

**ISI POMPALI KURUTUCU İLE BAYAT EKMEĞİN GERİ DÖNÜŞÜM
TEKNİKLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ**

Burak AKTEKELİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2014
ANKARA**

Burak AKTEKELİ tarafından hazırlanan ISI POMPALI KURUTUCU İLE BAYAT EKMEĞİN GERİ DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hikmet DOĞAN

.....

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ

.....

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Kamil SAÇILIK

.....

Tarım Makinaları Bölümü, Ankara Üniversitesi

Tez Savunma Tarih: 13/02/2014

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Burak AKTEKELİ

ISI POMPALI KURUTUCU İLE BAYAT EKMEĞİN GERİ DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİNİN DENEYSEL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak AKTEKELİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2014

ÖZET

Bu çalışmada, ısı pompalı üç farklı modda (sistem 1, sistem 2 ve sistem 3) ısı pompalı kurutucu tasarlanmış, imal edilmiş ve bayat ekmek dilimleri farklı şartlarda kurutulmuştur. Kurutma işlemi için gerekli olan enerji ısı pompasından sağlanmıştır. Bayat ekmekler 15 mm kalınlığında dilimlenerek kuru baza göre $0,55 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru}} \text{ madde}$ başlangıç nem miktarından $0,09 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru}} \text{ madde}$ son nem miktarına kadar ortalama 2,9 saatte kurutulmuştur. Bayat ekmek dilimleri 45°C - 50°C üfleme havası sıcaklığında ve değişken hava hızlarında ($0,2 \text{ m/s}$ - $0,9 \text{ m/s}$) kurutulmuştur. Kurutma havası sıcaklığı, kurutma havasının hacimsel debisinin değiştirilmesi ile kontrol edilmiştir. İstenilen kurutma havası sıcaklığı oransal-integral-türevsel (PID) kontrol kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı ısı pompasının kompresörünün kontrol edilmesiyle sağlanmıştır. $45\text{-}50^\circ\text{C}$ kurutma havası sıcaklığı (KHS) ve $40\text{-}45^\circ\text{C}$ kurutulan ürün yüzey sıcaklığı (KÜYS) set değerlerinde altı deney yapılmıştır.

Tüm sistem performans katsayısı (COP_{ws}); sistem 1 (40°C KÜYS - 45°C KHS) olduğu zaman 2,84, (45°C KÜYS - 50°C KHS) olduğu zaman 2,96; sistem 2 (40°C KÜYS - 45°C KHS) olduğu zaman 4,28, (45°C KÜYS - 50°C KHS) olduğu zaman 5,28 ve sistem 3 (40°C KÜYS - 45°C KHS) olduğu zaman 4,64, (45°C KÜYS - 50°C KHS) olduğu zaman 4,74 olarak hesaplanmıştır. Ekmek,

Türkiye’de olduğu gibi dünyanın her yerinde temel gıda maddesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye’de çok fazla ekmek israf edildiği için bu çalışmanın temelini ekmek israfının önlenmesi oluşturmaktadır.

Kurutma sisteminde enerji ve psikrometrik analiz deneysel sonuçlara göre yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre sistem 2 diğer sistemlere göre daha iyi performans göstermiştir. Sistem 2 için, atık hava ısı pompası buharlaştırıcısının ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, ısı pompası sistemlerinde kurutma egzost havası ısının kullanılmasının uygun ve etkili yöntem olduğu görülmüştür. Kurutma sonrası bayat ekmeklerin su aktivitesi değerleri (a_w) 0,395, 0,388, 0,366, 0,356, 0,368 ve 0,346 olarak ölçülmüştür. Bu nedenle, kurutulmuş ürün depolamaya hazır hale getirilmiştir.

Bilim Kodu : 708

Anahtar Kelime : Kurutma, ısı pompası, enerji, bayat ekmek, kurutucu

Sayfa Adedi : 102

Tez yöneticisi : Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RECYCLING TECHNIQUES OF STALE BREAD WITH HEAT PUMP DRYER

(M. Sc. Thesis)

Burak AKTEKELİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2014

ABSTRACT

In this study, three different modes (system 1, system 2 and system 3) heat pump dryers have been designed, manufactured and stale bread slices have been dried at the different conditions. The energy required for drying was provided from the heat pump. Stale breads sliced into 15 mm thickness were dried from initial dry basis moisture content $0,55 \text{ g}_{\text{water}} / \text{g}_{\text{dry matter}}$ to final moisture content at $0,09 \text{ g}_{\text{water}} / \text{g}_{\text{dry matter}}$. average 2,9 hours. Stale bread slices have been dried at $45^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ drying air temperature and variable air velocities $0,2 \text{ m/s} - 0,9 \text{ m/s}$. Drying air temperature was controlled by changing volumetric flowrate of the drying air. Desired drying air temperature was obtained by using Proportional-Integral-Derivation (PID) controller. Also dried product surface temperature was controlled by controlling of compressor of heat pump. Six experiments were done at $45\text{-}50^{\circ}\text{C}$ drying air temperature (DAT) and $40\text{-}45$ dried product surface temperature (DPST) set values.

The coefficient of performances of whole system (COP_{ws}) were calculated as system 1 (40°C DPST- 45°C DAT) 2,84, (45°C DPST - 50°C DAT) 2,96, system 2 (40°C DPST - 45°C DAT) 4,28, (45°C DPST - 50°C DAT) 5,28, system 3 (40°C DPST - 45°C DAT) 4,64, (45°C DPST - 50°C DAT) 4,74. Bread as in Turkey from all over the world are used as basic foodstuffs. Because bread is wasted too much in Turkey, this study focuses on prevention of bread waste.

Drying system energy and psychometric analysis have been done according to experimental results. System 2 showed better performance than other systems according to experiment results. For system 2, heat of exhaust air was used as heat source of evaporator of heat pump. In this study, it is seen that heat pump systems with usage of heat of exhaust drying air are suitable and efficient applications. After drying water activity (a_w) values of stale breads have been measured as 0,395, 0,388, 0,366, 0,356, 0,368 and 0,346. Thus, the dried product is prepared for storage.

