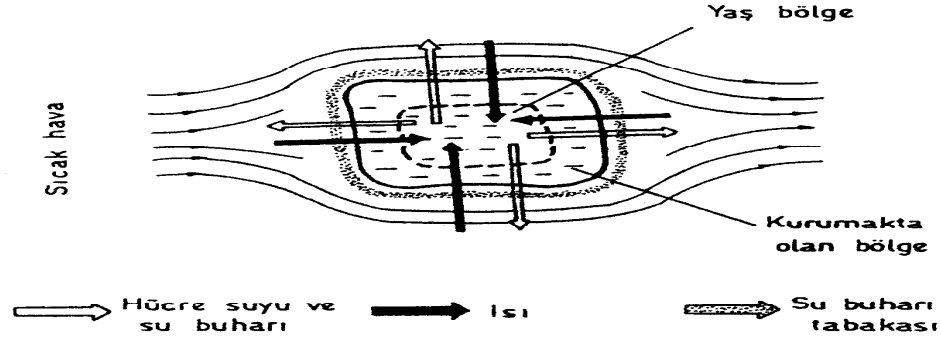
4. KURUTMA TEKNİĞİ

Kurutuma; gıdaların uzun süre muhafaza edilmesi için, insanın doğadan öğrendiği ve ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski ve en yaygın gıda saklama yöntemidir. Dünyada tarım ürünleri hem endüstriyel hem de doğal şartlarda kurutulmaktadır. Açıkta ürün kurutma; ürünün sağlığa uygunluğu (bakteriyolojik), renk ve lezzet gibi özellikleri istenilen şartlarda olamaması dolayısıyla; ürünün kalitesi düşmekle birlikte zaman ve işçilikte de büyük kayıplara sebep olmaktadır. Ayrıca açıkta tabii kurutmada meteorolojik etmenler de ürün kayıplarına neden olmaktadır. Endüstriyel kurutmada ilk yatırım maliyeti ve enerji maliyeti girdileri yüksek olduğundan ürün maliyetleri artmaktadır. Ancak kurutmanın kapalı şartlarda kontrollü olması; ürün kalitesi, zaman, işçilik, mikro biyolojik ve ürün kaybının azaltılması yönünden büyük faydalar sağlamaktadır.

Bir ısı ve kütle geçişi olayı olan kurutma, ısıнын gıdaya transferiyle gıdanın yapısında bulunan suyun gıdadan uzaklaştırılmasıdır. Düşük nem içeriğine ulaşan gıda maddelerinde mikrobiyal bozunmalar en aza indirileceğinden gıda maddelerinin raf ömrü artar, ağırlık ve hacimdeki önemli azalmalar paketlenme, taşıma, depolama ve dağıtım maliyetlerinin azaltılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, kurutma ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin muhafazası da sağlanmaktadır.

Genel olarak bir katı maddenin kurutulmasında Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi iki fiziksel olay meydana gelmektedir. Bunlar:

- Kurutulacak maddenin suyunu buharlaştırmak için gerekli ısıнын malzemeye iletilmesi (ısı geçişi),
- Buhar halindeki suyun hava akımı ile kurutma bölgesinden uzaklaştırılması.(kütle geçişi).



Şekil 4.1. Kurumada bitkisel hücredeki ısı ve nem hareketi [4]

4.1. Kuruma Hızını Etkileyen Faktörler

Kuruma hızı, doğrudan doğruya ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilir. Bu faktörlerin başlıcaları; sıcaklık, nem ve kurutucudaki hava hızı, kurutulacak maddeye en fazla yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parçanın iriliği, şekli, yığın kalınlığı vb.) gibi fiziksel faktörlerle kurutulan maddenin başta bileşimi olmak üzere kendine özgü nitelikleridir. Kurutma hızını etkileyen faktörlerden başlıcalar şunlardır [44]:

Sıcaklık: Kuruma hızını etkileyen en önemli faktörlerden birisi, kullanılan sıcak havanın kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farktır. Yaş ve kuru termometre dereceleri arasındaki fark arttıkça kuruma hızı da artar. Bu doğru orantılı etki kurumanın başlangıcında çok belirgin ise de kuruma ilerledikçe yaş ve kuru termometre dereceleri arasındaki fark arttıkça kuruma hızı aynı oranda artmaz. Yaş ve kuru termometre sıcaklıkları farkı sabit kalmak şartı ile kuru termometre sıcaklığı daha yüksek olan havanın kullanılması halinde kuruma başlangıcında kuruma hızında herhangi bir değişme görülmemesine karşın, kuruma ilerledikçe kuruma hızında artış olur. Çünkü kurumanın ileri aşamalarında kuruma hızını sınırlayıcı faktör, iç tabakalardaki suyun yüzeye difüzyonudur. Sıcaklık farkı artınca bu difüzyon olayı hızlanmakta ve buna bağlı olarak da kuruma hızı yükselmektedir.

Kurutma havasının hızı: Kuruma hızına etki eden diğer bir faktör kurutucudaki hava hızıdır. Hava hızı arttıkça kuruma hızı da artmaktadır. Kurutulan maddenin yüzeyinde kuruma esnasında daima durgun bir buhar filmi oluşur. Eğer bu filmin oluşması önlenir, daha doğrusu bu film, sürekli olarak uzaklaştırılırsa, suyun buharlaşmasında bir hızlanma belirir. İşte bu hava hızı, oluşan buhar filmini devamlı olarak sürüklemek suretiyle kuruma hızını artırıcı yönde etkide bulunmaktadır. Ancak, bu etki belli bir hava hızına ulaşana kadar görülmektedir. Kurumanın başlangıç aşamalarında hava hızı çok etkili olsa da kurumanın ileri aşamalarında kuruma hızı alt tabakalardaki suyun yüzeye taşıma hızı ile sınırlandırıldığından, hava hızının yüksek olmasının bu konuda bir etkisi bulunmamaktadır.

Kurutulan maddenin yüzey alanı: Kurutma hızı kurutulacak ürünün yüzey alanı ile doğru, kalınlıkla ters orantılıdır. Bu nedenle kurutulacak ürün ne kadar küçükse yüzey alanı o kadar fazla, kalınlığı o kadar az olacağından kuruma hızı olumlu yönde etkilenmektedir. Meyve ve sebzelerde kurumanın başlangıç aşamasında iri ve daha küçük parçalar halinde doğranmış dokular arasında, kuruma hızı bakımından belirgin bir fark görülmez. Ancak zaman ilerledikçe kuruma hızı parça iriliğine göre önemli ölçüde değişir. Çünkü özellikle azalan hızla kuruma evresinde iç tabakalardaki suyun yüzeye difüzyonu, iri parçalarda zorlaşmakta ve kuruma hızı düşmektedir. Parça iriliğinin kuruma hızına bu önemli etkisinden, kurutulacak meyvelerin küçük parçalar halinde kurutulması yararlıdır.

Kurutma havasının nemli: Isı ve kütle aktarım hızını etkileyen bir diğer faktör kurutma havasının kuruluğudur. Hava, kurutucu ortam olduğunda ya da ürün hava içinde kurutulduğunda kuruma hızı, havanın kuruluğu ile yakından ilgilidir. Kuru hava soğurucu (absorbe edici) ve tutucu özellik taşır. Buna karşın nemli hava doygunluğa yakındır ve kuru havaya kıyasla daha az nem soğurur.

Ortam basıncı: Bilindiği gibi su, 760 mm cıva basıncında 100°C’de kaynar. Kaynama sıcaklığı sabit tutularak basınç düşürüldüğü sürece kaynama işlemi hızlanacaktır. Ürünü atmosfere kapalı bir ortama koyarsak ürünlerdeki su daha düşük sıcaklıklarda uzaklaştırılabilir.

Diğer değişkenler: Yukarıda sayılan değişkenler dışında kurutma hızı ve son ürün kalitesi üzerinde önemli etkileri olan diğer faktörler; ürünün su tutma özelliği ve kimyasal bileşimi gibi ürünün kendine has özellikleridir. Eğer şeker, yağ vb. maddelerce zengin bir materyalin normal materyale göre daha zor kuruduğu görülür.

4.2. Nemlilik Ölçüsü

Kurutma işleminde materyalin nemi, çevresindeki katı veya akışkan (sıvı veya gaz) fazdaki ortama geçer. Kurutma işlemlerinde çevre genellikle havadır. Bu nedenle kurutma, nemli materyal ile hava arasındaki bir ilişkidir.

Tarım ürünlerinde bulunan nem miktarları, bünyede tutulmuş bulunan su ağırlığı olarak ele alınır. Su miktarı, “%” olarak oransal biçimde tanımlanır. Nem miktarının tanımlanmasında “Yaş Baz” (yb.), “Kuru Baz” (kb.) olmak üzere iki tanımdan biri kullanılır. Yaş bazı, çiftçiler tarafından ve tahıl pazarlarında kullanılır, kuru esas ise kuruma hızlarını belirlemek için mühendisler ve bilim adamları tarafından kullanılır [45].

Yaş baza göre nem, ürünlerdeki su ağırlığının ürünün tüm ağırlığına oranı olarak;

$$M_{yb} = \frac{W_s}{W_s + W_k} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.1)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Kuru baza göre nem, ürünlerdeki su ağırlığının ürünün kuru ağırlığına oranı da;

$$\% M_{kb} = \frac{W_s}{W_k} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

eşitliği ile belirlenir.

Kuru ve yaş baza göre saptanan nem oranları;

$$M_{kb} = \frac{M_{yb}}{100 - M_{yb}} \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{ve} \quad M_{yb} = \frac{M_{kb}}{100 + M_{kb}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

eşitlikleri yardımıyla birbirine çevrilebilir.

Özellikle ticari uygulamalarda, kuruyarak nem oranı azalan bir ürün yığınının yeni ağırlığını bulmak ya da eski nemine getirmek için eklenecek su miktarını belirlemek önem kazanmaktadır.

Kurutma ile ağırlık azalması ürünün ilk ağırlığı (W_1) ve son ağırlığı (W_2) biliniyorsa,

$$\Delta W_1 = W_1 \cdot \frac{M_1 - M_2}{100 - M_2} \quad \text{ve} \quad \Delta W_2 = W_2 \cdot \frac{M_1 - M_2}{100 - M_1} \quad (4.4)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Kuruyan ürünün ağırlığının hesabı için de;

$$W_2 = W_1 - \Delta W \quad (4.5)$$

eşitliği kullanılır.

Ürün kurutma işlemlerinde, denge nem içeriğinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ürünün denge nemi, o andaki çevre koşullarında ürünün bünyesinde bulundurabileceği sınır nem miktarını belirtmede kullanılır. Denge nemi, çevre havasının nem ve sıcaklık koşullarıyla olduğu kadar ürünün tür, cins ve olgunluğuna bağlı değişiklik göstermektedir. Her bir ürünün belirli sıcaklık ve nem içeriğinde, kendine özgü bir su buharı basıncı vardır. Ürün nemli hava ile karşılaştığında ya nem kazanmakta ya da nem kaybetmektedir. Eğer ürün neminin buhar basıncı, içinde bulunduğu havanın buhar basıncından fazla ise ortama nem verir, az ise ortamdaki nem alır. Ortamın koşulları değişmedikçe ürün nem içeriğinde bir değişim olmaz. Ürün, içinde bulunduğu ortam ile arasında nem açısından bir dengenin oluşması

durumunda bünyesindeki nem “Denge Nemi”, o anda havanın içerdiği bağıl nem değerine de “Denge Bağıl Nemi” denilmektedir. Denge nemi içerisindeki değişimler; ürün çeşidi, ürün olgunluğu, bağıl nem ölçme teknikleri ve denge nem içeriği belirleme yöntemleridir [46].

Kuruma sırasında materyal neminde meydana gelen değişimler ve etkili unsurlar, statik ve kinetik açılarından incelenebilir [6].

4.3. Kurumanın Statiği

Statik açıdan kurumanın incelenmesi sırasında, hava ile materyal arasındaki nem dengesi, zaman dikkate alınmadan irdelenir. Denge, materyalin çevre havasına nem vermesi (desorpsiyon) veya çevreden nem alması (sorpsiyon) sonucunda oluşur. Denge oluştuğunda, havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı (P_u) birbirine eşittir. Kuruyan materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak çevre havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğundan ($P_u = P_b$) alınabilir. Bu nedenle denge durumunda materyalin ulaştığı nem (M_d), havanın kısmi buhar basıncına ve sonuç olarak bağıl nemine (ϕ) bağlıdır.

Kurumakta olan materyalin hava ile arasındaki nem alışverişi sonucunda ulaşabileceği üst nem sınırı, o materyalin “Higroskopik Limiti” olarak tanımlanır. Bir başka söyleyişle; higroskopik limit %100 olduğu şartlarda, materyalin ulaşabileceği en yüksek denge nemi değeridir (M_{ds}). Materyalin higroskopik limitinden fazla nem alması, ancak serbest suyla doğrudan doğruya temasa gelmesi sonucunda söz konusu olabilir

Bu duruma örnek, materyalin suya batırılması veya iyice ıslatılmasıdır. Herhangi bir materyalin sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelendiğinde sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 4.2’de gösterilen şekilde belirtilebilir. Şekil 4.2.’de görüldüğü gibi izotermin DBN eksenine ile arasında kalan bölge, materyalin bünyesine

4.4. Kurumanın Kinetiği

Kurumanın kinetik açıdan incelenmesi sırasında materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman da dikkate alınarak irdelenir. Herhangi bir materyalin kuruması kinetik açıdan incelenirken;

Materyalin nemi ile kuruma süresi : $M=f(t)$

Kuruma hızı ile materyal nemi : $dM/dt=f(M)$

Kuruma hızı ile kuruma süresi : $dM/dt=f(t)$

Materyal sıcaklığı ile nemi : $T=f(M)$

arasındaki ilişkiler dikkate alınır.

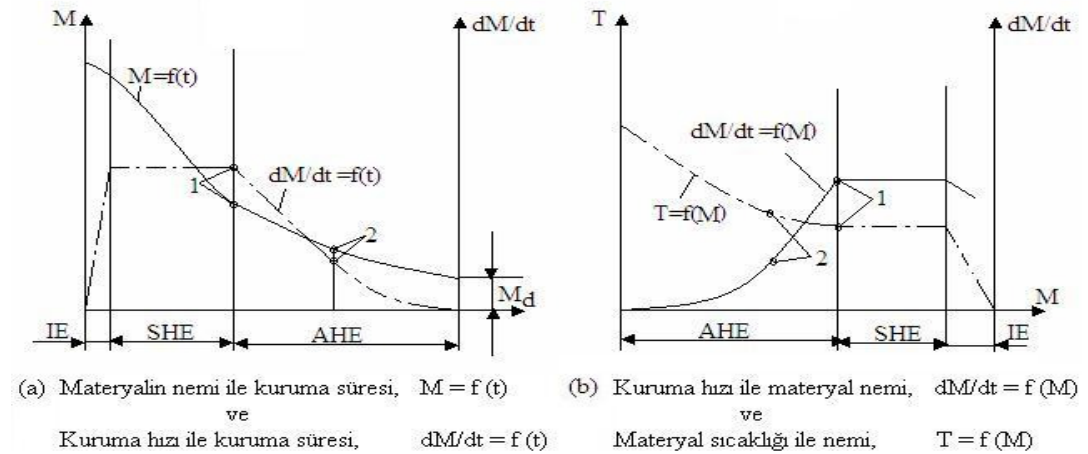
Kuruma süreci içinde üç karakteristik evreyle karşılaşılmaktadır. Bu evreler şekil 4.3.'te verildiği gibi;

Ürünün ısınma evresi (IE)

Sabit hızla kuruma evresi (SHE)

Azalan hızla kuruma evresi (AHE)

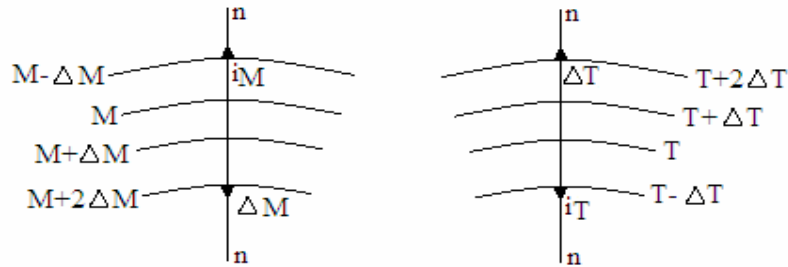
şeklinde adlandırılabilir.



Şekil 4.3. Kurumanın kinetik eğrileri [6]

Yapısı içinde nem ve sıcaklık dağılımının tekdüze olduğunu varsaydığımız bir materyal, kendisinden daha sıcak bir ortama yerleştirildiğinde, çevreden ısı alarak sıcaklığı artmaya başlar. Sıcaklık artışı, yüzeyden başlayarak materyalin iç kısımlarına doğru ilerler. Sıcaklık artışına paralel olarak, yüzeyde bulunan nem hızla buharlaşarak ayrılır. Bu oluşumların sonucunda materyalin içindeki nem ve sıcaklık dağılımının başlangıçtaki tek düzeliği bozulmaya başlar. Yüzey sıcaklığı iç kısımlara göre artarken, bu katmanlardaki nem giderek azalır. Materyalin yapısı içinde, sıcaklık ve nem konsantrasyonu açısından farklı değerlere sahip katmanlar oluşur. Bu katmanlarda oluşan eşit sıcaklıktaki noktaların birleştirilmesiyle izotermal, eşit nem değerine sahip noktaların birleştirilmesiyle de izopotansiyel çizgileri elde edilir (Şekil 4.4.).

Kuruyan materyalde, nem konsantrasyonu iç katmanlardan dışa doğru azalırken, sıcaklık değeri ise ters yönde, dış katmanlardan içe doğru azalır. Materyalin içindeki nemin hareketi sırasında bu iki gradyentin etkisi birbirine terstir. Nem, konsantrasyon farkına bağlı olarak, iç kısımlardan dış katmanlara doğru hareket eder. Sıcaklık farkına bağlı olan nem hareketinin yönü ise sıcaklık dış katmanlarda daha yüksek olduğundan dıştan iç kısımlara doğrudur.



Şekil 4.4. Kuruyan materyalde oluşan izotermal ve izopotansiyel çizgileri [6]

Sıcaklık ve nem gradyentlerine göre oluşan nem hareketlerinin birbirine zıt yönlü olması nedeniyle, kuruma sırasında bunlardan hangisi daha baskın durumdaysa, nem o etkenin belirlediği yönde hareket eder. Diğeri ise, nemin taşınımında bir direnç unsuru olarak ortaya çıkar. Araştırmalar, tarım ürünlerinin taşınım ile kurutulmaları sırasında nem taşınımının, nem konsantrasyonu farklılaşması tarafından daha çok

etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle nem taşınım yönü, ürünün iç kısımlarından dışa doğrudur. Sıcaklık konsantrasyon farkından doğan ters etki nedeniyle kuruma hızındaki azalma, oransal olarak ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

Kuruma başlangıcında görülen ısınma evresi (IE) sırasında materyalin yüzey sıcaklığı hızla yükselir. Kuruma hızı (birim zamanda buharlaşarak uzaklaşan nem miktarı) giderek artar ve bu evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır. Materyalin ortam havasından bir denge sıcaklığı oluşana kadar ısıtılması nedeniyle ortaya çıkan IE süresinin, tüm kuruma süresine kıyaslanınca çok kısa olduğu anlaşılır. Bu nedenle genellikle dikkate alınmaz ve kuruma eğrilerinde gösterilmez.

Kuruma sırasında IE'nin sona erdiği andan itibaren sabit hızla kuruma evresi (SHE) başlar. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi bu evre sırasında $[M=f(t)]$ eğrisi oldukça doğrusal bir değişim gösterir. Kuruma hızı eğrisi $[dM/dt=f(M)]$ ise bu evre boyunca apseye paralel olarak uzar. Bu durum kuruma hızının, IE sonunda ulaştığı en yüksek değerinin SHE süresince de korunduğunu göstermektedir.

SHE sırasında nem, materyalin yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan suyla aynı davranışı göstererek buharlaşır. Nemin buharlaşması için kullanılan ısıнын tümü suyun buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılır, materyali ısıtmaz. Bu nedenle, buharlaşma süresince yüzey sıcaklığı sabit kalır. Taşınım ile kurutma sırasında materyal yüzey sıcaklığının, büyük bir yaklaşıklıkla kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir. Bu kabul sırasında, iletim ve ışıınım yoluyla ısı geçişinin ihmal edilebilecek ölçüde küçük olduğu varsayılabilir.

SHE süresince materyal yüzeyi tamamen suyla kaplı olmalıdır. Bu nedenle birim zaman dilimi içinde iç katmanlardan yüzeye iletilen su miktarı, aynı zaman diliminde yüzeyden buharlaşan su miktarına eşit olmalıdır. Bir başka söyleyişle, SHE süresince suyun yüzeye iletim hızı ile yüzeyden buharlaşma hızı birbirine eşit olmalıdır.

SHE sırasında; suyun materyal yüzeyine kılcal borucuklar, ozmotik basınç, büzülme nedeniyle oluşan sıkıştırma basıncı vb. etkilere bağlı olarak taşındığı kabul edilir. Kuruyan materyalin iç kısımlarından yüzeye doğru süren nem geçişi nedeniyle, iç katmanlardaki nem miktarı giderek azalır ve buna bağlı olarak tabakalar arasındaki konsantrasyon farkı küçülür. Materyal içindeki tabakalar arası konsantrasyon farkının azalması, bu etkene bağlı olarak hareket eden su miktarının azalmasına neden olur. Ortaya çıkan bu yeni durum nedeniyle, kurumakta olan materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, iç kısımlardan yüzeye ulaşamaz. Bunun sonucunda, materyal yüzeyinin tamamen serbest suyla kaplı olan durumu sona erer. Yüzeydeki nem, materyalin higroskopik limit değerine iner ve kuruma eğrilerinin eğimlerinde belirgin sapmalar gözlenir. Bu anda materyalin sahip olduğu nem düzeyine “Birinci Kritik Nem” ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya “Birinci Kritik Nokta” (BKN) adı verilir (Şekil 4.3.’de 1 numaralı nokta).

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılabileceği gibi SHE, IE’nin sona erdiği nokta ile BKN arasında yer alır. Bu evre sırasında buharlaşan su miktarı, kuruyan materyalin cinsine, tipine ve şekline bağlı değildir. SHE sırasında buharlaşma hızının;

- Materyal yüzeyindeki suyun buhar basıncı ile kurutma havasının kısmi buhar basıncı arasındaki fark,
- Kurutma havası hızı

ile ilgili olarak tamamen çevre koşullarına bağlı olduğu kabul edilir.

Tarım ürünlerinin, özellikle tahılların, hasat sırasında sahip oldukları nem genellikle BKN değerinden daha azdır. Bu nedenle, sebze ve meyvelerin dışında kalan çoğu tarım ürününün kurutulması sırasında SHE’ ne rastlanmaz.

BKN değerinden sonra kuruma eğrisinin eğimi, azalan yönde hızla değişir. Bu noktadan itibaren, kuruma hızının zaman içinde giderek azaldığı bir başka evre başlar. Bu evre, ardışık birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının bir

önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi nedeniyle azalan hızla kuruma evresi (AHE) şeklinde tanımlanır.

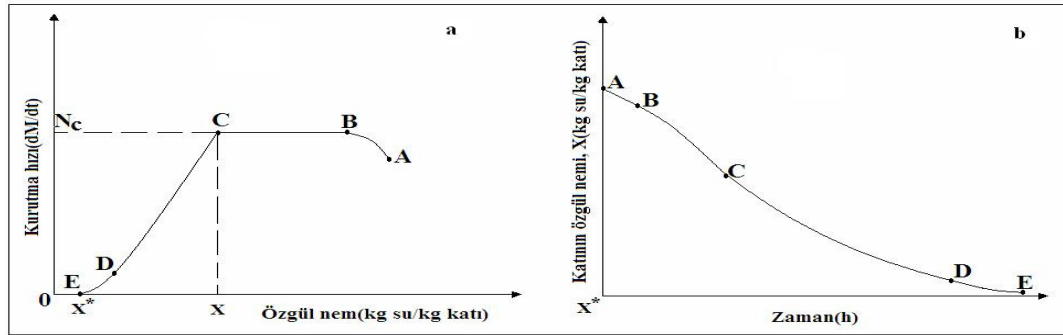
AHE sırasında suyun materyalin iç kısımlarından yüzeye taşınım hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızından az olduğu için materyal yüzeyini tümüyle kaplayan ince su tabakası ortadan kalkar ve yer yer kuru bölgeler oluşur. Yüzeyde oluşan su buharı basıncı, SHE sırasındaki doymuş buhar basıncı değerinden daha küçük değerlere iner. Yüzeydeki kuru alanların artmasıyla, materyal ısınmaya ve yüzey sıcaklığı kurutma havasının yaş termometre sıcaklığının üzerine çıkmaya başlar. Yüzey tabakalarından iç katmanlara doğru ilerleyen sıcaklık artışının etkisiyle nem, materyalin içinde buharlaşmaya ve yüzeye gaz difüzyonu yoluyla ulaşmaya başlar. Kurumanın ileri aşamalarında, materyalin nem içeriği azaldıkça, suyun yüzeye ulaşmasında içsel buhar difüzyonun önemi artar. Bu sonuç, SHE sırasındaki yüzey buharlaşmasına karşılık, AHE sırasında yüzeyden iç kısımlara doğru kuruma ilerledikçe kalınlığı giderek artan bir tabakadan, bölgesel bir buharlaşmanın ortaya çıktığını göstermektedir.

AHE'nin başlarında yüzeye nem taşınımı üzerinde, SHE' deki unsurların etkili olduğu görülür. Bu nedenle, AHE'nin başlarında buharlaşma hızının değişimi, yaklaşık olarak doğrusaldır. Ancak belirli bir nem değerinden sonra kuruma hızında nem azalmasında ve materyal sıcaklığı artışında izlenen düzgünlük değişir. Sıcaklık artışı hızlanırken, kuruma hızı ve nem azalması yavaşlar. Değişim eğrisel bir görünüm alır. Bu durum Şekil 4.3.'de verilen ilgili eğrilerden de görülebilir. AHE sırasında kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya "İkinci Kritik Nokta" (İKN) ve materyalin bu andaki nem değerine "İkinci Kritik Nem" adı verilir. AHE sonunda, materyalin sıcaklığı ile çevrenin sıcaklığı eşit hale gelir. $M=f(t)$ eğrisi M_d değerine, $dM/dt=f(M)$ eğrisi sıfır değerine ulaşır ve birbirine asimptot olurlar (Şekil 4.3.). AHE sırasında kuruma hızı, dış çevre ile materyal içyapısının özelliklerinden etkilenir. Bu evrenin başlarında, SHE'de olduğu gibi dış etkenler daha önemlidir.

Bir ürünün kuruma davranışı bazı grafiklerle ifade edilebilmektedir. Bunlar Şekil 4.5.'te;

- Kuruma hızı – Ürün Nemi,
- Ürün nemi – Zaman

değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Kuruma eğrileri [4]

Yukarıdaki grafiklerden de görülebileceği gibi nemli bir ürünün kuruma süreci içerisinde genel olarak üç farklı evre görülmektedir.

- Isınma Evresi (A-B)
- Sabit Hızla Kuruma Evresi (B-C)
- Azalan Hızla Kuruma Evresi (C-D)

Kurutucularda ürünün kurutulması için kullanılan havanın hızı, nemi, sıcaklığı ve kuruyan yüzey üzerindeki akış yönü sabittir. Kurutulacak olan ürünün ağırlığı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenerek (kuru madde bazında) nem içeriği tespit edilebilir. Şekil 4.5.a'da bu durumun değişim grafiği görülmektedir. Burada C değeri, kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma kritik nokta adı verilir. Kritik nokta sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Kurutma hızı eğrisi kurumadaki çeşitli dönemleri içermektedir.

Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı kademeli olarak azalır. Bunu maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması izler. CD bölgesinde ise ürün yüzeyine difüze edilebilen su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit kalmakta ve CD bölgesinde ise doğrusal olmaktadır. DE bölgesi, ürün içindeki suyun yüzeye çok yavaş difüze edildiği bölgedir.

Şekil 4.5.b’de AB bölgesi kurutucu ve ürünün ısınma süresini göstermektedir. BC bölgesinde buharlaşma ürünün yüzeyinde oluşan sıvı film tabakası ile gerçekleşmektedir.

4.5. Kuruma Sırasında Isı ve Kütle Geçişi

Yaş bir materyalin kuruması sırasında, hem materyalin içinde ve hem de kurutma ortamının materyal yüzeyine temas ettiği sınır tabakada, sürekli olarak ısı ve kütle geçişleri meydana gelir. Bu geçişler genel olarak, kuruyan materyalin iç şartları ile materyalin dışındaki kurutma ortamına ait çeşitli şartlardan etkilenir. Kuruma üzerinde etkili olan bu şartların etkinlik değerleri, kuruma evresine göre değişebilir. Örneğin, sabit hızla kuruma evresinde ısı ve kütle geçişleri, esas olarak materyal üzerindeki sınır tabakanın iletim özelliklerine bağlı değildir. Oysa azalan hızla kuruma evresinde, öteki etkenlere ek olarak materyalin iç yapısının iletme gösterdiği direnç de önemli bir etken olarak ortaya çıkar.

Tarım ürünlerinin kurutulması sırasında bünyeden ayrılacak nemin öncelikle ürünün yüzeye ulaşması gerekir. Ürün içinde nemin yüzeye doğru ilerlemesini sağlayan birçok etken bulunmaktadır. Bu etkenlerin en önemlileri arasında; [6]

- Kılcal borulardaki su hareketi,
- Kuruma sırasında materyalin büzülmesi ve bu nedenle ortaya çıkan sıkışmanın hızlandırdığı nem akışı,
- Nem ve sıcaklık konsantrasyon farkına bağlı olarak nem difüzyonu,

- Materyalin yüzeyinden çevreye olan buhar ve su difüzyonu,
- Materyalin yüzeyinden daha alt katmanlarda oluşan buharlaşma nedeniyle meydana gelen gaz difüzyonu, materyal bünyesindeki buhar basıncı ile çevre havasının kısmi buhar basınçları arasındaki fark,
- Çevre havasının sıcaklığı, bağıl nemi ve basıncı sayılabilir.

Kurutma işlemleri sırasında gerekli olan ısıнын kuruyan materyale geçişi sırasında taşınım, iletim, ışıınım ve elektromagnetik enerjinin hacimsel absorpsiyonu yollarından biri ya da birkaçının birlikte yararlanılabilir. Tarım ürünlerinin kurutulmasında en çok kullanılan yöntem, taşınım ile ısıtma yöntemidir. Bu yöntemde, kurutma ortamı (çevre) olarak materyalden daha sıcak hava kullanılmaktadır. Kurutucu hava, nemli materyale nemin buharlaşması için gerekli ısıyı iletir, buharlaşan suyu bünyesine alır ve ortamdan uzaklaştırır. Tarım ürünlerinin taşınım ile ısıtılması ve kurutulması sırasında aralarında bağıntılar bulunan birçok olay ardışık olarak birbirini izler. Bu olaylar;

- Sıcak havadan kuruyacak materyalin yüzeyine ısı iletimi,
- Isının, yüzeyden iç katmanlara doğru ilerlemesi,
- Nemin, iç kısımlardan yüzeye doğru ilerlemesi,
- Nemin buharlaşarak çevredeki gaz ortamına (hava) difüzyonu şeklinde sıralanabilir.

Kurutma ortamından nemli materyale ısı geçişi ve ısıнын materyal içinde yayılması, genel ısı iletim konularının kapsamına girer. Kurumakta olan bir materyalin içindeki nemin katmanlar arasında hareketi, buharlaşması ve çevredeki hava içine difüzyonu ise genel bir kütle iletimi olgusudur. Bu nedenle, tarım ürünlerinin kurutulmasının bir ısı ve kütle geçişi olduğu açıktır.

4.6. İnce Tabaka ve Kalın Tabaka Kuruma Teorisi

İnce tabaka kavramı, kurutulacak ürünün bir tanesinin kalınlığına sahip olacak şekilde serilmesiyle elde edilen kuramsal bir ürün tabakasını belirtir. Bu tip kurutmalarda 1966'da Henderson ve Perry'nin geliştirdikleri ince sergi kuruma teorisi esas alınır. Bu teoriye göre sergiye giren ve çıkan havanın sıcaklığı, mutlak nemi, bağıl nemi ve özgül hacmi değişmez ve ürün homojen olarak kabul edilir. Tarım ürünlerinin ince tabaka halinde kurutulması sırasında ısı ve kütle geçişi sabit ve azalan kuruma evreleri için ayrı ayrı incelenir [46].

Kurumakta olan ürünün oluşturduğu tabakanın kalınlığı bir tane kalınlığını aştığında, ince tabaka formundaki kuruma için geliştirilen eşitlikler yetersiz kalır. Bunun baş nedeni kurutma havası özelliklerinin, kalın ürün tabakasından geçerken sürekli olarak değişime uğramasıdır. Kalın tabaka formundaki ürün yığınının kurumasına ilişkin olarak geliştirilen yöntemler, ürün tabakasının hareketsiz ve hareketli olmasına göre farklılık gösterir [47].

4.7. Sabit Hızda Kuruma Evresi

SHE ürünün içerdiği nem, BKN'den daha fazla olduğunda görülebilir. Üzümler için bandırma işleminden sonra hızlı bir şekilde kurutma işlemine geçiliyorsa SHE'den bahsedilebilir aksi halde doğrudan AHE'ye geçilir. Sabit hızla kuruma evresinde buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu varsayılır.

Sabit hızla kuruma evresi süresince;

- Ürün yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı olduğu,
- Kuruma hızının, kuruma havasının sıcaklığından, bağıl neminden ve hızından etkilendiği,
- Kuruma hızının, ürünle ilgili unsurlardan etkilenmediği,

- Ürün yüzey sıcaklığının, kurutma havasının yaş termometre sıcaklığına eşit olduğu, yüzeyindeki su buharı basıncının yüzey sıcaklığına eşit sıcaklıktaki doymuş buhar basıncına eşit olduğu,

kabul edilir. SHE için yapılan kabullerden buharlaşan su miktarının aynı koşullardaki serbest su yüzeyinden buharlaşan su miktarına eşit olduğu varsayılır. Yapılan gözlemlerde ise bu evrede üründen buharlaşan suyun serbest su yüzeyinden buharlaşandan % 30 daha az olduğu görülmektedir. Bu evre sırasında, kurutma havası ile ürün arasındaki ısı ve kütle geçişi aşağıdaki eşitliklerle belirtilebilir [6].

Kurutma havasından ürüne iletilen enerji miktarı;

$$q = h' \cdot A \cdot (T_k - T_y) \quad (4.6)$$

Üründen kurutma havasına birim zamanda iletilen su buharı miktarı,

$$\dot{m}_s = h_D \cdot A \cdot (K_y - K_h) = \frac{h_D \cdot A \cdot M_s}{R \cdot T_m} (P'_b - P_b) \quad (4.7)$$

Üründen ayrılan suyun buharlaşabilmesi için gerekli enerji,

$$E = m_s \cdot q''_b \quad (4.8)$$

(4.6), (4.7) ve (4.8) eşitliklerinden faydalanarak, birim zaman içinde üründen ayrılan nem miktarı (kuruma hızı) aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla bulunur.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_D \cdot A}{R_b \cdot T_m} (P'_b - P_b) = \frac{h' \cdot A}{q_b} \cdot (T_k - T_y) \quad (4.9)$$

SHE sırasında, kurumayla ilgili bazı değerlendirmeler için geliştirilmiş başka eşitliklerden de faydalanılabilir. Bu eşitliklerden biri aşağıda verilmiştir.

$$\frac{dM}{dt} = h_D \cdot \rho \cdot A \cdot (\omega_2 - \omega_1) \quad (4.10)$$

Isı ve kütle geçişinin birlikte yer aldığı işlemlerin analizinde Lewis sayısı (Le) önemli bir rol oynar. (4.9 eşitliğinde), kütle geçiş sayısı (h_D) kolaylıkla ölçülemediği için Lewis sayısından faydalanılır. Hava-Su sistemlerinde Le sayısının 0,86'ya eşit olduğu kabul edilir [6].

$$Le = \frac{h'}{h_D \cdot C \cdot \rho} \quad (4.11)$$

Burada; C, Havanın ısı kapasitesi ($\text{kJ/kg}_{\text{kh}}\text{K}$). Buna göre,

$$0,86 = \frac{h'}{h_D \cdot 1,004 \cdot \rho} \quad \text{ve} \quad h_D = \left[\frac{h'}{0,86 \cdot 1,004 \cdot \rho} \right] \quad (4.12)$$

bulunur.

Eşitlik (4.9)'da verilen taşınım ile ısı ve kütle geçiş katsayılarının kurutma işlemi sırasındaki değişimleriyle ilgili deneysel çalışmalar bu katsayıların yaklaşık olarak [6];

- Hava akımının materyal yüzeyine paralel olması durumunda, hava hızının 0,8 kuvvetiyle,
- Hava akımının ürün tabakasının içinden geçirilmesi durumunda 0,6 ya da daha küçük bir orantılı olduğunu belirtmektedir.

Kurutma işlemi sırasında, kuruyan materyale taşınım yoluyla ısı geçişinin dışında, iletim ve ışınlım yoluyla da ısı geçişi söz konusu olduğunda (4.9) numaralı eşitlikte bu yollarla olan ısı geçişini belirlemek için geliştirilmiş ifadelerin eklenmesi gerekir.

4.8. Azalan Hızla Kuruma Evresi

Azalan hızla kuruma evresi sırasında, kuruma hızının ve süresinin belirlenmesi sabit hızla kuruma evresine göre daha karmaşıktır. Yalnızca materyalin yüzeyinden taşınım ile ısı ve kütle geçişi söz konusu değildir. Bu evrede ürün içindeki ısı ve kütle difüzyonunun da dikkate alınması gerekmektedir. Azalan hızla kuruma evresinde kuruma olayını incelemek amacıyla teorik, yarı teorik ve deneysel yöntemlerle elde edilen matematik modellerden faydalanılabilir. Bu modellerin bazı faydalı ve sakıncalı yönlerinin olduğu kuşkusuzdur. Teorik modeller, her ürün ve koşul için uygulanabilirler. Ancak, çözümü gereken eşitliklerin birçok parametre ve karmaşık yapı içermesi, bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yarı teorik modeller, daha az karmaşık olmakla birlikte, içerdikleri parametrelerin yalnızca ele alınan ürünlerle ilgili olması yaygın kullanım alanı bulmalarını engellemektedir. Deneysel yollarla elde edilen verilere dayanarak kuruma hızının belirlenmesinde, karmaşık matematik eşitlikler yoktur. Ancak, elde edilen eşitlikler deneme yapılan ürün ve deneme koşulları için geçerlidir; başka koşullarda kullanılamazlar. Azalan hızla kuruma evresiyle ilgili teorik ve yarı teorik kuruma modellerinin geliştirilmesi sırasında, işlemleri biraz daha kolaylaştırmak amacıyla bazı ön kabuller yapılır. Bu kabuller aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir [47]:

- Ürün içindeki nem dağılımı tek düzedir.
- Kuruma, madde içindeki nemin su veya buhar fazında difüzyonu sonucu oluşur.
- Difüzyon,
 - Nem konsantrasyonu farkı,
 - Sıcaklık konsantrasyonu farkı,
 - Buhar basınçları konsantrasyonu farkı gibi etkenlere bağlıdır.
- Kurutma havasının özellikleri (sıcaklık, hız, bağıl nem) kuruma süresince değişmez.
- Ürün ince bir tabaka şeklinde serilidir.