Science Code : 708
Keywords : Drying, heat pump, energy, stale bread, dryer
Page Number : 102
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunda bana yardımcı olan ve tezimin her aşamasında desteğini benden esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ'a tez süresi boyunca yardımlarını esirgemeyen GRUP MAVİ DÜŞ ailesine, teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Akademik kariyer çalışmalarımda, benden her türlü maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen annem Zeliha AKTEKELİ'ye, babam M. Fatih AKTEKELİ'ye, abim Zülfikar AKTEKELİ'ye kıymetli arkadaşım Sibel KOMAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
3. EKMEK VE ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1. Ekmekteki Nem Miktarı.....	17
3.2. Bayat Ekmeği Kurutarak Değerlendirme Yolları.....	17
4. KURUTMA VE KURUTMA TEORİSİ.....	19
4.1. Kurutma.....	19
4.1.1. Kurutmanın iç ve dış şartları.....	21
4.1.2. Kurutma sistemi seçimi.....	21
4.2. Kurutma Yöntemleri.....	25
4.2.1. İletim ile kurutma.....	25
4.2.2. Kızılötesi ışınlı kurutma.....	26
4.2.3. Taşınım ile kurutma.....	26
4.2.4. Sprey kurutucular.....	27
4.2.5. Dondurarak kurutma.....	27

Sayfa

4.2.6. Akışkan yataklı kurutm.....	28
4.2.7. Alevli (flaş) kurutma.....	29
4.3. Kurutucu Seçimi.....	29
5. ISI POMPASI SİSTEMİ.....	32
5.1. Isı Pompası.....	32
5.1.1. Isı pompası sistemlerinin tarihçesi.....	32
5.1.2. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi.....	33
5.1.3. Isı pompası sistemi.....	40
5.1.4. Isı pompalarının sınıflandırılması.....	42
5.1.5. Isı pompalarında verimi etkileyen faktörler.....	46
5.2. Isı Pompası Sisteminin Otomatik Kontrolü.....	47
5.2.1. Otomatik kontrol sistemi.....	47
5.2.2. Oransal kontrol (P kontrol).....	47
5.2.3. Oransal-integral kontrol (PI kontrol).....	48
5.2.4. Oransal-türevsel kontrol (PD kontrol).....	49
5.2.5. Oransal-integral-türevsel kontrol (PID kontrol).....	49
6. TEORİK ANALİZ.....	51
6.1. Kuru Ağırlığın Belirlenmesi.....	51
6.1.1. Isıtma tesir katsayısı.....	52
6.1.2. Özgül nem çekme oranı.....	54
6.1.3. Hata analizi.....	55
6.1.4. Su aktivitesi.....	56
7. DENEY SETİ VE KURULUMU.....	57

	Sayfa
7.1. Deney Setinin Hazırlanması.....	57
8. DENEYLERİN YAPILIŞI.....	66
8.1. Kuru Ağırlığın Belirlenmesi.....	66
8.2. Bayat Ekmeğin Kurutulması.....	67
8.3. Kurutma İşleminin Sonlandırılması.....	69
9. DENEY SONUÇLARI.....	72
10. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
KAYNAKLAR.....	93
EKLER.....	98
Ek-1 Sistemle İlgili Fotoğraflar.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Bazı ürünlerin kurutma sıcaklıkları ve kurutma süreleri.....	23
Çizelge 4.2. Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerjiler.....	24
Çizelge 7.1. Sistem ekipmanlarının çalışma şekli.....	59
Çizelge 7.2. Isı pompası destekli ve PID ve aç-kapa kontrollü kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri.....	63
Çizelge 8.1. Deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri.....	68
Çizelge 9.1. Deney sonuçları.....	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Isı pompası destekli mikrodalga kurutma makinesi.....	10
Şekil 2.2. Isı pompası destekli PID kontrollü kurutma sistemi.....	11
Şekil 2.3. Kapalı bir hacimde ekmek kurutulması.....	12
Şekil 2.4. Isı pompası destekli PLC kontrollü kurutma fırını.....	13
Şekil 2.5. Isı pompalı, güneş enerjisi destekli kurutma fırını.....	14
Şekil 3.1. Taze ekmek.....	15
Şekil 3.2. Bayat ekmek.....	16
Şekil 3.3. Bayat ekmek toplama kutusu.....	16
Şekil 3.4. Ekmekteki nem içeriği değişimi.....	17
Şekil 3.5. Galeta unu.....	18
Şekil 3.6. Tirit yemeği.....	18
Şekil 4.1. İletimle kurutma sistemi.....	26
Şekil 4.2. Süt tozu üretim sistemi.....	27
Şekil 4.3. Dondurarak kurutma sistem şeması.....	28
Şekil 4.4. Akışkan yataklı kurutucu.....	29
Şekil 4.5. Kurutucu seçimi için işlem adımları.....	30
Şekil 5.1. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi.....	34
Şekil 5.2. Isı pompası sisteminin P-h diyagramı.....	36
Şekil 5.3. Isı pompası sisteminin T-s diyagramı.....	36
Şekil 5.4. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin farklı basınç ve sıcaklık bölgeleri.....	37
Şekil 5.5. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin ana kısımları.....	38

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Isı pompası prensip şeması.....	41
Şekil 5.7. Toprak kaynaklı ısı pompası sistem şeması.....	45
Şekil 5.8. Oransal kontrolün offset değeri.....	48
Şekil 5.9. Offset'i olmayan oransal-integral kontrol.....	49
Şekil 7.1. Isı pompalı kurutma fırını sistem 1.....	60
Şekil 7.2. Isı pompalı kurutma fırını sistem 2.....	61
Şekil 7.3. Isı pompalı kurutma fırını sistem 3.....	62
Şekil 7.4. Kurutma havası ve soğutucu akışkan akışının, PID ve aç-kapa kontrol sistem şeması.....	64
Şekil 8.1. Elektronik dijital elektrik sayacı.....	69
Şekil 8.2. Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazı.....	69
Şekil 8.3. Su aktivitesi ölçüm cihazı.....	70
Şekil 8.4. Bayat ekmeklere ait kurutma öncesi ve kurutma sonrası resimler.....	71
Şekil 9.1. Nem miktarının kurutma süresine göre değişimi.....	72
Şekil 9.2. Sistemlerin ayrı ayrı nem miktarlarının kurutma süresine göre değişimi.....	73
Şekil 9.3. Kurutma süresine göre ayrılabilir nem oranı değerleri.....	74
Şekil 9.4. Kurutma süresine göre ayrılabilir nem oranının ayrı ayrı gösterim.....	75
Şekil 9.5. Bayat ekmeklerin kurutma süresine göre kurutma hızı değerleri.....	77
Şekil 9.6. Kurutma süresine göre kurutma hızının ayrı ayrı gösterimi.....	78
Şekil 9.7. Bayat ekmeklerin kütlesinin zamana göre değişimi.....	79
Şekil 9.8. Sistemlerin her birindeki bayat ekmeklerin kütlesinin zamana göre değişimi.....	80
Şekil 9.9. Yapılan deneylerde zamana göre enerji tüketim değerleri.....	81

Şekil	Sayfa
Şekil 9.10. Yapılan deneylerde zamana bağlı anlık tüketilen enerji miktarları.....	82
Şekil 9.11. Yapılan deneylerin ayrı ayrı enerji tüketim değerleri.....	83
Şekil 9.12. Sistemelerin taslak psikrometrik analizi.....	84
Şekil 9.13. Üç sistemin çevrim analizi.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a_w	Su aktivitesi değeri
c	Havanın özgül ısısı (kJ/kg °C)
dt	Süre (dakika)
f	Frekans (Hz)
f	Fugasite
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
$\dot{m}_d$	Kuruma oranı (kg/h)
n	Devir sayısı (devir/dakika)
p	Buhar basıncı (N/m ²)
R	Ölçülmesi gereken büyüklük
T	Sıcaklık (°C)
T_E	Evaporatör sıcaklığı (°C)
T_K	Kondenser sıcaklığı (°C)
T_k	Karışım havası sıcaklığı (°C)
t	Zaman (s)
T_d	Dış hava sıcaklığı (°C)
T_k	Kurutma fırınının işletme sıcaklığı (°C)
$T_{iç}$	Kurutma odası iç hava sıcaklığı (°C)
$\dot{V}$	Hacimsel debi (m ³ /h)
$\% \dot{V}$	$\dot{V}$ havasının karışım içindeki % oranı
$\dot{Q}$	Birim zamanda verilen enerji (kW)
V	Hava hızı (m/s)
$\dot{Q}$	Birim zamanda verilen enerji (kJ)

Simgeler	Açıklama
$\dot{Q}_C$	Kompresör gücü (kW)
$\dot{Q}_E$	Evaporatör kapasitesi (kW)
$\dot{Q}_K$	Kondenser gücü (kW)
$\dot{Q}_{Kon}$	Kondenserden birim zamanda kurutma havasına verilen enerji (kW)
$\dot{Q}_{Evap}$	Evaporatörden birim zamanda sisteme alınan ısı (kW)
SO_{KA}	Ürünlerdeki kuru ağırlığa göre su oranı (g su/ g kuru ağırlık)
SO_{YA}	Ürünlerdeki yaş ağırlığa göre su oranı (g su/ g yaş ağırlık)
$COP_{c,h}$	Carnot çevriminin ısıtma tesir katsayısı
$COP_{hp,h}$	Isı pompasının ısıtma tesir katsayısı
COP_{ws}	Tüm sistem ısıtma tesir katsayısı
$SMER_{ws}$	Tüm sistemin özgül nem çekme oranı (kg/kWh)
ω	Özgül nem (g su / g kuru hava)
W	Yapılan iş (kJ)
W_C	Kompresörde harcanan enerji (kJ)
W_R	Toplam hata
w	Hata oranı (%)
x	Bağımsız değişken
ΔT	Fırın işletme sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)

Kısaltmalar	Açıklama
--------------------	-----------------

aai	Çevre havası giriş
DR	Kurutma hızı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

hp	Isı pompası
h	Isıtma
MC	Nem miktarı
M_{Cs}	Son nem miktarı
M_{Ct}	“t” anındaki nem miktarı
M_{Ctb}	“t” anındaki başlangıç nem miktarı
M_{Cts}	“t” anındaki son nem miktarı
MR	Ayrılabilir nem oranı
ia	Giriş havası
PID	Oransal, İntegral, Türevsel
TMO	Toprak Mahsulleri Ofisi
TİSVA	Türkiye İsrar Önlleme Vakfı
o	Çıkış
YA	Yaş ağırlık
ws	Tüm sistem

1. GİRİŞ

Türkiye’de gıdaların kurutularak saklama yöntemi, ilk çağlardan bu günümüze kadar gelen en eski yöntemdir. Bu yöntem çoğu zaman doğada kendi kendine gerçekleşmektedir. Doğada kuruma güneş enerjisi ile gerçekleştiğinden dolayı yılın on iki ayı ve geceleri kurutma yönteminin uygulanması mümkün olmayabilir. Bu durum havanın şartlandırılması ile kurutma yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir.

Kurutma işlemi ürünler üzerindeki suyun çeşitli yöntemler kullanılarak giderilmesidir. Bununla birlikte kurutma teriminin en yaygın bilinen ifadesi, katı maddelerden ısıl yöntemlerle su veya uçucu diğer maddelerin giderilmesi işlemleri olarak tanımlanmaktadır. Kurutma işlemi ve kurutucu seçiminde gerekli temel etkenler; istenen niteliklere sahip ürünün elde edilmesinde en düşük enerji tüketimi ve olabilecek mümkün en yüksek kuruma hızına ulaşmaktır.

Isıtılmış sıcak hava ile ürün kurutma işleminde kurutma havası belli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak nem alma kapasitesi arttırılmakta, doğal veya zorlanmış olarak kurutulacak ürün üzerine belli bir hızda gönderilmektedir. Ürün ile temas eden sıcak hava ürünün bünyesinde bulunan nemi alır ve bu işlem, ürün istenilen nem içeriğine düşene kadar devam eder.

Kontrollü ortamda kurutulan ürünler açıkta güneş altında kurutulan ürünlere göre daha temizdir ve kurutma sonunda doğal renk, koku, tat ve besin maddelerinde daha az değişim olmaktadır. Böylece kontrollü kurutma ile ürün çevrenin olumsuz etkilerinden (renk bozulması, kirlilik vs.) korunmaktadır.

Kurutmadaki temel amaç gıdanın su aktivitesi değerini indirerek raf ömrünü uzatmaktır. Bu şekilde mikrobiyal büyüme ve enzim aktivitesi engellenmiş olur. Ama işlem sıcaklığı bu enzimleri inaktif etmek için yeterli değildir. Bu yüzden depolama boyunca nem içeriğindeki her artış bozulmayı hızlandıracaktır. Gıda ağırlığındaki azalma dağıtım ve depolama maliyetini düşürür. Bazı tip gıdalar için

kurutma işlemi tüketici için daha uygun ürün, gıda işleyicileri içinse daha kolay içerik hazırlama gibi katkılar sağlar. Fakat kurutma işlemi gıdanın besin değeri ve kalitesi üzerinde olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu yüzden kurutma ekipmanlarının tasarımı ve çalışma şekli bu tür olumsuzlukları en aza indirecek şekilde yapılır, ayarlanır ve gıdaya özgü şartlar uygulanır.

Ekmeğin hammaddesi olan buğday Türkiye’de yaklaşık 9,5 milyon hektar alanda ekilmekte, üretim de yıldan yıla değişmekle birlikte 20 milyon ton civarında gerçekleşmektedir. Türkiye’de bir kişinin beslenmesi için ortalama yıllık 225 kg buğday gerekli olduğu düşünülürse Türkiye için yıllık 14,5 milyon ton buğdaya ihtiyaç vardır [Süzer, 2013].

Türkiye’de 2012 yılında yapılan araştırmalara göre günlük 6 milyon, yıllık ise 2,1 milyar adet ekmek israf edilmektedir. Bu israfın parasal değeri 1,5 milyar TL’dir. Kişi başına göre hesap yapıldığı zaman küçük gibi görülen ancak ülke nüfusu temel alındığında çöpe atılan ekmeğin ülke ekonomisini uğrattığı zarar hesaplanabilir. Yıllık israf edilen 1,5 milyar TL değerindeki ekmek ile 500 km çift yol, 80 adet hastane, 150 adet okul yapılabilir. Yapılan araştırmalar ekmeğin geri dönüşümünün ya da israfın azaltılmasının ülke ekonomisine katkısının çok büyük olduğunu göstermektedir [TMO, 2013].