4.8.1. Azalan hızla kuruma evresi ile ilgili teorik modeller

Luikov ve arkadaşları, herhangi bir materyalde suyun iletimi ve buharlaşarak ayrılmasını kontrol eden unsurları dikkate alarak kılcal borulu yapıya sahip, gözenekli materyaller için teorik bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde, eşzamanlı kütle ve ısı transferini dikkate alır ve ürün içersindeki sıcaklık ve nem dağılımı ile ilgilenir. Bu matematik model Fick'in II. Difüzyon kanununa dayanılarak türetilmiş olup üç kısmi diferansiyel eşitlik takımından oluşmaktadır [47].

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T + \nabla^2 K_{13}P \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T + \nabla^2 K_{23}P \\ \frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}T + \nabla^2 K_{33}P\end{aligned}\tag{4.13}$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan M, nemi; T, sıcaklığı; P basıncı, t zamanı ve K ürün ve çevre ile ilgili doğal katsayıları (K_{11} , K_{22} , K_{33} fenomenolojik katsayılar – K_{12} , K_{13} , K_{21} , K_{23} , K_{31} , K_{32} çift etkili katsayılar) belirtmektedir. Günümüzde, bu katsayıların tarım ürünleriyle ilgili olanlarının pek azı belirlenebilmiştir. Bu nedenle, yukarıdaki eşitlik takımlarını kullanılabilir duruma getirebilmek amacıyla bazı unsurlardan vazgeçilip, sadeleştirmeler yapılır.

Toplam basınç farkı nedeniyle oluşacak nem iletimi, tarım ürünlerinin kurutulması sırasında söz konusu dahi olamayacak derecede yüksek sıcaklıklarda göz ardı edilemeyecek büyüklüğe geleceğinden, eşitlik takımlarındaki basınç unsuru ihmal edilebilir ve aşağıdaki formu alır;

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T \tag{4.14}$$

Ancak bu denklkler oldukça karmaşık yapıya sahip olduklarından nümerik yöntemlerle çözümlenebilirler, analitik yöntemlerle çözümlenemezler.

İkinci bir sadeleştirme, sıcaklık konsantrasyonu farkından ötürü meydana gelen nem iletiminin ihmal edilmesiyle yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, nem konsantrasyon farkına bağlı olarak meydana gelen nem iletimiyle karşılaştırıldığında, sıcaklık farkına bağlı iletim, dikkate alınmayabilecek ölçülerdedir. Ürün içersindeki herhangi bir noktada ürün sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir. Yukarıda sıralanan sadeleştirmeler sonucunda, AHE sırasındaki kuruma hızı, yalnızca bir kısmı diferansiyel eşitlikle ifade edilebilir şekle getirilir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M \qquad \frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{22} T \qquad (4.15)$$

Burada fenomenolojik katsayılar K_{11} – nem difüzivitesi (D), K_{22} ise ısı difüzivite (α) olarak adlandırılır ve bu kavramların işlem boyunca sabit oldukları kabul edilirse;

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \right] \qquad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{a_1}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] \qquad (4.16)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada a_1 – düzlemsel geometrilerde 0, silindirik şekillerde 1 ve küresel şekillerde 2’dir.

Eşitlik (4.14)’de “K” katsayısı yerine, difüzyon katsayısı “D” kullanılabilir. Bu durumda elde edilen eşitlik kartezyen ve küresel koordinat sistemlerine göre yazılırsa (4.16) ve (4.17) numaralı eşitlikler elde edilir. (4.14) numaralı eşitliğin, kartezyen koordinat sistemine göre üç boyut için yazılışı:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D \frac{\partial M}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad (4.17)$$

(4.16) numaralı eşitliğin, küresel koordinat sisteminde difüzyon katsayısının sabit kaldığı durum için tek boyutlu yazılışı:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(R^2 \cdot D \cdot \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (4.18)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte R, materyalin ele alınan boyutunu (örneğin, materyal küre şeklindeyse yarıçapını) belirtmektedir.

(4.17) numaralı eşitliğin, küre, sonsuz yassı levha ve sonsuz silindirik cisimlerin, herhangi bir “t” anındaki ortalama nem düzeyleri dikkate alınarak yapılan genel çözümü aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) \quad (4.19)$$

(4.18) numaralı eşitlikte yer alan M_o , M ve M_e sırasıyla ürünün ilk nemini, gözlem anındaki (t) nemini ve denge nemi değerlerini belirtmektedir. B_n ve μ_n çeşitli geometrik şekiller için eşitlikte yer alması gereken ifadeleri belirtmektedir. Bu ifadeler aşağıdaki gibidir (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Çeşitli geometrik şekiller için B_n ve μ_n ifadeleri

Geometrik Şekil	B_n	μ_n
Küre	$6/\pi^2$	$n\pi$
Sonsuz yassı düz levha	$2/\mu_n^2$	$(2n-1)\pi/2$
Sonsuz silindir	$4/\mu_n^2$	$J_0(\mu_n^2)$ $\mu_1 = 2,405$, $\mu_2 = 5,520$, $\mu_3 = 8,654$, $\mu_4 = 11,792$

(4.18) numaralı eşitlikte yer alan “ Fo_m ” Fourier sayısını belirtmektedir. Fourier sayısı,

$$Fo_{m0} = Dt/R^2$$

olduğundan bu değer (4.18) numaralı eşitlikte yerine konulup, eşitlik küre şekilli cisimler için yeniden düzenlenirse,

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right) \quad (4.20)$$

eşitliği elde edilir. $\left[\pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right]$ ifadesinin 1,2 den büyük olması durumunda, serinin yalnızca ilk teriminin dikkate alınmasıyla yapılan hata %5’i geçmez. Bu hata tarım ürünlerinin kurutulmasıyla ilgili işlemler için kabul edilebilir olduğundan, seri açılımının ilk terimi alınıp ayrıca $\left[\pi^2 \frac{Dt}{R^2}\right]$ yerine (k) yazılarak, küre için basitleştirilmiş,

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp(-k.t) \quad (4.21)$$

eşitliği elde edilir.

Difüzyon katsayısı gerçekte sabit değildir, nem içeriği ile değişir. D değeri küçük nem içeriklerinde daha azdır ve kuruma yüzeyi yakınında çok küçük olabilir. Pratikte kurutulan materyalde ortalama bir D değeri deneysel olarak hesaplanabilir. Bu amaçla aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$t = \frac{4L^2}{\pi^2 D} \ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)} \quad (4.22)$$

Eğer yassı düz levha için $\ln \frac{8(M_o - M_e)}{\pi^2 (M - M_e)}$ ifadesine karşı zaman grafiği çizilirse bir doğru elde edilir ve bu doğrunun eğiminden D difüzyon katsayısı hesaplanır [48].

Difüzyon yavaş kuruyan materyallerin karakteristik davranışdır. Katı yüzeyinden havaya su buharının kütle transferi direnci genellikle ihmal edilir ve bütün kuruma hızını katıdaki difüzyon kontrol eder. Böylece yüzeydeki nem içeriği denge değerindedir veya denge değeri çok yakındır. Sıcaklıkla difüzyon katsayısı arttığından, katıdaki sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artar.

4.8.2. Azalan hızla kuruma evresi için geliştirilmiş yarı teorik modeller ve deneysel kuruma eşitlikleri

Azalan hızla kuruma evresi sırasında materyalin içinde oluşan nem taşınımı, Newton'un soğuma ile ilgili yasasına benzetilerek açıklanmaya çalışılır. Söz konusu yasa, cisim ile çevre arasındaki sıcaklık farkının çok büyük olmaması şartıyla, sıcaklığı değişmez kabul edilen bir ortam içine konulan bir cismin sıcaklığındaki değişim miktarının, cisim ve çevre sıcaklıkları ($T - T_e$) arasındaki farkla orantılı olduğunu belirtmektedir. Bu yasa aşağıdaki eşitliklerle gösterilebilir [47]:

$$\frac{dT}{dt} = -k (T - T_e) \quad (4.23)$$

Nem içeriği değişmez kabul edilen bir ortam içinde bulunan herhangi bir materyalin neminde meydana gelen değişim, üstteki eşitliğin uyarlanması ile aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_e) \quad \text{veya} \quad \frac{dM}{M - M_e} = -k \cdot dt \quad (4.24)$$

Eşitlik (4.22)'deki diferansiyel eşitliğin çözümü aşağıdaki şekildedir:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \frac{M}{M_o} = \exp (-k \cdot t) \quad (4.25)$$

Eşitlik (4.24)'ün sol tarafı boyutsuz oransal bir büyüklüktür. Bu büyüklük, kuruma sırasında, herhangi bir anda üründe kalan buharlaşabilecek nem miktarının $(M - M_e)$, üründen buharlaşabilecek tüm nem miktarına $(M_o - M_e)$ oranını belirtmektedir. “k” kuruma sabiti olarak adlandırılır. Birimi h^{-1} veya s^{-1} 'dir. Kuruma sabiti kurutulacak ürün ve kurutma şartlarına göre deneysel verilerden yararlanılarak belirlenir. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulan (4.24) numaralı eşitlik Newton modeli olarak tanımlanır.

Newton eşitliği yardımıyla hesaplanan sonuçlar, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin azalan hız evresinin birinci bölümünde iyi bir uyum gösterdiği, ancak ikinci bölümde bazı sapmaların ortaya çıktığı görülür. Kuruma eğrilerini açıklamak için bazı araştırmacılar tarafından teorik ve deneysel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller Çizelge 4.2.'de sunulmuştur [49].

Çizelge 4.2. Literatürde bulunan bazı kuruma eğrisi modelleri [49]

Model Adı	Model	Kaynak
Newton	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp (-k.t)$	Majumdar, 1987
Page Modeli	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp (-k.t.n)$	Diamante vd., 1993
Geliştirilmiş Page	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp [-(k.t)^n]$	White vd., 1978
Henderson ve Pabis	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k.t) + c$	Zhang vd., 1991
Logaritmik	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k.t) + c$	Yağcıoğlu vd., 1999
İki Terimli	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k_o.t) + b \exp (-k_i.t)$	Henderson vd., 1974
Wang and Singh	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = 1 + a.t + b.t^2$	Wang vd., 1978
Thompson	$t = a.\ln (MR) + b [\ln (MR)]^2$	Thompson vd., 1968
Difüzyon Yaklaşımı	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k.t) + (1-a) \exp (-k.b.t)$	Yaldız vd., 2001
Verma ve Ark.	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k.t) + (1-a) \exp (-g.t)$	Verma vd., 1985
İki Terimli Eksponansiyel	$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = a \exp (-k.t) + (1-a) \exp (-k.a.t)$	Sharaf – Elden vd., 1980

4.9. Kurutma Modellerinin Sınıflandırılması

Kurutma işleminin kuramsal olarak açıklanmasında önerilen kurutma mekanizmaları genellikle şu şekilde özetlenebilir [50]:

- i. Kılcal akım mekanizması ile hareket eden sıvı nem.
- ii. Katının iç gözenekleri ile yüzeyi arasında meydana gelen nem konsantrasyon farkı nedeni ile difüzyon mekanizması ile hareket eden sıvı nem.
- iii. Katı yüzeylerdeki gözeneklerde bulunan nem ile yüzeye adsorbe olmuş sıvı nem arasında meydana gelen yüzeysel difüzyon.
- iv. Katının içinde buharlaşan nem ile sıvı nem arasında oluşan buharlaşma-sıvılaşma mekanizması ile meydana gelen aktarım.
- v. Katının şekil değiştirmesi veya iç buharlaşma neni ile gözeneklerde meydana gelen yüksek sıcaklıktaki bölgelerin oluşturduğu toplam basınç farkı ile meydana gelen buhar aktarımı.
- vi. Büyük gözenekli katılarda yerçekimi etkisi ile meydana gelen sıvı aktarımı.

Bundan önceki kısımda özet şeklinde verilen kurutma mekanizmalarının yardımı ile azalan kuruma devresinde oluşan kurutma olayını açıklamak için çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu kurutma modelleri genel olarak basit modeller ve karmaşık modeller adı altında iki ana başlık altında toplanır. Basit model türünde kurutma mekanizmalarından sadece bir tanesinin azalan kuruma hızı devresindeki kurutma hızını kontrol ettiği kabul edilir. Karmaşık modellerde ise iki veya daha fazla kurutma mekanizmalarının aynı anda meydana geldiği ve kurutma hızını beraberce etkiledikleri kabul edilir. Basit modeller başlıca üç şekilde olur [50].

- Difüzyon Modeli
- Kılcal Akım Modeli
- Buharlaşma – sıvılaşma modeli

Karmaşık modeller için genel bir adlandırma mümkün olmadığı için, ilgili modeller konusunda uzun süre araştırma yapan grupların liderlerinin isimlerine göre tanımlama yapılması uygun görülmüştür. Bu yaklaşım sonucu karmaşık kurutma modelleri şunlardır [50]:

- Krischer Modeli • Peck Modeli • Lykov Modeli • Morgan Modeli

4.9.1. Basit Kurutma Modelleri

Difüzyon modeli: Azalan hızla kuruma devresinde katının iç gözeneklerinden yüzeyine doğru sıvı nem akımı (difüzyon) meydana geldiğini kabul eder. Bu akımı kontrol eden, ilgili noktalar arasındaki nem konsantrasyonu farkının etkisi ile etkilenen ve II. Fick kanununa uyan buhar ve sıvıların transferinde bu tip difüzyon kontrollü kütle transferinin olduğu varsayılır. II. Fick kanununun tek yönlü difüzyonu için matematiksel ifade aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dM}{dt} = D \left(\frac{d^2M}{dL^2} \right) \quad (4.26)$$

Elde edilmiş çözümlerin geçerliliği birçok maddenin kurutulmasında deneysel yöntemlerle ispatlanmıştır. Genel olarak bu difüzyon modelinin iç gözenekleri çok küçük olan katılarda geçerli olduğu gözlenmiştir.

Kılcal akım modeli: Katının iç gözenekleri büyük olursa, katının azalan kuruma devresindeki nem akımının gözenekler arasından kılcal akım mekanizması prensiplerine göre oluştuğu kabul edilerek, kurutma hızı çeşitli kılcal akım modellerine göre hesaplanır. Bu model kurutma mekanizmasını difüzyon modeline göre daha iyi bir biçimde tanımlamasına rağmen, modelin matematiksel formülasyonu oldukça karmaşıktır. Bunun yanında difüzyon modeli kurutma zamanını tam olarak vermemesine rağmen, kullanılması oldukça basittir.

4.9.2. Karmaşık Kurutma Modelleri

Krischer modeli: Bu modele göre katının sıvı nemi kurutma sırasında yüzeye doğru kılcal akım ve difüzyon kurutma mekanizmalarının birbirlerinin seri veya paralel biçimde tamamlanması sonucu hareket eder. Modelin kurutma zamanını kolayca açıklayabilmesi için katı maddenin iki fiziksel özelliğinin bilinmesi gereklidir. Birincisi, difüzyon akımını simgeleyen su buharı-sıcak hava difüzyon katsayısı ve ikincisi ise, kılcal akım potansiyelini simgeleyen nem iletkenlik katsayısıdır. Bu iki katsayı genellikle katının cinsine, gözeneklerin yapısına ve katıdaki sıcaklık, nem değişimine bağlıdır. Dolayısı ile ancak deneysel yollarla elde edilebilir. Modelin kullanılabilmesi için gerekli olan katsayıların fazlalığı, deneysel yollarla elde edilebilme mecburiyeti, sıcaklık ve nem değişiminin değişken bir fonksiyonu olması ve hatta tüm bu ihtiyaçlar sağlansa bile kurutma hızını hesaplamak için çok karmaşık ve uzun bir hesaplama yöntemine ihtiyaç göstermesi bu modelin başlıca arzu edilmeyen tarafıdır.

Peck modeli: Azalan kuruma devresinde kurutma hızını etkileyen faktörlerin sadece katının özelliklerini yansıtan içyapısal faktörlerden oluştuğu bu modelde kabul edilmemiş ve katının içinde oluşan kurutma mekanizmasına ilaveten yüzeyde dış etkenlerden meydana gelen diğer faktörlerde göz önünde tutulmuştur. Kılcal akım mekanizmasının kurutma hızını kontrol ettiği varsayılmış, yüzeyde Newton soğuma ifadesi yardımı ile meydana gelen kurutmaya engel olan etkenlerin, katının içindeki engellemeye olan oranları matematiksel olarak bulunmuştur. İnce katıların düşük sıcaklıklarda kurutulduğu durumlarda bu model oldukça tatminkâr sonuçlar vermiştir.

Lykov modeli: Kurutma sırasında katının içinde oluşan ısı ve kütle transferine ilave olarak hidrodinamik kuvvetlerin etkisi altında meydana gelen üçüncü bir transfer mekanizması öngörülmüştür. Sistem modeli karmaşık ve birbirini tamamlayıcı bir özellik gösterdiği ve deneysel yollarla elde edilmesi gereken çok fazla katsayıya ihtiyaç gösterdiği için eldeki mevcut çözümleri genellikle uygulamaya dönük değildir.

Morgan modeli: Bu modele göre katı madde iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısımda katının iç gözenekleri tamamen sıvı nem ile doludur ve bu kısım adeta bir su havuzuna benzemektedir. Kurutma sırasında bu havuz içindeki nem kılcal borular ile yüzeye doğru hareket eder ve bu sırada da sıcaklığı yükselir. Belli bir sıcaklıktaki sıvı katı yüzeyine ulaşmamışken buharlaşma meydana gelir. Buhar haline geçen nem tamamen kuru katının ikinci bölgesinde difüzyon mekanizması ile yükselir ve yüzeye ulaşır. Kurutma devam ederken kuru olan ikinci bölgeyi birinci kısımdan ayıran ve yüzeye paralel bir şekilde hareket ettiği varsayılan buharlaşma düzlemi ayırır. Kurutmaya karşı çıkan en büyük fiziksel engelleme başlıca iki şekilde olur. Buharlaşma düzleminde sıvı nemin buhar haline dönüşümü ve buhar halindeki nemin kuru kısımdan difüzyon mekanizmasına göre hareketi. Bu modeldeki yaklaşım çok karmaşık bir matematiksel modelleme ve çözümüne gereksinim gösterdiği için model genellikle bir boyutlu sistem geometrisi için incelenebilmiştir. Morgan modelindeki en önemli bulgu, azalan hızla kuruma evresindeki kuruma hızının, genellikle en fazla nemin katı içindeki hareket yeteneğini simgeleyen difüzyon katsayısının kurutma sırasındaki değişiminden etkilenmesidir.

4.10. Kurutmada Meydana Gelen Başlıca Değişmeler

4.10.1. Fiziksel değişmeler

Yöresel kuru madde birikimi: Meyve ve sebzelerin kurutulması sırasında çoğu geri dönüşsüz fiziksel ve kimyasal değişmeler belirlemektedir. Bunlardan birisi olan yöresel kuru madde yığılması, doğrudan doğruya kuru madde yığılması ve doğrudan doğruya kuru madde hareketine bağlıdır. Kuruyan materyalin dış yüzeyindeki suyun uzaklaşmasına paralel olarak, iç tabakalardaki su yüzeye hareket etmektedir böylece suyun dokudaki gözenekler içindeki hareketi, doğrudan doğruya bir sıvı hareketi şeklinde veya su buharı şeklinde veya bireysel serbest su molekülleri şeklinde olmak üzere değişik tipte olabilmektedir. Eğer suyun hareketi kurumanın başlangıç aşamalarında olduğu gibi bir sıvı hareketi şeklindeyse, su içerisinde erimiş maddelerde beraberinde taşınır. Böylece alt tabakalardaki kuru madde su ile yüzeye kadar taşınır ve su uzaklaşıp gidince, yüzeyde bir kuru madde yığılması görülür.

Ancak bu yolla yüzeyde kuru madde konsantrasyonu artınca, iç kısımlarda düşmüş konsantrasyonu dengelemek amacıyla bu defa yüzeyden içeri doğru bir kuru madde akımı belirir. Şüphesiz buda, iç tabakalarla yüzey arasında devamlı bir sıvı bağlantısı bulunması durumunda yani, suyun yüzeye “sıvı hareketi” şeklinde hareket ettiği dönemde gerçekleşebilir. Kurutmada uygulanan koşullara göre, kuru maddenin tanımlanan bu hareketlerinden biri egemen olabilir ve bunun sonucu olarak yüzeyde veya merkezde aşırı bir kuru madde birikimi belirebilir. Meyve ve sebzelerde hücre suyu, hücre duvarını aşarak dışarı çıktığından hücre zarının geçirgenliğine bağlı olarak, su ile hareket eden maddelerin niteliği farklıdır. Ancak genellikle bunlar küçük moleküllü maddelerdir [51].

Benzer bir olayda hücre sıvısının tümünden yüzeye ve hatta dışarı akmasıdır. Ancak bu, daha farklı bir şekilde gelişir. Meyve ve sebzelerin kurutulmasında daha kurumanın başlangıcında dahi, yüzeyde kuru bir tabaka oluşur. Hatta kuruyan materyal, içten dışa doğru bir alttakine göre biraz daha kurumuş tabakalar halinde bulunur. Kurumuş tabakalar büzüşerek iç kısımlara basınç yapar. Bu basınç ise, iç tabakalardaki hücre sıvısının gözenek ve çatlaklardan dışarı doğru akmasına neden olur. Böylece yüzeye ulaşan sıvının hücre içinde bulunan tüm maddeleri içerdiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle yüzey; yapışkan, cıvık bir sıvı ile kaplanır. Bu olgu özellikle, erik ve kaysı gibi yumuşak dokulu meyvelerin kurutulmasında kendini gösterir.

Kabuk bağlama: Kabuk bağlama kurutma koşullarının hatalı seçilmesi sonucu oluşan bir olaydır. Kabuk bağlama; kurumanın ilk aşamasında yüksek sıcaklık uygulamasından kaynaklanır. Böylece yüzeyde hızla oluşan kuru tabaka büzüşme, sonucu alt tabakalara baskı yapar. Ancak alt tabakalar henüz o kadar ıslaktır ki, üstten yapılan basınca direnç gösterir. Bu durumda kuruma sonucu büzüşme olanağı bulamayan üst tabaka gerilip sert bir kabuk haline dönüşür. Böylece oluşan sert kabuk, kurumanın ileri aşamalarında, alt tabakalar kuruyup buruşsa dahi bir daha göçmez ve fakat alt tabakalardan ayrılarak sert bir tabaka yapısını korur. Kabuk bağlama ile birlikte kuruma hızı birden bire düşer. Kabuk bağlama şeker ve benzer maddelerce zengin materyallerde, örneğin meyvelerde, sık görülür. Bunlarda olay

biraz daha farklı gelişir. Nitekim bu tip materyallerde oluşan kabuk, su buharının difüzyonunu engelleyici camsı bir nitelik gösterir. Bu durumda alt tabakalardaki su, bu tabakayı aşamadığından kuruma tümünden durur ve ürün; dışı kuru ve sert, içi ıslak bir halde kalır. Artık kurumanın tamamlanması çok zorlaşmıştır. Tanımlanan bu oluşumlara kabuk bağlama denir. Görüldüğü gibi kuruma hızı, kurutulmuş ürünün kalite ve niteliklerini etkileyen en önemli faktördür. Kurutma koşulları ayarlanarak, “kabuk bağlamanın” önlenmesi olanaklıdır.

Kitle yoğunluğunda değişmeler: Herhangi bir materyalin birim hacminin ağırlığına kitle yoğunluğu denir. Kurutulmuş bir ürünün kitle yoğunluğu, onun kurutulmasında uygulanan koşulların bir belirteçidir. Kitle yoğunluğu, kurutulmuş ürünün bir kalite ölçüsüdür. Eğer kurutulan herhangi materyalde hiçbir büzüşme, buruşma olmasa ve materyal kurutma sonunda da başlangıçtaki boyutlarını korusa, bu materyalin kurutma sonundaki kitle yoğunluğu sadece kaybedilen su kadar azalır. Fakat kurutulan maddelerde, özellikle meyve ve sebzelerde daima bir buruşma, büzüşme ortaya çıkar. Gıda maddeleri genelde elastik özellik gösteren materyallerdir. Kusursuz elastik bir maddeden su uzaklaşınca büzüşme miktarı ile kaybedilen su arasında doğrusal bir ilişki vardır. Her ürün, kurutmada uygulanan koşullara bağlı olarak kendine özgü bir buruşma niteliği gösterir. Buna göre kurutulan materyalin hacmi az veya çok düşerek kurutulmuş ürünün kitle yoğunluğu değişir.

Kurutma koşulları eğer; iç kısımlarına göre materyal yüzeyinin daha fazla ve hızlı kurumasına neden olmayacak kadar ılımlıysa, tüm kitle beraberce kurur ve muntazam bir buruşma belirerek materyal şeklini kaybeder ve hacmi son derece küçülür. Böyle bir ürünün kitle yoğunluğu çok yüksektir. Buna karşın önce yüzeyde aşırı bir kuruma oluşacak şekilde hızlı bir kurutma uygulanırsa, dış tabakalar sertleşir ve ürünün içi henüz ıslak kalır. Daha sonraki kuruma aşamalarında nihayet alt tabakalarda kurur. Ancak sertleşmiş dış tabaka, daha sonra kuruyan alt tabaka üzerine çökemediğinden kurumuş ürünün içinde kat kat boşluk ve çatlaklar oluşur. Böyle bir kurumuş ürün dış görünüşüyle, orijinaline benzer ve sanki hiç buruşma olmamış veya çok az olmuş izlenimini verir. Bunlarda kitle yoğunluğu çok düşüktür.

Kitle yoğunluğu düşük olan kurutulmuş ürünlerin iç kısmında bir sürü boşluk ve çatlak bulunduğu bunların kesiti incelenirse bazen bir petek görüntüsü ortaya çıkar. Açıklıkla ortaya konduğu gibi kitle yoğunluğu, bir ürünün kurutma koşulları hakkında bilgi veren önemli bir değerdir. Aynı ürünün; düşük kitle yoğunluğunda ve yüksek kitle yoğunluğunda olmasının olumlu ve olumsuz yönleri vardır. Kitle yoğunluğu düşük olanlar tüketici tarafından tercih edilir. Çünkü her şeyden önce aynı ağırlıktaki mal daha fazla görülür. Ayrıca bunların nem alma yetenekleri daha iyidir, yani daha fazla ve hızlı su absorbe ederler. Kurumuş ürün orijinaline daha fazla benzer. Ancak bunların ambalaj, depo ve taşıma masrafları daha fazladır. Ayrıca içerdeki boşluklar aynı miktar ürünün yüzey alanının çok stabilitesi azdır. Ayrıca tekrar nem almada bazen tabaka tabaka dağılma görülebilir. Yoğunluğu daha fazla olan kuru ürünler, özellikle bunları başka ürünlere işleyen imalatçılar tarafından tercih edilirler.

Kurutulmuş ürünün nem alma yeteneği: Kurutulmuş üründe aranan en önemli nitelik, kullanılması sırasında verilen su ile eski haline dönüşebilme düzeyidir. Yani kurutulmuş bir ürün suda tutulunca, taze halinde içerdiği kadar su alarak eski haline ve şekline dönüşürse, mükemmel niteliklerde olduğu kabul edilir. Bu özellik dondurularak kurutulmuş ürünlerde önemli ölçüde sağlanabilirse de, geleneksel kurutma yöntemleriyle kurutulanlarda önemli ölçüde kaybedilmiş olur. Nem alma yeteneği sadece parça halinde kurutulan ürünlerde değil, aynı zamanda sıvı halde kurutulup toz haline getirilen, meyve tozu ve süt tozu gibi ürünler içinde geçerlidir. Özellikle toz halindeki bu ürünlerin suda tümünden ve hızla eriyip dağılması istenir. Bu niteliğe “instant özellik” denir. Ürünlerin nem alma yeteneği veya instant özelliği kuruma koşulları ile yakından ilgilidir.

4.10.2. Kimyasal ve diğer değişmeler

Kurutma sırasında yukarıda değinilen fiziksel değişmelere paralel olarak çeşitli kimyasal değişmelerde belirir. Bu değişiklikler kendisini, kurutulmuş ürünün veya tekrar nem almış ürünün, renginde, lezzetinde, tekstüründe, viskozitesinde, besleme değeri ve depolama stabilitesinde gösterir. Bu değişmelerin oluşumu veya düzeyi her üründe kendine özgü bir şekilde değişir. Ayrıca, kurutma işleminde uygulanan ısıнын şiddeti, bu değişimlerin düzeyini etkileyen en önemli faktördür. Ancak her kurutulan üründe daima ortaya çıkan olumsuzluk rengin esmerleşmesidir. Renk esmerleşmesi kurutmada önce, kurutma sırasında veya depolama süresinde oluşur. Renk esmerleşmesi enzimatik veya enzimatik olmayan reaksiyonlar sonucu olabilir. Meyveler başta olmak üzere haşlanmadan kurutulan ürünlerde oksidasyon enzimlerinin faaliyetıyla, başta polifenoller olmak üzere birçok maddenin oksidasyonuna dayalı renk esmerleşmesi kendini gösterir. Kurutmada uygulanan havanın sıcaklık derecesi, materyaldeki enzimleri inaktif hale getirmeye çoğu kez yeterli gelemmez. Bilindiği gibi materyal, kurutma sırasında uygulanan yüksek sıcaklığa rağmen suyun buharlaşması sonucu daima soğuk kalır.

Renk esmerleşmesini önlemede en önemli olanak, ürünün kükürt dioksit gazı ile kükürtlenmesidir. SO_2 bir taraftan enzimleri inaktif hale getirmekte, diğer taraftan özellikle enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonlarını engellemektedir. Kükürt dioksit gazı ayrıca daha önce oluşmuş esmer rengin açılıp düzeltilmesini de sağlamaktadır. Ancak SO_2 , antosiyaninlerle reaksiyona girerek onların renginin kaybolmasına neden olduğundan pembe mor renkli ürünlerde uygulanmazlar.

4.11. Kurutma Yöntemleri

Tarım ürünlerinin kurutulması sırasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmanın yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yetenekte olmak zorundadır. Bu nedenle, birbirinden önemli farklar gösteren çok çeşitli tiplerde kurutucular geliştirilmiştir. Tarım ürünlerinin kurutulması için, bu işleme gerek duyulan ilk günlerden günümüze kadar geçen süre içinde güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin tümünü sıralayabilmek mümkün değildir. Bazı çok uygulanan temel kurutma yöntemleri aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir:

- Kontakt kurutma: Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak materyale ısıtılmış yüzeylerden iletim yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş materyalin ısıl kondüktivitesine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır.
- Taşıyma (konvektif) kurutma: Bu yöntemde ısı, kurutucu ortamdan (genellikle sıcak hava kullanılır) yaş materyale taşıma yoluyla iletilir. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden ya da içinden geçirilir. Bu yöntemin ısıl iletkenliği kontakt kurutmaya göre daha düşüktür. Tünel kurutucular (tapsili kurutucular), akışkan yataklı kurutucular, püskürtmeli kurutucular bu yöntemin değişik uygulamalarıdır.
- Işınım ile kurutma: Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, yaş materyale elektromanyetik tayfın kırmızı ötesi bölgesinde yer alan ışınlarla iletilir. Bu ışınlar içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz; kendilerini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların, yaş materyalin yüzeyinden itibaren etkilediği derinlik oldukça az olduğundan bu yöntem ince film şeklinde serili tabakaların kurutulmasında kullanılır.

- Di elektrik kurutma: Kurutulacak madde yüksek frekanslı (2-100.106 Hz) bir elektrostatik alandan geçirilerek kurutulur. Bu maddenin her noktasında düzenli bir ısınma meydana getirir. Bu metod sadece kontrplak tabakalar arasındaki reçinenin polimerizasyonu ve bu suretle, tabakaların birbirine yapışmasını sağlar. Bu yönden de tam bir kurutma işlemi sayılmaz. Kurutma düşünülebilirse de çok pahalıdır.
- Donmalı kurutma: Bu yöntemde donmuş suyun süblimasyonundan yararlanılır. Kurutulacak yaş materyal önce hızla -25, -30°C değerlerine kadar soğutularak dondurulur. Daha sonra, ürünlerdeki donmuş suyun serbest buhar basıncına göre biraz daha düşük değerlerdeki vakum ortamında, gerekli süblimasyon ısı verilir, donmuş suyun, sıvı fazı atlayarak, doğrudan buhar fazına geçmesi sağlanır. Yüksek kaliteli kurutulmuş ürün elde edebilen modern bir kurutma yöntemidir.
- Ozmotik kurutma: Bu yöntemde, yarı geçirgen zarla kaplı olan bitki hücresi duvarının iç kısmı ile dış çevre arasında, ozmotik basıncı yüksek bir eriyiğin nemi azaltılmaya çalışılır. Kurutulacak materyal ozmotik basıncı yüksek bir eriyiğin içine bandırılarak nemin azaltılması sağlanır. Ürünün içine bandırılacağı ozmoaktif ortam, çeşitli sıcaklık ve konsantrasyonlarda olmak üzere genellikle meyveler için şeker, sebzeler için tuz (NaCl) eriyiğinden hazırlanır.

Yukarıda özetlenen yöntemler içinde günümüzde en yaygın kullanılanı, ürünlerin hava akımı yardımıyla (taşınım) kurutmadır. Son yıllarda, ürünlerin dondurularak kurutulması, alım gücü yüksek toplumlarda giderek daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Dielektrik kurutma teknikleri ise (kızılötesi ışınlar, mikro dalga ışınlar, radyo dalgaları vb.) henüz ticari açıdan söz edilebilecek boyutta bir uygulama alanı bulamamışlardır. Şekerli Şurup içinde ozmotik basınç farkından yararlanılarak kurutma tekniği ise özellikle meyvelerin kurutulmasına uygun gibi görülmekle birlikte, istenen nem değerine inilememe, pahalılık gibi nedenlerle yaygınlaşamamışlardır.

Kurutma süreci ısı ve kütle transferinin aynı anda gözlemlendiği karmaşık bir olaydır. İşlem sırasında kurutucu gazdan katıya doğru ısı aktarımı, katıdan da gaza kütle aktarımı gerçekleşir. Ürünün kullanım kalitesi ile dayanım özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı, bu işlemde son kurutma derecesinin çok önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu sebeple kurutmanın kontrollü şartlarda gerçekleştirilmesi önemlidir[52].

Kurutma besleme stokuna ısı verilip sıvının buharlaşmasını sağlayarak gerçekleşir. Daha önceden belirtildiği gibi ısı taşınımıyla, iletimle, ışınlama ya da hacimsel olarak ıslak materyalin mikrodalga ya da yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaya yerleştirmekle sağlanabilir. Endüstriyel kurutucuların % 85'i kurutma aracı olarak hava ya da doğrudan yanma gazlarını kullanan taşınimli kurutuculardır. Uygulamaların % 99'u suyun uzaklaştırılmasını içerir. Dielektrik (mikrodalga ya da yüksek frekans) yöntemi dışında bütün uygulamalarda kurutma objesinin sınırlarına ısı verilir, böylece ısı öncelikle iletimle malzemenin içine transfer edilir. Nem, taşıyıcı gaz tarafından uzaklaştırılmadan önce malzemenin yüzeyine transfer olmalıdır [53].

Birçok sektörde kurutma için tüketilen enerji, toplam enerji tüketimi içinde önemli bir paya sahiptir. Bu oran kimyada % 6, tekstilde % 5, seramik ve diğer inşaat malzemeleri üretiminde % 11, kereste kurutmada % 11, kâğıt endüstrisinde % 33, gıda ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında % 12 seviyelerine ulaşabilmektedir.

Enerji tüketiminin yüksek olduğu konvektif kurutucularda nemin buharlaştırılması için gerekli enerji ve kurutucu akış havasıyla enerji kaybı, sistemin toplam enerji gereksiniminin önemli bir bölümünü oluşturur. Çizelge 4.3.'de bir konvektif kurutucuda enerji tüketiminin dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Bir konvektif kurutucuda enerji tüketiminin dağılımı [54]

Tüketim Noktaları	Enerji İhtiyacı	
	kJ/h	%
Buharlaştırma	975.400	55
Kurutucu çıkış havası	521.200	30
Destek donanımı	143.900	8
Işınım kayıpları	47.900	3
Sistemin ısıtılması	45.800	3
Fan	13.300	1

Enerji, yoğun bir süreç olan kurutmada, kurutma etkinliği kurutucu tipine bağlı olarak % 20 ile % 90 arasında değişmektedir. Değişik kurutucularda kurutma etkinlikleri Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Değişik kurutucularda kurutma etkinlikleri [54]

Kurutucu Tipi Doğrudan Sürekli	Etkinlik (%)	Kurutucu Tipi Dolaylı Sürekli	Etkinlik (%)
Konvektif	20-40	Silindirik	85
Flash	50-75	Döner	75-90
Bantlı	40-60	Kesikli	
Döner	40-70	Karıştırıcılı, tepsili	90
Püskürtmeli	50	Vakumlu döner	70
Tünel	35-40	İnfrared	30-60
Akışkanlaştırılmış yatak	40-80	Dielektrik	60
Kesikli, raflı	85		

4.12. Kurutucu Seçimi

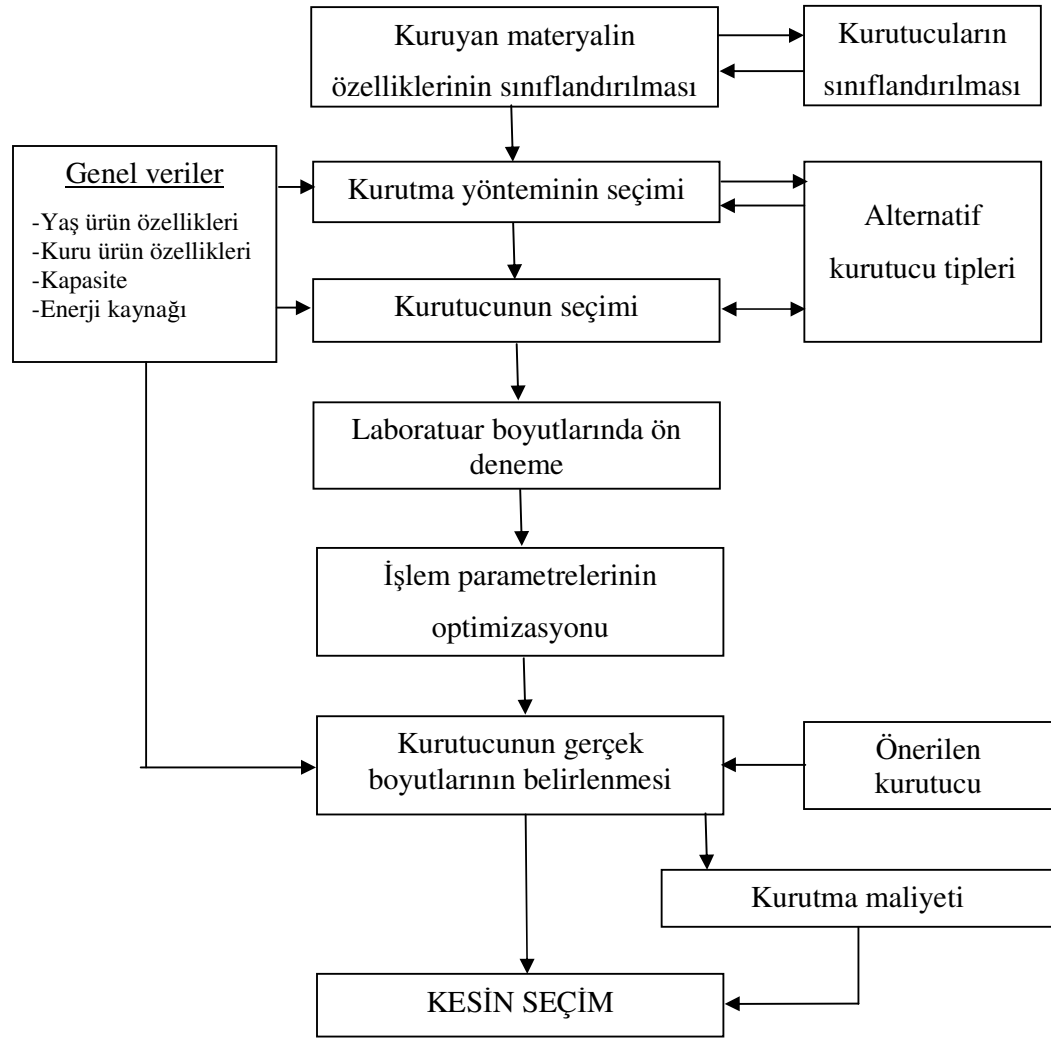
Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin kârlılığı açısından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilip kullanılmasına doğrudan bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeniyle, ilk adım olarak kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine en üst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

Yapılmak 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 kriterler olarak ele alınmalıdır. Kurutucu seçimi için işlem adımları Şekil 4.6.'da verilmiştir [6].

Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası materyal özelliklerinin belirlenmesiyle başlar. Kurutulacak materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri ve kurumuş ürünlerden beklenen şekil ve dış görünüm özellikleri öncelikle belirlenmelidir. Materyalin statik ve kinetik kuruma özellikleri, sorpsiyon ve adsorpsiyon izotermi ile kritik nemi, denge nemi, kurutma sıcaklığı, kuruma hızı gibi parametrelerin belirlenmesi için bilinmesi gereken önemli unsurlardır.

Bir kurutma sisteminin seçimi genel işlem sıralaması aşağıdaki gibidir:

1. Uygun kurutucuların incelenmesi
2. Değişik tiplerin ön maliyetlerinin tahminlenmesi
 - a. Yatırım maliyeti
 - b. İşletme maliyeti
3. Prototip veya laboratuvar ünitesinde kurutma testi davranışları en uygun cihazın tipini. Bazen bir örnek tesiste bu doğrulanabilir.
4. Kurutma deneylerinde kurutulan ürünlerin örnek ve kalitelerinin belirlenmesi.



Şekil 4.6. Kurutucu seçimi için işlem adımları [6]

Değişik ihtiyaçlar kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemlidir, kurutucuda kalma süresiyle yakından ilgilidir. Ürünün başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granül, levha vb.) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir. Çizelge 4.5.'de kurutucu tipine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler görülmektedir [54].

Çizelge 4.5. Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerji [54]

Kurutucu Tipleri	MJ/kg	Uzaklaştırılan Su
Isı pompalı kurutucu	0,5	0,8
Doğrudan egzoz gazları ile çalışan kurutucu	3,2	3,8
Hava ile çalışan kurutucu (70 – 100 °C)	4,5	5,5
Kazandan alınan egzoz gazları ile kurutma (400 °C)	5,0	6,0
Kazandan alınan egzoz gazları ile kurutma (200 °C)	9,0	12,0
Bantlı ve tünel kurutucular		
Ters akışlı tepsili - bantlı	8,0	16,0
Ters akışlı raflı - tünel	6,0	16,0
Arasından akışlı tepsili bantlı	5,0	12,0
Vakumlu tepsili - bantlı - levhalı	3,5	8,0

Kurutma cihazlarının seçimi aşağıdaki sıralama dâhilinde gerçekleştirilir.

a) **Kurutucuların ön seçimi:** Islak malzeme ve kuru ürün teminine en uygun kurutucu tipleri ön seçimi gerçekleştirilir. Kurutucularda bütün işlemlerin sürekliliği ve istenen fiziksel ve kalite özelliklerini elde etmesi ön koşulu aranır.

b) **Kurutucuların ön karşılaştırılması:** Ön seçilen kurutucular elde edilebilen veriler ışığında yaklaşık maliyet ve verimlilik açısından karşılaştırılır. Bu değerlendirmede verimlilik açısından uygunsuz veya ekonomik olmayan kurutucular sonraki değerlendirmelerde dikkate alınmaz.

c) **Kurutma denemeleri (testleri):** Bu denemeler halen değerlendirmeye alınmakta olan kurutucu tipleri için gerçekleştirilir. Bu testler en iyi çalışma koşullarını ve ürün karakteristiklerini belirler ve ayrıca cihaz satıcı firmaların aktardıkları bilgilerin doğruluğunun sınanmasını sağlayacaktır.

d) Kurutucu seçimine karar verme: Kurutma testlerinden ve belirtilen özelliklerin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilebilir. Kurutma yöntemleri ve kurutucular alternatifli olarak belirlendikten sonra kesin seçim için aşağıda sıralanan unsurlar da dikkatle irdelenmelidir [6].

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

Bu çalışmada çekirdeksiz üzümün, sıhhi, kapalı ve kontrollü şartlarda endüstriyel çapta kurutmanın yapılması amacıyla yönelik olarak, ısı pompası teknolojisi esas alınarak, küçük çapta bir deney seti kurutucu ve Türkiye’de ilk olarak 10.000 kg kapasiteli endüstriyel tip ısı pompalı kurutma sistemi tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Çeşitli sistem etkenlerinin kurutma verimine, kurutma hızı ve kalitesine etkileri araştırılmış, enerji analizi incelenmiştir.

5. ISI POMPALI KURUTUCULAR VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

5.1. Isı Pompaları ve Isı Pompalı Kurutmanın Geçmişi

Isı pompasının basit prensibi ilk kez 1824 yılında Sadi Carnot tarafından öne sürülmüştür. Bu teoriden 26 yıl sonra, 1850 yılında Lord Kelvin ısıtma için soğutma makinelerinin kullanılabilineceğini öne sürmüştür. Kelvin 1852 yılında yayınladığı yazısında, kompresör ile bağlantılı genişletici kullanan bir sistem tanıtmıştır. Fakat normal ısıtma masraflarına oranla makinenin masrafının çok daha yüksek olması nedeniyle, bu hava-ısıtma ısı pompası o zamanlar kurulamamıştır. Sıkıştırılmış buharla çalışan ısı pompasının prensibinin ilk olarak İsviçre’de, 1870-1880 yılları arasında Salina Bex’de mühendis Paul Piccard tarafından gerçekleştirilmesi dikkate değerdir. Benzeri ikinci bir tesis 1917’de Aarau’da Faerberei Jenny’de işletilmiştir.

İlk pratik ısı pompası ise, 1930 yılında İskoç Haldane’in yapıp, evinde kullanılmasına kadar ortaya çıkmamıştır. Bu makinede kaynak olarak havayı kullanmış ve hava koşullarının iyi olmadığı zamanlarda su ile desteklemiştir. 1950’lerde ısı pompasına ilgi az da olsa artmış; ancak petrol fiyatlarının gerilemesi ve bazı işletim zorluklarından ötürü fazla rağbet görmemiştir. Ancak soğutma endüstrisinin gelişip, kimi zorlukların alt edilmesi ve yeni modellerin üretilmesine, bir de 1973–1974 yıllarında petrol fiyatlarının artması eklenince, ısı pompası yeniden ilginin odağı olmuştur.

1950’lerde Amerika ve İngiltere’de, evsel ısı pompalarında toprak kaynağının kullanımı ile ilgili çalışmalara başlanılmıştır. Baker, 1950–51 kış ayları boyunca ortalama ısıtma etki katsayısı 3’ün üzerine çıkan, çift tesirli, toprak kaynaklı bir ısı pompası geliştirmiştir. 1950’den 1960’a kadar düşük üretim güvenilirliği ve yüksek servis masrafları gelişmeyi engellemiştir. 1960’da Amerika’da elektrik fiyatlarının düşmesi ve daha düşük üretim güvenilirlikleri nedeniyle ilgiyi yine ısı pompaları üzerine toplamıştır. Nem almalı ısı pompalı kurutucular ise ticari olarak özellikle

gıda ve ahşap kurutma endüstrilerinde 1970'lerden bu yana yaygın olarak kullanılmaktadır [55-56].

Yaşadığımız yüzyıl içinde tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de önem kazanan enerji bunalımının, birlikte getirdiği sakıncaları bir ölçüde olsa azaltmak amacıyla; ısı enerjisi gereksiniminin minimum seviyeye indirgenebileceği ısıtma sistemlerinin geliştirilmesine ve bunun pratik olarak uygulanmasına kuvvetle ihtiyaç duyulmaktadır. Isı pompaları, bu sistemlere bir örnek olarak verilebilir. Isı pompaları en basit tanımı ile ekonomik değeri olmayan düşük kaynaklı bir bölgedeki ısıyı, ısıtılması düşünülen bölgeye pompalayan ve bu işi yapmak için çok az enerji harcayan (yaklaşık % 20–25) bir sistemdir [18].

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

Isı pompası sistemleri yoğunlaştırıcıdaki (kondenser) ve buharlaştırıcıdaki (evaporatör) ısı atımı ve çekimi şekillerine göre;

- Hava – hava
- Hava – su
- Su – su
- Toprak – hava

olmak üzere dört gruba ayrılır.

Nem yoğuşturarak kurutma, ısı kullanılarak bir katıdan kaldırılan nemin bir işlemde yoğuşturulmasıdır. Nemli ve sıcak hava ısı pompasının önce buharlaştırıcısı üzerinden (soğuk yüzeyli) geçerek çiy noktası sıcaklığı altına kadar soğumaktadır. Nemli hava içerisindeki su buharı soğuk yüzeylerde yoğunlaşarak su haline gelmekte ve fırından atılmaktadır. Buharlaştırıcıdan geçerek soğumuş ve kurumuş (nemi azalmış) olan hava yoğusturucu (sıcak yüzeyli) üzerinden geçerek tekrar ısınmakta ve kurutulacak ürün üzerine gönderilmektedir. Fırın içerisindeki hava su buharı karışımının dolaşımı fırın içerisine konan fanlar ile gerçekleşmektedir. Isı pompası sistemleri buharlaştırıcı, yoğusturucu, kompresör ve genleşme vanası ile sistem içerisinde dolaştırılan soğutucu akışkandan oluşmaktadır.

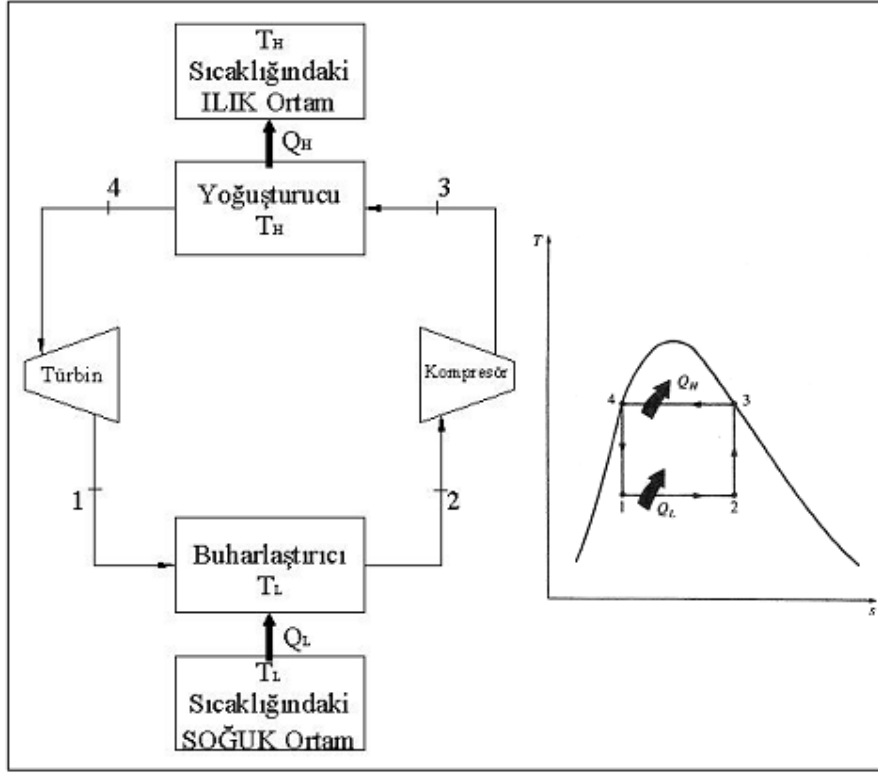
Sıcak ve nemli hava buharlaştırıcıdan geçerken ısı pompası içerisindeki soğutkanın buharlaşmasını sağlayan ısıyı bırakmaktadır. Sistem havasından ısı çekerek buharlaşan soğutkan kompresör tarafından emilerek sıkıştırılır. Basınç yükselmesi ile sıcaklık artmaktadır. Yüksek sıcaklık ve basınçtaki soğutkan kompresörden yoğusturucuya iletilmektedir. Buharlaştırıcıda kurutma havasından çekilen buharlaşma gizli ısı, yoğusturucudan yine kurutma havasına yoğunlaşma gizli ısı olarak atılır. Bu şekilde sistemde ısının geri kazanılması sağlanmaktadır. Bu işlemleri gerçekleştiren çift işlevli sisteme “ısı pompası” adı verilmekte ve kurutma işlemlerinde de faydalanılmaktadır. Kurutma olayı ısı ve kütle transferinin birçok durumu ve kurutulacak ürünün gözenek yapısı ile ilgilidir. Kurutma işlemi yoğun bir enerjiye sahiptir, çünkü nemin buharlaştırılması için kurutulacak ürün buharlaşma gizli ısına sahiptir. Kurutma sisteminde kullanılan enerjinin yoğun olması; sistemin enerji yönünden geliştirilmesinde çok dikkat edilmesine sebep olur. Son yıllarda ısı pompalı kurutucularda önemli gelişmeler olmuştur. Enerji tasarrufu yönünden etkili yeni tasarımlar ile sistemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Isı pompalarının bilinen enerji etkisi kurutma işlemlerinde etkili olarak kullanılmaktadır. Isı pompalı kurutucuların başlıca faydası atık ısıyı yeniden kullanmasından gelir ve ısı pompasının bu yapısı bir kurutma işlemindeki sıcaklığı ve nemi kontrol edebilecek yetenektir. Birçok araştırma ısı pompalı kurutucuların enerji etkinliğinin artırılması üzerinedir. Herhangi bir ısı pompalı kurutucuda ısı geçişi modeli olarak en çok

taşıyım (konveksiyon) ile ısı geişı kullanılır (diğeri ısı geişı modelleri göz ardı edildiğinde), ısı pompası da buna uygun bir şekilde tertip edilir. Raflar, tepsiler veya fırın ısı pompası sistemi ile birleştirilerek kullanılmasına rağmen diğeri çeşitleri de döner kurutucular gibi kullanılabilir. Flash ya da sprey kurutucular ısı pompalı kurutma için uygun değildir.

5.2. Isı Pompası Çevrimleri

5.2.1. Ters Carnot çevrimi

Bir soğutucu akışkanın doyma bölgesi içinde gerçekleşen ters Carnot çevrimi Şekil 5.1’de görülmektedir. 1–2 hal değişimi sırasında, soğutucu akışkana T_L sıcaklığındaki soğuk ortamdan, sabit sıcaklıkta Q_L miktarında ısı geişı olur. Akışkan daha sonra izantropik bir hal değişimiyle 3 haline sıkıştırılır ve hal değişimi sonunda sıcaklığı T_H olur. 3–4 hal değişimi sırasında, soğutucu akışkandan T_H sıcaklığındaki ortama sabit sıcaklıkta ısı geişı olur ve daha sonra akışkan, 1 haline izantropik olarak genişleyerek çevrimini tamamlar. 4–1 hal değişimi sonunda akışkanın sıcaklığı T_L olur. 3–4 hal değişimi sırasında soğutucu akışkan yoğuşturucuda doymuş buhardan doymuş sıvıya dönüşür.



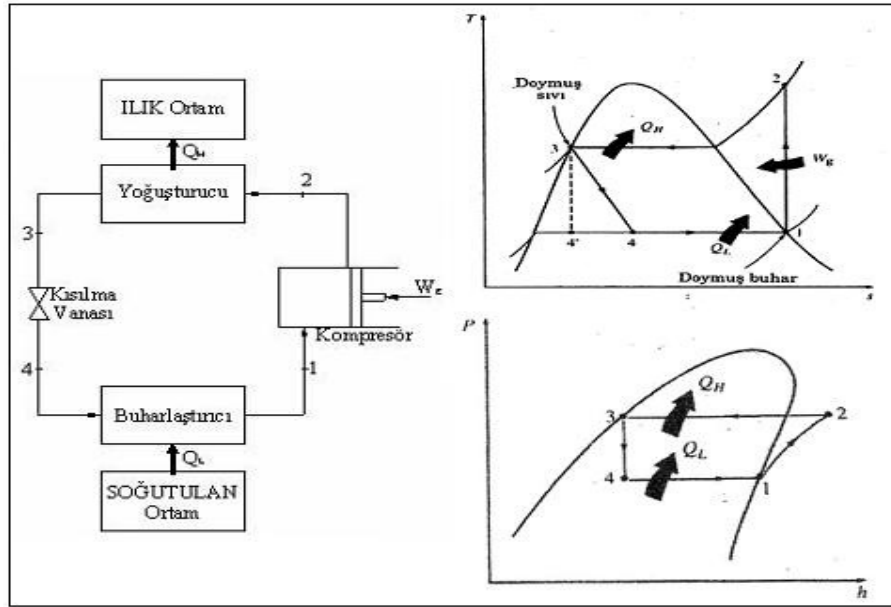
Şekil 5.1.Carnot soğutma makinesinin düzeni ve ters Carnot soğutma çevriminin T-s diyagramı [57].

Ters Carnot çevrimi, belirli sıcaklıklardaki iki ısı enerji deposu arasında çalışan en etkin soğutma çevrimidir, ancak uygulamada gerçekleştirilemez. Bu nedenle ters Carnot çevrimi, gerçek soğutma çevrimlerinin karşılaştırılabileceği bir standard oluşturur [57].

5.2.2. İdeal çevrim

Isı pompası sisteminde bulunan kompresör, yoğusturucu, kısma vanası ve buharlaştırıcının bir araya gelerek oluşturduğu kapalı çevrim, çevrimin T-s diyagramı ve çevrime ait P-h diyagramı Şekil 5.2.'de görülmektedir.

İdeal olarak, kompresör düşük basınç emiş hattından gelen çalışma akışkanı buharını izantropik olarak yüksek basınç atık hattına sıkıştırır (1–2 süreci). Çalışma akışkanına mekanik iş ilave edilince entalpi yükselir. Normalde politropik bir süreç olan sıkıştırma işlemi ideal çevrimde tersinir adyabatik veya başka bir deyişle izantropiktir. Kızgın buhar yoğusturucuda ısısını bırakır ve kısılma vanasından geçmeden önce (3–4 süreci) doymuş ya da aşırı soğumuş sıvı haline dönüşür. Düşük basınçlı sıvı buharlaştırıcıda buharlaşırken (4–1 süreci) buharlaşma gizli ısısını çevreden çeker [31].



Şekil 5.2. İdeal buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminin düzeni ve soğutma çevriminin T-s ve P-h diyagramı [57].

5.3. Isı Pompalı Kurutucular

Kurutma, endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan “enerji yoğun” işlemlerden birisidir. Enerji fiyatlarındaki artış, çevre koruma konusundaki yasal düzenlemeler, çalışma koşulları ve emniyet ihtiyaçları gittikçe sıkılaşmaktadır. Bu ihtiyaçlar ve enerji tüketimini karşılamak için kurutma tekniği ile ilgili yeni teknolojilerin kullanılması gerekmektedir. Kurutma sektör hacminin büyüklüğü ve Türkiye’nin içinde bulunduğu şartlar dikkate alındığında, yapılacak kurutucu tasarımlarının enerji/ekonomi/ekoloji ekseninde yapılma zorunluluğu vardır.

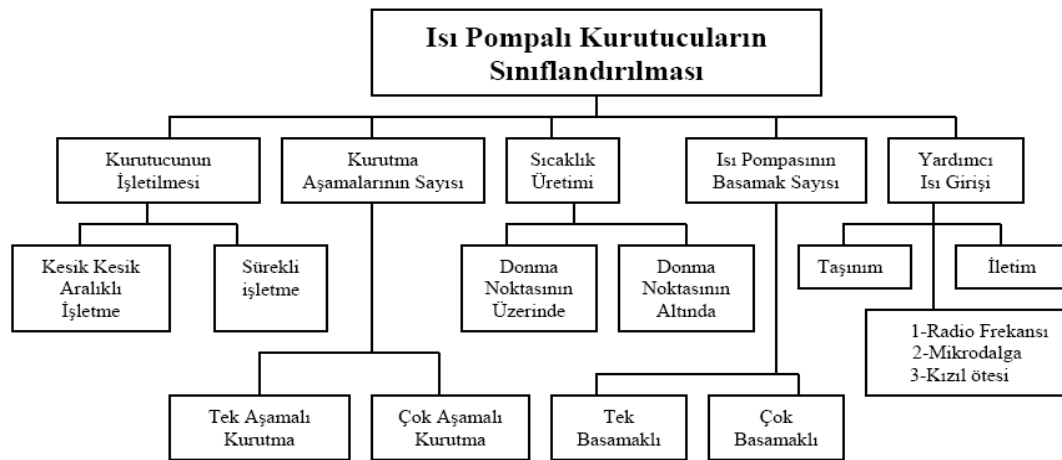
Enerji ve çevre problemleri göz önüne alındığında, etkili ısı enerjisi kullanımı önemli bir hale gelmiştir. Ekolojik olarak çevreyle dost yeni ısı enerjisi kullanma sistemleri geliştirilmelidir. Kurutmada enerji yoğun bir işlem olduğundan, etkin enerji kullanımına sahip kurutma süreçlerinin geliştirilmesine önem verilmektedir [25].

Genelde yaygın kullanılan kurutucularda enerji tasarrufu düşünüldüğünde, ısı değiştirici kullanımı ile atık ısı sisteminde çıkan kurutma havasından geri kazanımı veya kurutma havasının taze hava ile karıştırılarak tekrar dolaşımının sağlanması uygulamalarına sıklıkla karşılaşılr. Isı değiştirici ilave edilen bir kurutucuda amaç, kurutucudan ayrılan egzoz gazlarının ısını, kurutucuya giren gazlara vermek suretiyle bir ön ısıtma işleminin gerçekleştirmek ve bu yolla kurutma havasının ısıtılması için gerekli ısı miktarını ve dolayısıyla enerji giderlerini düşürmektir. Bazı kurutucularda ise yalnızca kurutucudan çıkan nemli havanın bir kısmını geri besleme yaparak, giriş taze havası ile karıştırılması sağlanır. Bu yöntemde kurutucuya giren havanın sıcaklığı ile beraber nem miktarı da artacağından, kurutma hızı azalacaktır. Kurutma havasının nemi kontrol edilerek egzoz miktarı kontrollü bir biçimde gerçekleştirilebilir. Atık egzoz havasındaki ısı birçok farklı ısı değiştirici sistemi ile geri kazanılabilir. Örneğin bu yöntemlerden bazıları: plaka ısı değiştirici kullanımı, ısı borulu ısı değiştirici ile ısı geri kazanımı, termosifon prensipli ısı geri kazanım sistemi, pompalı ısı taşıyıcı akışkanlı (su) ısı değiştiricili gibi yöntemler olarak sıralanabilir. Diğer bir yöntem ise dışarı atılan sıcak gazların

gizli ve duyulur ısısını sisteme kazandırmak için ısı pompası kullanımıdır [54]. Son yıllarda, ısı pompalarının kurutma alanında büyük enerji tasarrufu sağladığı bilinmektedir. Yakın zamanda geliştirilmekte olan yeni teknolojilerin de etkisiyle ısı pompalı kurutucuların potansiyel piyasasında önemli bir büyüme gerçekleşmiştir [25]. Sanayileşmiş yabancı ülkelerde birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılan ısı pompaları ne yazık ki Türkiye’de sadece konfor amaçlı uygulama alanları ile sınırlı kalmıştır. Isı pompalarının endüstriyel alanda özellikle mamullerin kurutulması işleminde çok büyük enerji tasarrufu sağladığı bilinmektedir.

Isı pompalı kurutucu, iki mühendislik sisteminin bir araya gelmesinden oluşmaktadır: Isı pompası ve kurutucu. Isı pompalı kurutma ile kontrol edilebilir bir kurutma ortamında (sıcaklık ve nem) düşük enerji tüketilerek, daha iyi kalitede ürünler elde edilir [31].

Isı pompalı kurutucular için süreç türü, kurutma aşamalarının sayısı, ısı pompasının kademe sayısı, yardımcı ısı geçiş modelleri ve ısı pompalı kurutucunun çalışma şekline bağlı olarak sınıflandırma şeması Şekil 5.3.’de verilmiştir. [25].

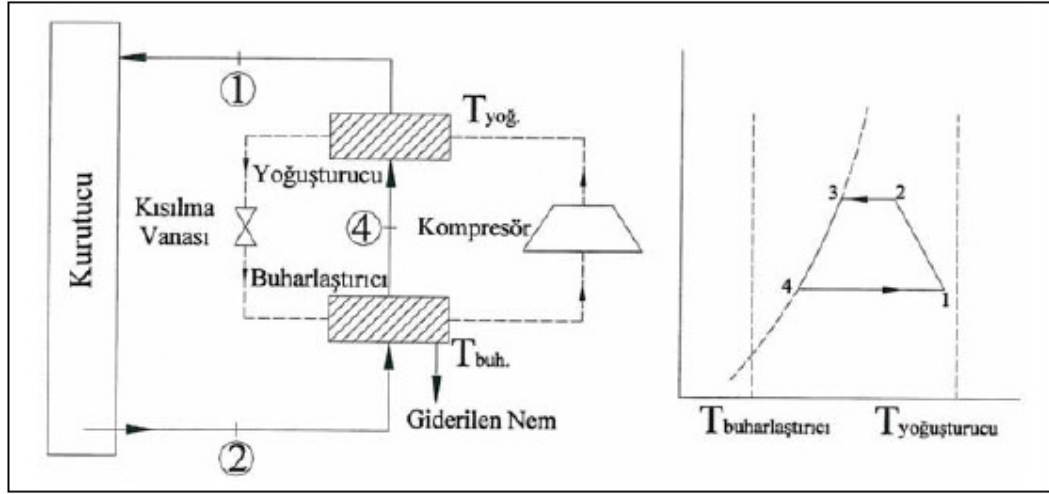


Şekil 5.3. Isı pompalı kurutucuların sınıflandırma şeması [25].

5.4. Isı Pompalı Kurutucunun Çalışma Şekli

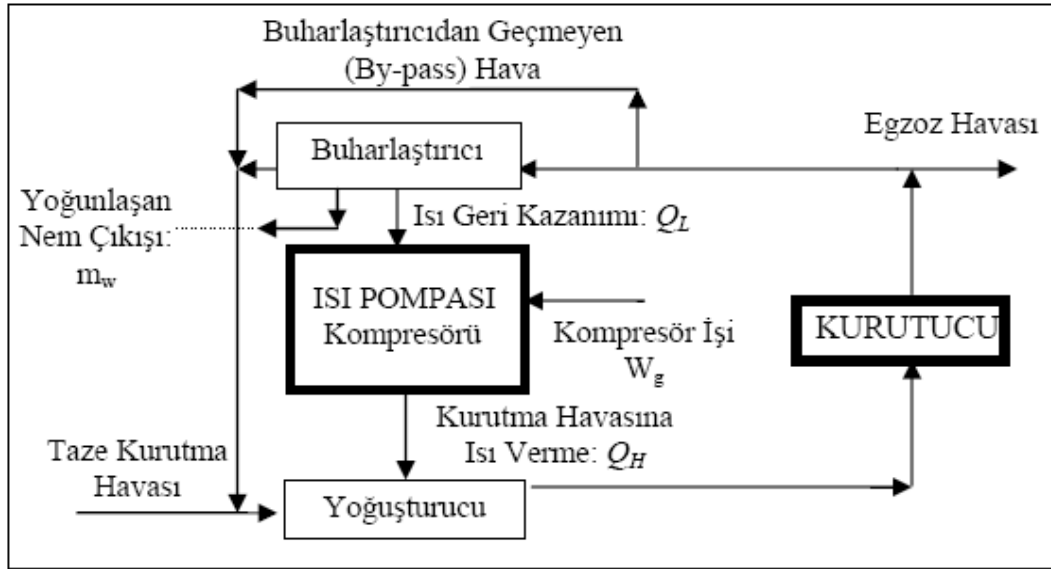
Geleneksel sıcak havalı bir kurutucuda, oldukça yüksek sıcaklıktaki kurutucu havasının kurutucudan dışarı atılması gerektiğinden önemli bir miktarda enerji (ısı) kaybı kaçınılmazdır. Isı pompası ile desteklenmiş bir kurutucuda kurutucu egzozundaki enerji tekrar kullanılmaktadır [31].

Kapalı sistem ısı pompaları uygulamasının temel prensibi Şekil 5.4.'de görülmektedir. Burada kurutucudan gelen düşük sıcaklıktaki hava yardımıyla buharlaştırıcıda, ısı pompası devresindeki soğutucu akışkan buharlaşır. Aynı zamanda egzoz (kurutma) havasından yoğunlaşan nem uzaklaştırılır. Soğutucu akışkan kompresörde sıkıştırılır ve yoğunlaştırıcıdan 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 yoğunlaşma sıcaklığının altına soğutulmalıdır. Bu sürecin izlediği yol Psikrometrik diyagramda Şekil 5.4.'de görülmektedir. Kurutucudan gelen egzoz havasının ısı pompası buharlaştırıcısına giriş koşulları 2 noktası ile belirlenir. Buharlaştırıcıda önce egzoz havasının sıcaklığı düşer (3), ardından içerdiği nem yoğunlaşarak 4 noktası ile gösterilen koşullara ulaşılır. Nemi uzaklaştırılan egzoz havası ısı pompası yoğunlaştırıcısında kurutma sıcaklığına getirilerek 1 noktası ile gösterilen koşula getirilir [54].



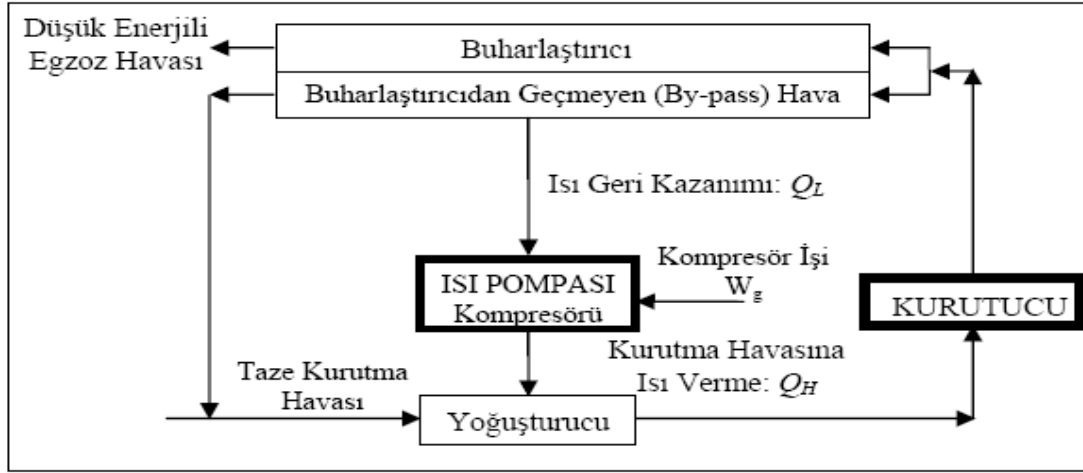
Şekil 5.4. IPK şeması ve Psikrometrik diyagramda gösterimi [54].

Isı pompalı kurutma sistemlerinde, uygulamada farklı yerleşimler söz konusudur. Şekil 5.5.'de "nem almalı ısı pompalı kurutucu" olarak adlandırılan kapalı çevrimli sistem görülmektedir [58]. 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 [52].



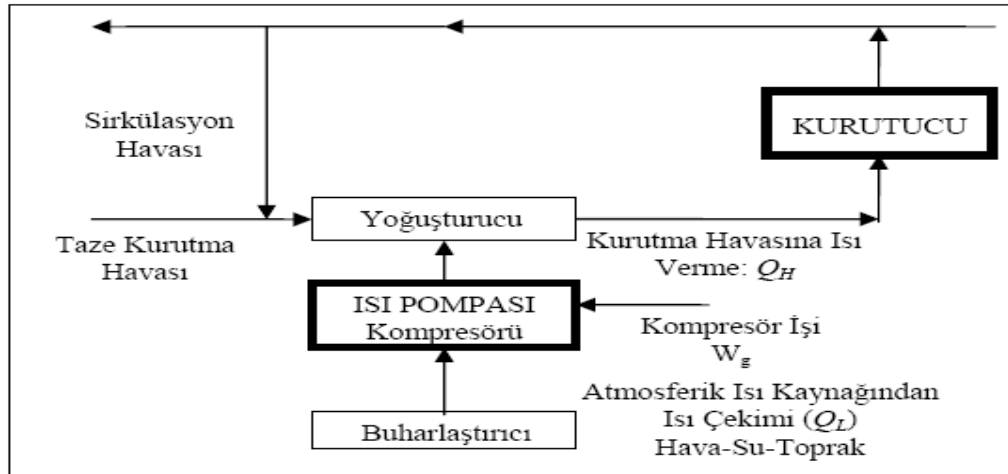
Şekil 5.5. Basit nem alıcı ısı pompalı kurutucu [58].

Şekil 5.6’de, ısı geri kazanımının ana amaç olduğu açık çevrimli sistem şematik olarak gösterilmiştir [58]. 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 geçen 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 5.6. Isı geri kazanımlı ısı pompalı açık hava çevrimli sistem [58].

Atmosferik ısı kaynaklı ısı pompalı kurutucuda ısı pompası doğrudan dış bir atmosferik kaynaktan (atmosferik çevre havası kaynaklı, toprak-su kaynaklı) buharlaştırıcısı aracılığı ile çektiği ısıyı kurutma havasının ısıtılmasında kullanır. Tasarruflu bir elektrik enerjisi kullanımı sağlar. Şekil 5.7.'de uygulama gösterilmiştir[52].



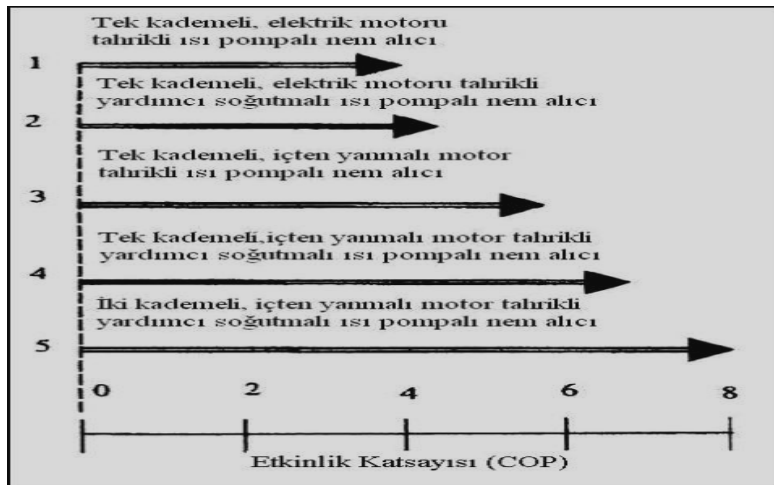
Şekil 5.7. Isı pompası ile bir atmosferik kaynaktan ısı çekimi ile kurutma havasının ısıtılması [52].

5.5. Gelişmiş Isı Pompalı Kurutucular

5.5.1. Çok kademeli ısı pompalı kurutucu

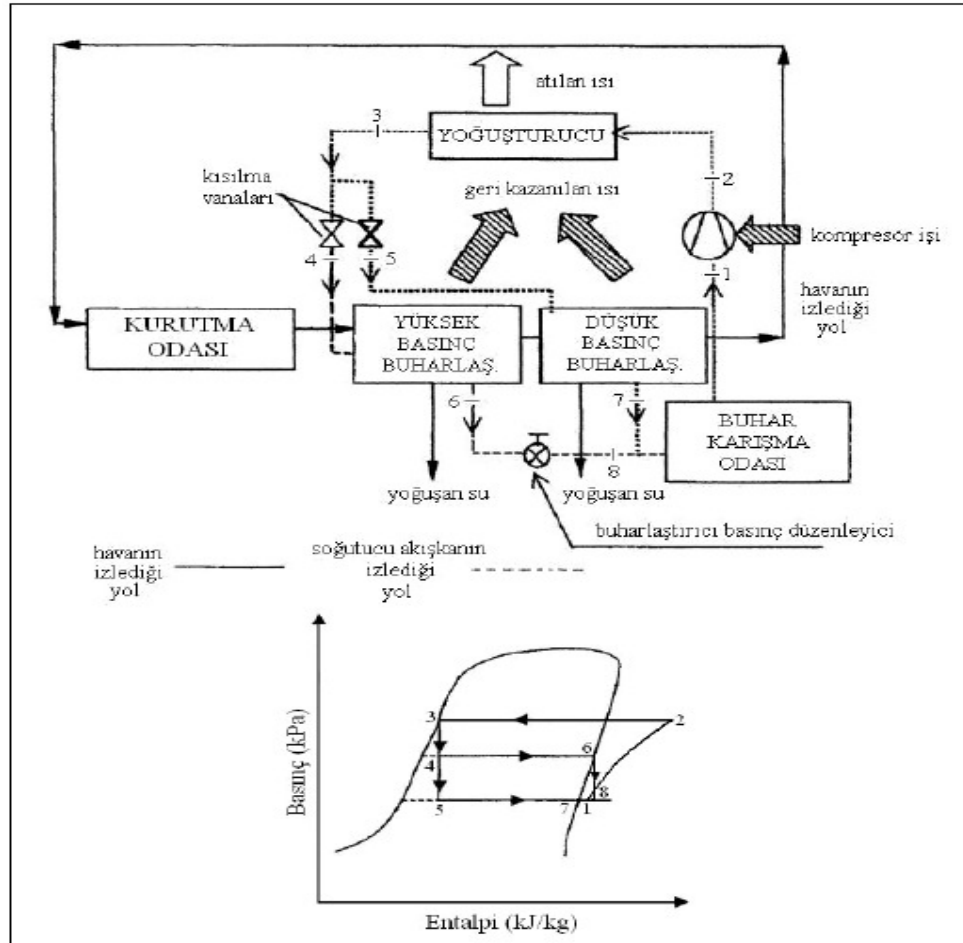
Mevcut soğutma çevrimlerinde tek kademeli kompresörler kullanılmaktadır. Kompresörün performansı buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki sıcaklık farkına çok büyük miktarda bağlıdır. Verimi artıracak bir yöntem çok kademeli ya da kaskad sıkıştırmadır. Böyle bir soğutma tekniği daha karışık bir mühendislik uygulaması olduğundan maliyetine rağmen sistem verimliliği çok net bir şekilde artmaktadır.