Türkiye, kurutulmuş gıda üretimi açısından oldukça yüksek bir potansiyele sahiptir. Aynı zamanda kurutma uygulamaları endüstride de (kereste kurutma, plastik kurutma vb.) uygulama olarak çok geniş bir çalışma sahasına sahiptir. Kurutma sistemlerinde harcanan enerji yüksek düzeylerde. Ürünler teknik metotlarla kurutulmadığından ürünlerde bazı kalite bozulmaları söz konusu olmakta bu da ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu tez çalışmasında bu sorunların önüne geçebilmek için kurutma yöntemi ile bayat ekmeğin geri dönüşüm tekniklerinin deneysel analizi yapılmıştır. Bu tez kapsamında yapılacak olan teknik kurutma yöntemi ile; kurutulan ürünün de yüksek kalitede olması hedeflenmiştir.

Günümüzde havanın çeşitli işlemler (nem alma, ısıtma, soğutma, vb.) sonunda

ürünün üzerinden geçirilerek kurutma yapılması sağlanmaktadır. Yapmış olduğumuz deneysel çalışma ile ısı pompası sisteminin en elverişli çalışma şartlarının belirlenmesi ve sistem üç modda değerlendirilip, analizleri yapılacaktır. Kurutma havası debisi, sıcaklık, bağıl nem ve ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilerek ürün bu değişimlerden etkilenmeden kurutulabilecektir.

Kurutulan bayat ekmekler; hayvan yemi yapımında, köfte harcı olarak, işlemlerden geçirilip galeta unu olarak ve ülkemizde birçok yemeğin ana maddesi olarak kullanılabilmesi, bayat ekmeğin kurutma yöntemi ile geri dönüşümün uygunluğunu göstermektedir.

Yapmış olduğumuz deneysel çalışma ile ısı pompalı kurutucunun en iyi çalışma şartlarının belirlenmesi ve kurutma odası dönüş havasının değerlendirilip, enerji verimliliğine etkisi analiz edilecektir. Bu çalışmada PID olarak kurutma havası sıcaklığı ve ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilerek ürünün bu değişimlerden etkilenmeden kurutulabilmesi hedeflenmiştir. Yapılan bu çalışma ile bayat ekmeğin kurutularak yeniden değerlendirilmesine yönelik analizler yapılarak, enerji verimli bir sistem ile ekonomik bir şekilde tekrar gıda maddesi olarak sofralara dönmesi sağlanacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde endüstriyel ürünlerin kurutulmasında büyük oranda birincil enerji kaynakları kullanılmaktadır. Bu enerji kaynaklarından hangisi kullanılırsa kullanılsın kurutma işlemlerinde karşılaşılan en büyük problemten birisi yüksek enerji maliyetleridir. Bu tez çalışmasında sistemde gerektiğinde kurutma odası çıkış havasından faydalanılarak sistemin enerji tüketiminin azaltılması ve kurutma süresinin kısaltılması planlanmıştır.

Gıda maddelerinin belirli yöntemlerle kurutulmasının birçok amacı vardır ve bunların belki de en belirgin olanı, uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma işlemi; ürünlerin uzun süreli depolanmasına, ürünün bozulmadan kalmasına, ürünün bünyesinde bulundurduğu nemden dolayı mikrobiyal gelişme veya diğer reaksiyonları sınırlamaya üründeki nemi yeterli seviyeye düşürerek sağlar. Buna ek olarak ürünün nem miktarının belirli oranların altına düşürülmesi ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin de korunması sağlanmaktadır. Kurutma işleminin diğer amacı ürünün bünyesinde bulunan nemin alınmasından dolayı ürünün hacminde azalma meydana gelecektir, bu da gıda maddesinin önemli bileşenlerinin taşınmasında ve depolanmasında kolaylık sağlar.

Gıda maddelerindeki kurutma işlemi daha çok meyve ve sebzelere uygulanmaktadır. Kuru meyvelerin anavatanı ve binlerce yıllık üretim alanı olan Türkiye’de kuru meyveler tarih boyunca ve günümüzde özellikle dış ticaret gelirlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Türkiye’de kuru meyve yetiştiriciliğinin çok eski ve üretimin fazla olmasında bu meyvelerin kolay hasat, muhafaza ve nakil edilebilir oluşlarının, ekonomik olarak uygunluğunun ve doğal olarak yetişmiş olmalarının büyük payı vardır.

Kurutma; bir madde içinde bulunan sıvının uzaklaşmasıdır. Teknik kurutmada, kurutma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem farklı yöntemlerle alınır. Bu nedenle kurutma; kurutulacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine belli bir sürede indirgenmesi olarak tanımlanır. Belli bir sürede ürünün

kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de “kurutma sistemi” denir. Kurutma işleminde kullanılan sistemler sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak kullanılmaktadır [Ceylan ve Doğan, 2004].

Gıdaların kurutulması, insanlığın doğadan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Bu yöntem doğada çoğu zaman kendi kendine gerçekteşmekte ve örneğin, çeşitli baklagiller ve tahıllar tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir. Doğada kuruma, güneş enerjisiyle gerçekteştiğinden dolayı, kurumanın her yerde ve her zaman bu yolla olması imkansızdır. Her ürünün güneşte kurutulması doğru değildir. Bu yüzden birçok ürünün farklı metotlar kullanılarak kurutulma yolları geliştirilmiştir [Cemeroğlu ve ark, 2003].

Kurutmanın uygulandığı en yaygın alanlar; gıda sanayi, tarım sektörü, kimya sanayi, silah sanayi, deri sanayi ve orman ürünleri sanayi olarak özetlenebilir. Bu alanlara kurutma işlemi uygulanarak ürünlerin kalitelerinin iyileştirilmesi yanında, nemden dolayı oluşabilecek bozulmalardan korunması, hacimlerinin ve ağırlıklarının azaltılması, taşıma, kullanım ve işlenme kolaylığı vb. avantajlar kazandırılması da eklenebilir.

Birçok uygulamada, havanın kurutma sisteminde yeniden kullanılması ısı verimi artırır. Ancak bu aşamada kurutma havasının nem içeriğinin kontrol edilmesi ve istenilen hava neminin kontrol altında tutulması için analiz edilip havanın neminin kontrol altına alınması gerekmektedir. Havanın soğurabileceği en yüksek nem miktarını; yaş termometre sıcaklığındaki doyma nemi ile sisteme sağlanan havanın çiy noktası sıcaklığındaki nemi arasındaki fark verir. Havanın gerçekte nem alma potansiyeli ısı ve kütle transferi oranlarıyla hesaplanır ve genelde en yüksek değerlerden düşüktür [Günerkan, 2005].