Geleneksel ısı pompalı kurutucuların büyük çoğunluğu tek kademeli buhar sıkıştırma çevriminden meydana gelmektedir. Bu tür sistemlerde soğutma ve nem alma ile kurutma havasının buharlaşma gizli ısısını geri kazanan yalnızca bir buharlaştırıcı vardır. Isı transferi için kullanılan fiziksel alan sebebiyle geri kazanılan ısı üzerinde mekanik bir kısıtlama oluşur. Bunun da ötesinde, tek kademeli ısı pompası çevrimi sıcaklık ve nem esas alınarak ayrı ayrı bağımsız kurutma odaları için farklı kurutma şartlarında kurutma havası üretemez. Şekil 5.8. farklı ısı pompası modellerinin enerji verimliliği açısından gelişimini göstermektedir.



Şekil 5.8. Farklı ısı pompası modellerinin etkinlik katsayıları [25].

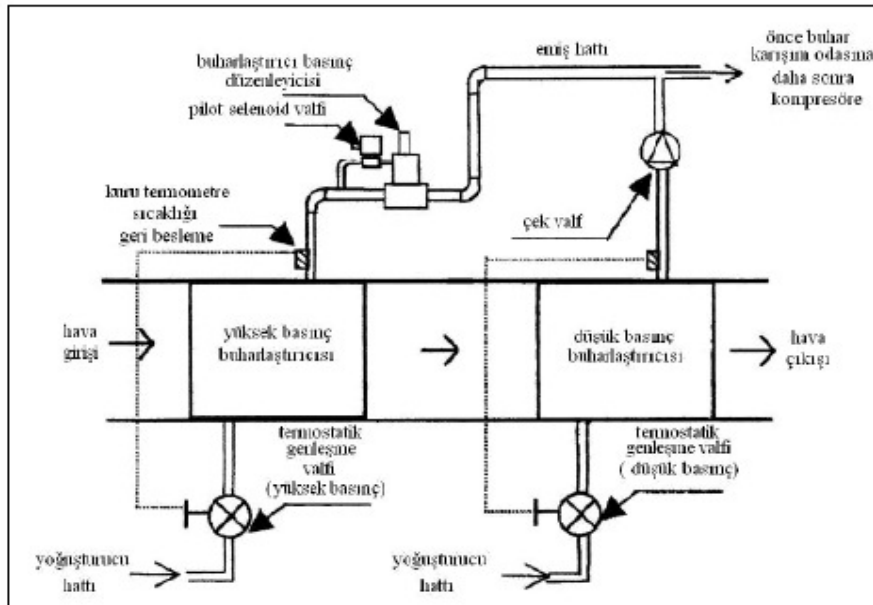
Şekilden de görülebileceği gibi iki kademeli ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği ile tek kademelinin verimliliği arasında açık bir fark vardır. Çok kademeli buhar sıkıştırma sistemleri Şekil 5.9.'da görüldüğü gibi kurutma odalarıyla beraber olacak şekilde tasarlanabilir.



Şekil 5.9. Kurutma odasıyla birleştirilmiş iki kademeli ısı pompası sistemi [25].

Çok kademeli ısı pompası çevriminin bir avantajı da bu sistem sayesinde kurutma havasının nemliliğini ayarlayan bir kontrol mekanizmasının olmasıdır.

İki kademeli ısı pompalı kurutucuda, soğutucu akışkan buharı yoğunlaştırıcı çıkışında iki akıma ayrılır. Akımlardan bir tanesi, düşük buharlaştırıcı sıcaklığına gelmesi için yüksek boşaltma kapasitesiyle kısılma vanasına giriş yaparken diğeri Şekil 5.10.'da görüldüğü gibi sıcaklığı daha yüksekken kısılmak üzere diğeri bir kısılma vanasına gönderilir.



Şekil 5.10. İki kademeli ısı pompası çevriminin soğutma devresi [25].

Yüksek ve düşük basınçlı buharlaştırıcılarda, soğutucu akışkanın buharlaşması meydana gelir. Yüksek basınçlı buharlaştırıcının çıkışındaki soğutucu akışkan buharının basıncı, düşük basınçlı buharlaştırıcının basıncına, akımlar karışma odasında karışmadan evvel bir basınç düzenleyici ile eşitlenir. Karışan buhar akımlarının basıncı daha sonra yoğunlaştırıcıya gelmeden önce kompresör ile yükseltilir. Bu iki kademeli çevrim daha sonra kendisini tekrarlar [25].

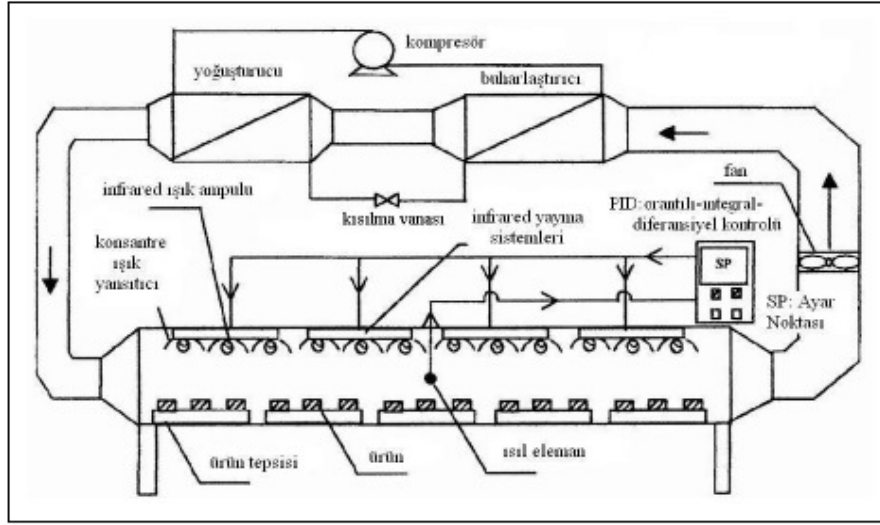
5.5.2. Kızıl ötesi ışınlı (infrared) ısı pompalı kurutucu

Kızıl ötesi kurutma, kurutma sürecini hızlandıran duyulur ısı ilavesiyle kuruma süresinin kısılmasında önemli rol oynar. İnfrared enerji, ısıtma elemanından ürünün yüzeyine ortam havasını ısıtmadan geçer. Çok sayıda araştırmacı kızıl ötesi kurutmanın avantajlarını kanıtlamışlardır.

Bu avantajlar;

- Kompakt ısıtıcılarla yüksek ısı transfer değerlerine (kağıt endüstrisinde 100 kW/m² gibi) ulaşılabilir.
- Isı kaynağından kurutma yüzeyine transfer kolaydır.
- Kolay ve hızlı süreç kontrolüne imkan sağlayan çabuk karşılama zamanı mevcuttur.
- Mevcut bir ısı pompasına kızıl ötesi ışınlı yayıcılarının eklenmesi kolaydır ve maliyet açısından bu işlem düşük sayılır.

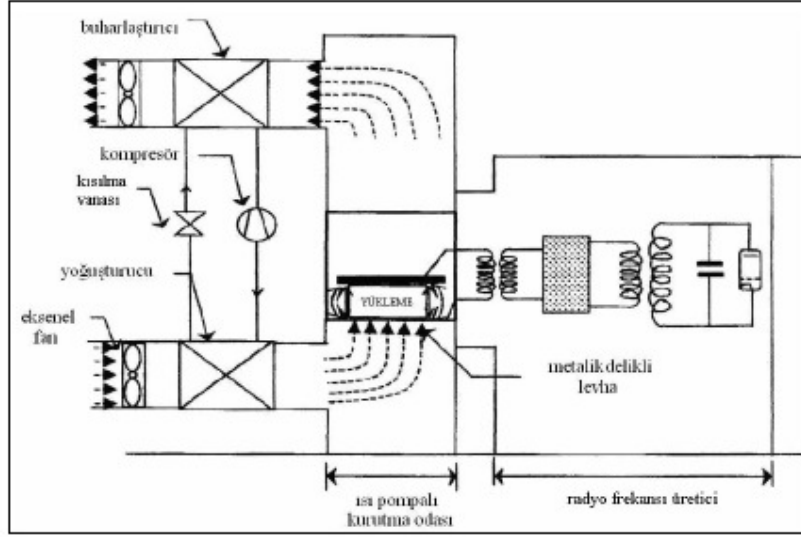
Kızıl ötesi ışınlı kurutma birçok araştırmacının çalışma alanı olmaya devam etmektedir. Paakkonen kızıl ötesi ışınlı kurutma ile ürünlerin kalitesinin iyileştiğini göstermiştir ve Dontigny grafit çamurunun kızıl ötesi ışınlı kurutulması ile kuruma oranının önemli bir şekilde yükseldiğini kanıtlamıştır. Ton tarafından yapılan en son çalışmada kesikli kızıl ötesi ışınlı ısı kaynağı ile desteklenmiş taşıyıcı kurutmada ürün rengindeki bozulma en aza inerken kurutma zamanının dikkate değer bir şekilde azaldığını göstermiştir. Şekil 5.11.'de kızıl ötesi ışınlı destekli bir ısı pompalı kurutucu sistemi görülmektedir [25].



Şekil 5.11. Kızıl ötesi ışınlam destekli ısı pompalı kurutucunun şematik diyagramı [25].

5.5.3. Radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucu

Geleneksel sıcak havalı kurutucularda özellikle azalan hız periyodunda ısı transferinde gerçekleşen sınırlama, radyo frekanslı ısıtma destekli geleneksel ısı pompalı kurutucularla giderilebilir. Radyo frekansı, hacimsel olarak ıslak materyalin içinde kurutma sürecini hızlandıran çift kutup (dipol) dönme ve iletimin birleşimiyle ısı üretir. Tipik bir radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucu buhar sıkıştırma ısı pompası sistemi ve kurutma süreci esnasında farklı aşamalarda kurutulan materyale radyo frekansı enerjisi veren radyo frekansı üreticisinden meydana gelir. Şekil 5.12 radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucunun şematik diyagramını göstermektedir [25].

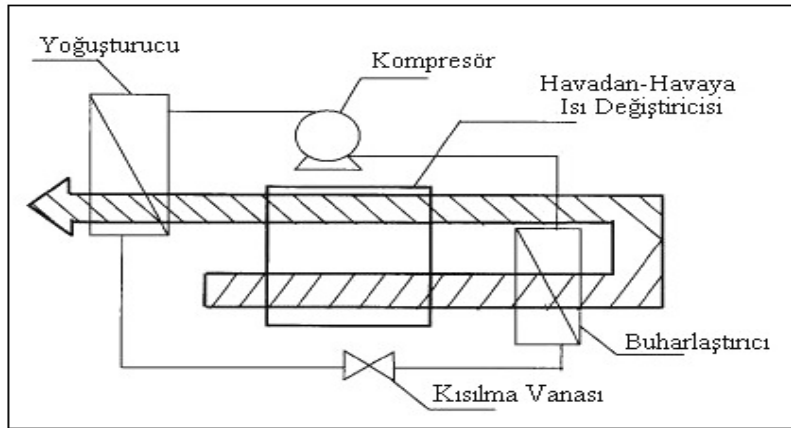


Şekil 5.12. Radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucunun şematik diyagramı [25].

Tek başına taşınımlı ısıtma ile kurutulması zor olan materyaller radyo frekansı destekli kurutucular için oldukça uygundur. Düşük ısı transfer karakteristiğine sahip seramikler ve cam lifi gibi materyaller ısıtma ve kurutma söz konusu olduğunda geleneksel olarak problemlili materyallerdir. Radyo frekansı ürün yığınının tamamını aynı anda ısıtır ve genellikle 82 °C'yi aşmayan düşük sıcaklıklarda suyu buharlaştırır. Suyun ürün içinden kapiler hareket yerine gaz halinde ayrılmasıyla katıların yer değişiminin önüne geçilmiştir. Çarpılma, renk bozulması ve çatlama gibi geleneksel kurutma yöntemlerinin sonuçları da engellenmiş olur. Aynı anda hem ürün içinde hem de dışında meydana gelen kuruma ile arzu edilen nem miktarına daha çabuk ulaşılır. Ürünün kalınlığı boyunca nem değişimini çok büyük miktarda azalttığı için diferansiyel çekme değeri çok düşer. Yüksek çekme potansiyeline sahip ürünler için radyo frekansı destekli ısı pompalı kurutucular kullanılabilir. Radyo frekansı destekli kurutucunun sağladığı nem dengeleme olgusu ürünün her yanında homojen bir kuruluk sağlar. Seramik gibi homojen kurutmaya ihtiyaç duyan materyalleri üreten sanayi kolları radyo frekansı destekli kurutmayı iyi bir alternatif olarak ele alabilirler.

5.5.4. Geliştirilmiş ısı pompası çevrimi

Isı pompası verimliliği, nem alıcı üzerinden geçen hava devresinin dikkatli bir şekilde ele alınmasıyla artırılabilir. Buharlaştırıcıda, genellikle su buharı ile tam olarak doymuş hava akımının gizli ısısı çekilmeden önce çiy noktasının altına soğutma gerçekleşmelidir. Sabit bir sıcaklıkta gelen havanın bağıl nemliliği düşükse, buharlaştırıcıda gerçekleştirilen soğutma işleminin büyük bir kısmında hava çiy noktası sıcaklığına düşürülürken, geri kalan kısımda ise nem alma ve ısı geri kazanımı gerçekleşir. Şekil 5.13.'de ısı pompası çevrimini önemli bir şekilde iyileştirebilen bir havadan havaya ısı değiştiricisinin kullanımı gösterilmektedir. Giriş havası öncelikle nem alma işleminin ilk aşaması olarak çiy noktası sıcaklığının altına düşürülmek üzere soğuk bir ısı değiştiricinin üzerinden geçirilir. Soğutulmuş hava, tam olarak nem alma işlemini gerçekleştirmek ve nemli havada bulunan atık ısıyı çekmek üzere çalışan buharlaştırıcıdan geçirilir. Aşırı soğutulmuş hava daha sonra giriş havasını soğutmak üzere havadan havaya ısı değiştiricisine tekrar yönlendirilir. Bu sayede nem alma işleminin verimi ikiye, buharlaştırıcıda atık ısı alma kapasitesi üçe katlanabilir [25].



Şekil 5.13. En yüksek verimliliğin elde edilmesi amacıyla havadan havaya ısı değiştiricisi ile ısı pompası çevriminin şematik gösterilişi [25].

5.6. Isı Pompalı Kurutucuların Üstünlükleri ve Sınırlamaları

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

5.6.1. Isı pompalı kurutucuların üstünlükleri

- 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 [59].
- Isı pompalı kurutucular sıcaklık, nem ve hava akış değerlerinin tam ve bağımsız kontrolüne olanak sağlarlar. Sürekli kontrol edilen kurutma koşulları ısı hassas materyaller için fayda sağlarken açık bir şekilde daha iyi kalitede ürün elde edilir.
- Tipik olarak $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye (ilave ısıtmayla) sıcaklık ve % 15-80 (nemlendirme sistemiyle) bağıl nemliliğe kadar çok geniş kurutma şartları sağlanabilir [25].
- Yüksek değerli ürünler için kurutma çevresinin kontrolü mükemmel bir şekilde sağlanırken, düşük değerli ürünler içinse elektrik tüketimi düşer.
- Kurutma işlemi sonunda aynı kalitede ürün elde edilir.
- Steril süreç şartları sağlanabilir [59].

5.6.2. 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 en uygun çalışma şartlarında tutabilmek için düzenli bakım yapılmalıdır.
- Borularda bir çatlak oluşması halinde soğutucu akışkan çevreye sızabilir. Sızıntı olması durumunda ısı pompası çevriminin basıncı yavaş yavaş düşecektir ve kurutucunun performans değeri azalacaktır.
- Güneş enerjili kurutma gibi diğer kurutma sistemleriyle karşılaştırıldığında ısı pompalı kurutucuların ilk yatırım maliyetleri daha yüksek olabilir. Bunun yanında ısı pompalı kurutucuların ısıyı geri kazanmaları çalışma maliyetlerini düşürür bu da yüksek maliyetlerini dengeler [25].
- Bazı soğutucu akışkanların (örneğin R22 için 99,6 °C) kritik basınç seviyelerinden dolayı yüksek sıcaklıkta kurutma yapılabilmesi için ilave ısıtmaya ihtiyaç duyulur.
- Arzu edilen kurutma şartlarına ulaşmak için sistem, kararlı hal periyoduna ihtiyaç duyar.
- Daha büyük soğutma sistemleri için üç fazlı güç ünitelerine ihtiyaç duyulabilir [59].

6. TEORİK ANALİZ

6.1. Kurutma İşlemi İçin Gerekli Enerji Miktarının Hesaplanması

Kurutma işlemlerinde kapasite belirlenirken, kurutma hacmi için gerekli enerji hesap edilir. Bu enerji sistemdeki ısı kaynağı (ısı pompası) tarafından sağlanmalıdır.

Kurutma tüneline üzümlerin kurutulması için gerekli olan toplam enerji miktarı;

$$Q_{\text{VTOPI}} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 \quad (6.1)$$

olarak kurutucuda harcanan ısıların toplanması ile bulunur. Harcanan ısılar aşağıdaki verilmiştir.

Kurutucu duvar ve tavan panellerinin ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_1 = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6.2)$$

Kurutucu havasının ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_2 = V \cdot c_{p,h} \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (6.3)$$

Üzümlerin ısıtılması için gerekli enerji:

$$q_3 = m_u \cdot c_{p,u} \cdot \Delta T \quad (6.4)$$

Üzümdeki nemin buharlaştırılması için gerekli enerji:

$$q_4 = m_u \cdot q_{4a} \quad (6.5)$$

$$q_{4a} = [h_{ss} - h_s] \quad (6.6)$$

Eşitlik 6.6'da kg başına verilen ısı bulunarak Eşitlik 6.5'den gerekli olan enerji hesaplanabilir.

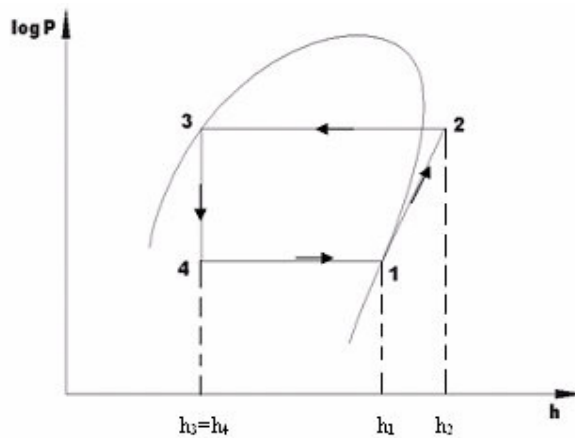
Kurutucudan çevre havasına olan ısı kayıplarını karşılamak için harcanan enerji:

$$q_5 = K.A. \left[\frac{(T_k + T_{iç})}{2} - T_d \right] . Z \quad (6.7)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{\alpha_{du}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (6.8)$$

eşitliği ile bulunur.

Eşitlik 6.1'deki gerekli toplam ısı miktarını ısı pompasının yoğuşturucusu sağlamalıdır. Gerekli yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve kompresör kapasiteleri çalışma sıcaklık aralıkları belirlenerek kullanılan soğutkanın log P-h diyagramından yararlanılarak hesaplanabileceğinden çevrimin log P-h diyagramı Şekil 6.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Isı pompası sisteminin log P-h diyagramı

Kullanılan soğutkanın log P-h diyagramında;

h_1-h_2 : Kompresör giriş çıkış,

h_2-h_3 : Yoğuşturucu giriş çıkış,

h_3-h_4 : Genleşme valfi giriş çıkış

entalpi değerleridir ve yoğuşturucu kapasitesi Eşitlik 6.1'deki gerekli toplam ısıнын kompresörün dinlenmesi için % 25 fazlası kadar alınarak, sistemde kullanılacak soğutkan debisi;

$$\dot{Q}_K = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (6.9)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanmaktadır. Yoğuşturucunun kurutma havasına verdiği ısı debisi;

$$\dot{Q}_{ve} = \dot{Q}_K \cdot IPK_h \quad (6.10)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanır.

Kurutucu çalıştığı süreci ısı pompası sistemi de devrede kalacağından, kurutucu çalışma süresi (IPK_h), aynı zamanda ısı pompası çalışma süresidir.

Eşitlik 6.1'deki gerekli toplam ısı miktarı, yoğuşturucu kapasitesi kabul edilerek soğutkan debisi bulunan sistemde, kompresör gücü için de;

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (6.11)$$

eşitliğinden faydalanılır. Sistemdeki buharlaştırıcı kapasitesi;

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (6.12)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Kurutma, enerji tabanlı bir süreçtir. Kurutma işleminin daha iyi anlaşılması için kurutma sisteminin termodinamik analizinin yapılması yerinde olacaktır. Bu kapsamda tünel kurutucunun kurutma kısmının; süreklilik eşitliği (kütle korunumu kanunu), 1. kanun (enerji) ve 2. kanun (ekserji) analizleri incelenecektir.

Tünel tipi kurutucunun termodinamik analizinde ilk önce yapılması gereken, analize konu olan kısmın sistem olarak tanımlanmasıdır. İçinden enerji akışlarının olduğu sınırlar tarafından çevrelenmiş bir sistemi, yani; kurutucu kısmını “Kontrol Hacmi” olarak nitelendirebiliriz. Ardından analize konu olan sistemin termodinamik modelinin belirlenmesi ve seçilmesi gerekir. Tünel tipi kurutucunun kurutma kısmı analizinde SASA (Sürekli Akışlı Sürekli Açık Sistem) modelinde incelenecektir.

Sürekli akışlı açık sistem (SASA) için şu kabuller dikkate alınmıştır. Bunlar:

- Seçilen kontrol hacmi içinde, yaygın hiçbir özellik zamanla değişmez. Böylece kontrol hacminin kütlesi, hacmi (sınır işi sıfırdır) ve toplam enerjisi sabit kalır.
- Kontrol hacminin sınırlarındaki hiçbir özellik zamanla değişmez. Yani kontrol hacminin herhangi bir noktasında akışkan özellikleri sabittir.
- Kontrol hacminin çevresiyle ısı ve iş alışverişi zamanla değişmez. Yani sistemin çevresiyle birim zamanda yaptığı ısı ve iş alış veriş sabittir.

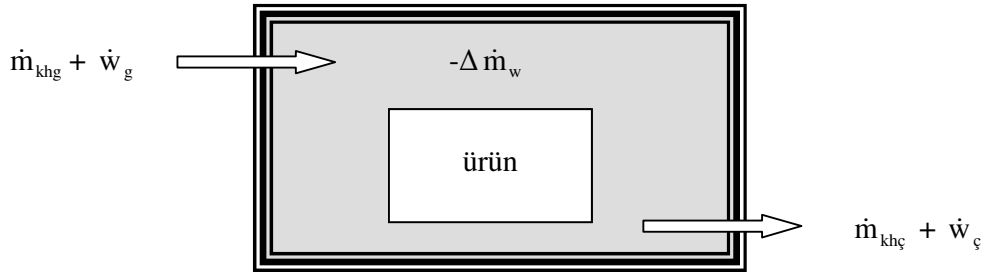
6.2. Kütle Denkliği (Süreklilik Eşitliği)

Tasarımı yapılan kurutma sisteminin termodinamik analizinde gerekli olan ilk şey, sisteme (kontrol hacmine) giren ve çıkan gaz, katı ve sıvı maddelerin miktarları ile ilgili bilgiye sahip olmaktır. Bu nedenle, bir enerji eşitliğinde mevcut bulunan verilen ve alınan enerjilerin hesaplanmasından önce bir kütle eşitliği hesabının yapılması gerekir. Kütle eşitliği hesaplarının sabit denge şartlarında yapılması gerekir. Denge şartlarında, bir birim zamanda sisteme giren kütle akışı, sistemden çıkan kütle akışına eşittir.

Tünel kurutucunun kontrol hacmi için süreklilik eşitliğinde; sisteme giren ürün ve sisteme giren akışkan miktarı ile yine sistemden çıkan ürün ve hava miktarını dikkate almak gerekmektedir.

Kurutucuları, çalışma rejimi bakımından sürekli ve süreksiz kurutucular olarak iki sınıfta incelenebilir. Şekil 6.2.'de verilen sürekli kurutmada, ürün belirli bir sürede kurutucudan geçerken ürünlerdeki sıvı, $\Delta \dot{m}_{sıvı}$ kadar azalır.

Şekil 6.2.'de verilen süreksiz kurutmada, kurutma süresince kurutucudan $\dot{m}_{kh}$ kadar kuru hava geçer. Bu hava kurutucuya girişte $\dot{m}_{b1}$ kadar suyu beraberinde getirecek ve çıkışta $\dot{m}_{b2}$ kadar su buharı götürecektir. Bu süre içerisinde kurutulacak malzemenin miktarında $\Delta \dot{m}$ kadar azalma olur. Bu çalışmada yapılan kütle bağıntısı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Kütle denklığı için tünel kurutucunun kontrol hacmi (süreksiz akış)

Süreklilik eşitliğinin genel ifadesi:

$$\sum \dot{m}_ç = \sum \dot{m}_g \quad (6.13)$$

Kütle, ele alınan açık sisteme yalnız bir kısımdan giriyorsa ve açık sistemi bir kısımdan terk ediyorsa süreklilik eşitliği;

$$\dot{m}_ç = \dot{m}_g = \dot{m},$$

$$\sum \dot{m}_{khg} = \sum \dot{m}_{khç} = \sum \dot{m}_{kh} \quad (\text{kuru hava için}) \quad (6.14)$$

$$\sum (\omega_g \cdot \dot{m}_{khg} + \dot{m}_w) = \sum \omega_{ç} \cdot \dot{m}_{khç} \quad \text{veya} \quad \sum (\dot{m}_{wg} + \dot{m}_w) = \sum \dot{m}_{wç} \quad (\text{nem için}) \quad (6.15)$$

şeklinde yazılabilir.

6.3. Enerji Dengesi (Termodinamiğin I. Kanunu)

Enerji eşitliği, normal sabit çalışma şartlarında (denge şartlarında) bir sisteme verilen enerji miktarı ile sistemden çıkan enerji miktarı arasında bir denklik kurulması anlamını taşımaktadır.

Enerji denkliği, aşağıdaki konuların tespitine imkân sağlamaktadır: [60]

- Gerçekten kullanılan veya tüketilen enerjinin hesaplanması,
- Tesis verimliliğinin, performansının düzenli olarak izlenmesi,
- Malzeme, tesis ve süreç konularında yapılabilecek değişikliklerin, enerji tüketimine etkilerinin değerlendirilmesi,
- Enerji tüketimini azaltmak amacıyla yapılabilecek iyileştirme çalışmaları planında öncelik verilmesi gereken yerlerin tespiti,
- Örneğin yeni bir tesis, değişim veya yenileme gibi iyileştirme planları için veri sağlanması,
- Mümkün olan en düşük enerji tüketimi ile en yüksek üretimin sağlanması gibi, sürecin temel amacının gerçekleştirilmesidir.

Enerji eşitliği, enerjilerin bir sistem içinde birbirlerine dönüşümleri ile ilgilenmekten çok enerji girdisini belirleyen, bir sistemden çıkan miktarların bağlı dağılımlarını gösterir. Bununla birlikte bir sistem içerisinde enerjinin ne kadar verimli olarak

kullanıldığıının görülmesi için sistem içinde enerji dönüşümlerine bakılması da o derecede önemlidir.

Kontrol hacmindeki enerji değişimi; sisteme giren havanın entalpisinden, çıkan havanın entalpisinin ve kurutucunun; duvarlarından, kurutma arabaları ve giriş-çıkış kapıları vb. yerlerden kaçan enerjinin çıkartılması ile elde edilir. Enerji eşitliğinin doğru olabilmesi, bir anlam taşıyabilmesi için kontrol hacmi içinde bulunan sistemin, sabit ve denge şartlarında çalıştırılıyor olması gerekir. Sabit, denge şartlarında, kontrol hacmine giren toplam enerji miktarı, bu hacimden çıkan toplam enerji miktarına eşit olacaktır.

Termodinamiğin I. Kanunu (Enerji Eşitliği):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\dot{m}_{\dot{c}}} \dot{m} (h + \frac{1}{2} V^2 + g.z) - \sum_{\dot{m}_g} \dot{m} (h + \frac{1}{2} V^2 + g.z) \quad (6.16)$$

Enerji eşitliğinde kinetik enerji ve potansiyel enerji değişimleri, potansiyel enerji değişimleri yanında çok küçük olduğundan ihmal edilerek hesaplamalarda enerji eşitliği aşağıdaki gibi kullanılmıştır:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{\dot{c}} \cdot h_{\dot{c}} - \sum \dot{m}_g \cdot h_g \quad (6.17)$$

Kurutma havasının bağıl nem oranı, kurutma havasının ve fan çıkışındaki entalpisi aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilir.

$$\phi = \frac{w.P}{(0,622 + w)P_{\text{sat @ T}}} \quad (6.18)$$

$$h = c_{p_{kh}} T + w \cdot h_{\text{sat @ T}} \quad (6.19)$$

$$h_{f_c} = \left[\left(W_f - \frac{V_{f_c}^2}{2 \times 1.000} \right) \left(\frac{1}{\dot{m}_{kh}} \right) \right] + h_{fg} \quad (6.20)$$

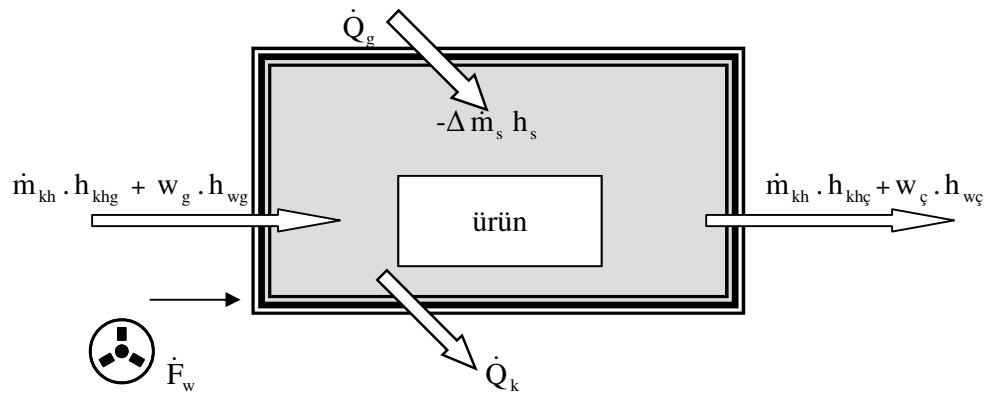
Eşitlik 6.19'dan elde edilen entalpi değeri ve mevcut kuru termometre sıcaklık değeri kullanılarak fan çıkışındaki kurutma havasının özellikleri psikrometrik diyagram kullanılarak bulunabilir.

Nemin çekilmesi için kurutma tüneline kullanılan enerji miktarı;

$$\dot{Q}_{DT} = \dot{m}_{hg} (h_{gh} - h_{ch}) \quad (6.21)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Kurutucunun kontrol hacmindeki enerji değişimi; kurutma havasına verilen $\dot{Q}$ ısıısının verildiği, havanın hareketini sağlamak için fan kullanarak işi yapıldığı ve çevreye $\dot{Q}_k$ ısı kayıplarının olduğu kabul edilirse, enerji dengesi şekil 6.3.'deki gibi gösterilebilir. Burada kurutulacak maddenin başlangıçta sahip olduğu nemi ile son durumda sahip olduğu nem değişimi için gerekli ısı ($\dot{Q}$) ısı pompasından faydalanılarak yoğunlaştırucudan elde edilecektir. Buharlaştıran suyu hava almaktadır. Hava başlangıçta $\dot{m}_{b1}$ nemine sahip iken çıkışta $\dot{m}_{b2}$ nemine sahiptir. Bunun için kurutma havasındaki nem değişimi, ürünün kütlesindeki değişime eşittir.



Şekil 6.3. Süreksiz kurutmada enerji dengliği için tünel kurutucunun kontrol hacmi

Enerji eşitliği;

$$\dot{Q}_g + F_w - \dot{Q}_k = \dot{m}_{kh} (h_{kh\check{c}} - h_{khg}) + w_{\check{c}} \cdot h_{w\check{c}} - w_g \cdot h_{wg} - \Delta \dot{m}_s \cdot h_s \quad (6.22)$$

Kurutma tüneline zamana bağlı giren enerji miktarı;

$$Q_g = \dot{m}_{khg} \cdot c_{p_{khg}} \cdot (T_g - T_o) \cdot \left(\frac{\text{ölçümsüresi}}{3600} \right) \text{ (kWh)} \quad (6.23)$$

Kurutma tüneline zamana bağlı çıkan enerji miktarı;

$$Q_{\check{c}} = \dot{m}_{kh\check{c}} \cdot c_{p_{kh\check{c}}} \cdot (T_{\check{c}} - T_o) \cdot \left(\frac{\text{ölçümsüresi}}{3600} \right) \text{ (kWh)} \quad (6.24)$$

Kurutucu tarafından zamana bağlı çekilen enerji miktarı;

$$Q_{\check{c}ek} = \dot{m}_{kh} \cdot c_{p_{kh}} \cdot (T_g - T_{\check{c}}) \cdot \left(\frac{\text{ölçümsüresi}}{3600} \right) \text{ (kWh)} \quad (6.25)$$

eşitlikleri ile bulunur. Kurutucunun enerji kullanım oranı (EKO) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$EKO_k = \frac{Q_g - Q_{\check{c}}}{Q_g} \cdot 100 \quad (6.26)$$

6.4. Ekserji Eşitliği (Termodinamiğin II. Kanunu)

Ekserji (kullanılabilirlik) analizi bir tesiste kayıp enerjilerin yerlerinin bulunması ve kayıpların önlenmesine yönelik yeni tasarımların yapılmasında oldukça önemli bir analizdir.

Termodinamiğin II. Kanunu, ısı enerjisinin sadece belirli bir kısmının işe çevrilebileceğini, çevrenin iç enerjisinden yararlanarak iş elde edilemeyeceğini belirterek enerji dönüşümlerini sınırlamakta ve ayrıca bütün doğal olayların tersinmez olduğuna dikkat çekerek enerjinin bir türden diğer bir türe dönüşümünde veya bir sistemden diğer bir sisteme geçişinde, insanların faydalanabilecekleri kısmının azalacağını ve sürekli değer kaybedeceğini ifade etmektedir. Bir sürecin tersinmezliği, Termodinamiğin II. Kanunu ile bulunabilir ve entropi üretimindeki artışla ifade edilir.

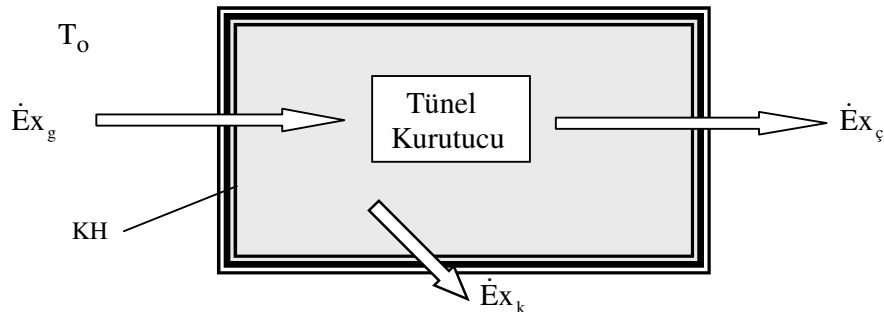
Enerji, ekserji ve anerji olmak üzere iki kısma ayrılır. Kısaca, enerjinin kullanılabilir kısmına “ekserji”, kullanılamayan kısmına ise “anerji” denir. Ekserji, referans şartlarına bağlı olarak bir akışkanın, gazın veya bir kütlenin dengede olmayan durumunun sonucu olarak; bir gazdaki, akışkandaki veya kütledeki kullanılabilir işi ifade eder. Böylece ekserji; bir sistemdeki her bir sürecin enerji dengesinden yararlanarak belirlenebilen diğer özelliklerden hesaplanabilir. Genel olarak ekserji; iç enerjideki değişimleri, entropi değişimini, iş değişimini, momentum ve yerçekimi gibi etkileri içerir [61].

Ekserji analizi, Termodinamiğin II. Kanununa ve tersinmez durum değişimlerindeki entropinin genel ifadesine bağlıdır. Başka bir deyişle, termodinamiğin II. Kanunun mühendislik sistemlerine uygulanmasını ve entropinin yoğun kullanımını gerektirir. Bir sistemin ekserji analizinde amaç, sistemin denge durumundaki ekserji değerini belirlemek ve belli şartlarda meydana gelen işlemler için ekserji dönüşümünün nedenini belirlemektir. Bunun için ilk hedef, ekserji kayıplarının bulunduğu yeri, bu kayıpların ne büyüklükte olduğunu, bu kayıpların ne zaman giderileceğini ve böylece

sistemin ikinci kanun veriminin nasıl iyileştirileceğini bilmektir. Genel olarak ekserji kayıpları, gerçek sistemlerdeki veya elemanlardaki tersinmez durum değişimlerinde meydana gelen entropi üretiminden kaynaklanır [61].

Sistemdeki ekserjiyi değerlendirmede iki yaklaşım vardır. Bunlardan biri, yeni sistemler tertip etmektir; diğeri de mevcut sistemleri değerlendirmektir. Bu durumda, çevre referans alınarak mevcut sistemdeki ekserjiyi girişi-çıkışı ve ekserji kayıpları kolayca belirlenebilir. Eğer bir işlemde veya sistemde yararlı iş yoksa o zaman ekserjide kayıp var demektir [61].

Sonuç olarak; bir sistemin ekserji analizini yapmak, sistemdeki verimsiz işleri, elemanları ve çalışma durumlarını belirleyerek, II. Kanun verimini iyileştirmek için gereklidir. II. Kanun verimini iyileştirmek için, sistemin durum değişimindeki ısıya, işe ve kütsel debiye bağı kayıplardan kaynaklanan ekserji kayıplarının miktarını, yerini ve türünü belirlemek gerekir. Tünel tipi kurutucunun ekserji girişi, kontrol hacmine kütsel girişi ile, ekserji çıkışı ise kütsel çıkışı ile olmaktadır. Kurutucunun kontrol hacmi atmosferik çevre ile etkileşim halindedir. Yani; ölü ortam olarak çevre şartları geçerlidir. Şekil 5.4.'de tünel kurutucu için ekserji eşitliği verilmiştir.



Şekil 6.4. Ekserji denklığı için tünel kurutucunun kontrol hacmi

Kurutucunun kontrol hacmindeki ekserji denklığı aşağıdaki gibidir:

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_\phi - \sum \dot{E}x_k \quad (6.27)$$

Kontrol hacmine giren net ekserji,

$$\dot{E}x_g = \dot{m}_{gh} [(h_{gh} - h_o) - T_o (s_{gh} - s_o)] \cdot \left(\frac{\text{ölçümsüresi}}{3600} \right) \text{ (kWh)} \quad (6.28)$$

Kontrol hacminden çıkan net ekserji:

$$\dot{E}x_{\dot{\varsigma}} = \dot{m}_{\dot{\varsigma}h} [(h_{\dot{\varsigma}h} - h_o) - T_o (s_{\dot{\varsigma}h} - s_o)] \cdot \left(\frac{\text{ölçümsüresi}}{3600} \right) \text{ (kWh)} \quad (6.29)$$

Buradaki kurutma işleminde sabit basınç şartlarında ısıtılan hava akışı vardır, Bu nedenle bir T sıcaklığından T_o sıcaklığına özgül entropi değişimi;

$$\Delta s = \bar{C}_p \ln \frac{T_o}{T} \quad (6.30)$$

şeklinde olur. Burada:

$\bar{C}_p$: Sıcaklık aralığındaki ortalama özgül ısıdır.

Entalpi değişimi ise özgül ısı ve sıcaklığın $(T - T_o)$ çarpımıdır.

$$\Delta h = \bar{C}_p (T - T_o) \quad (6.31)$$

Kurutucuya giren net ekserji ve çıkan net ekserji (6.28 ve 6.29) ifadeleri kullanılarak,

$$\dot{E}x_g = \dot{m}_{hg} \bar{C}_p [(T_{hg} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{hg}}{T_o}] \quad (6.32)$$

$$\dot{E}x_{\dot{\varsigma}} = \dot{m}_{h\dot{\varsigma}} \bar{C}_p [(T_{h\dot{\varsigma}} - T_o) - T_o \ln \frac{T_{h\dot{\varsigma}}}{T_o}] \quad (6.33)$$

Oransal verim bağlantısı kullanılarak kurutucu kontrol hacminin ekserjetik verimi;

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_g - Ex_k}{Ex_g} = 1 - \frac{Ex_k}{Ex_g} \quad (6.34)$$

şeklinde hesaplanır.

6.5. Isı Pompası Etkinlik Katsayısı

Isı Pompası Etkinlik Katsayısı (COP_{hp}): Yoğuşturucuda alınan ısının kompresörde verilen güce oranı olarak tanımlanır [54]. COP_{hp} ve COP_{ws} şeklinde iki tanımlama yapılabilir [23].

$$COP_{hp} = \frac{\text{Yoğuşturucuda alınan ısı}}{\text{Kompresörde verilen güç}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_g} \quad (6.35)$$

$$COP_{ws} = \frac{\text{Yoğuşturucuda alınan ısı}}{\text{Sistem için verilen toplam güç}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{sistem}} \quad (6.36)$$

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

$$COP_{carnot} = \frac{T_{yoğuşturucu}}{T_{yoğuşturucu} - T_{buharlaştırıcı}} \quad (6.37)$$

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

Sistemde yoğuşturucudan atılan ısı miktarı ($\dot{Q}_K$) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{gh} \cdot c_p \cdot (T_{gh} - T_{ch}) \quad (6.38)$$

$$\dot{m}_{gh} = \rho_{gh} \cdot \dot{V}_g \quad (6.39)$$

Eşitlikte ($\dot{m}_{gh}$), kurutma havasının kütleli debisi, (c_p), kurutma havasının özgül ısıtma ısısı ($\dot{V}_g$), kurutma havasının hacimsel debisi, (ρ_{gh}), kurutma havasının yoğunluğu (T_{gh}) ve (T_{ch}) ise sırasıyla yoğuşturucudan çıkan ve yoğuşturucuya giren havanın sıcaklığıdır.

Normal bir uygulama için, enerji tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Sistemde diğer ekipmanlarda (fan vb) söz konusu olabilir. Bütün sistem için etkinlik katsayısı ($COP_{tüm,carnot}$) hesaplanmasında tüketim ekipmanları için (kompresör, fan ve diğer ekipmanlar) aşağıdaki eşitlik kullanılır [23].

$$COP_{tüm,carnot} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + \dot{W}_1 + \dot{W}_2} \quad (6.40)$$

Kurutma esnasında kurutma tüneline enerji kullanılması oranı (EUR_{dt}) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [23].

$$EUR_{dt} = \frac{\dot{m}_{gh} \cdot (h_{gh} - h_{ch})}{\dot{m}_{gh} \cdot c_p \cdot (T_{gh} - T_{ch})} \quad (6.41)$$

6.6. Kurutma Havasının Isı Taşınım Katsayısı

Kurutma havası ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında doğal taşınım için Grashof ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu olan Nusselt sayısı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [62]:

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k} = C(Gr.Pr)^n \quad (6.42)$$

Eşitlik 6.42’de verilen Grashof sayısının hesaplanmasında Eşitlik 6.43 kullanılır:

$$Gr = \frac{D^3 \beta g \Delta T}{\nu^2} \quad (6.43)$$

Eşitlik 6.43’deki hacimsel genleşme sayısı (β) ise

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (6.44)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Eşitlik 6.44’de verilen T_f (Kelvin cinsinden) ise, $(T_y + T_\infty)/2$ ifadesi ile hesaplanabilir.

Benzer şekilde, kurutma havası ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında zorlanmış taşınım için Reynold ve Prandtl sayısının bir fonksiyonu olan Nusselt sayısı;

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{k} = C.(Re. Pr)^n \quad (6.45)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Eşitlik 6.45’de verilen Reynold sayısı (Re) Eşitlik 6.46 ile verilmiştir.

$$Re = \frac{u.D}{\nu} \quad (6.46)$$

Eşitlik 6.45 ile verilen Prandtl sayısı (Pr) Eşitlik 6.47 ile verilmiştir:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6.47)$$

Eşitlik 6.47’de verilen ısıl yayılım oranı (α) Eşitlik 6.48 ile verilmiştir:

$$\alpha = \frac{k}{\rho.c} \quad (6.48)$$

Sistemde zorlanmış taşınım olduğundan ürün içersindeki nemin buharlaştırılması için gerekli olan enerji aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [63].

$$\dot{Q}_e = 0.016 h_c [P(T_{\ddot{u}}) - \phi.P.(T_c)] \quad (6.49)$$

Eşitlik 6.49’yi Eşitlik 6.45’de yerine koyduğumuzda;

$$\dot{Q}_e = 0.016 \frac{k}{L} C(Re.Pr)^n [P(T_{\ddot{u}}) - \phi.P.(T_c)] \quad (6.50)$$

eşitliği elde edilir. Üründen buharlaştırılan nem miktarı Eşitlik 6.51 ile hesaplanabilir [64].

$$\dot{m}_{ev} = \frac{\dot{Q}_e}{q_g} A_t t = 0.016 \frac{k}{L.q_g} C(Gr.Pr)^n [P(T_{\ddot{u}}) - \phi.P.(T_c)] A_t t \quad (6.51)$$

Eşitlik 6.51’de $0.016 \frac{k}{L.q_g} [P(T_{ii}) - \phi.P(T_c)] A_t . t$ ifadesine Z dersek eşitlik,

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} = C(Gr.Pr)^n \quad (6.52)$$

şeklini alır [65].

Eşitlik 6.52’deki ifadenin her iki tarafının logaritması alındığında eşitlik,

$$\ln \left[\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} \right] = \ln C + n \ln(Gr.Pr) \quad (6.53)$$

şeklini alır.

Eşitlik 6.53 lineer bir eşitlik olup,

$$y = m.x+c \quad (6.54)$$

şeklindedir.

Eşitlik 6.54’deki $y = \ln \left[\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} \right]$, $m = n$, $x = \ln(Gr.Pr)$ ve $c = \ln C$ şeklinde düzenlendiğinde $C=e^c$ şeklini alır.

Benzer şekilde zorlanmış taşınım için eşitlikler düzenlendiğinde, $y = \ln \left[\frac{\dot{m}_{ev}}{Z} \right]$, $m=n$, $x=\ln(Re.Pr)$ ve $c=\ln C$ şeklinde düzenlendiğinde, $C=e^c$ şeklini alır.

Belirli bir zaman aralığında elde edilen deney sonuçlarına göre Eşitlik 6.42 ve 6.45’den tabii ve zorlanmış taşınım için ısı taşınım katsayısı hesaplanır.

Isı taşınım katsayısının bilinmesi ile evaporatif kütle transfer katsayısı Eşitlik 6.55 ile hesaplanır [66].

$$h_e = 16.273.10^{-3} h_c \left(\frac{P(T_{ii}) - \phi.P.(T_c)}{T_{ii} - T_c} \right) \quad (6.55)$$

6.7. Özgül Nem Çekme Oranı, Kuruma Hızı ve Nem Alma Verimi

Isı pompası destekli kurutucularda sistemin etkinliğinin belirlenebilmesi için özgül nem alma hızı, kuruma hızı, nem alma verimi ve ısı pompası etkinlik katsayısı kriterlerinden yararlanılır.

Özgül nem alma hızı (SMER): Bir ısı pompalı kurutucunun enerji verimliliği genellikle özgül nem uzaklaştırma (SMER: **S**pecific **M**oisture **E**xtraction **R**ate) hızı ile belirlenir. Bu büyüklük birim kWh enerji kullanımı için, kurutulacak üründen uzaklaştırılan su kütlesini gösterir (kg_w / kWh). Bir kurutucunun işletme maliyetleri enerji verimliliği için önemli bir parametredir [54]. SMER için SMER_{hp} ve SMER_{ws} şeklinde iki tanımlama yapılabilir [23].

$$\text{SMER} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Enerji girişi}} \quad \left(\frac{\text{kg}_w}{\text{kWh}} \right) \quad (6.56)$$

$$\text{SMER}_{\text{hp}} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılacak nem kütlesi}}{\text{Enerji girişi (kompresör için)}} \quad \left(\frac{\text{kg}_w}{\text{kWh}} \right) \quad (6.57)$$

$$\text{SMER}_{\text{ws}} = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılacak nem kütlesi}}{\text{Enerji girişi (tüm sistem için)}} \quad \left(\frac{\text{kg}_w}{\text{kWh}} \right) \quad (6.58)$$

Kuruma hızı (MER): Kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nemin kütlesi olarak tanımlanır (MER: **M**oisture **E**xtraction **R**ate).

$$MER = \frac{\text{Üründen uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kuruma süresi}} \left(\frac{\text{kg}_w}{\text{h}} \right) \quad (6.59)$$

Nem alma verimi (η): Kurutma havası tarafından alınan nemin kurutma havasınca alınabilecek maksimum neme oranı olarak tanımlanmıştır.

$$\eta = \frac{(w_2 - w_1)}{(w_a - w_1)} \quad (6.60)$$

Özgül nemin ölçümünün kolay olmaması nedeniyle mutlak nem ölçümü, kütle ve hava debisi ölçümlerinden yararlanılarak nem alma verimi için,

$$\eta = \frac{(m_0 - m_t)}{\dot{V} \cdot \rho \cdot t \cdot (w_{\text{ady.}} - w_1)} \quad (6.61)$$

yazılabilir.

7. MATERYAL VE METOD

7.1. Materyal

7.1.1. Kurutulacak ürün

Bu çalışmada kurutma materyali olarak Türkiye’de üretimi en çok yapılan çekirdeksiz üzüm çeşidi olan Sultaniye tip çekirdeksiz üzüm seçilmiştir. Denemelerde; Manisa-Sarıgöl’de bir üreticiye ait bağda yetiştirilen uygun nitelikte çekirdeksiz üzüm kullanılmıştır. Kurutma denemelerinde kullanılan tüm örnekler aynı üretim alanından temin edilmiştir. Ayrıca, Manisa-Alaşehir’de kuru üzüm işleme alanında faaliyet göstermekte olan Uzunoğlu Ltd. Şti.’ne (www.sungiftsultanas.com) ait şekerlenmiş üzümler de kullanılmıştır.

7.1.2. Kurutma yeri

Kurutma işlemleri;

Endüstriyel tip kurutucu için, Manisa-Sarıgöl-Çavuşlar Köyü’nde boş bir arazi seçilmiştir (38° 18’ 21.01’’ Enlem - 28° 41’ 59.05’’ Boylam – Rakım 205 m).

7.1.3. Isı pompalı deney seti kurutucu

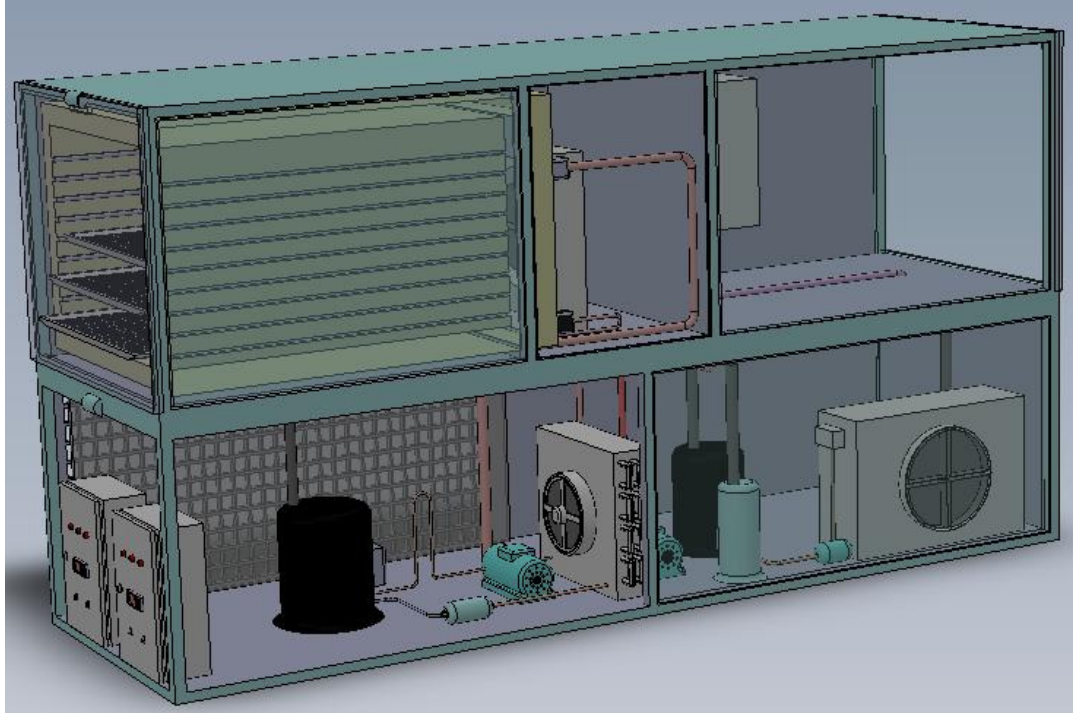
Endüstriyel ölçekte yapılacak kurutucu öncesi, laboratuvar ölçekli bir deney seti olarak “ısı pompalı kurutucu” imal edilmiştir. Deney setinin yapımında aşağıdaki unsurlar dikkate alınmıştır:

- Endüstriyel ölçekli kurutucu öncesi sistem performansının ve kurutma test ve denemelerinin gerçekleştirilmesi.
- Kurutma deneme ve testlerinin endüstriyel ölçeğe göre daha düşük maliyetle yapılabilecek olması.
- Yapılacak değişikliklerin ve ar-ge çalışmalarının, endüstriyel ölçeğe göre daha az maliyetle yapılabilecek olması.
- Çekirdeksiz üzüm dışındaki diğer tarımsal ürün (kiraz, kekik, zeytin vb.) kurutma taleplerinin yerine getirilerek kurutma performansının ispat edilebilmesi.
- Teşhir materyali olarak atölyede ve tarım fuarlarında sergilenebilmesi.

Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutma sistemi ana hatları ile kurutma kabini, kompresörler, yoğuşturucu, buharlaştırıcı, ısı pompası sistemini oluşturan tesisat parçalarından ve kontrol ekipmanlarından oluşmaktadır. Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusu deney seti resmi Şekil 7.1’de, tasarımı da Şekil 7.2.’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Isı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusu deney seti resmi



Şekil 7.2. Isı pompalı üzüm kurutucu deney setinin şematik görünüşü

Deney seti kurutucu sistemi, ısı pompası sisteminin yoğuşturucusunu enerji kaynağı olarak kullanacak şekilde düşünülmüş ve imal edilmiştir. Kurutma fırını içerisindeki ürünlerin nemi ısı pompası sisteminin yoğuşturucusundan aldığı ısı ile buharlaşarak kurutma havasına karışacaktır. Bu nedenle, nemi artan kurutma havasının zamanla nem alma yeteneği azalacağından dolayı, bu hava kurutucu içerisindeki nem buharlaştırıcıda yoğuşturulur. Yoğuşturma işlemi soğuk yüzeyde sistem havasının çiy noktası sıcaklığının altında bir sıcaklıktaki soğuk yüzeyde gerçekleştirilir.

İmal edilen kurutucuda, kurutma sistemlerinde ürün üzerinden geçtikten sonra dışarı atılan kurutma havasının buharlaştırıcı üzerinden geçirilmesi ile sistemde atık ısıdan faydalanılmaya çalışılmıştır. Böylece sistemde ısı pompasının buharlaştırıcısı buharlaşma gizli ısısının bir kısmını sıcak ve nemli olan atık kurutma havasından çekecektir. Kurutma sistemi böylece havadan - havaya bir ısı pompası olarak çalışacaktır.

Sistemde kurutma havası sıcaklığı süreç kontrol ekipmanından ayarlanan değerde mikroişlemcili kontrol sistemi ile tutulacaktır. Ayarlanan değer termokupl ile okunan değerden büyük olduğunda; sistem çalışması duracaktır. Ayarlanan değer (istenilen kurutma havası sıcaklığı) termokupl ile okunan değerden küçük olduğunda, sistem çalışacaktır.

Tasarım aşamasında sistemde kurutma havası sıcaklığı 65°C (± 3) ve yoğuşma ortam sıcaklığı da $1-5^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiş ve bu değerlere göre kapasite hesaplamaları yapılmıştır. Yoğuşturucudan kurutma havasına aktarılan enerjinin bir kısmının, kurutma odasının çıkışında tekrar buharlaştırıcıdan çekilmesi ile ısı pompası sisteminin ısı dengesi sağlanmış olunacaktır.

Sistemde çekirdeksiz üzüm kurutulması için uygun olan şartların (kurutma havası sıcaklığı ve kurutma havası hızı) alt ve üst sınır değerleri sistem tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulmuş ve sistem imalatında kullanılan ekipmanların kapasitelerinin kurutma şartlarına uygun olarak belirlenmesi düşünülmüştür. Isı pompası sisteminde soğutkan olarak R-134a gazı kullanılmıştır.

Kurutma sistemi ölçüleri yükseklik 185 cm, genişlik 100 cm ve uzunluk 312 cm'dir. Kurutucuda 5 adet raf olup ölçüleri 75 x 80 cm'dir. Kurutucu ürün sergi alanı 3 m^2 olup denemelerde 50 kg çekirdeksiz üzüm kullanılmıştır. Kurutulacak üzüm, deneylerde plastik kasa, delikli ahşap ve sac raflar kullanılarak kurutulmuştur. Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanlar ana unsurları aşağıdaki gibidir. Ayrıntılı metraj ise Ek 2'de verilmiştir.

- 2 adet 3 BG hermetik kompresör
- 3 adet yoğuşturucu: 10, 16 ve 16 m^2
- 1 adet buharlaştırıcı, 15 m^2
- Tesisat ekipmanları
- Kontrol ekipmanları

Deney seti kurutucuda yapılan kurutma denemelerinde % 75-78 nem değerindeki aralığındaki çekirdeksiz üzümler % 13-15 nem değerine kadar 25-40 saat arasındaki farklı kurutma değerleri elde edilmiştir. Deney setinde birçok kurutma deneme ve sistem doğrulama çalışmaları yapılmış olup kurutma süresi değerinde 40 saatten 25 saate kadar inilmiştir. Bu değer üzüm kurutma sektörü dikkate alındığında oldukça başarılı olduğu kanaatine varılmış olup bu kurutma süresi değerinde 10 ton kapasiteli endüstriyel tip bir kurutucunun imalatı çalışmalarına geçilmiştir.

Deney setindeki kurutma işlemleri, Manisa-Turgutlu'da bulunan Yavuz Endüstriyel Soğutma Ltd. Şti.'nin atölyesinde gerçekleştirilmiştir.

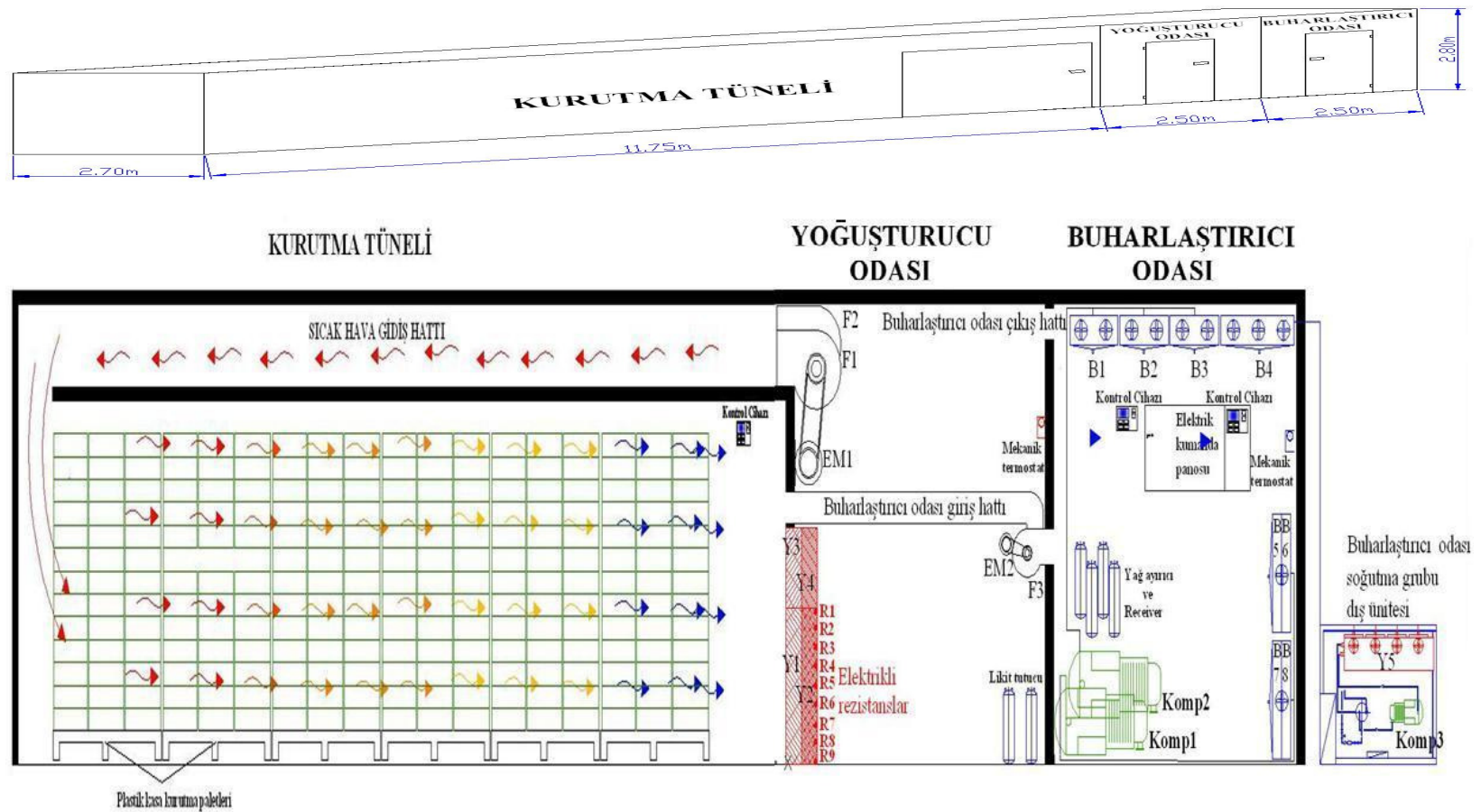
Bu tez çalışmasının özü endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu olduğu için deney seti ile ilgili ayrıntılı bilgilere değinilmemiştir.

7.1.4. Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu

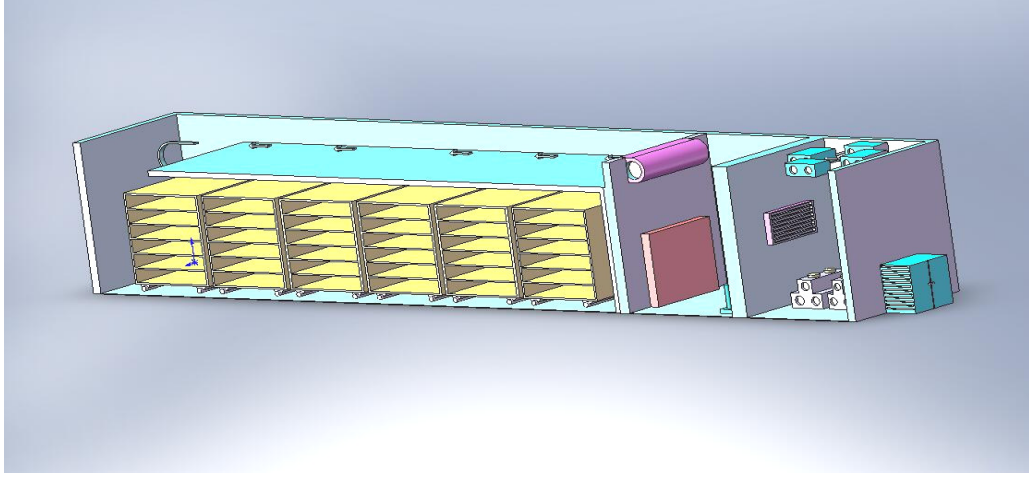
Tasarlanan ve imalatı yapılan endüstriyel tip ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutma sistemi ana hatları ile kurutma tüneli, yoğuşturucu ve fan odası, buharlaştırıcı ve kompresör odası, dış kompresör grubu (tetikleyici), ısı pompası sistemini oluşturan tesisat parçalarından ve kontrol ekipmanlarından oluşmaktadır. Sistem kapasitesi 10.000 kg'dır. Tasarlanan ve imalatı yapılan ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusu resmi Şekil 7.3'de, teknik resmi Şekil 8.4.'de, şematik görünüşü de Şekil 7.5.'de verilmiştir.



Şekil 7.3. Endüstriyel tip ısı pompalı üzüm kurutucusunun resmi



Şekil 7.4. Endüstriyel tip ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusunun teknik resmi



Şekil 7.5. Endüstriyel tip ısı pompalı çekirdeksiz üzüm kurutucusunun şematik görünüşü

Endüstriyel tip kurutucu deney seti tipi kurutucu sisteminde olduğu gibi, ısı pompası sisteminin yoğuşturucusunu enerji kaynağı olarak kullanacak şekilde düşünülmüş ve imal edilmiştir. Kurutma fırını içerisindeki ürünlerin nemi ısı pompası sisteminin yoğuşturucusundan aldığı ısı ile buharlaşarak kurutma havasına karışacaktır. Bu nedenle, nemi artan kurutma havasının zamanla nem alma yeteneği azalacağından dolayı, bu hava kurutma fırınında içerisindeki nem buharlaştırıcıda yoğuşturulur. Yoğuşturma işlemi soğuk yüzeyde sistem havasının çiy noktası sıcaklığının altında bir sıcaklıktaki soğuk yüzeyde gerçekleştirilir.

İmal edilen kurutucuda, kurutma sistemlerinde ürün üzerinden geçtikten sonra dışarı atılan kurutma havasının buharlaştırıcı üzerinden geçirilmesi ile sistemde atık ısıdan faydalanılmaya çalışılacaktır. Böylece sistemde ısı pompasının buharlaştırıcısı buharlaşma gizli ısının bir kısmını sıcak ve nemli olan atık kurutma havasından çekecektir. Kurutma sistemi böylece havadan - havaya bir ısı pompası olarak çalışacaktır.

Kurutucu sistemde, kurutma havası tünel sonunda iki kola ayrılıp tünele girmeden önce tekrar birleşmektedir. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucudan geçen hava akımlarının karışması ile elde edilen karışım, kurutma havası olarak kurutma tüneline giriş yapmaktadır.

Sistemde kurutma havası sıcaklığı süreç kontrol ekipmanından ayarlanan değerde mikroişlemcili kontrol sistemi ile tutulacaktır. Ayarlanan değer termokupl ile okunan değerden büyük olduğunda; sistem çalışması duracaktır. Ayarlanan değer (istenilen kurutma havası sıcaklığı) termokupl ile okunan değerden küçük olduğunda, sistem çalışacaktır.

Tasarım aşamasında sistemde kurutma havası sıcaklığı 65°C ve yoğuşma ortam sıcaklığı da 5-10 °C olarak belirlenmiş ve bu değerlere göre kapasite hesaplamaları yapılmıştır. Yoğuşturucudan kurutma havasına aktarılan enerjinin bir kısmının, kurutma odasının çıkışında tekrar buharlaştıricıdan çekilmesi ile ısı pompası sisteminin ısı dengesi sağlanmış olunacaktır.

Sistemde çekirdeksiz üzüm kurutulması için uygun olan şartların (kurutma havası sıcaklığı ve kurutma havası hızı) alt ve üst sınır değerleri sistem tasarımı yapılırken göz önünde bulundurulmuş ve sistem imalatında kullanılan ekipmanların kapasitelerinin kurutma şartlarına uygun olarak belirlenmesi düşünülmüştür. Isı pompası sisteminde soğutkan olarak R22 ve R-134a gazı kullanılmıştır.

Kurutma sistemi ölçüleri yükseklik 2,8 m., genişlik 2,7 m., kurutma tünel uzunluğu 11,75 m ve toplam sistem uzunluğu 16,75 m., kapasitesi ise 10.000 kg'dır. Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipman ana unsurları aşağıdaki gibidir. Ayrıntılı metraj ise Ek 6'de verilmiştir.

Endüstriyel tip kurutucunun ana unsurları:

- 1 adet 30 BG, 2 adet 20 BG yarı hermetik kompresör
- 2 adet 145 m², 1 adet 80 m², 2 adet 86 m² yoğuşturucu
- Yoğuşturucu üzeri 9 adet elektrikli ısıtıcı rezistans (1.000 W)
- 4 adet 100 m², 3 adet 41 m², 1 adet 150 m² buharlaştırıcı
- 1 adet salyangoz ikiz fan (150.000 m³/h), 1 adet salyangoz fan (53.000 m³/h)
- 1 adet elektrik motoru 7,5 BG, 1 adet 3 BG elektrik motoru
- 3 adet aksiyal fan Ø 400, 4 adet eksenel fan Ø 450
- 6 adet aksiyal fan Ø 300, 2 adet eksenel fan Ø 500
- 2 adet çarpma kapı (90x190 cm), 1 adet sürgülü kapı (200x250 cm)
- 194 m² panel (8 cm)

7.1.5. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Kurutma işlemi esnasında aşağıda verilen kurutma sistemine ait veriler farklı aralıklarla kaydedilmiştir. Aşağıda ölçümü yapılan sistem değerleri verilmiştir.

- Dış hava sıcaklığı (°C)
- Sistemde ayarlanan sıcaklık değeri (°C)
- Kurutma tüneline giren-çıkan havanın sıcaklığı (°C)
- Kurutma tüneline giren-çıkan havanın bağıl nemi [ϕ (%)]
- Kurutma tüneline giren-çıkan havanın hızı (m/s)
- Yoğuşturucu odasındaki havanın sıcaklığı (°C)
- Yoğuşturucu odasındaki havanın bağıl nemi [ϕ (%)]
- Buharlaştırıcı odasındaki havanın sıcaklığı (°C)
- Buharlaştırıcı odasındaki havanın bağıl nemi [ϕ (%)]
- Ürün yüzey sıcaklığı (°C)
- Elektrik enerjisi sarfıyatı (kWh)
- Numune üzümlerdeki kütle değişimi (g)

Kurutma işlemlerinde kullanılan ölçüm cihazları Çizelge 7.1.'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Cihaz	Özellikleri
Kuru meyve nem test cihazı	Dried Fruit Moisture Asc. of California Ölçüm hassasiyeti 0.5
Dijital tartı	Precisa BJ 410 C, en yüksek ölçüm 420 g Ölçüm hassasiyeti 0.01 g
Halojen nem tayin cihazı	Metler Toledo HB43, 50 – 200 °C, ölçüm hassasiyeti % 0.01.
Etüv kurutma fırını	Nüve FN 400, 70 – 250 °C, sıcaklık hassasiyeti 1°C
Infrared termometre	TT Technic VA-6520, -50 – 500 °C, ölçüm hassasiyeti 0.1 °C
Dijital termometre	ETI Worthing Sussex, -50 – 150 °C, ölçüm hassasiyeti 0.1 °C
Dijital anemometre	Lutron Electronic am-4201, ölçüm aralığı: 0.4-30 m/s, ölçüm hassasiyeti: $\pm 2\%$ +1d
El tipi refraktometre	Ausjena, ölçüm aralığı 0-30 %
Termometre	Carel IR 33 dijital kontrol cihazı
Higrometre	Dixell XT110C dijital kontrol cihazı
Endüstriyel terazi	Tem TEKO20000 Eko lcd Terazi, 20 kg kapasiteli, ölçüm hassasiyeti 2 g
Elektrik sayacı	Köhler KHL.ES6 üç fazlı elektronik sayaç 3x220/380V-50 Hz
Araç kantarı	-
Bome areometresi	-

7.2. Metot

Kurutma sistemi 2007 yılında kurulmuş olup, 2008 yılı kurutma denemesinde 2 adet kompresör yandığı için deney gerçekleştirilememiştir. Kurutma denemesine 2009 yılı Ağustos ayının 24. gününde başlanılmıştır. Hasat edilen ürün kuruma karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan denemede, imal edilen ısı pompalı kurutucu kullanılmıştır. Kurutucu tünelinin son kısmındaki paletten alınan (alt-orta ve üst) üç adet numune etüv fırında, halojen nem tayin cihazında ve kuru meyve nem test cihazında tam kuru madde testleri yapılarak ortalamaları alınarak ürünün “kuru madde miktarı” belirlenmiştir.

Kurutma tünelinin ilk ve orta kısmındaki paletlerden alınan numuneler sadece kuru meyve nem test cihazında test edilmişlerdir.

Isı pompalı kurutucuda yapılan kurutma ile eşzamanlı olarak, ürünün hasat edildiği bağ kenarında bulunan beton sergide kanaviçe üzerinde de aynı üründen kurutulmuştur. Sergi yerinin sadece orta kısmından numune alınarak kütle ölçümleri yapılmış ve kuru meyve nem test cihazında ölçülerek, ısı pompalı kurutucudaki kurutulan ürünle karşılaştırılmıştır.

7.2.1. Kurutulacak ürünün hazırlanışı ve ön işlemler

Manisa – Sarıgöl şartlarında Ağustos ayının ilk haftasından itibaren çekirdeksiz üzümler hasat olgunluğuna gelmektedir. Hasat edilen bağda yapılan incelemelerde üzümlerde herhangi bir hastalık veya anormallik tespit edilmemiştir. Kurutma denemelerinde kullanılan üzümlere bitki gelişim düzenleyicisi (GA_3 - gibberelik asid) kullanılmamıştır.

Kurutmada kullanılacak üzümlerin olgunluk derecesi hasat günü yapılan refraktometrik ölçüm ile belirlenmiştir. Kurutma işleminde kullanılacak çekirdeksiz üzümlerden rastgele alınan on adet numune salkımlardan üst-orta ve alt kısmından

alınan ikişer adet üzüm tanesi sırası çıkartılarak suda çözünebilir kuru madde miktarı (briks) refraktometre ile 22,2 briks değeri ölçülmüştür.

Kurutma denemelerinde kullanılan üzümler hasat edildikten sonra kasalarda taşıma aracı ile kantara götürülerek ölçme işlemi yapılmıştır. Hasat edilen üzümler, bağ kenarında bulunan beton sergi yerinde bandırma düzeneğinde bandırılmış ve ısı pompalı kurutucuda kullanılacak plastik kasalara ince tabaka (5-10 cm) şeklinde yerleştirilmiştir. Plastik kurutma kasalarına yerleştirilen üzümler taşıma aracına yerleştirilerek kurutucunun olduğu yere getirilmiş ve kurutmada kullanılmak üzere kurutucuya yerleştirilmiştir.

Üzümler kurutulmadan önce üzerlerindeki mum tabakasının uzaklaştırılabilmesi için bandırma suyuna potasa adı verilen %5'lik K_2CO_3 ve % 1 zeytinyağı eklenerek bir emülsiyon haline getirilerek bandırma çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti içersine kurutulacak ürünler potasa çözeltisine daldırılıp kısa bir süre tutulduktan sonra (4-6 sn.) süzülerek plastik kurutma kasalarına yerleştirilmiş ve kurutucuya götürülmüştür. Ayrıca büyük salkımlar, orta büyüklükte parçalara ayrılmıştır.

8. DENEYLERİN YAPILIŞI

8.1. Tam Kuru Ağırlığın Belirlenmesi

Isı pompalı kurutucuda yapılan denemede 3 adet (paletin alt-orta ve üst kısmı) 250 g. numuneler kurutucunun son bölümünde kurutulduktan sonra kuru meyve nem test cihazı, halojen nem tayin cihazı ve etüv fırınında ($70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, basınç 100 mmHgS düzeyini geçmeyecek şekilde 6 saat süre ile kurutulmuştur) kurutularak ortalamaları alınmış ve tam kuru ağırlık belirlenmiştir.