Literatürde kurutma ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Yılmaz ve ark (2002), çapraz akımlı sulu yıkayıcıda kurutma havasının neminin alınarak kurutma sisteminde tekrar kullanılması için, kurutma odası çıkış havasının egzost havası olarak atılmasını önlemeye yönelik geliştirilen, soğuk su pülverizasyonlu, ters yıkamalı nem alma ünitesinde kg hava başına ortalama 8 gram nem çekmişlerdir [Yılmaz ve Ceylan, 2002].

Hawlader ve Jahangeer (2006), güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sisteminin ve su ısıtıcısının performansını araştırmışlardır. Bununla ilgili bir simülasyon programı geliştirilmişlerdir. Yükün 20 kg ve kompresör hızının 1200 rpm olması durumunda özgül nem çekme oranı (SMER) 0,65 olarak hesaplamışlardır. Sistem performansını etkileyen üç parametrenin güneş radyasyonu, kompresör hızı ve kurutma odasındaki toplam yük olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, kompresör hızı arttığında SMER ve COP değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir [Hawlader ve Jahangeer, 2006].

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 işlemini gerçekleştirmiştir. Termodinamiğin I. Kanunu'ndan yararlanarak enerji analizini ve termodinamiğin II. Kanunu'ndan yararlanarak ekserji analizini yapmıştır [Akpınar, 2004].

Oktay (1997), ısı pompası destekli kurutucunun performansına etki eden etkenleri araştırmıştır. İncelemeler sonucunda by-pass hava oranı, toplam hava debisi ve egzoz debisi; sistemin performansını etkileyen anahtar parametreler olduğunu saptamıştır [Oktay, 1997].

Doğan (2003), su-toprak kaynaklı ısı pompalarını incelemiştir. Toprak kaynaklı ısı pompalarının, Türkiye'de yaygın olarak kullanılmasının enerji verimliliği açısından uygun olacağını ifade etmiştir [Doğan, 2003].

Demiray ve ark. (2008), kurutulmuş domates üretimi çoğunlukla doğal yöntemlerle yapıldığından domatesin bünyesinde bulunan antioksidan bileşikler (likopen,

karopen, aksorbik asit vb.) bakımdan kayıplar meydana geldiğini açıklamışlardır. Kontrollü kurutma şartları altında bu tür kayıpların en aza indirildiğini ifade etmişlerdir [Demiray ve Tülek, 2008].

Chua ve Chou, iki kademeli ısı pompalı kurutma sistemini deneysel olarak incelemişlerdir. Tek kademeli sisteme göre bu sistemde % 35' ten daha fazla ısı çekildiğini belirtmişlerdir. Sistemde yüksek ve düşük basınçlı dış evaporatörler kurutma havasını soğutma ve kurutma havasından nem çekme amaçlı olarak kullanmışlardır [Chua ve Chou, 2005].

Lee ve Kim, ısı pompalı kurutma sisteminde ince dilimlenmiş kırmızı turp'u kurutmuşlardır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek için sıcak havalı ısıtıcıyla da kurutma yapmışlardır. Isı pompasında özgül nem çekme oranı (SMER) 3,4 kg/kWh değerini hesaplamışlardır. Sıcak havalı kurutma sistemine göre 1-1,5 kat uzun sürmesine karşın bu sistemin enerji kazancının yaklaşık üç kat daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada ayrıca kurutma havası sıcaklığını arttırdıklarında bağıl nemin düştüğü ve MER ile SMER değerlerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışma da, ayrıca ısı pompalı kurutmanın, sıcak havalı kurutmaya nazaran % 58,9 - 69,5 arasında enerji tasarrufu sağladığını göstermişlerdir [Lee ve Kim, 2009].

Hawlader ve ark, Singapur'da yaptıkları çalışmada güneş enerjisi destekli ısı pompalı kurutma sistemini tasarlayıp testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sistemde soğutucu akışkan buharlaştırmak için dış ortam hava sıcaklığından faydalanmışlardır, ayrıca kurutma havasını ısıtmak için de havalı güneş kolektörü kullanmışlardır. Bunların dışında kurutucu girişine fazladan ısıtıcı monte edilmiştir. Isı pompası çevriminde kullanılan soğutucu akışkan R-134a gazıdır. Sistem ile ilgili olarak basınç, sıcaklık, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgar hızı değerleri ölçülmüştür. Ölçüm cihazları için hata analizi metodu kullanılmış ve hata miktarını $\pm 3,5$ bulmuşlardır. ASHRAE test standartlarına göre kollektör testleri gerçekleştirilmiş ve en yüksek verimin hava debisinin artmasıyla elde edildiği gözlemlenmiştir. Verim değerleri 0,036 kg/s ve 0,06 kg/s hava debileri için sırasıyla %69-73 ve %72-75 olarak bulmuşlardır. Soğutucu akışkanın buharlaştırıcı kolektöre daha düşük sıcaklıkta girmesinden dolayı

verimin havalı kolektör verimine göre daha iyi olduğu saptanmıştır. Bu verim değerlerini %87 ve %76 olarak belirtmişlerdir [Hawlader ve ark, 2008].

Söylemez (2006), kurutma sistemlerinde, sistemdeki kurutma odası çıkış havasındaki atık ısıyı kullanan ısı pompalı kurutucuların termo-ekonomik analizini yapmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, sistemin termo-ekonomik analizi için sistem elemanlarının ısı analizi ile birlikte basit bir ekonomik analiz yapmış ve ısı pompası için en elverişli sıcaklık değerlerini hesaplamıştır. Sistem için en elverişli kondenser çıkış hava sıcaklığı 50,13 °C, evaporatörden ayrılan hava sıcaklığı 11,90 °C ve evaporatöre giren sistem havası sıcaklığı ise 37,68 °C olarak hesaplanmış. Sistem elemanları için en elverişli çalışma şartlarında COP değeri 2,3596 olarak hesaplamıştır [Söylemez, 2006].

Queiroz ve ark, yaptıkları çalışmada elektrik ısıtıcı ve ısı pompalı olmak üzere iki farklı kurutucu kullanarak domates kurutmuşlar ve performanslarını araştırmışlardır. Kurutmanın yanısıra matematiksel modelle de çalışmalarını desteklemişlerdir. Kurutma havasını paralel ve zıt akışlı olacak şekilde kullanmışlardır. Sıcaklık, hava hızı ve domates tiplerinin etkilerini inceleyip ısı pompalı kurutucunun efektif COP değerini 2,56-2,68 arasında tespit etmişlerdir. Elektrik ısıtıcı kurutucuya göre ısı pompalı kurutucunun enerji bakımından %40 daha ekonomik olduğunu kanıtlamışlardır. Matematiksel model olarak da Page modelini kullanmışlardır. Bu modelde parametrelerin en çok kurutma sıcaklığıyla etkilendiğini belirtmişlerdir [Queiroz ve ark, 2004].

Oktay ve Hepbaşlı (2003), mekanik ısı pompalı 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 görülmüştür [Oktay ve Hepbaşlı, 2003].