Kurutucu tünelin orta-ilk kısmındaki ürünlerden (alt-orta ve üst kısım) ve beton üzeri bez sergide kurutulan üzümünden 250 g numuneler kurutma işlemi bittikten sonra sadece kuru meyve nem test cihazında teste tabii tutulmuşlardır.

Kuru meyve nem test cihazı ve etüv fırınında yapılan işlemler TS 3411'e uygun olarak yapılmıştır.

8.2. Çekirdeksiz Üzümlerin Kurutulması

Ürünler, kurutma tüneline yerleştirilerek kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Çekirdeksiz üzüm için kurutma havası sıcaklığı $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir. Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklığı kontrol cihazından ayarlanarak kurutma işlemine başlanılmıştır.

Kurutucu tüneline üzümler, 60x40x20 cm plastik kasalarda palet üzerine 4 adet plastik kasada 13 kat, genişliğe göre 3 palet ve uzunluğa göre 9 palet halinde istiflenerek yerleştirilmiştir. Kurutma tüneline toplam 1.404 plastik kasa yerleştirilmiştir. Toplam plastik kasa kurutma yüzeyi 337 m^2 'dir. Ürünler kurutma öncesi ticari kantarda 7.050 kg ölçülmüştür.

Kurutucuda $20,91\text{ kg/m}^2$ üzüm serilmiştir. Beton üzeri bez sergiye ise $18,65\text{ kg/m}^2$ üzüm serilmiştir.

Daha önce de belirtildiği gibi; 2008 yılında yapılan denemenin başlangıç kurutmasında birer adet 30 ve 15 BG kompresör yandığından dolayı deneme tamamlanamamıştır. Bu olaydan sonra kompresörler yenilenmiş ve sistem dışına bir adet 20 BG soğutma grubu ve yoğuşturucu üzerine 9 adet 1000 W'lık elektrikli ısıtıcı konmuştur. Dış soğutma grubu (20 BG) buharlaştırıcı odası sıcaklığı 10-15 °C aralığında çalışmak üzere ayarlanmıştır. Yoğuşturucu üzerindeki elektrikli ısıtıcılar yoğuşturucu çıkış havası sıcaklığı 60 °C'ye ulaştığında kapatılmak üzere mekanik termostat ile ayarlanmıştır.

Kurutma sistemi deneme hazırlık çalışmalarında elektrik ve elektronik parçalardan bazıları nem ve sıcaklıktan dolayı arıza yapmıştır. Arıza yapan ekipmanlar uygun standarttaki parçalar ile değiştirilmiştir.

Isı pompalı kurutucu, kurutma işlemi başlangıcından sonuna kadar ara vermeden 24 saat devamlı olarak çalıştırılmıştır.

8.3. Kurutma İşleminin Bitirilmesi

Kurutma işleminden sonra tünele konulan üzümün ilk-orta-son bölümlerinden alınan numunelerin son nem miktarları ölçülmüştür. Kurutulan ürünlerden alınan numuneler “Kuru Meyve Nem Test Cihazı”, “Halojen Nem Tayin Cihazı” ve “Etüv Fırınında” ölçülmüştür.

9. DENEY SONUÇLARI

Kurutma denemelerinde gerçekleşen sonuçlar Çizelge 9.1.' de verilmiştir. Yaş baza göre nem oranı hesaplamaları Eşitlik 4.1, kuru baza göre nem oranı hesaplamaları Eşitlik 4.2'den yapılmıştır.

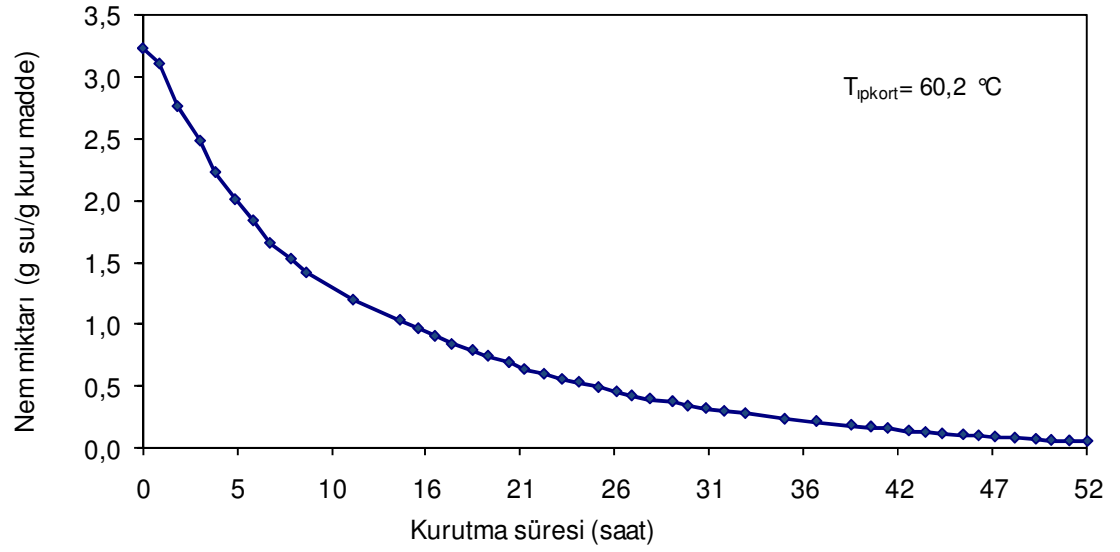
Çizelge 9.1. IPK ve sergideki kurutma tam kuru madde ve nem oranları

Numune yeri	Numune no	İlk kütle	Son kütle	Kurutma sonrası kütle kaybı	Tam kuru ağırlık	Tam kuru ağırlığa göre kütle kaybı	Tam kuru maddeye göre ürün ilk-son nem oranı	Tam kuru maddeye göre ürün ilk-son nem oranı
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(% kb)	(% yb)
IPK tünel sonu ort.	1 ^a	250	71,10	178,90	58,90	191,10	324,45- 20,71	76,44-17,16
IPK tünel orta kısım	2 ^b	250	68,28	181,72	58,12	191,88	330,14-17,48	76,75-14,88
IPK tünel ilk kısım	3 ^c	250	66,13	183,87	57,97	192,03	331,26-14,08	76,81-12,34
Sergi	4 ^d	250	66,50	183,50	58,03	191,97	330,81-14,60	76,79-12,74
IPK	Tüm ürün	7.050 kg	1.894 kg	5.156 kg	-	-	-	-
Sergi	Tüm ürün	6.420 kg	1.724 kg	4.696 kg	-	-	-	-

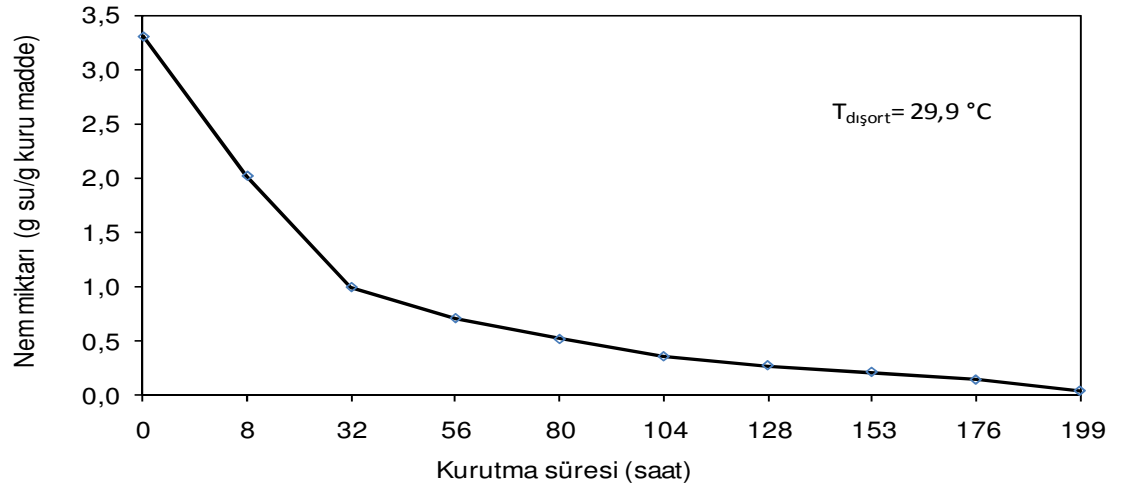
^a : Tünelin son kısmındaki paletin alt-orta-üst kısmından alınan birer numune etüv fırında, halojen nem tayin cihazı ve kuru meyve nem test cihazında tam kurutma işlemi gerçekleştirilerek ortalamaları alınmıştır.

^{b-c-d} : Kurutma tünelinin orta-ilk kısmındaki paletin alt-orta-üst kısmından alınan birer numune ve sergi ortasından alınan numune sadece kuru meyve nem test cihazında ölçüm gerçekleştirilerek ortalamaları alınmıştır.

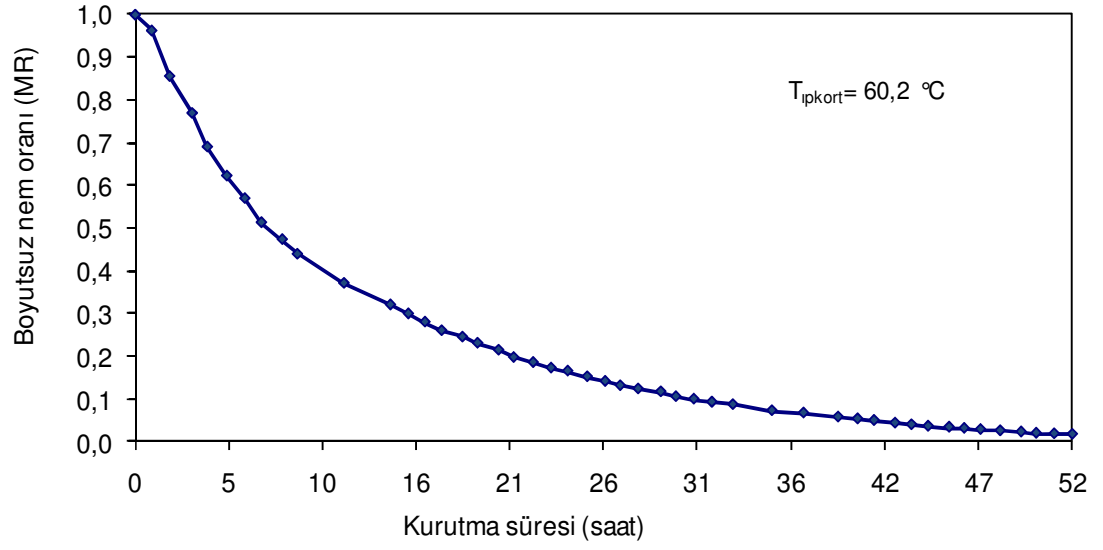
Kurutma işleminde kurutucu tünelin son kısmındaki paletin orta kısmındaki numune kütle değişimi belirli zaman aralıklarında ölçülerek Eşitlik 4.2. ile hesaplanarak Şekil 9.1.'de verilmiştir. Beton üstü bez sergide kurutulan üzümün nem oranı Şekil 9.2.'de verilmiştir. Boyutsuz nem oranı (MR) ise eşitlik 4.25. ile hesaplanarak IPK için Şekil 9.3.'de, sergide kurutma için de Şekil 9.4.'de verilmiştir. IPK'daki kurutma işleminde nem değişimi başlangıçta hızlı, kurutma işleminin sonuna doğru azalan bir eğilim göstermiştir.



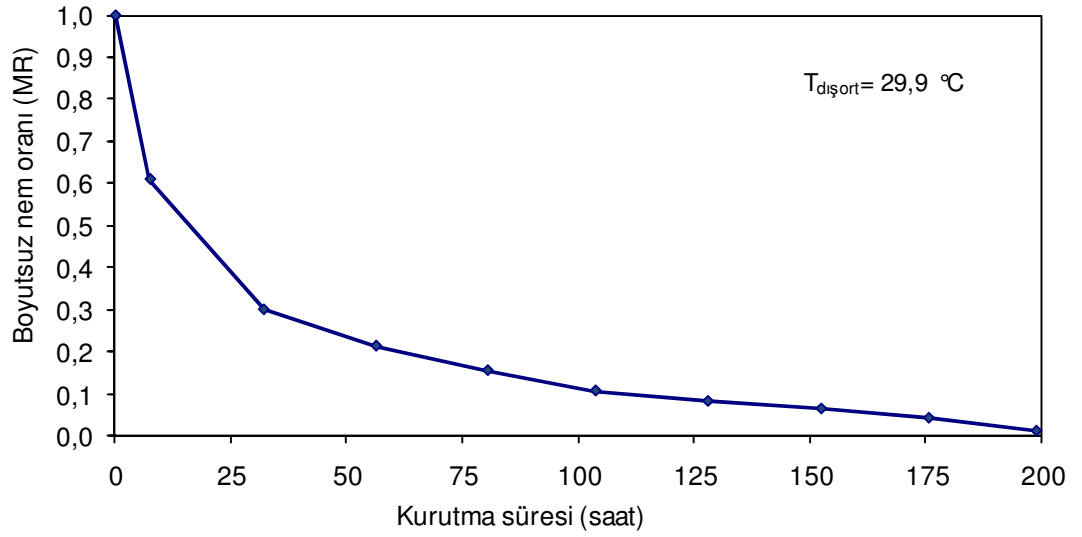
Şekil 9.1. Isı pompalı kurutucuda kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi



Şekil 9.2. Beton sergide kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi

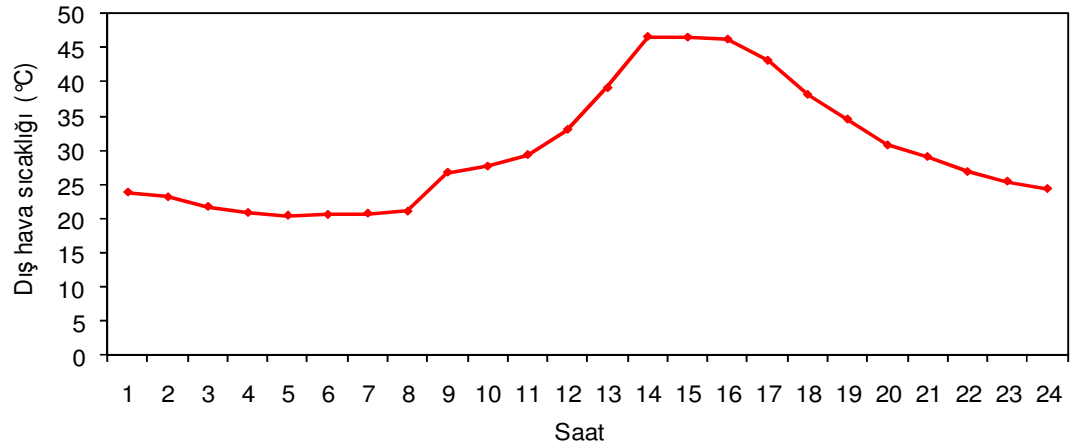


Şekil 9.3. Isı pompalı kurutucuda kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi



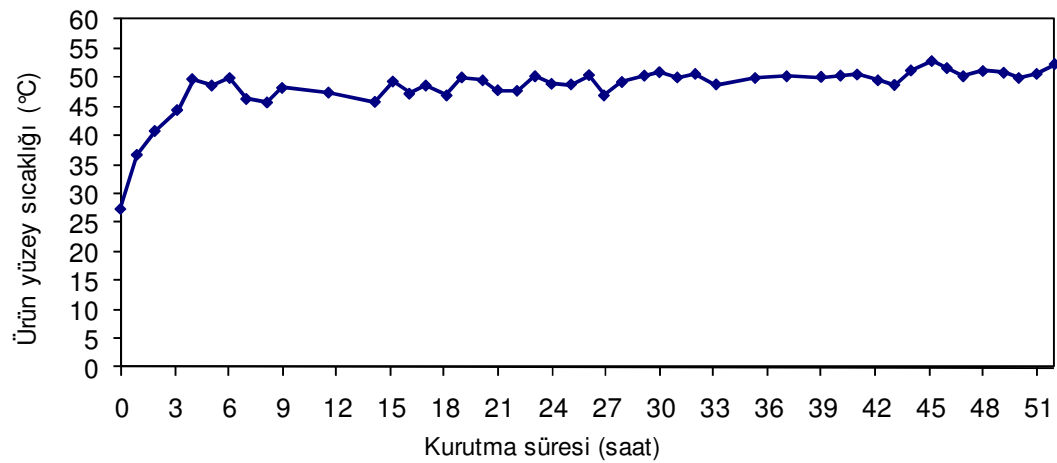
Şekil 9.4. Beton sergide kurutulan üzümün zamana göre nem değişimi

Kurutma işleminin başladığı günden itibaren 9 günlük dış hava sıcaklığının ortalaması Şekil 9.5. 'te verilmiştir. Dış hava sıcaklığı bölgedeki bir atmosfer kontrollü soğuk hava tesisinin ölçüm istasyonundan alınmıştır. Ölçüm değeri gölgede olmayan açık sıcaklık ölçümüdür.



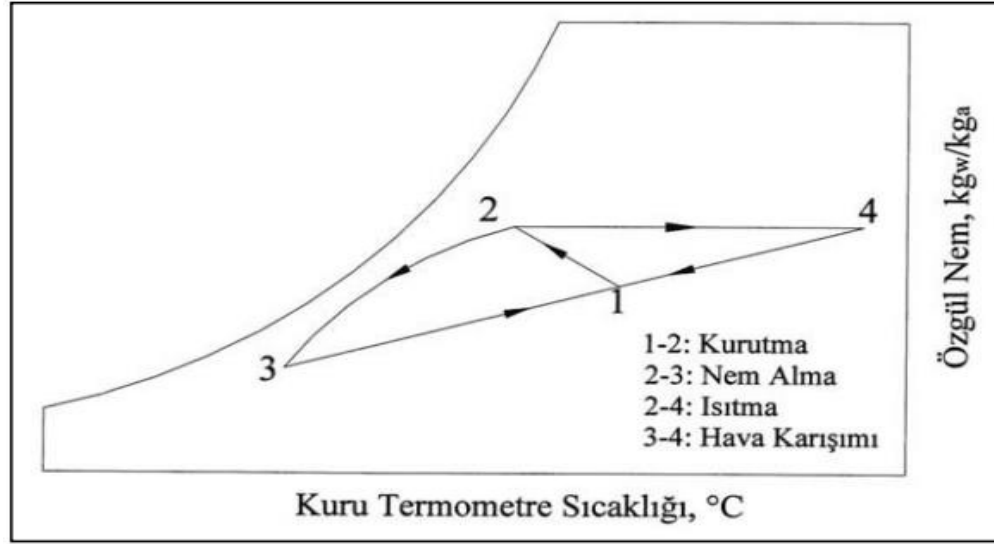
Şekil 9.5. Kurutma denemelerinin yapıldığı 8 günlük dış hava sıcaklığı ortalaması

Kurutucunun son bölümündeki numunede kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı değişimleri Şekil 9.6.'de verilmiştir. Ürünün yüzey sıcaklığı kurutma süresindeki ortalaması 48,3 °C'dir. Yüzey sıcaklığı ölçümleri infrared termometre ile ölçülmüştür.



Şekil 9.6. Kurutulan ürünün yüzey sıcaklık değişimleri

Kurutma sisteminde kurutma işlemi esnasında sistem havasının psikrometrik döngüsü Şekil 9.7’de verilmiştir.

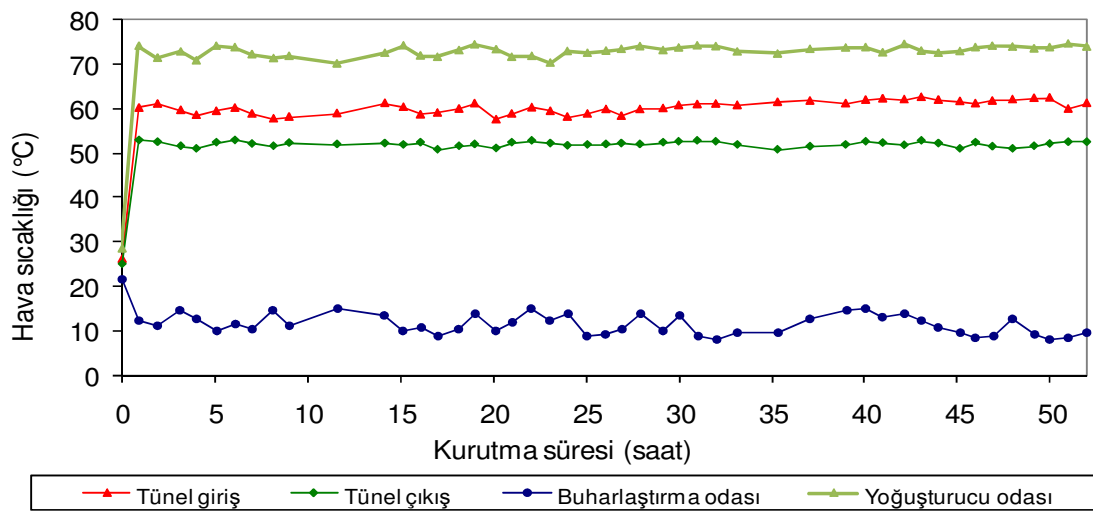


Şekil 9.7. Isı pompalı kurutucu çevriminin psikrometrik diyagramda gösterilişi.

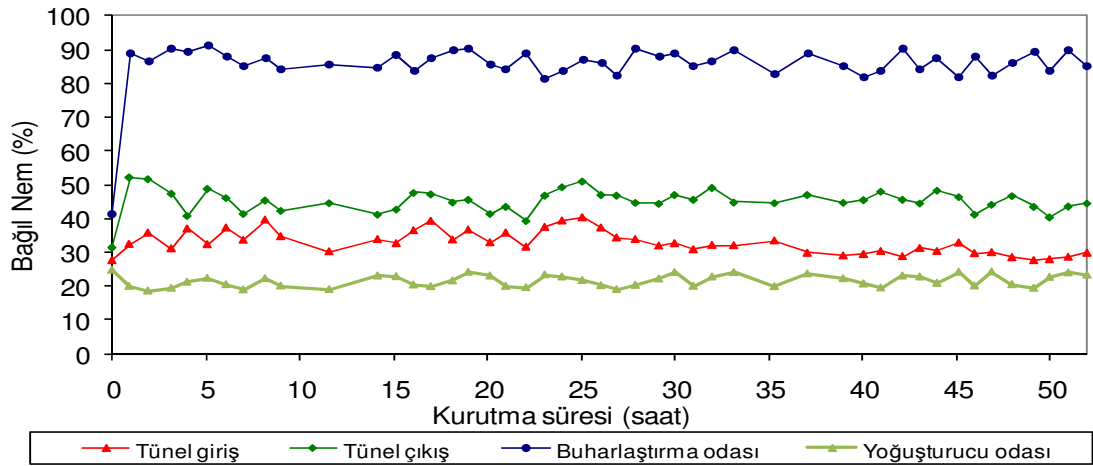
IPK sistemindeki hava akışının psikrometrik diyagramda; (1-2) kurutma tüneline kurutma işlemi, (2-4) yoğuşturucuda ısıtma işlemi, (2-3) buharlaştırıcı odasında soğutma ve nem düşürme işlemi, (3-4) buharlaştırıcı odasında soğutulmuş ve nemi düşürülmüş hava ile yoğuşturucuda ısıtılan havanın karışımıdır.

IPK sisteminde yeniden kullanılan çevrim havası oranı $RAR=2/3$ 'tür. Toplam hava debisinin $2/3$ 'ü yoğuşturucu üzerinden ısıtılarak tekrar dolaştırılmakta, $1/3$ 'ü ise buharlaştırıcıda soğutularak nemi düşürülmektedir. Yoğuşturucuda ısıtılan ve buharlaştırıcıda soğutularak nemi düşürülen hava debileri karıştırılarak kurutma tüneline yönlendirilmektedir.

Kurutma denemesi esnasında kurutma süresine bağlı olarak kurutma havası sıcaklığının kurutma tüneline giriş, kurutma tüneline çıkış, yoğunlaştırıcı odası ve buharlaştırıcı odasının sıcaklık değişimi Şekil 9.8.'de, bağıl nem değişimi ise 9.9'de görülmektedir. Kurutma havasının sistemde ortalama değerler ile tünel giriş sıcaklığı $60,2^{\circ}\text{C}$ – nemi % 32,4, tünel çıkış sıcaklığı $52,9^{\circ}\text{C}$, nemi % 52,3, yoğunlaştırıcı odası hava sıcaklığı $74,2^{\circ}\text{C}$, nemi % 20,0 ve buharlaştırıcı odası hava sıcaklığı $12,3^{\circ}\text{C}$, nemi % 88,9 ölçülmüştür.

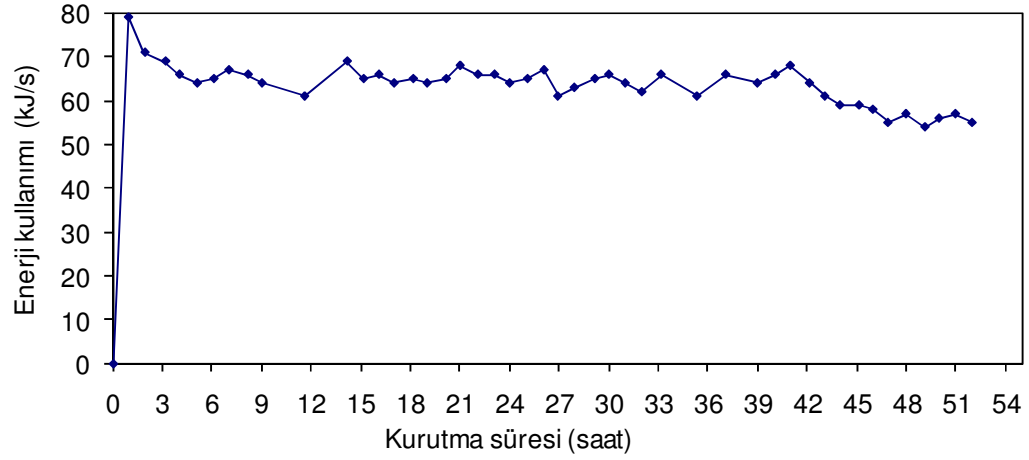


Şekil 9.8. IPK'da kurutma sürecinde kurutma havasının sıcaklık değişimi



Şekil 9.9. IPK'da kurutma sürecinde kurutma havasının bağıl nem değişimi

Kurutma sürecindeki enerji kullanımı ortalama 62,4 kWh olmuştur. Enerji kullanımı kurutma işleminin başlangıcında en yüksek noktada gerçekleşerek kurutma işleminin bitimine doğru azalmıştır. Kurutma odasında kullanılan enerji miktarının kurutma süresince değişimi Şekil 9.10’de verilmiştir.



Şekil 9.10. Kurutma süresince enerjinin kullanımı

Çizelge 9.2. Deneyler sonucunda elde edilen bazı veriler

Tanım	Değer
İlk Kütle (kg)	7.050
Son Kütle (kg)	1.894
Uzaklaştırılan Nem (kg)	5.156
Kurutma Süresi (h)	52
Toplam Enerji (kWh)	3.353
MER _{ort.} (kg/h)	99,15
SMER _{ws,ort.} (kg/kWh)	1,53
COP _{ws,ort.}	2,81

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye’de ilk olarak 10.000 kg kapasiteli endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu tasarlanarak imal edilmiştir. Sistem ve kurutma deneyi yaklaşık 70.000 €+KDV’ye mal olmuştur. Sultaniye tipi çekirdeksiz üzüm çeşidi örnekleri ön işlemlerden geçirilerek plastik kasalarda kurutulmuştur. Kurutma işleminde ürünün kurutma zamanı, yüzde ağırlık kaybı ve ısı pompası sisteminin diğer parametreleri açısından incelenmiştir.

Türkiye’de tarımsal işletmelerde ürün kurutma, yıkama işlemi sonrası kurutma ve üretim sonrası ürün mikroorganizma değerlerinin düşürülmesi için ısıl işlemde (Örneğin; kuru üzümde 60 °C’de 40 dak. % 90 toplam mikroorganizma yükünün düşürülmesi) genel olarak fosil yakıtlı, elektrikli ve son zamanlarda ise infrared kurutucular kullanılmaktadır. Enerji verimliliği açısından mahzurları olan elektrikli kurutucular ve sabit noktasal sıcaklığın yakalanması ve çevre kirliliği, kontrol zorluğu, ürün çatlama gibi mahzurları olan katı yakıtlı kurutucular yerine, enerji açısından verimliliği yüksek ve kullanımı kolay olan “ısı pompalı endüstriyel kurutucu”ların kullanılması daha iyi olacaktır.

Yapılan deney sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Isı pompalı kurutucuda kurutulan üzümlerin, olumsuz çevre şartlarından (yağmur, toz, toprak vb.) korunduğu dikkate alındığında temizlik açısından açık alanda kurutulanlardan daha temiz olduğu gözlenmiştir. Ayrıca sistemde kurutulan üzümlerin, açık alanda kurutulan üzümlere kıyasla renklerinin daha açık olduğu gözlemlenmiştir. Numuneler, kuru üzüm ticareti alanında faaliyet gösteren özel bir kuru üzüm firmasının mal alım uzmanına gösterilerek görüşlerine başvurulmuştur. Açıkta sergide kurutulan üzüm 9 numara, kurutucuda kurutulan üzüm ise 10 numara renk değeri elde edilmiştir.

- Kurutulan çekirdeksiz üzümdeki nem miktarı tam kuru madde bazında % 324,45-331,26 aralığında bulunmuş olup bu nem miktarından % 14,08-20,71 nem miktarına kadar çekirdeksiz üzümler 52 saatte kurutulmuştur. Kurutma havası sıcaklığı ortalaması 60,2 °C ve kurutma havası hızı tünel sonunda ortalama 3,2 m/s ölçülmüştür. Kurutucuda yapılan kurutma deneyi ile eş zamanlı olarak açık havada beton üzeri kanaviçe sergi üzerinde yapılan kurutma deneyinde ise üzüm numunesi % 330,81 nem oranından % 14,60 nem oranına 199 saatte kurumıştır.
- Özel bir kuru üzüm işletmesine ait şekerlenmiş kuru üzümlerden altı adet kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olup, bu denemelerde ürünler 20-30 saat aralığında şekerleri çözülmüştür. Bu sonuç IPK'nun kuru meyve işletmelerinin stokta bulunan ürünlerinin işlenmesinde kullanılabilirliğini göstermiştir.
- Sultaniye tipi çekirdeksiz üzümlerin kurutulmasında deneysel olarak analiz edilen kurutucunun, ürünün kurutulması sırasında ortalama ısıtma tesir katsayısı tüm sistem için COP_{ws} : 2,81, özgül nem alma verimi $SMER_{ws}$: 1,53 kg/kWh, nem alma verimi MER: 99,15 kg/h olarak bulunmuştur.
- Deney parametrelerinin ölçümünde profesyonel dışarıdan izlenebilir ve kaydedilebilir veri cihazı ve ölçüm aletlerinin olmayışından ayrıca sistem parçalarının büyük olması ve tasarımın oda şeklinde olmasından dolayı ölçüm değerlerindeki hata payının yüksek olduğu kanaatine varılmıştır.
- Kurutma ölçümlerinde teknik imkânsızlıklar nedeniyle kapsamlı, dışarıdan izlenebilir ve kaydedilebilir ölçüm aletlerinin olmamasından dolayı belirli aralıklarla ölçüm ve gözlem yapabilmek amacıyla kapıların açılarak içeri girilmesinden dolayı sistemin ısı kaybı ve ısı kazancı olumsuz etkilenmiştir. Bu nedenle kurutma işlemi yapılırken kapılar hiç açılmadan, içerideki değişim verileri alınabilse daha iyi verim alınabileceği kanaatine varılmıştır.

- Kurutma sonrasında sistem elemanları üzerinde korozyon gözlemlenmiştir. Bu sonuca kurutma havasının yüksek nem etkisi olduğu düşünülmüştür. Korozyon etkisine karşı sistemi oluşturan makine ekipmanının uzun yıllar sağlıklı olarak çalışabilmesi için gerekli önlemler alınması sonucunu göstermiştir.
- Kurutma sistemi deneme hazırlık çalışmalarında elektrik ve elektronik parçalardan bazıları nem ve sıcaklıktan dolayı arıza yapmıştır. Arıza yapan ekipmanlar uygun standarttaki parçalar ile değiştirilmiş olup bu sonuç sistem ekipman seçiminde yüksek nem sıcaklık etkenlerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- 2008 yılı denemesinde iki adet kompresör deney başlangıcında yanmıştır. Bunun başlangıç kurutmasında sistemin aşırı yüklenmesi sonucu olduğu kanaatine varılıp, çalışma başlangıcındaki aşırı yükü azaltmak için kompresörler yenilenerek yoğuşturucu üzerine 9 adet 1000 W'lık elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Yoğuşturucu üzerine yerleştirilen elektrikli ısıtıcılar yoğuşturucu çıkış havası sıcaklığı 60 °C'ye ulaştığında kapatılmak üzere mekanik termostat ile ayarlanmıştır. Ayrıca sistem dışına 20 BG kapasitesinde soğutma grubu eklenmiştir. Dış ünite soğutma grubu buharlaştırıcı odasının 12,5 °C ($\pm 2,5$ °C) sıcaklık aralığında çalışmak üzere ayarlanmıştır. Yapılan bu destekleme çalışmaları ile sistem başlangıcındaki aşırı yüklenmeden dolayı kompresörlerin zarar görmesinin önüne geçilmiştir.
- Krom nikel tepsili kurutma arabaları maliyeti yüksek olduğu için üzümder plastik kasalarda kurutulmuştur. Plastik kasalarda kurutulmuş üzümderden bazılarında (özellikle paletin alt kısmındaki kasalarda) tam kurumamış tanelere rastlanmıştır. Bu sonuca kasa içinden geçen kurutma havasının tam nüfuz etmediği anlaşılmıştır. Bu durum sistemde difüzör ihtiyacını göstermiştir.

- Kurutma tünelinin başlangıç kısmındaki üzümlerde aşırı kuruma gözlemlenmiştir. Bu durum sistem tasarımının ters akımlı olarak da çalıştırılması ihtiyacını göstermiştir.
- Isı pompalı kurutma sisteminin açık havada üzüm kurutmaya kıyasla yaklaşık olarak % 74 oranında kurutma süresi üstünlüğü sağladığı görülmüştür. Ancak bu kurutma süresi değeri üzüm kurutma sektörü, ilk yatırım maliyeti ve işletme masrafı dikkate alındığında kabul görebilecek bir değerde değildir. İdeal kurutma süresi değerinin 24 saat civarında olması gerektiği düşünülmektedir.
- Yoğuşturucu ve buharlaştırıcı bataryalarının farklı ölçülerde olması ve farklı konumlarda yerleştirilmesi ile sistem tasarımının oda şeklinde yapılması ölçümleri zorlaştırmıştır. Sistemde eşit boyutlu yoğuşturucu ve buharlaştırıcı bataryaları kullanılarak, kanal içine alınmasının önemi anlaşılmıştır.
- Yapılan kurutma denemeleri sonrasında sistem parçaları ve özellikle yoğuşturucu üzerinde üzüm yaprağı ile üzüm çöpu parçalarının tıkama ve kir oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu etkilere karşı yoğuşturucu bataryasının önüne uygun filtre konulması ve periyodik olarak temizlenmesi ve değiştirilmesi ihtiyacını göstermiştir.
- Yoğuşturucuda ısıtılan ve buharlaştırıcı odasından gelen hava akımların birleşiminde ve buharlaştırıcı ve yoğuşturucu odalarında hava köprülerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Buna, yoğuşturucuda ısıtılan ve buharlaştırıcı odasından gelen hava akımların birleşiminde volumetrik damper ile birleştirilmemesi, buharlaştırıcı bataryalarının kaset ve fanlarının sökülmemiş olması ve sistem tasarımının oda şeklinde olmasının neden olduğu kanaatine varılmıştır.

- Kurutma havasının, tünel giriş sıcaklık ortalaması 60,2 °C ve buharlaştırıcı odası hava sıcaklığı ortalamasının 12,3 °C olduğu dikkate alınarak tünel giriş havası sıcaklığının artırılması ve buharlaştırıcı odası sıcaklığının düşürülmesi suretiyle sistem veriminin artırılabilmesi için tünel çıkış havası ve buharlaştırıcı odası çıkış havasının havadan-havaya ısı değiştiricisi kullanımının gerekliliği anlaşılmıştır.

Sistemin 24 saat kurutma süresi hedefine ulaşabilmesi için, sistemde yapılması gereken birtakım değişiklikler önem arz etmektedir. Bu değişiklik önerileri ve benzer konuda çalışmak isteyenler için tavsiyeler aşağıda verilmiştir.

- Sistem ısı kaybını ve sızıntıları (infiltrasyonu) azaltma noktasında duvarları oluşturan panellerin ve ek yerlerinin klasik sistemden ziyade kontrollü atmosfer tekniğine göre imal edilebilir.
- Kurutma tüneli dönüş havası ile buharlaştırıcı çıkış havası havadan-havaya ısı değiştiricisi kullanımıyla, yoğuşturucu ısıtma yükü ve buharlaştırıcı soğutma yükü düşürülerek sistem performansı artırılabilir.
- Endüstriyel sistemlerde alternatif soğutkan kullanılabilir. Bu kapsamda amonyak tip merkezi kompresör ve soğutkan olarak amonyak kullanılabilir.
- Sistem kompresörlerinin ve fan motorlarının inverter tip olması fayda sağlayacaktır.
- Sistem tasarımı kademeli olarak tasarlanabilir.
- Kurutucu üzeri boş alan güneş pilleri yerleştirilerek fayda sağlanabilir.
- Kurutucu üzeri boş alan (45 m²) havalı tip güneş kolektörleri yerleştirilerek buharlaştırıcı çıkış havasına havadan-havaya ısı değiştiricisi ile destekleme yapılabilir.

- Tetikleyici olarak kullanılan dışarıdaki kompresör-yoğurturucu grubunun da ısılarından faydalanmak için bu ekipmanlar yoğurturucu odasına alınabilir.
- Yoğurtan nemin dış ortama özellikle toprak yapısına ve bitkilere olan etkisi araştırılabilir.

Kurutucu sistemdeki yapılacak geliştirme çalışmaları ile çekirdeksiz üzüm 24 saatte kurutulabilecektir. Ayrıca diğer tarımsal ürünlerin de kurutulabilecek olması ile sistemin yıllık kullanım süresi artırılabilir. Isı pompalı kurutma sistemi özellikle tarımsal ürünlerin kurutmasını yapan işletmelerin, yıkama sonrası kurutma/ısıtım işlemi ihtiyacı olan işletmelerin ve stoktaki şekerlenmiş ürünlerin çözülmesi ihtiyacı olan işletmelerin ihtiyaçlarına çözüm getirme noktasında başarılı bir çözüm olabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Aybers, N., "Üzümlerin suni kurutulması", *İ.T.Ü. Mak. Müh. Fakültesi*, (1954).
2. Eissen, W., Mühlbauer, W., Kutzbach, H.D., Solar Drying of Grapes, *Drying Technology*, 3(1): 63-74, (1985).
3. Güngör, A., "Çekirdeksiz üzümün değişik kurutma koşullarındaki kütle transferi sayılarını veren ifadelerin teori ve deney sonuçlarından yararlanarak türetilmesi", Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*, (1985).
4. Ergüneş, G., "Çekirdeksiz üzümün kuruma karakteristiklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma" Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1990).
5. Sadeghian, E., "Bandırılmış çekirdeksiz üzümün farklı kuruma evrelerindeki difüzyon katsayılarının belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (1992).
6. Yağcıoğlu, A., "Tarım ürünleri kurutma tekniği", *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı*, İzmir, (1999).
7. Brundrettle, G.W., Blundell, C.J., "An advanced dehumidifier for britain", *Htg& Vent Energy*, Amsterdam, 6-7 (1980).
8. Karel, M., "Optimizing the heat sensitive materials in concentration and drying",
In preconcentration and drying of food materials, *Taylor & Francis Group, LLC* Amsterdam, 217-233 (1988).
9. Prasertsan. S, Saen-saby.P, " Heat pump drying of agricultural materials", *Drying Technology*, 235-250 (1998).
10. Coskun, S., "Isı pompası yardımıyla sürekli kurutma sisteminin simülasyonu", Doktora Tezi, *Uludag Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 124-125, (2000).
11. Phani, K., A., Greg, J., S., "Re-circulating heat pump assisted continuous bed drying and energy analysis", *International Journal of Energy Research*, 29: 961-972, (2005).
12. Filho, O., A., Strommen, I., "The application of heat pump in drying of biomaterials", *Drying Technology*, 14(9): 2061-2090, (1996).

13. Baines P., G., "A comparative analysis of heat pump dryers", Ph.D. Thesis, *University of Otago*, New Zealand, 1-10, (1986).
14. Achariyaviriya, S., Sopanronnarit, S., Terdyothin A., "Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer", *Drying Technology*, 18(1-2): 479-491, (2000).
15. Söylemez, M., S., "Optimum heat pump in drying systems with waste heat recovery", *Journal of Food Engineering*, 74: 292-298, (2006).
16. Chua, K., J., Chou, S., K., "A modular approach to study the performance of a two-stage heat pump system for drying", *Applied Thermal Engineering*, 25(8-9): 1363-1379, (2005).
17. Günerkan, H., "Endüstriyel kurutma sistemleri", *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36(13): 1-10, Mart-Nisan (2005).
18. Oktay, Z., "Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması", *Tesisat Kongresi*, 1-2, (1997).
19. Oktay, Z., "Testing of a heat-pump-assisted mechanical opener dryer", *Applied Thermal Engineering*, 23: 153-162, (2003).
20. Rahman, M., S., Perera, C., O., Thebaud, C., "Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas", *Food Research International*, 30(7): 485-491, (1998).
21. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., Soponronnarit, S., "Optimization of heat pump fruit dryers", *Journal of Food Engineering*, 59: 369-377, (2002).
22. Braun, J., E., Bansal, P., K., Groll, E., A., "Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers", *International Journal of Refrigeration*, 25: 954-965, (2002).
23. Oktay Z., Hepbaşlı A., "Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer", *Energy Conversion and Management*, 44: 1193-1207, (2003).
24. Akpınar, E., K., "Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer", *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, (31)8: 1165-1176, (2004).

25. Chua, K., J., Chou, S., K., Ho, J., C., Hawlader, M., N., A., "Heat pump drying: recent developments and future trends", *Drying Technology*, (20)8: 1579-1610, (2002).
26. Ceylan, İ., Aktas, M., Dogan H., "Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump", *Applied Thermal Engineering*, 27: 216-222, (2007).
27. Chou S.K. , Hawlader M.N.A., Ho J.C. and Chua K., J., "On the study of a twostage heat pump cycle for drying of agricultural products", *Proceedings of the ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology*, Phitsanulok, Thailand, June 3–5, (1998a).
28. Chua K. J. , Chou S. K. , Hawlader M. N. A. and Ho J. C., "A two-stage heat pump dryer for better heat recovery and product quality", *Journal of the Institute of Engineers*, Singapore, 38(6): 8-14, (1998b).
29. Chua K. J. , Mujumdar A.S. , Chou S.K., Hawlader M.N.A. and Ho J. C., "Heat pump drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on convective drying kinetics and colour change", *Drying Technology*, 18(5), 907-936, (2000).
30. Prasertsan S. , Saen-Saby P. , Prateepchaikul G. and Ngamsritrakul P. "Heat Pump Dryer Part 3: Experiment verification of the simulation", *International Journal of Energy Research*, 21: 1-20, (1997).
31. Prasertsan S. and Saen-Saby P., "Heat pump drying of agricultural materials", *Drying Technology*, 16: 235-250, (1998b).
32. Strommen I. and Kramer K. "New Applications of Heat Pumps in Drying Proces", *Drying Technology*, 12: 889-901, (1994).
33. Fatouh, M., Metwally, A., B., Helali A., B., Shedid, M., H., "Herbs drying using a heat pump dryer", *Energy Conversion and Management*, 47(15-16): 2629- 2643, (2006).
34. Tosun S., "Bazı tarımsal ürünler için ısı pompalı bir kurutucunun geliştirilmesi ve termodinamik analizi", Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
35. Majumdar A.S., "Handbook of industrial drying", 2006 by *Taylor & Francis Group, LLC*. (2006).
36. *Türk Standartları Enstitüsü*, "TS 3411 Çekirdeksiz kuru üzüm", (2009).

37. ***Türk Standartları Enstitüsü***, “TS 9856 Üzüm kurutma yerleri – sınıflandırma, özellikler ve kurutma kuralları”, (1992).
38. ***T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi***
“Kuru üzüm” (2009).
39. Kısmalı, İ., Altındışli, A., “Çekirdeksiz kuru üzüm üretimi”, ***Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi***.
40. Aydın, S., “Kapalı alanda güneş enerjisi ile çekirdeksiz üzüm kurutulması hakkında üretici ile ortak çalışma”, ***Güneş Enerjisi Enstitüsü Dergisi***, Cilt:1 Sayı:4, Nisan (1992).
41. TR3 Ege Bölgesi Tarım Master Planı, ***Tarım ve Köyişleri Bakanlığı***, Ankara (2006).
42. S.S. Üzüm Tarım Satış Kooperatifleri Birliği Alaşehir Entegre Üzüm İşletmesi
43. Temel Gıda ve Toprak Ürünleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi Saruhanlı Üzüm İşletmesi
44. Van Arsdel, W.B., Copley, M.J., “Food dehydration”, ***The AVI Publishing Company***, Westport Connecticut, 178, (1963).
45. Ashrae TC 2.2, Plant and Animal Enviroment, “Ashrae Temel El Kitabı-Tarım ürünlerinin kurutulmasında ve depolanmasında göz önüne alınacak fizyolojik etkenler”, ***Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınları***: 2, (1998).
46. Hall Carl W.: “Drying and storage of agricultural crops. ***The AVI Publishing Company***, Westport, Connecticut, (1980).
47. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C.W., “Drying cereal grains”, ***The AVI Publishing Company***, Weatport, Connecticut, (1973).
48. Crank, J., “The mathematics of diffusion”. ***Clarendon Press***, Oxford (1975).
49. Akpınar, E., “Tarımsal ürünler için siklon tipi bir kurutucunun geliştirilmesi”, Doktora Tezi, ***Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, (2002).
50. Majumdar, A. S., Devahastin, S., “Majumdar’s Practical Guide to Industrial Drying”, (2000).
51. Cemeroğlu, B., Acar, J., “Meyve ve sebze işletme teknolojisi”, ***Gıda Teknolojisi Dergisi*** (1987).

52. Başaran B., Bitlisli O., Sarı Ö., Özbalta N., Güngör A., “Deri kurutulmasında yeni teknolojiler: Isı pompalı kurutucular”, **1. Ulusal Deri Sempozyumu**, (633-648), İzmir,(2004).
53. Güngör A., Özbalta N., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, **3. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, Bildiriler Kitabı, Cilt 2, Yayın no:203/2, (75-747), (1997).
54. Özbalta N., Güngör A., “Kurutma sistemlerinde ısı pompası kullanım potansiyeli”, **3. Gap Mühendislik Kongresi**, (107-116), Urfa, (2000).
55. Erbil,T., “Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı Hibrit Isı Pompası Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, İzmir, Türkiye, 29, 30, 43. (2002).
56. Bannister, P., Carrington, G. and Chen, G., “Heat pump dehumidifier drying technology-status, potential and prospects”, **Proceedings of 7th IEA (International Energy Agency) Heat Pump Conference**, Volume 1, China, 219p. (2002)
57. Çengel, Y.A. ve Boles, M. A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, **McGraw-Hill**-Literatür, İstanbul , 527-530., (1999).
57. Ogura, H., Ishida, H., Yokooji, R., Kage, H., Matsuno, Y. And Mujumdar, A.S., Experimental studies on a novel chemical heat pump dryer using a gas-solid reaction, **Drying Technology**, 19 (7): 1462p, (2001)
58. Hepbaşlı, A., “Isı pompalarının ürün kurutucularında kullanılması”, **1. Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı**, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi, İzmir, 80, 84, 85., (2002).
59. Kudra, T. and Mujumdar, A.S.,”Advanced Drying Technologies”, New York, **Marcel Dekker**, 247-249p., (2002).
60. Akman, S., ”Fabrikalarda enerji ve kütle denklikleri”, **Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü**-Enerji Kaynakları Etüt Dairesi, Ankara, (1993).
61. Midilli, A., “Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system”, **International Journal of Energy Research**, 25,715-725, (2001)
62. Incropera F. P., Dewitt, D. P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, **John Wiley Sons**, New York, 303-577, 1996.

63. Malik MAS, Tiwari GN, Kumar A, Sodha MS, "Solar distillation", *Oxford, Permagon Press*, 1-50, (1982).
64. Dilip J, Tiwari GN, "Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection I: Evaluation of convective mass transfer coefficient", *Energy Conversion and Management*, 45: 765-783, (2004).
65. Kumar A., Tiwari G., N., "Effect of shape and size on convective mass transfer coefficient during greenhouse drying (GHD) of jaggery", *Journal of Food Engineering*, 73: 121-134, (2006).
66. Tiwari, G., N., Kumar, S., Prakash O., "Evaluation of convective mass transfer coefficient during of jaggery", *Journal of Food Engineering*, 63: 219-227, (2004)

EKLER

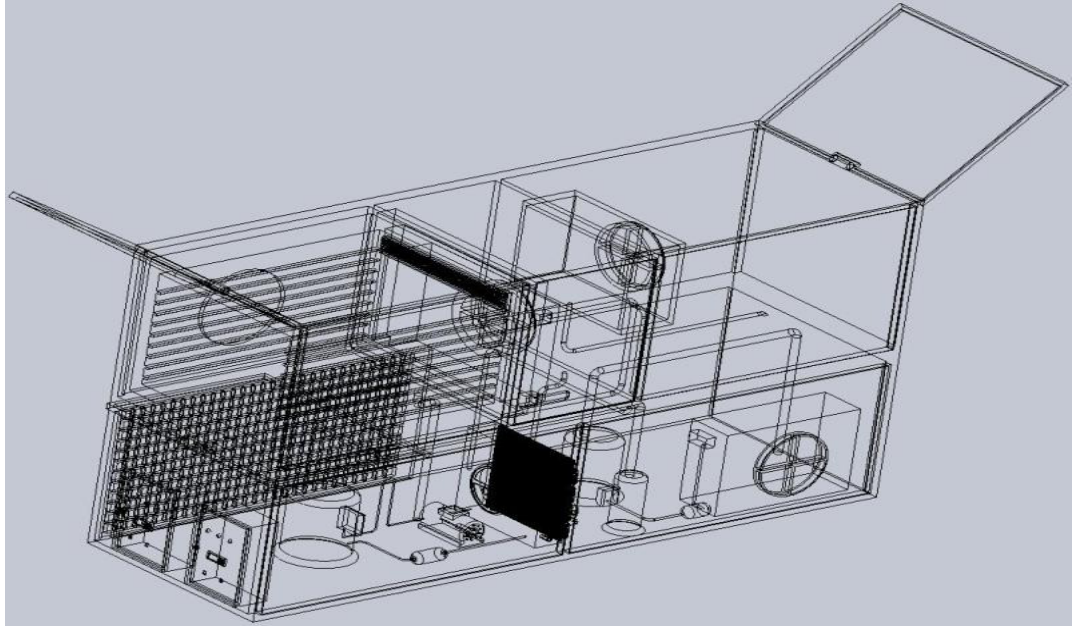
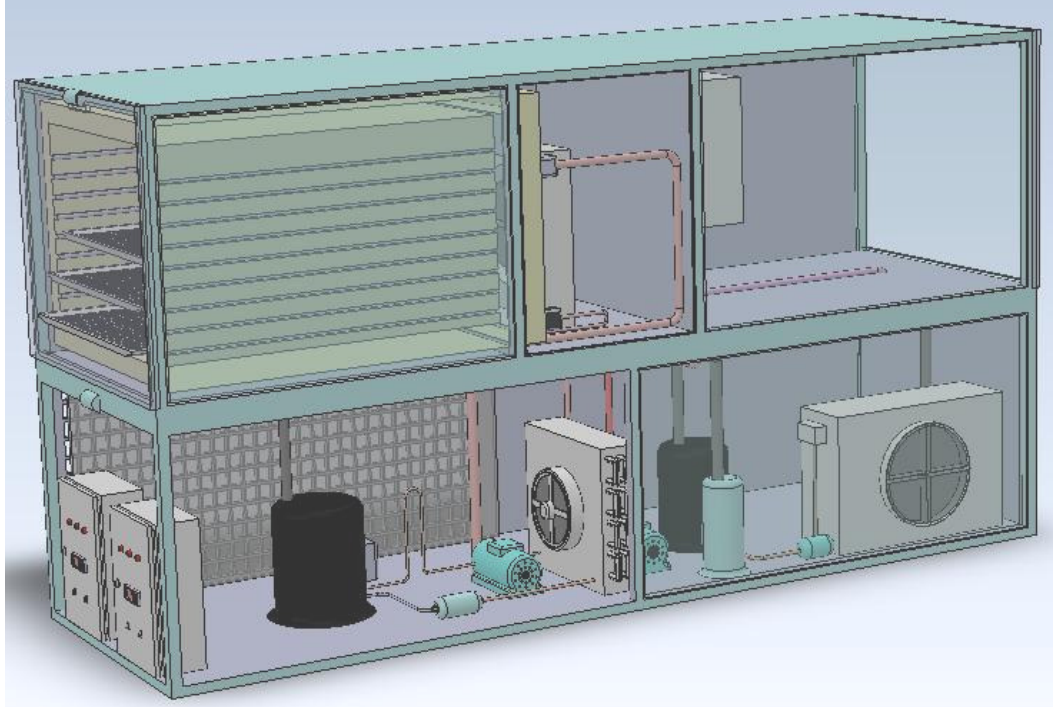
EK- 1. Isı pompalı kurutucu deney seti fotoğrafları



EK- 2. Isı pompalı deney seti kurutucusunun metrajı

Sıra no	Makine/Ekipman/Malzeme	Adet	Kapasite	Teknik Özellik
1	Kompresör	2	3 BG	Tecumseh - Hermetik
2	Yoğuşturucu (kondenser)	3	10-16-16 m ²	Friterm
3	Buharlaştırıcı (evaporatör)	1	15 m ²	Friterm
4	Su Pompası	1		Devridaim
5	Eksenel Fan	4	3 adet Ø 400, 220 V, 50 Hz, 1 adet Ø 350, 220 V, 50 Hz	
6	Damper	2		100mm x 100mm
7	Su Tankı	2	50 lt	
8	Su Borusu	10 m		
9	Su Giriş Çıkış Vanası	4		
10	Su Boru İzolesi	10 m		
11	Genleşme Vanası	3		Alco
12	Dijital Nem Kontrol Cihazı (higrostat)	2		Dixel XT 110 C
13	Nem Sensörü (duygargası)	2		
14	Dijital Sıcaklık Kontrol Cihazı (termostat)	2		Carel ir 33
15	Kontaktör	11		Üç fazlı
16	Termik Manyetik Şalter	1		Üç fazlı
17	Sigorta	5		Üç fazlı
18	Sigorta	16		Tek fazlı
19	Termik Röle	4		
20	Faz Koruma Rölesi	2		
21	Açma Kapama (on-off) Anahtarı	8		
22	Buat	4		110x180 Kaim
23	Buz Çözücü (defrost) Rezistanslar	24	2.000 W	120 cm
24	Sıvı (likit) Tutucu	2	7,5 lt	1 5/8"
25	Yağ Ayırıcı,	2	6 lt	1 3/8"
26	Hazne (receiver)	1	8 lt	5/8"
27	Filtre Kurutucu (dryer)	2		¾" Rakorlu
28	Ürün Rafları	2		Krom
29	Gözetleme Camı	2		5/8"
30	Basma Hattı Vanası	3		Küresel 5/8"
31	Emme Hattı Vanası	3		Küresel 1 3/8"
32	Fan Hız Kontrol	4	8 amp	
33	Pano	2		40x30x20 Esfb
34	İzotermik Gözetleme Camı	2		
35	Bakır Boru Emiş Hatları	10 m		1 5/8"
36	Bakır Boru Basma Hatları	10 m		1 5/8"
37	İzolasyon Emiş Hatları	10 m		1 5/8"
38	Prosestat Kombine	2		
39	Alçak Basınç Saati	2		
40	Yüksek Basınç Saati	2		
41	Rakor	15		¼"
42	Rakor	12		3/8"
43	Rakor	12		½"
44	Rakor	5		5/8"
45	Rakor	6		¾"
46	Dirsek, T, Manşon	6		7/8"
47	Mekanik Termostat	2		-30 / +30 °C
48	Etiketler	4		
49	Kapalı Tip Cihaz Şasesi	1		Elektro Statik Fırın Boyalı
50	Soğutucu (soğutucu gaz)	20 kg		R 134a
51	R 134a Yağı	15 kg		
52	Panel 8 cm	4 m ²		PVC
53	İzolasyon	30 m ²		
54	Koruyucu örtü	30 m ²		

EK- 3. Deney seti kurutucu 3D tasarım resimleri



EK- 4. Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



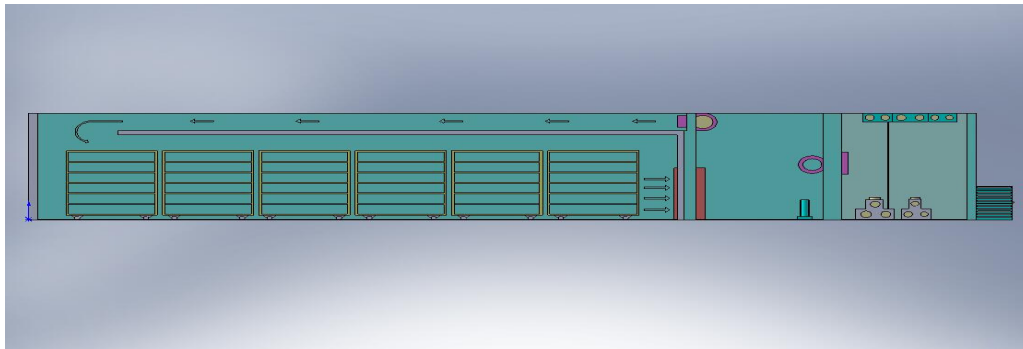
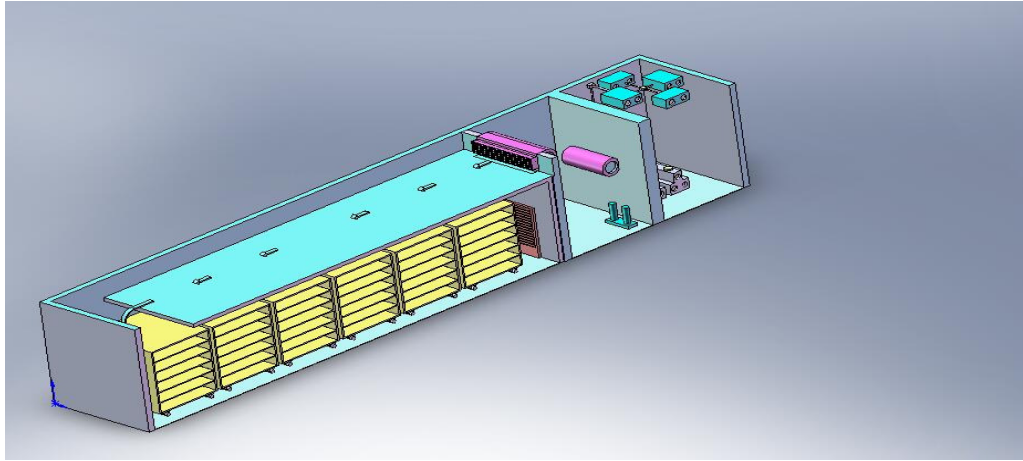
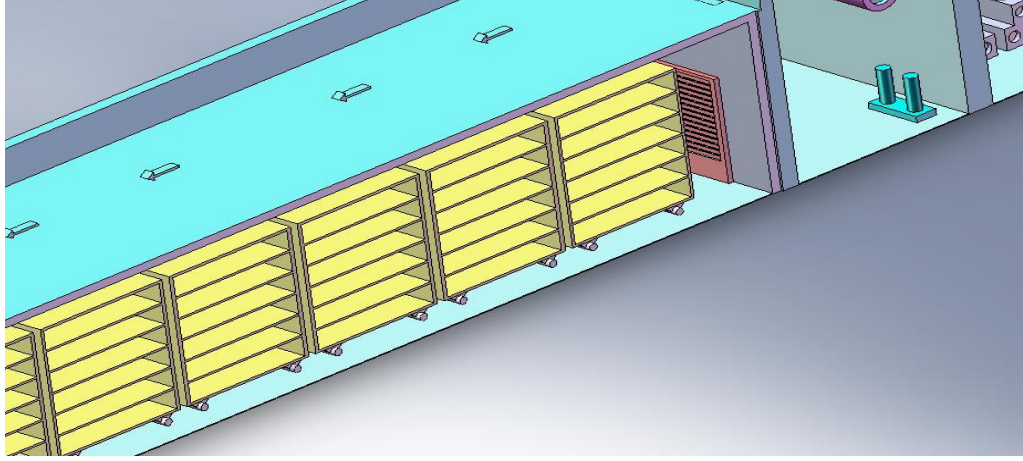
EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



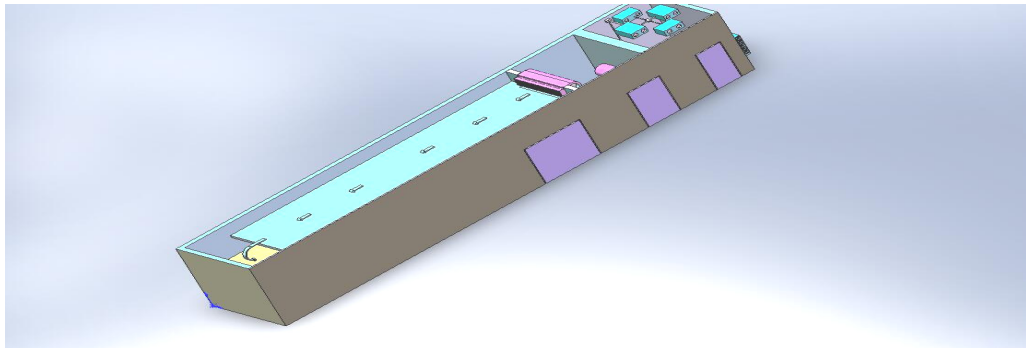
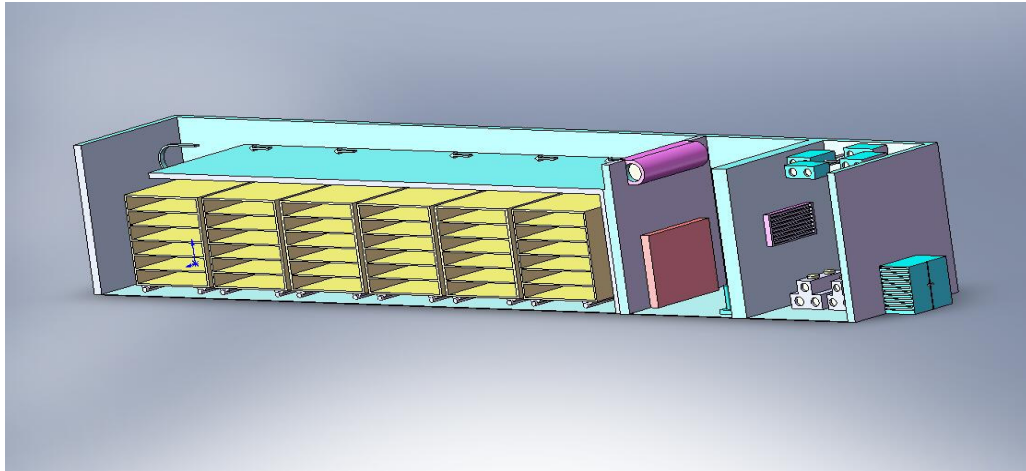
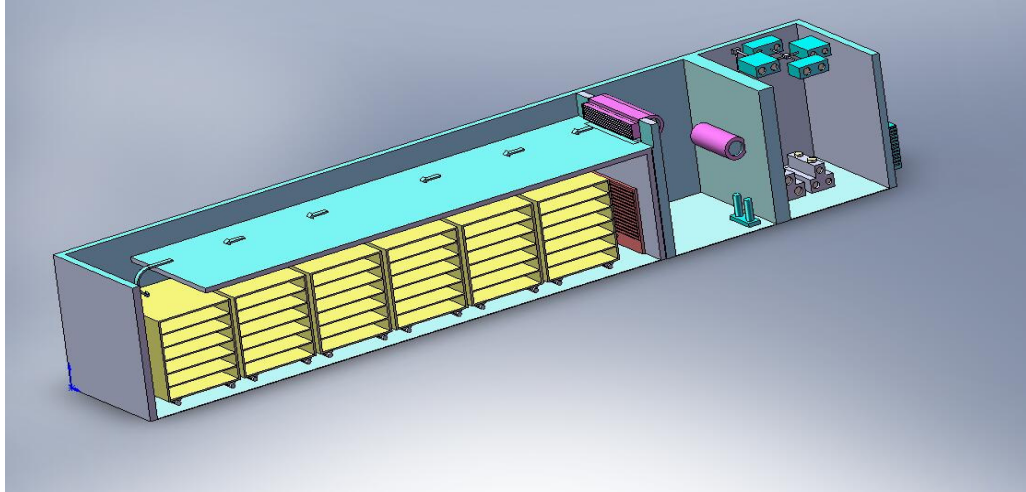
EK- 4. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu fotoğrafları



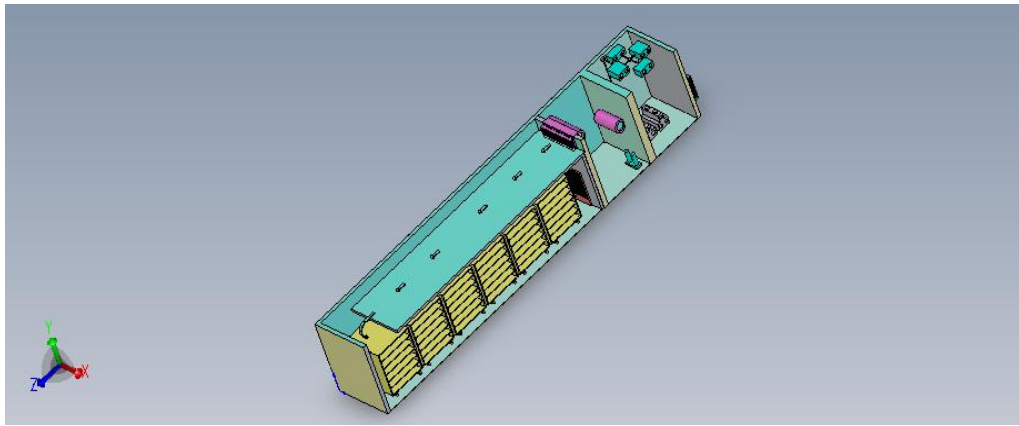
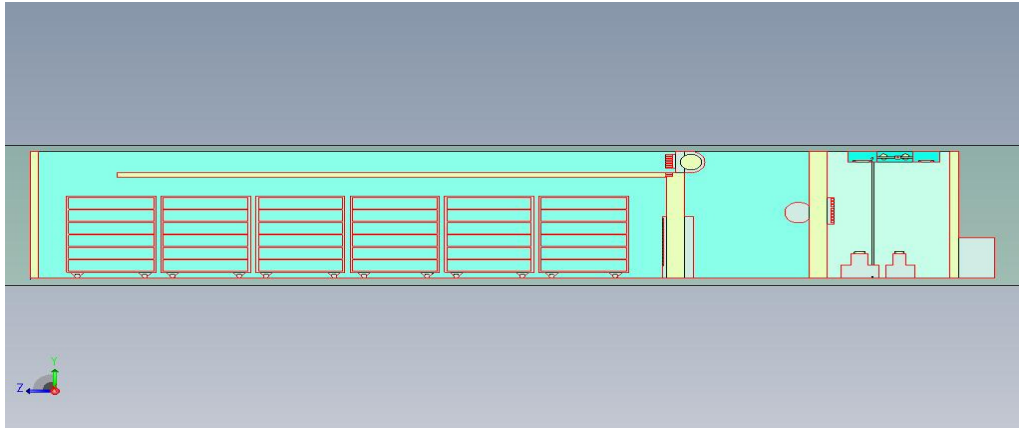
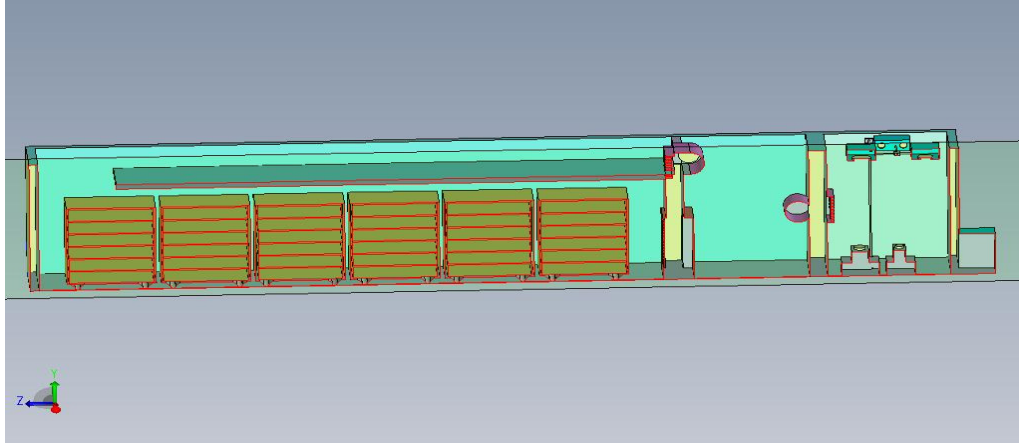
EK- 5. Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu 3D tasarım resimleri (solidworks)



EK- 5. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu 3D tasarım resimleri



EK- 5. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucu 3D tasarım resimleri



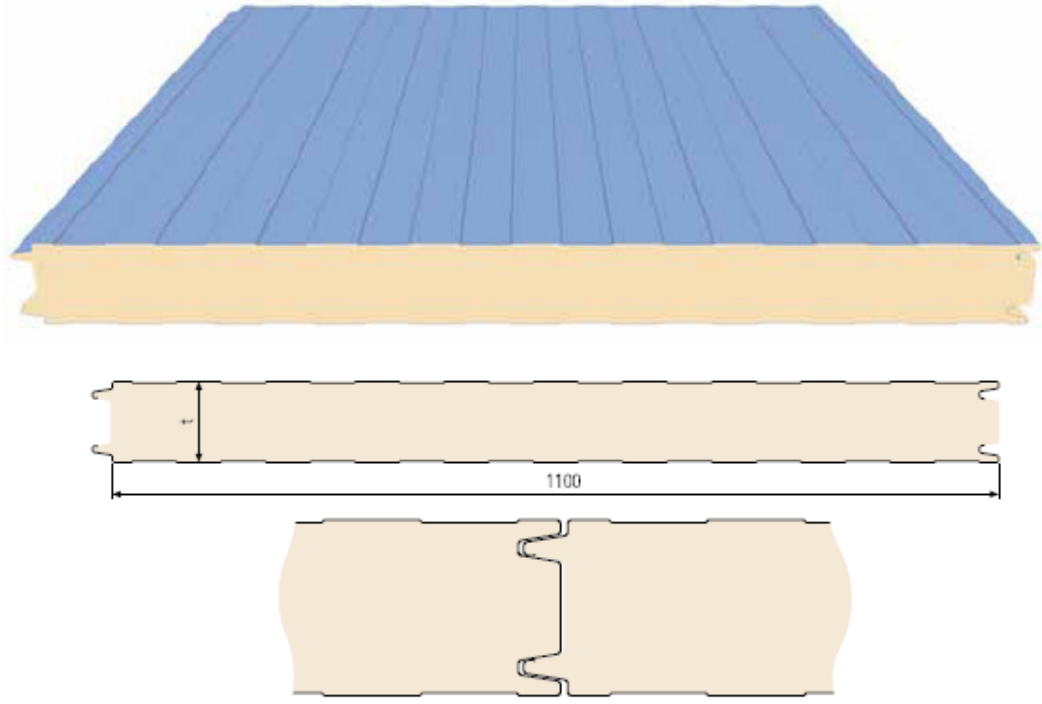
EK- 6. Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucunun metrajı

Sıra no	Makine/Ekipman/Malzeme	Miktar	Kapasite		Teknik Özellik
1	Kompresör	1	30 BG	90 BG	Yarı Hermetik, Bitzer, (içteki sol)
2	Kompresör	1	20 BG		Yarı Hermetik, Bitzer (içteki sağ)
3	Kompresör	1	20 BG		Yarı Hermetik, Bitzer (dış ünite)
4	Yoğuşturucu (kondenser)	2	145 m ²	542 m ²	Friterm (alt kısımda)
5	Yoğuşturucu (kondenser)	1	80 m ²		Friterm (dış ünite)
6	Yoğuşturucu (kondenser)	2	86 m ²		Friterm (üst kısımda)
7	Buharlaştırıcı (evaporatör)	4	100 m ²	673 m ²	Friterm (2. el siyah renkli)
8	Buharlaştırıcı (evaporatör)	3	41 m ²		Friterm (iki fanlı)
9	Buharlaştırıcı (evaporatör)	1	150 m ²		Friterm (üç fanlı)
10	Salyangoz (radial) Fan	1	150.000 m ³ /h		-
11	Salyangoz (radial) Fan	1	53.000 m ³ /h		-
12	Elektrik Motoru	1	7,5 BG		380 V, 50 Hz
13	Eksenel (aksiyal) Fan	3	-		Ø 400, 220 V, 50 Hz
14	Eksenel (aksiyal) Fan	4	-		Ø 450, 220 V, 50 Hz
15	Eksenel (aksiyal) Fan	6	-		Ø 300, 220 V, 50 Hz
16	Eksenel (aksiyal) Fan	2	-		Ø 500, 220 V, 50 Hz
17	Elektrik Motoru	1	3 BG		380 V, 50 Hz
18	Kompresör (Deneme Çalışmalarında Yandı)	1	35 BG		Frescold
19	Kompresör (Deneme Çalışmalarında Yandı)	1	15 BG		Frescold
20	Genleşme Valfi	8			Alco
21	Dijital Nem Kontrol Cihazı (higrostat)	4			Dixel XT 110 C
22	Nem Duyargası (sensörü)	4			
23	Dijital Sıcaklık Kontrol Cihazı (Termostat)	4			Carel ir 33
24	Sıcaklık Duyargası (sensörü)	4			
25	Kontaktör	11			Üçfazlı
26	Termik Manyetik Şalter	1			Üçfazlı
27	Sigorta	5			Üçfazlı
28	Sigorta	16			Tekfazlı
29	Termik Röle	4			
30	Faz Koruma Rölesi	3			
31	Açma Kapama (on-off) Anahtarı	4			
32	Buat	4			110x180 Kaim
33	Defrost (buzlanma önleyici) Rezistansları	30	2.000 W		120 cm (buharlaştırıcılarda)
34	Sıvı (likit) tutucu	3	7,5 lt		1 5/8"
35	Yağ Ayırıcı	3	6 lt		1 3/8"
36	Hazne (receiver)	3	8 lt		5/8"
37	Filtre Kurutucu (dryer)	3			¾" Rakorlu
38	Titreşim Emici (absorber)	3			1 5/8", Emiş Hattı
39	Titreşim Emici (absorber)	3			1 3/8", Basma Hattı
40	Gözetleme Camı	3			5/8"
41	Basma Hattı Vanası	3			Küresel, 5/8"
42	Emme Hattı Vanası	3			Küresel, 1 3/8"
43	Pano	1			50x80x22, Polyester
44	Pano	1			50x80x22 Esfb
45	Pano	1			40x50x17 Esfb
46	Bakır Boru	30 m			Emiş Hatları, 1 5/8"
47	Bakır Boru	30 m			Basma Hatları, 1 5/8"
48	İzolasyon	30 m			Emiş Hatları, 1 5/8"
49	Prosestat Kombine	3			
50	Alçak Basınç Saati	3			

EK- 6. (Devam) Endüstriyel tip ısı pompalı kurutucunun metrajı

51	Yüksek Basınç Saati	3		
52	Rakor	15		1/4"
53	Rakor	12		3/8"
54	Rakor	12		1/2"
55	Rakor	5		5/8"
56	Rakor	6		3/4"
57	Dirsek, T, Manşon	5		1 5/8"
58	Dirsek, T, Manşon	5		1 3/8"
59	Dirsek, T, Manşon	5		1 1/8"
60	Dirsek, T, Manşon	20		Ø 28, 22, 19, 16, 12, 10
61	Mekanik Termostat,	2		-30 / +30 °C
62	Açık Tip Cihaz Şasesi	2		Elektro Statik Fırın Boyalı
63	Kapalı Tip Cihaz Şasesi	1		Elektro Statik Fırın Boyalı
64	Soğutkan (soğutucu gaz)	100 kg		R 134a
65	Soğutkan (soğutucu gaz)	30 kg		R 22
66	R 134a Yağı	27 kg		İç ünitelerde kullanıldı
67	R 22 Yağı	12 kg		Dış ünitelerde kullanıldı
68	Panel 8 cm	194 m ²		PVC
69	Çarpma Kapı	2		90 x 190 net geçişli
70	Sürgülü Kapı	1		20x250 cm
71	Elektrikli Isıtıcı Rezistans	9	1.000 W	