Fatouh ve ark. (2006), ısı pompalı kurutucu kullanılarak maydanoz, nane ve ebegümece kurutmuşlardır. Sistemde soğutucu akışkan olarak 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 hesaplanmışlardır [Fatouh ve ark, 2006].

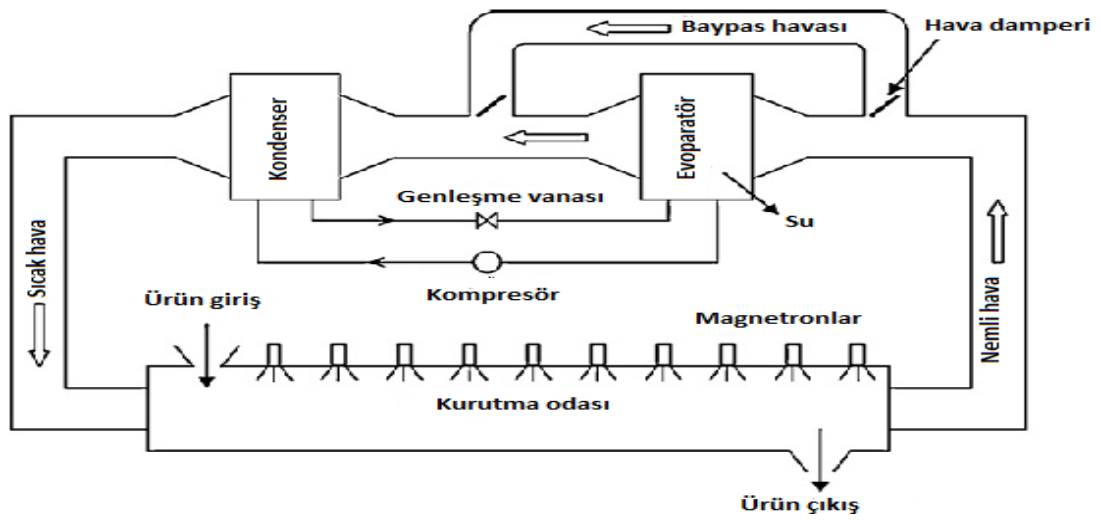
Onat ve ark. (2003), biber kurutucusu ile aflatoksinsiz TSE 2419 ve ASTA standartlarına uygun olarak kırmızı biberi kurutmak, kurutma süresini azaltmak ve sürekliliğini sağlamak için otomatik kontrol sistemi geliştirilip uygulamışlardır. Farklı geometrilerdeki numunelerin kurutma süreleri, işleme kolaylıkları ve diğer özellikleri (renk, kül miktarı, nem miktarı) karşılaştırılarak biber kurutma için en uygun geometrik yapıyı tespit etmişlerdir [Onat ve ark, 2003].

Yağcıoğlu ve ark. (1999), farklı kurutma koşullarında defne yaprağının kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Güneşte kurutma metodunda uygun olmayan hava koşulları ile karşılaşıldığında, kayıpların meydana geldiğini ve uzun kuruma süresinin uzaması gibi olumsuz durumların ortaya çıktığını görmüşlerdir. Kurutma işlemi kontrollü koşullarlarda gerçekleştiğinde geleneksel kurutma yöntemlerine göre birçok problemi ortadan kaldırdığını gözlemişlerdir. 50 °C ya da 60 °C sıcaklıkta kurutma ile defne yapraklarının temel yağ bileşim miktarları ile kalitesinde bir kayıp olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yaprakların % 10 nem içeriğine kadar kurutma zamanı, geleneksel kurutma işlemine göre 12 kez ya da 40 °C sıcaklıkta kurutma şartlarına göre 8 kez daha kısaldığını ve hiçbir kayıp olmadığını ifade etmişlerdir [Yağcıoğlu ve ark, 1999].

Toğrul ve ark. (2005b), dört farklı kalınlıkta kestikleri muz dilimlerini infrared kurutucuda 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklık değerlerinde kurutarak muz dilimlerinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Araştırmacılar sonuçta, artan kurutma havası sıcaklığı ile hem kuruma hızının hem de difüzyon katsayısının arttığını, muz dilim kalınlığının artmasıyla da kuruma hızının azaldığını tespit etmişlerdir [Toğrul ve ark, 2005b].

Jia ve ark. (1993), ısı pompası destekli mikrodalga kurutma makinesini tasarlamışlardır. Isı pompalı hibrit mikrodalga kurutma sisteminin genel performansı

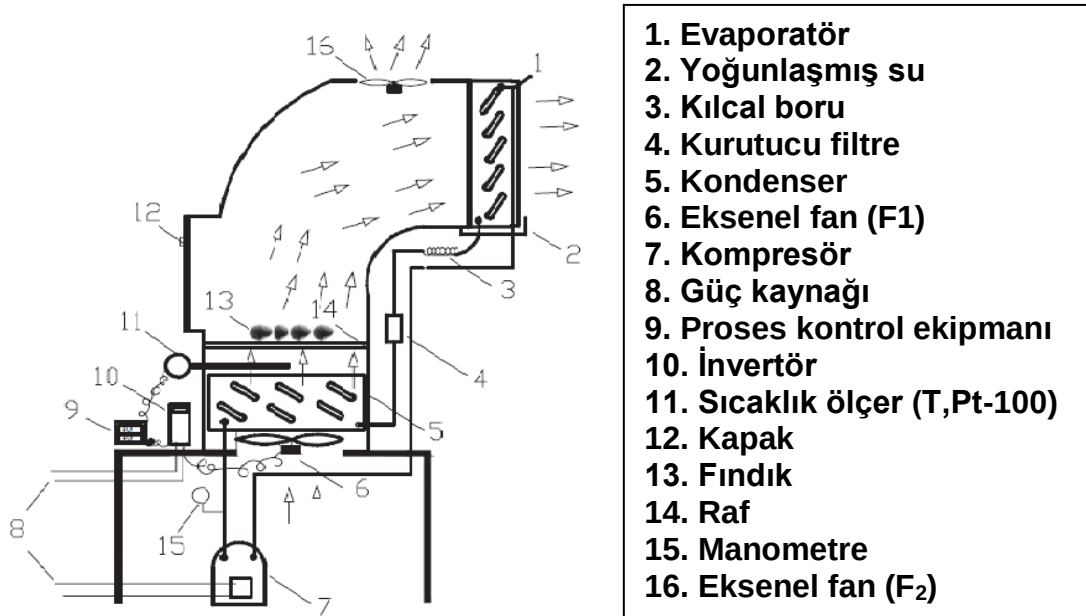
test etmişlerdir. Şekil 2.1 de gösterildiği gibi, ısı pompası kompresör gücü 5 kW ve 10 kW mikrodalga gücü olan bir prototip kurutucu imal etmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları, dikkatli bir tasarım ile ısı pompası destekli mikrodalga kurutma sisteminin enerji tüketiminde geleneksel konvektif kurutma ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.1. Isı pompası destekli mikrodalga kurutma makinesi [Jia ve ark,1993].