EK- 7. Deney seti ve endüstriyel tip kurutucuda kullanılan panel teknik özellikleri



Kalınlık	:	80 mm
PUR Yoğunluğu	:	40 - 42 kg/m ³
Yanmazlık sınıfı	:	B sınıfı EN 13501-1
Üretim uzunluğu	:	Panel kalınlığına göre 19 m'ye kadar.
Üretim toleransı	:	DIN 18164 ve DIN 18202
Akustik izolasyon	:	Yaklaşık 35 dB bütün panel kalınlıklarında.
Isı geçirgenlik katsayısı	:	0.2627 W/m ² K (80 mm kalınlık için)
Isı iletim katsayısı	:	0.022 W/m K (PUR köpük için)
Ağırlık	:	11.62 kg/ m ²

EK- 8. Devlet meteoroloji işletmesi genel müdürlüğünden Manisa için rasat bilgileri

Enlem (°) : 38° 37' N
Boylam (°) : 27° 26' E
Yükselik (m) : 21 m

(MANISA) MANISA

METEOROLOJİK ELEMENLER	YILLIK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	YILLIK
Ortalama yerel basınç (hPa)	61	1009.0	1007.6	1007.0	1006.3	1004.9	1003.7	1002.0	1002.8	1006.2	1009.0	1009.8	1009.3	1006.4
En yüksek yerel basınç (hPa)	61	1031.7	1027.5	1031.1	1018.7	1021.1	1019.4	1012.0	1011.8	1018.8	1021.5	1025.5	1031.5	1031.7
En düşük yerel basınç (hPa)	61	887.0	879.6	876.2	883.8	887.5	892.7	889.0	890.7	892.7	892.3	886.6	879.1	887.0
Saat 07 deki ortalama sıcaklık (°C)	61	4.4	4.9	6.5	11.0	16.3	20.6	23.5	22.5	18.0	12.8	8.7	5.8	12.3
Saat 14 deki ortalama sıcaklık (°C)	61	9.4	11.1	14.4	19.9	25.5	30.6	33.5	33.3	29.4	23.0	16.2	11.1	21.5
Saat 21 deki ortalama sıcaklık (°C)	61	6.6	7.9	10.4	14.8	19.3	24.0	26.8	26.4	22.4	17.3	12.1	8.2	16.4
Ortalama sıcaklık (°C)	61	6.8	8.0	10.4	15.1	20.1	25.0	27.6	27.2	23.1	17.6	12.3	8.4	16.8
Ortalama sıcaklık $\geq 5^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	35	20.3	21.7	28.8	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	29.2	25.2	339.2
Ortalama sıcaklık $\geq 10^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	35	6.9	8.7	17.3	28.1	30.9	30.0	31.0	31.0	30.0	30.8	22.0	10.6	277.3
Ortalama yüksek sıcaklık (°C)	61	10.7	12.5	15.9	21.3	26.7	31.8	34.4	34.4	30.5	24.2	17.5	12.4	22.7
Ortalama düşük sıcaklık (°C)	61	3.0	3.6	5.0	8.6	12.8	16.7	19.5	19.3	15.5	11.2	7.3	4.3	10.6
En yüksek sıcaklık günü	61	3	15	16	3	26	28	11	23	1	7	6	21	23/8
En yüksek sıcaklık yılı	61	1971	1953	1931	1952	1945	1982	1980	1958	1938	1984	1990	1963	1958
En düşük sıcaklık günü	61	23.3	24.8	33.5	34.6	39.5	41.8	44.0	44.5	40.1	36.0	29.9	26.4	44.5
En düşük sıcaklık yılı	61	1942	1932	1943	1943	1974	1943	1933	1949	1931	1940	1946	1945	1942
Yüksek sıcaklık $\geq 30^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	-	-	0.5	6.7	7.6	31.2	25.1	28.5	18.2	21.5	-	-	106.3
Yüksek sıcaklık $\geq 25^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	-	-	0.9	6.8	20.8	28.9	30.8	31.0	27.7	13.9	1.0	0.0	161.8
Yüksek sıcaklık $\geq 20^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.3	1.1	6.8	18.6	29.1	29.9	31.0	31.0	29.7	25.8	8.8	1.3	213.4
Yüksek sıcaklık $\leq -0.1^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.2	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.3
Günlük en yüksek sıcaklık farkı (°C)	61	18.8	20.1	24.1	26.0	25.0	25.2	25.6	25.9	25.7	24.1	20.3	20.1	26.0
En düşük sıcaklık günü	61	5	8	6	7	3	1	7	21	29	21	28	16	5/1
En düşük sıcaklık yılı	61	1942	1932	1943	1943	1974	1943	1933	1949	1931	1940	1946	1945	1942
En düşük sıcaklık (°C)	61	-17.5	-10.9	-6.7	-2.7	2.0	7.4	10.6	11.2	3.3	-0.9	-7.3	-9.9	-17.5
Düşük sıcaklık $\leq -0.1^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	6.8	6.2	3.4	6.1	-	-	-	-	-	0.0	1.6	5.9	25.7
Düşük sıcaklık $\leq -3^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	2.2	1.8	0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.2	1.4	6.1
Düşük sıcaklık $\leq -5^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.8	0.5	0.0	-	-	-	-	-	-	-	0.1	0.4	1.8
Düşük sıcaklık $\leq -10^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Düşük sıcaklık $\leq -15^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0
Düşük sıcaklık $\leq -20^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Düşük sıcaklık $\geq 20^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	-	-	0.0	0.0	0.2	3.9	14.4	13.6	2.3	0.2	0.0	-	34.6
Düşük sıcaklık $\geq 15^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	0.1	0.2	0.3	1.1	7.4	22.4	29.5	29.5	17.4	4.7	0.8	0.4	113.9
Düşük sıcaklık $\geq 10^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	1.8	1.9	3.0	10.3	25.8	29.7	31.0	31.0	28.4	20.1	8.5	3.2	194.7
Düşük sıcaklık $\geq 5^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	61	10.5	10.5	16.1	25.9	30.8	30.0	31.0	31.0	30.0	29.1	21.9	14.6	281.4
Ortalama toprak üstü minimum sıcaklık (°C)	43	1.6	2.0	3.4	5.5	10.6	14.5	17.5	17.3	13.4	9.4	5.6	3.0	8.7
En düşük toprak üstü minimum sıcaklık (°C)	43	-16.8	-6.6	-8.2	-4.0	-0.3	4.8	9.2	7.7	3.6	-2.0	-10.5	-12.7	-16.8
Top. üs. min. sic. $\leq -0.1^{\circ}\text{C}$ old. ort. günler sayısı	35	12.0	5.5	6.5	1.0	0.0	-	-	-	-	0.2	4.1	8.2	41.5
Top. üs. min. sic. $\leq -3^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	35	6.0	3.9	1.8	0.0	-	-	-	-	-	-	1.1	3.3	16.1
Top. üs. min. sic. $\leq -5^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	35	2.3	1.5	0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.9	5.4
Top. üs. min. sic. $\leq -10^{\circ}\text{C}$ olduğu ort. günler sayısı	35	0.1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Ortalama buhar basıncı (hPa)	60	7.6	7.7	8.3	10.2	12.9	14.7	16.0	16.0	13.9	12.5	10.4	8.9	11.9
Saat 07 deki ortalama bağıl nem (%)	60	83	81	80	77	71	62	57	60	68	60	55	45	74
Saat 14 deki ortalama bağıl nem (%)	60	86	81	53	46	40	34	31	31	34	45	59	67	47
Saat 21 deki ortalama bağıl nem (%)	60	74	71	66	80	88	49	45	46	51	62	74	78	61
Ortalama bağıl nem (%)	60	75	71	66	81	57	48	45	46	51	62	73	76	61
En düşük bağıl nem (%)	60	18	16	3	9	1	7	7	7	9	19	13	3	1
Saat 07 deki ortalama bulutluluk (0-10)	61	6.5	6.5	5.8	5.1	4.0	2.0	0.9	0.9	1.8	4.0	6.0	6.9	4.2
Saat 14 deki ortalama bulutluluk (0-10)	61	6.6	6.5	6.2	5.9	5.4	3.8	2.0	1.7	2.6	4.4	6.7	6.4	4.8
Saat 21 deki ortalama bulutluluk (0-10)	61	5.6	5.2	4.8	4.0	3.4	2.0	0.8	0.7	1.4	3.1	4.3	5.2	3.4
Ortalama bulutluluk (0-10)	61	6.4	6.0	5.6	5.0	4.3	2.5	1.2	1.1	1.9	3.8	5.4	6.2	4.1
Ortalama açık günler sayısı (bulutluluk 0.0 - 1.9)	61	3.8	3.5	5.3	5.4	7.4	14.2	23.0	24.1	19.4	11.1	5.1	4.0	126.4
Ortalama bulutlu günler sayısı (bulutluluk 2.0 - 6.0)	61	15.5	15.9	17.1	19.2	20.3	15.1	7.6	6.8	9.7	16.2	18.6	16.6	176.6
Ortalama kapalı günler sayısı (bulutluluk 6.1 - 10.0)	61	11.6	8.8	8.6	5.5	3.3	0.6	0.1	0.0	0.7	3.9	6.2	10.4	59.7
Saat 07 deki ortalama toplam yağış miktarı (mm)	60	56.5	47.8	32.9	20.5	11.2	2.5	0.9	0.3	6.6	16.6	38.4	65.4	301.2
Saat 14 deki ortalama toplam yağış miktarı (mm)	60	35.7	30.7	20.5	17.8	10.0	4.5	1.7	1.5	3.0	13.2	27.9	40.8	207.3
Saat 21 deki ortalama toplam yağış miktarı (mm)	60	38.6	26.3	25.2	17.9	18.3	8.1	3.4	2.7	5.9	15.4	27.3	40.9	230.0
Ortalama toplam yağış miktarı (mm)	61	128.8	106.2	78.8	55.6	40.0	15.1	6.4	4.6	15.8	50.0	90.9	147.8	740.0
Günlük en çok yağış miktarı (mm)	62	101.6	100.1	90.7	78.6	56.1	31.8	32.5	54.2	68.8	110.4	114.1	153.6	153.8
Yağış ≥ 0.1 mm olduğu günler sayısı	61	14.5	11.2	10.2	9.1	8.9	3.2	1.0	0.8	2.1	6.7	9.9	14.4	89.0
Yağış ≥ 10 mm olduğu günler sayısı	61	4.4	3.4	2.7	1.9	1.4	0.5	0.2	0.1	0.4	1.7	2.9	4.8	24.4
Yağış ≥ 50 mm olduğu günler sayısı	26	0.3	0.2	0.2	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.2	0.4	1.4
Ortalama kar yağışı günler sayısı	35	0.3	0.3	0.1	0.0	-	-	-	-	-	-	0.0	0.7	0.7

İstatistiklerin çalışma süresi : 1930-1990

Not : 1 hPa=1 mb

MANISA	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
Uzun Yıllar İçinde Gerçekleşen Ortalama Değerler (1975 - 2008)												
Ortalama Sıcaklık (°C)	6.7	7.6	10.5	15.1	20.5	25.7	28.3	27.6	23.4	17.9	11.7	8.2
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	10.8	12.1	16.1	21.1	27.1	32.5	35.2	34.7	30.6	24.2	16.8	11.9
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	3.0	3.4	5.2	9.1	13.6	18.1	21.1	20.7	16.4	12.2	7.2	4.6
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	2.9	3.9	5.5	6.7	8.6	10.9	11.4	10.7	9.3	6.7	4.0	2.3
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	11.7	10.7	8.9	9.6	6.5	3.2	2.1	1.6	3.3	6.0	9.4	13.2
Ortalama Yağış Miktarı (kg/m ²)	114.6	90.7	79.8	57.3	33.2	12.3	5.4	4.6	16.1	41.7	98.1	133.3
Uzun Yıllar İçinde Gerçekleşen En Yüksek ve En Düşük Değerler (1975 - 2008)*												
En Yüksek Sıcaklık (°C)	22.3	24.8	31.6	32.7	39.1	43.3	45.5	43.7	42.4	37.3	29.9	25.9
En Düşük Sıcaklık (°C)	-6.3	-8.9	-5.1	-2.0	4.0	7.6	13.4	12.2	8.4	2.3	-3.4	-5.5
En yüksek ve en düşük sıcaklıkların gerçekleşme tarihini görmek için fare imlecini değerlerin üstüne getiriniz.												
En Çok Yağış	23.12.1986	163.5 kg/m ²	En Hızlı Rüzgar	31.03.1982	130.3 km/sa	En Yüksek Kar	13.02.2004	23.0 cm				

EK- 9. Nemli havanın termodinamik özellikleri

ASHRAE Temel El Kitabı

Nemli havanın termodinamik özellikleri (standart atmosferik basınç, 101,325 kPa).

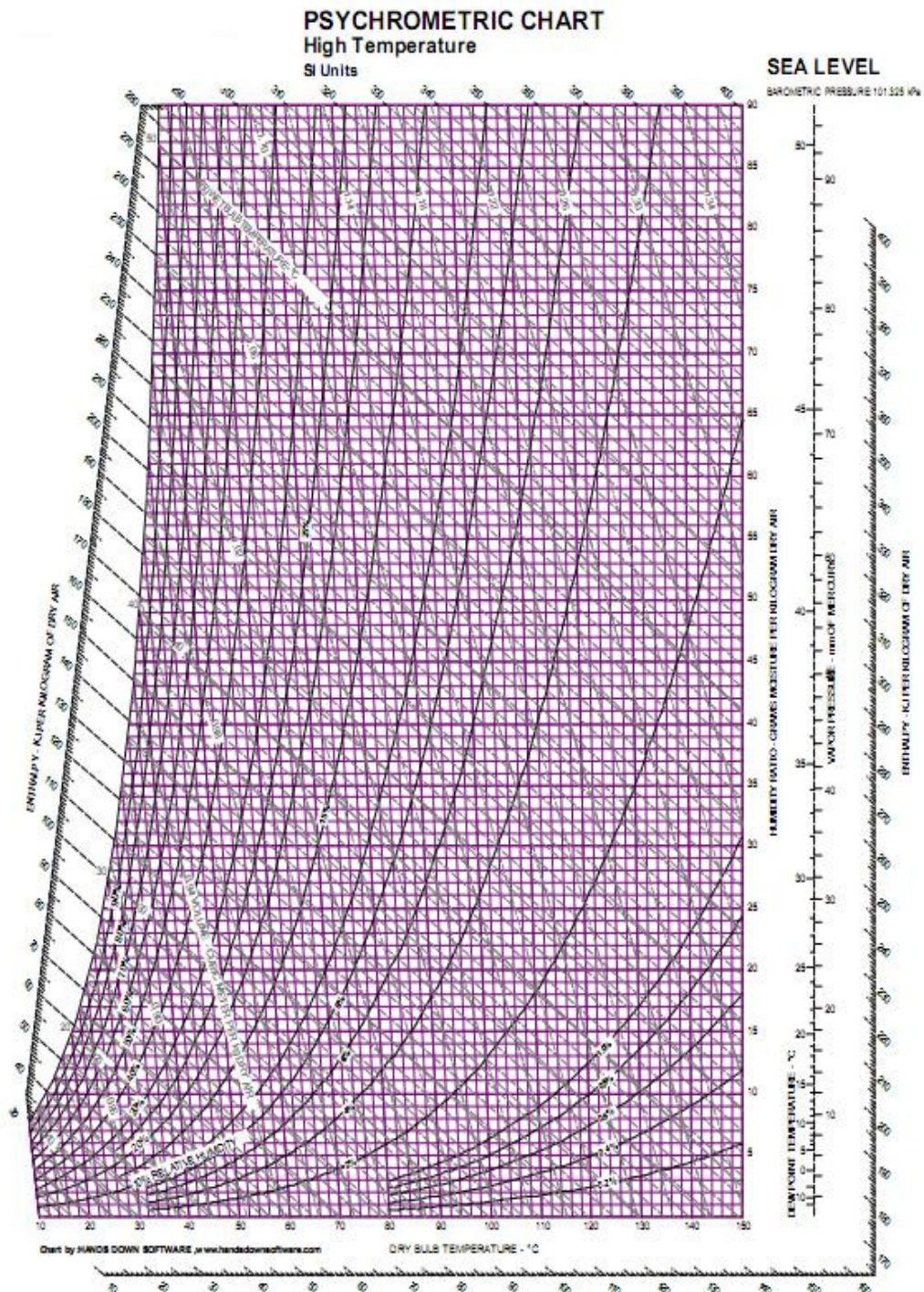
t, °C	Özgül nem $\frac{W_s}{W_a}$	Özgül hacim $\text{m}^3/\text{kg}(\text{kuru hava})$			Antalpi $\text{kJ}/\text{kg}(\text{kuru hava})$			Antropi $\text{kJ}/\text{kg}(\text{kuru hava})\cdot\text{K}$			Yoğuşmuş su			
		v_a	v_{as}	v_s	h_a	h_{as}	h_s	s_a	s_{as}	s_s	Antalpi kJ/kg h_w	Antropi $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ s_w	Buhar basıncı kPa p_s	
		v_a	v_{as}	v_s	h_a	h_{as}	h_s	s_a	s_{as}	s_s	h_w	s_w	p_s	
0	0.003789	0.7734	0.0047	0.7781	-0.000	9.473	9.473	0.0000	0.0364	0.0364	0.06	-0.0001	0.6112	0
1	0.004076	0.7762	0.0051	0.7813	1.006	10.197	11.203	0.0037	0.0391	0.0427	4.28	0.0153	0.6571	1
2	0.004381	0.7791	0.0055	0.7845	2.012	10.970	12.982	0.0073	0.0419	0.0492	8.49	0.0306	0.7060	2
3	0.004707	0.7819	0.0059	0.7878	3.018	11.793	14.811	0.0110	0.0449	0.0559	12.70	0.0459	0.7581	3
4	0.005054	0.7848	0.0064	0.7911	4.024	12.672	16.696	0.0146	0.0480	0.0627	16.91	0.0611	0.8135	4
5	0.005424	0.7876	0.0068	0.7944	5.029	13.610	18.639	0.0182	0.0514	0.0697	21.12	0.0762	0.8725	5
6	0.005818	0.7904	0.0074	0.7978	6.036	14.608	20.644	0.0219	0.0550	0.0769	25.32	0.0913	0.9353	6
7	0.006237	0.7933	0.0079	0.8012	7.041	15.671	22.713	0.0255	0.0588	0.0843	29.52	0.1064	1.0020	7
8	0.006683	0.7961	0.0085	0.8046	8.047	16.805	24.852	0.0290	0.0628	0.0919	33.72	0.1213	1.0729	8
9	0.007157	0.7990	0.0092	0.8081	9.053	18.010	27.064	0.0326	0.0671	0.0997	37.92	0.1362	1.1481	9
10	0.007661	0.8018	0.0098	0.8116	10.059	19.293	29.352	0.0362	0.0717	0.1078	42.11	0.1511	1.2280	10
11	0.008197	0.8046	0.0106	0.8152	11.065	20.658	31.724	0.0397	0.0765	0.1162	46.31	0.1659	1.3128	11
12	0.008766	0.8075	0.0113	0.8188	12.071	22.108	34.179	0.0433	0.0816	0.1248	50.50	0.1806	1.4026	12
13	0.009370	0.8103	0.0122	0.8225	13.077	23.649	36.726	0.0468	0.0870	0.1337	54.69	0.1953	1.4979	13
14	0.010012	0.8132	0.0131	0.8262	14.084	25.286	39.370	0.0503	0.0927	0.1430	58.88	0.2099	1.5987	14
15	0.010692	0.8160	0.0140	0.8300	15.090	27.023	42.113	0.0538	0.0987	0.1525	63.07	0.2244	1.7055	15
16	0.011413	0.8188	0.0150	0.8338	16.096	28.867	44.963	0.0573	0.1051	0.1624	67.26	0.2389	1.8185	16
17	0.012178	0.8217	0.0160	0.8377	17.102	30.824	47.926	0.0607	0.1119	0.1726	71.44	0.2534	1.9380	17
18	0.012989	0.8245	0.0172	0.8417	18.108	32.900	51.008	0.0642	0.1190	0.1832	75.63	0.2678	2.0643	18
19	0.013848	0.8274	0.0184	0.8457	19.114	35.101	54.216	0.0677	0.1266	0.1942	79.81	0.2821	2.1979	19
20	0.014758	0.8302	0.0196	0.8498	20.121	37.434	57.555	0.0711	0.1346	0.2057	84.00	0.2965	2.3389	20
21	0.015721	0.8330	0.0210	0.8540	21.127	39.908	61.035	0.0745	0.1430	0.2175	88.18	0.3107	2.4878	21
22	0.016741	0.8359	0.0224	0.8583	22.133	42.527	64.660	0.0779	0.1519	0.2298	92.36	0.3249	2.6448	22
23	0.017821	0.8387	0.0240	0.8627	23.140	45.301	68.440	0.0813	0.1613	0.2426	96.55	0.3390	2.8105	23
24	0.018963	0.8416	0.0256	0.8671	24.146	48.239	72.385	0.0847	0.1712	0.2559	100.73	0.3531	2.9852	24
25	0.020170	0.8444	0.0273	0.8717	25.153	51.347	76.500	0.0881	0.1817	0.2698	104.91	0.3672	3.1693	25
26	0.021448	0.8472	0.0291	0.8764	26.159	54.638	80.798	0.0915	0.1927	0.2842	109.09	0.3812	3.3633	26
27	0.022798	0.8501	0.0311	0.8811	27.165	58.120	85.285	0.0948	0.2044	0.2992	113.27	0.3951	3.5674	27
28	0.024226	0.8529	0.0331	0.8860	28.172	61.804	89.976	0.0982	0.2166	0.3148	117.45	0.4090	3.7823	28
29	0.025735	0.8558	0.0353	0.8910	29.179	65.699	94.878	0.1015	0.2296	0.3311	121.63	0.4229	4.0084	29
30	0.027329	0.8586	0.0376	0.8962	30.185	69.820	100.006	0.1048	0.2432	0.3481	125.81	0.4367	4.2462	30
31	0.029014	0.8614	0.0400	0.9015	31.192	74.177	105.369	0.1082	0.2576	0.3658	129.99	0.4505	4.4961	31
32	0.030793	0.8643	0.0426	0.9069	32.198	78.780	110.979	0.1115	0.2728	0.3842	134.17	0.4642	4.7586	32
33	0.032674	0.8671	0.0454	0.9125	33.205	83.652	116.857	0.1148	0.2887	0.4035	138.35	0.4779	5.0345	33
34	0.034660	0.8700	0.0483	0.9183	34.212	88.799	123.011	0.1180	0.3056	0.4236	142.53	0.4915	5.3242	34
35	0.036756	0.8728	0.0514	0.9242	35.219	94.236	129.455	0.1213	0.3233	0.4446	146.71	0.5051	5.6280	35
36	0.038971	0.8756	0.0546	0.9303	36.226	99.983	136.209	0.1246	0.3420	0.4666	150.89	0.5186	5.9468	36
37	0.041309	0.8785	0.0581	0.9366	37.233	106.058	143.290	0.1278	0.3617	0.4895	155.07	0.5321	6.2812	37
38	0.043778	0.8813	0.0618	0.9431	38.239	112.474	150.713	0.1311	0.3824	0.5135	159.25	0.5456	6.6315	38
39	0.046386	0.8842	0.0657	0.9498	39.246	119.258	158.504	0.1343	0.4043	0.5386	163.43	0.5590	6.9988	39
40	0.049141	0.8870	0.0698	0.9568	40.253	126.430	166.683	0.1375	0.4273	0.5649	167.61	0.5724	7.3838	40
41	0.052049	0.8898	0.0741	0.9640	41.261	134.005	175.265	0.1407	0.4516	0.5923	171.79	0.5857	7.7866	41
42	0.055119	0.8927	0.0788	0.9714	42.268	142.007	184.275	0.1439	0.4771	0.6211	175.97	0.5990	8.2081	42
43	0.058365	0.8955	0.0837	0.9792	43.275	150.475	193.749	0.1471	0.5041	0.6512	180.15	0.6122	8.6495	43
44	0.061791	0.8983	0.0888	0.9872	44.282	159.417	203.699	0.1503	0.5325	0.6828	184.33	0.6254	9.1110	44
45	0.065411	0.9012	0.0943	0.9955	45.289	168.874	214.164	0.1535	0.5624	0.7159	188.51	0.6386	9.5935	45
46	0.069239	0.9040	0.1002	1.0042	46.296	178.882	225.179	0.1566	0.5940	0.7507	192.69	0.6517	10.0982	46
47	0.073282	0.9069	0.1063	1.0132	47.304	189.455	236.759	0.1598	0.6273	0.7871	196.88	0.6648	10.6250	47
48	0.077556	0.9097	0.1129	1.0226	48.311	200.644	248.955	0.1629	0.6624	0.8253	201.06	0.6778	11.1754	48
49	0.082077	0.9125	0.1198	1.0323	49.319	212.485	261.803	0.1661	0.6994	0.8655	205.24	0.6908	11.7502	49
50	0.086858	0.9154	0.1272	1.0425	50.326	225.019	275.345	0.1692	0.7385	0.9077	209.42	0.7038	12.3503	50
51	0.091918	0.9182	0.1350	1.0532	51.334	238.290	289.624	0.1723	0.7798	0.9521	213.60	0.7167	12.9764	51
52	0.097272	0.9211	0.1433	1.0643	52.341	252.340	304.682	0.1754	0.8234	0.9988	217.78	0.7296	13.6293	52
53	0.102948	0.9239	0.1521	1.0760	53.349	267.247	320.596	0.1785	0.8695	1.0480	221.97	0.7424	14.3108	53
54	0.108954	0.9267	0.1614	1.0882	54.357	283.031	337.388	0.1816	0.9182	1.0998	226.15	0.7552	15.0205	54
55	0.115321	0.9296	0.1713	1.1009	55.365	299.772	355.137	0.1847	0.9698	1.1544	230.33	0.7680	15.7601	55
56	0.122077	0.9324	0.1819	1.1143	56.373	317.549	373.922	0.1877	1.0243	1.2120	234.52	0.7807	16.5311	56
57	0.129243	0.9353	0.1932	1.1284	57.381	336.417	393.798	0.1908	1.0820	1.2728	238.70	0.7934	17.3337	57
58	0.136851	0.9381	0.2051	1.1432	58.389	356.461	414.850	0.1938	1.1432	1.3370	242.88	0.8061	18.1691	58
59	0.144942	0.9409	0.2179	1.1588	59.397	377.788	437.185	0.1969	1.2081	1.4050	247.07	0.8187	19.0393	59
60	0.15354	0.9438	0.2315	1.1752	60.405	400.458	460.863	0.1999	1.2769	1.4768	251.25	0.8313	19.9439	60
61	0.16269	0.9466	0.2460	1.1926	61.413	424.624	486.036	0.2029	1.3500	1.5530	255.44	0.8438	20.8858	61
62	0.17244	0.9494	0.2614	1.2109	62.421	450.377	512.798	0.2059	1.4278	1.6337	259.62	0.8563	21.8651	62
63	0.18284	0.9523	0.2780	1.2303	63.429	477.837	541.266	0.2089	1.5104	1.7194	263.81	0.8688	22.8826	63
64	0.19393	0.9551	0.2957	1.2508	64.438	507.177	571.615	0.2119	1.5985	1.8105	268.00	0.8812	23.9405	64
6														

EK- 10. Doymuş su buharının termodinamik özellikleri

Doymuş su buharının termodinamik özellikleri.

$t, ^\circ\text{C}$	Mutlak Baskıç p kPa	Özgül hacir, m^3/kg			Entalpi, kJ/kg			Entropi, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$			$^\circ\text{C}$
		Doymuş Sıvı v_f/v_f	Buharlaşma v_g/v_g	Doymuş Buhar v_g	Doymuş Sıvı h_f/h_f	Buharlaşma h_{fg}/h_{fg}	Doymuş Buhar h_g	Doymuş Sıvı s_f/s_f	Buharlaşma s_{fg}/s_{fg}	Doymuş Buhar s_g	
0	0.6112	0.001000	206.141	206.143	-0.04	2500.81	2500.77	-0.0002	9.1555	9.1553	0
1	0.6571	0.001000	192.455	192.456	4.18	2498.43	2502.61	0.0153	9.1134	9.1286	1
2	0.7060	0.001000	179.769	179.770	8.39	2496.05	2504.45	0.0306	9.0716	9.1022	2
3	0.7580	0.001000	168.026	168.027	12.60	2493.68	2506.28	0.0459	9.0302	9.0761	3
4	0.8135	0.001000	157.137	157.138	16.81	2491.31	2508.12	0.0611	8.9890	9.0501	4
5	0.8725	0.001000	147.032	147.033	21.02	2488.94	2509.96	0.0763	8.9482	9.0244	5
6	0.9353	0.001000	137.653	137.654	25.22	2486.57	2511.79	0.0913	8.9077	8.9990	6
7	1.0020	0.001000	128.947	128.948	29.42	2484.20	2513.62	0.1064	8.8674	8.9738	7
8	1.0728	0.001000	120.850	120.851	33.62	2481.84	2515.46	0.1213	8.8273	8.9488	8
9	1.1481	0.001000	113.326	113.327	37.82	2479.47	2517.29	0.1362	8.7878	8.9245	9
10	1.2280	0.001000	106.328	106.329	42.01	2477.11	2519.12	0.1511	8.7484	8.8995	10
11	1.3127	0.001000	99.812	99.813	46.21	2474.74	2520.95	0.1659	8.7093	8.8752	11
12	1.4026	0.001001	93.743	93.744	50.40	2472.38	2522.78	0.1806	8.6705	8.8511	12
13	1.4978	0.001001	88.088	88.089	54.59	2470.02	2524.61	0.1953	8.6319	8.8272	13
14	1.4987	0.001001	82.815	82.816	58.78	2467.66	2526.44	0.2099	8.5936	8.8035	14
15	1.7055	0.001001	77.897	77.898	62.97	2465.30	2528.26	0.2244	8.5556	8.7801	15
16	1.8184	0.001001	73.307	73.308	67.16	2462.93	2530.09	0.2389	8.5178	8.7568	16
17	1.9380	0.001001	69.021	69.022	71.34	2460.57	2531.92	0.2534	8.4804	8.7338	17
18	2.0643	0.001002	65.017	65.018	75.53	2458.21	2533.74	0.2678	8.4431	8.7109	18
19	2.1978	0.001002	61.274	61.273	79.72	2455.85	2535.56	0.2821	8.4061	8.6883	19
20	2.3388	0.001002	57.774	57.773	83.90	2453.48	2537.38	0.2964	8.3694	8.6658	20
21	2.4877	0.001002	54.450	54.450	88.08	2451.12	2539.20	0.3107	8.3329	8.6436	21
22	2.6448	0.001002	51.433	51.434	92.27	2448.75	2541.02	0.3249	8.2967	8.6215	22
23	2.8104	0.001003	48.562	48.563	96.45	2446.39	2542.84	0.3390	8.2607	8.5996	23
24	2.9851	0.001003	45.872	45.873	100.63	2444.02	2544.65	0.3531	8.2249	8.5780	24
25	3.1692	0.001003	43.350	43.351	104.81	2441.66	2546.47	0.3672	8.1894	8.5565	25
26	3.3631	0.001003	40.985	40.986	108.99	2439.29	2548.28	0.3812	8.1541	8.5352	26
27	3.5673	0.001004	38.766	38.767	113.18	2436.92	2550.09	0.3951	8.1190	8.5141	27
28	3.7822	0.001004	36.682	36.683	117.36	2434.55	2551.90	0.4090	8.0842	8.4932	28
29	4.0083	0.001004	34.726	34.727	121.54	2432.17	2553.71	0.4229	8.0496	8.4724	29
30	4.2460	0.001004	32.889	32.889	125.72	2429.80	2555.52	0.4367	8.0152	8.4519	30
31	4.4959	0.001005	31.160	31.161	129.90	2427.43	2557.32	0.4505	7.9810	8.4315	31
32	4.7585	0.001005	29.535	29.536	134.08	2425.05	2559.13	0.4642	7.9471	8.4112	32
33	5.0343	0.001005	28.006	28.007	138.26	2422.67	2560.93	0.4779	7.9133	8.3912	33
34	5.3239	0.001006	26.567	26.568	142.44	2420.29	2562.73	0.4915	7.8790	8.3713	34
35	5.6278	0.001006	25.212	25.213	146.62	2417.91	2564.53	0.5051	7.8465	8.3516	35
36	5.9466	0.001006	23.935	23.936	150.80	2415.53	2566.33	0.5186	7.8134	8.3320	36
37	6.2810	0.001007	22.733	22.734	154.98	2413.14	2568.12	0.5321	7.7805	8.3127	37
38	6.6315	0.001007	21.599	21.600	159.16	2410.76	2569.91	0.5456	7.7479	8.2934	38
39	6.9987	0.001008	20.529	20.530	163.34	2408.37	2571.71	0.5590	7.7154	8.2744	39
40	7.3835	0.001008	19.520	19.521	167.52	2405.98	2573.50	0.5724	7.6831	8.2555	40
41	7.7863	0.001008	18.567	18.568	171.70	2403.58	2575.28	0.5857	7.6510	8.2367	41
42	8.2080	0.001009	17.667	17.668	175.88	2401.19	2577.07	0.5990	7.6191	8.2181	42
43	8.6492	0.001009	16.818	16.819	180.06	2398.79	2578.85	0.6122	7.5875	8.1997	43
44	9.1107	0.001010	16.014	16.015	184.24	2396.39	2580.63	0.6254	7.5560	8.1814	44
45	9.4932	0.001010	15.255	15.256	188.42	2393.99	2582.41	0.6386	7.5247	8.1632	45
46	10.0976	0.001010	14.537	14.538	192.60	2391.59	2584.19	0.6517	7.4936	8.1452	46
47	10.6246	0.001011	13.858	13.859	196.78	2389.18	2585.96	0.6648	7.4626	8.1274	47
48	11.1751	0.001011	13.214	13.215	200.97	2386.77	2587.74	0.6778	7.4319	8.1097	48
49	11.7500	0.001012	12.606	12.607	205.15	2384.36	2589.51	0.6908	7.4013	8.0921	49
50	12.3499	0.001012	12.029	12.029	209.33	2381.94	2591.27	0.7038	7.3709	8.0747	50
51	12.9759	0.001013	11.483	11.483	213.51	2379.53	2593.04	0.7167	7.3407	8.0574	51
52	13.6290	0.001013	10.964	10.965	217.70	2377.10	2594.80	0.7296	7.3107	8.0403	52
53	14.3100	0.001014	10.473	10.474	221.88	2374.68	2596.56	0.7424	7.2809	8.0233	53
54	15.0200	0.001014	10.001	10.008	226.06	2372.26	2598.32	0.7552	7.2512	8.0064	54
55	15.7597	0.001015	9.563	9.563	230.25	2369.83	2600.07	0.7680	7.2217	7.9897	55
56	16.5304	0.001015	9.147	9.148	234.43	2367.39	2601.82	0.7807	7.1924	7.9731	56
57	17.3331	0.001016	8.744	8.748	238.61	2364.96	2603.57	0.7934	7.1632	7.9566	57
58	18.1690	0.001016	8.360	8.370	242.80	2362.52	2605.32	0.8061	7.1342	7.9403	58
59	19.0387	0.001017	8.0094	8.014	246.99	2360.08	2607.06	0.8187	7.1054	7.9240	59
60	19.9444	1.001017	7.6677	7.6697	251.17	2357.63	2608.80	0.8313	7.0767	7.9079	60
61	20.885	0.001018	7.3428	7.3438	255.36	2355.19	2610.54	0.8438	7.0482	7.8920	61
62	21.864	0.001018	7.0337	7.0347	259.54	2352.73	2612.28	0.8563	7.0198	7.8761	62
63	22.882	0.001019	6.7397	6.7407	263.73	2350.28	2614.01	0.8688	6.9916	7.8604	63
64	23.940	0.001019	6.4599	6.4609	267.92	2347.82	2615.74	0.8812	6.9636	7.8448	64
65	25.040	0.001020	6.1935	6.1946	272.11	2345.36	2617.46	0.8936	6.9357	7.8293	65
66	26.180	0.001020	5.9397	5.9409	276.30	2342.89	2619.19	0.9060	6.9080	7.8140	66
67	27.366	0.001021	5.6982	5.6992	280.49	2340.42	2620.90	0.9183	6.8804	7.7987	67
68	28.596	0.001022	5.4680	5.4690	284.68	2337.95	2622.62	0.9306	6.8530	7.7836	68
69	29.873	0.001022	5.2485	5.2495	288.87	2335.47	2624.33	0.9429	6.8257	7.7686	69
70	31.198	0.001023	5.0392	5.0402	293.06	2332.99	2626.04	0.9551	6.7986	7.7537	70
71	32.572	0.001023	4.8396	4.8407	297.25	2330.50	2627.75	0.9673	6.7716	7.7389	71
72	33.997	0.001024	4.6492	4.6502	301.44	2328.01	2629.45	0.9795	6.7448	7.7242	72
73	35.475	0.001025	4.4675	4.4685	305.63	2325.51	2631.15	0.9916	6.7181	7.7097	73
74	37.006	0.001026	4.2940	4.2951	309.83	2323.02	2632.84	1.0037	6.6915	7.6952	74
75	38.592	0.001026	4.1284	4.1294	314.02	2320.51	2634.53	1.0157	6.6651	7.6809	75
76	40.236	0.001027	3.9702	3.9712	318.22	2318.01	2636.22	1.0278	6.6389	7.6666	76
77	41.938	0.001027	3.8191	3.8201	322.41	2315.49	2637.90	1.0398	6.6127	7.6525	77
78	43.700	0.001028	3.6746	3.6756	326.61	2312.98	2639.58	1.0517	6.5867	7.6384	78
79	45.524	0.001028	3.5365	3.5375	330.81	2310.46	2641.26	1.0636	6.5609	7.6243	79
80	47.412	0.002029	3.4044	3.4055	335.00	2307.93	2642.93	1.0755	6.5351	7.6107	80

EK- 11. Psikrometrik diyagram



EK- 12. Isı pompalı kurutucu ve beton üzeri bez sergi için üzüm hasat ve ön işlemler ile ilgili resimler



EK- 13. Deneylerde kurutulan üzümlerin nem testleri ile ilgili resimler



EK- 14. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları ile ilgili resimler



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ABUŞKA, Mesut
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.04.1978, Elazığ
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 453 36 63
 E-mail : mesut_abuska@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Marmara Üniv. /Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı	2002
Lisans	Gazi Üniv./ Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü	1999
Lise	Org. Kenan Evren Endüstri Meslek Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999-2005	Ümraniye E.M.L., İstanbul Ümraniye	Öğretmen
2005-	Kenan Evren E.M.L., Manisa Alaşehir	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Abuşka, M., Binark, A., K., “Jeotermal Enerjili Üzüm Kurutma Sistem Tasarımı”, 3. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 7 (2):156-160, 18-20 Ağustos 2003.