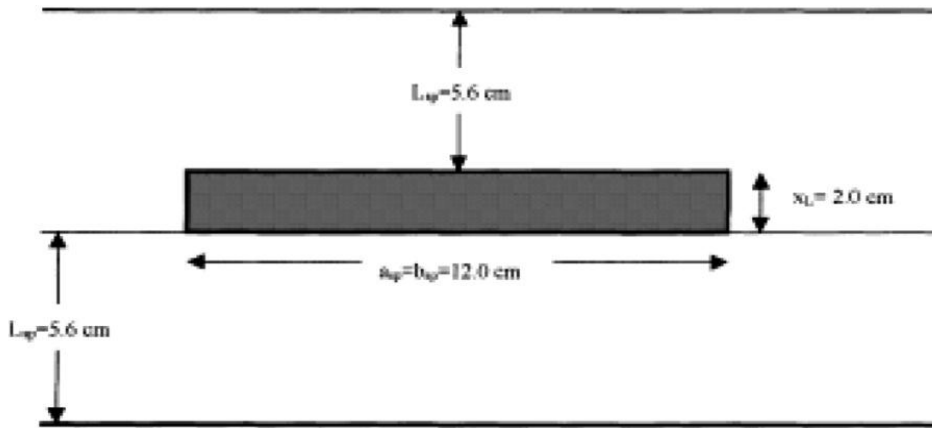
Aktaş ve ark. (2005), fındık kurutma şartlarını göz önünde bulundurarak ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesini yapmışlardır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfiyatı olurken, diğer zamanlarda kurutma işleminin devamlılığının ısı pompası yardımı ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir [Aktaş ve ark, 2005].

Ceylan (2009), Şekil 2.2 de görüldüğü üzere ısı pompalı PID kontrollü kurutma fırınına imal etmiş ve yaptığı deneylerde kivi, avokado ve muzun kuruma performanslarını değerlendirmiştir. Kurutma sistemini, ortalama 0,37 m/s hava hızı ve 40 °C kurutma havası sıcaklığında denemiştir. Kuruttuğu ürünlerin deney sonuçlarının analini yapmıştır.



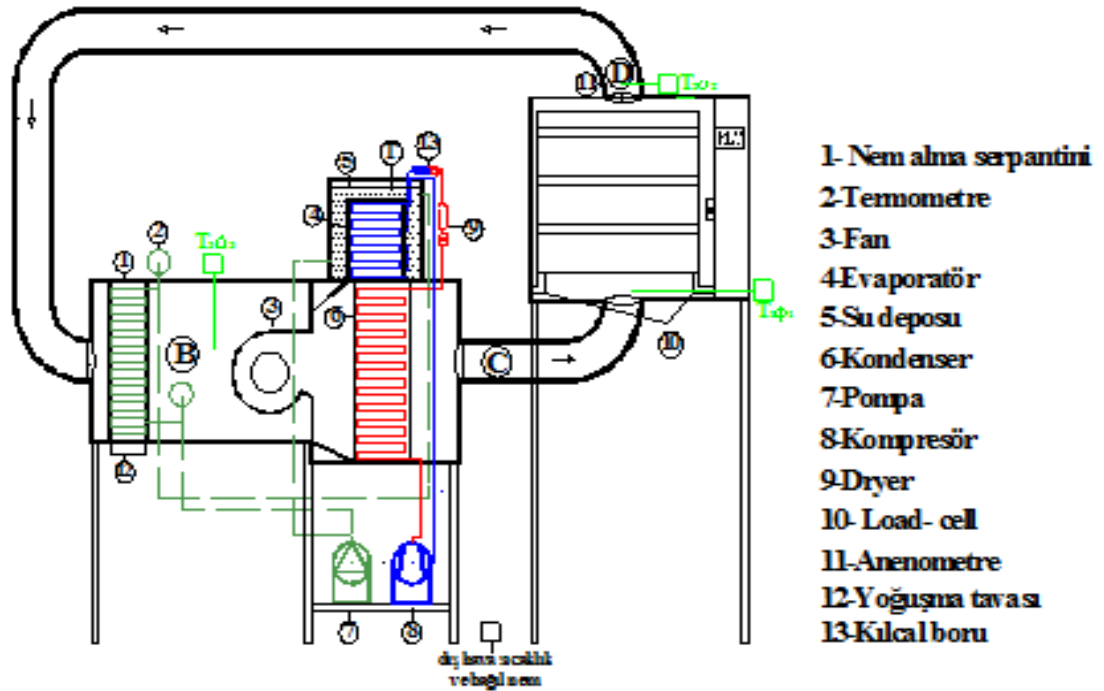
Şekil 2.2. Isı pompası destekli PID kontrollü kurutma sistemi [Ceylan ve ark., 2009].

Seyhan ve ark. (2012), Thorvaldsson ve Janestad tarafından yapılan çalışmada francala ekmek, geleneksel bir fırında, 210 °C fırın içi sıcaklığında, doğal taşınım ile kurutmuşlardır (Şekil 2.3) [Thorvalddson ve Janested, 1999]. Bu kurutma işleminde alınan ölçümler UDF modelinin doğrulanmasında kullanılmışlardır. FLUENT® programında yapılan çözümlemede fırının iç kısmındaki ve poroz yapı olarak tanımlanan ekmek bölgesindeki boşluklardaki sıcaklık dağılımına göre hesaplanan doyma basıncı değerleri her iterasyonda güncellenerek, UDF koduna gönderilmiştir. Burada, ekmeğin birim yüzeyinden buharlaşan suyun miktarı, denklemi kullanılarak belirlenmiştir. Ekmek için geçirgenlik ve spv değerlerinin çarpımı 10-11 mertebesinde alınmıştır. Başlangıçta, ekmeğin %40 nemli olduğu kabulü ile yapılan deneylerle, UDF katkılı modelleme ile karşılaştırılmıştır. Modelleme ile ekmeğin yüzeyinde ve merkezinde elde edilen su buharı miktarları ile ekmeğin içinde kalan nem hesaplanmıştır. Yüzeyde ve merkezde, modelin belirlediği, kalan su yüzdesi, toplam kurutma süresinin yarısı kadar bir zaman içerisinde deneysel sonuçlarla uyum içerisindeydi. Ancak; nem miktarı %5'e düştüğünde, kuruma, yavaşlayarak sürmektedir. Modelin bu durumu yansıtmayışının nedeni, ekmeğin geçirgenlik değerinin ve poroz yapısının, içerdiği nem miktarına bağlı olarak değişmesidir. Bu değişimin de UDF kodu ile programa tanıtılması olanaklıdır.



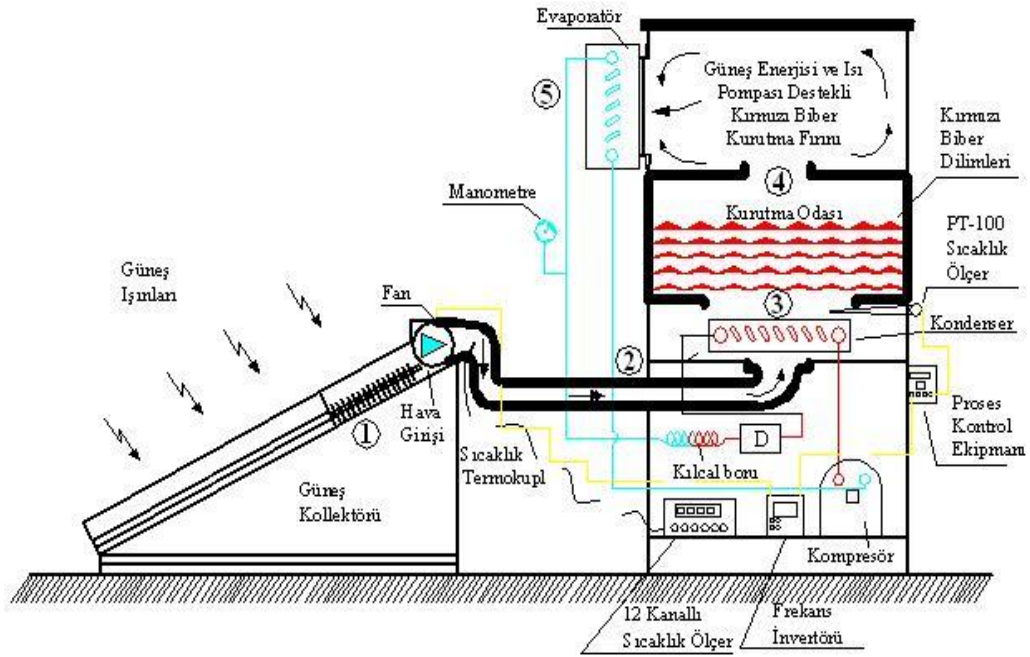
Şekil 2.3. Kapalı bir hacimde ekmek kurutulması [Seyhan U., O. ve ark, 2012].

Gönen (2012), çalışmasında ısı pompası destekli PLC kontrollü defne yaprağı kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve performans deneylerini yapmıştır. Şekil 2.4 de görülen çalışmada defne yapraklarını farklı sıcaklıklarda (40°C, 45 °C, 50 °C) ve farklı hava debilerinde (400 m³/h ve 600 m³/h) kurutmuşlardır. Yapılan bu çalışmada enerji verimliliği açısından, defne yaprağı kurutulmasındaki en ideal sıcaklık değerinin 45 °C olduğu kurutma hava debisinin ise 600 m³/h olduğunu belirlemiştir. Yapılan bu çalışmada tüm sistem ısıtma tesir katsayısı (COP_{ws}) en yüksek olan değer 45 °C sıcaklıkta ve 600 m³/h hava debisinde 3,02 olarak hesaplamıştır.



Şekil 2.4. Isı pompası destekli PLC kontrollü kurutma fırını [Gönen, 2012].

Aktaş ve ark. (2010), çalışmalarında, güneş enerjisi destekli ısı pompalı bir kurutucuda kırmızıbiber kurutmuşlardır. Isı borulu güneş kolektörü ve havadan havaya ısı pompası sistemi kullanılarak kırmızıbiberler başlangıç nem miktarından (10,81 g su/g kuru madde) son nem miktarına (0,16 g su/g kuru madde) kadar kuruttukları görülmüştür. Şekil 2.5 de kurutma sisteminde 24 saat kurutma periyodunu ısı pompası desteği ile sağlamışlardır. PID kontrollü kurutucuda hava hızı proses kontrol cihazından set edilen sıcaklık değerine göre değişmiştir. Kırmızıbiberler 50 °C kuru termometre sıcaklığında ve ortalama 0,4 m/s hava hızında 210 dakikada kurutmuşlardır. Deney sonuçlarına göre tüm sistem için ortalama ısıtma tesir katsayısı (COP_{wh}) 2,24 ve özgül nem çekme oranını ($SMER_{ws}$) 0,209 olarak hesaplamışlardır.



Şekil 2.5. Isı pompalı ve güneş enerjisi destekli kurutma fırını [Aktaş ve ark, 2010].

Özgüven ve ark. (2004), farklı tıbbi bitkilerin değişik kurutma ortamlarında kurutulmasının uçucu yağ oranı üzerine etkilerinin araştırdıkları çalışmada, geleneksel kurutma yöntemlerinden gölgede ve güneşte kurutma ile kabin tipi (40 °C’de 12 saat) ve solar tünel kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda, kurutma yöntemlerine göre bitkilerin uçucu yağ oranları değişiklik göstermiştir. En yüksek uçucu yağ oranları; *Lavandula officinalis*, *Origanum onites*, *Thymus eigii* ve *Thymus vulgaris* bitkilerinde solar ve kabin kurutucuda, *Rosmarinus officinalis*’te solar kurutucu ve gölgede, *Salvia officinalis* bitkisinde gölge ve kabin kurutucuda, *Cymbopogon citratus* bitkisinde güneşte, *Artemisia annua*, *Thymbra spicata* ve *Melisa officinalis* bitkilerinde gölgede belirlenmiştir [Özgüven ve ark, 2004].

Bu tez çalışmasında önceden yapılmış ısı pompalı kurutma çalışmaları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda; kurutulan ürünlerin en uygun kuruma şartlarını belirlemişler ve kurutma süresince ürünlerde oluşabilecek bozulmaların önüne geçmeye çalışmışlardır. Bu çalışmada, ısı pompalı kurutma sistemi tasarlanıp, üç farklı modda denenerek bayat ekmeğin geri dönüşüm tekniklerinin deneysel analizi planlanmıştır.

3. EKMEK VE ÖZELLİKLERİ

Ekmek, zengin ve yoksul ayırt etmeksizin, her kesimden insanın, en temel gıda maddesidir. Ekmek Dünya'nın her yerinde paylaşmanın, alın terinin ve bereketin sembolü olarak görülmektedir. Ayrıca ekmek Türk kültüründe o kadar kutsaldır ki yere düştüğünde öpüp başımıza koyarız.

Araştırma verilerine göre 2012 yılı itibariyle Türkiye'de; günde 25.295 ton ekmek üretilmekte, bunun da günde 23.809 ton'u tüketilmektedir. Bu da gösteriyor ki hergün üretilen ekmeğin % 6'sı amacı dışında kullanılarak israf edilmektedir [Anonim, 2013].

Şekil 3.1 de görüldüğü üzere taze ekmeğin kendine has özellikleri; karakteristik ekmek kokusuna, nispeten kuru ve gevrek kabuk yapısına, yumuşak, süngerimsi, nemli ve düzgün bir gözenek yapısına sahip oluşudur [Ertaş, 2013].



Şekil 3.1. Taze ekmek

Şekil 3.2 de görüldüğü üzere bayat ekmeğin özellikleri; kendine has karakterdeki tat ve aromasının kaybolması, ekmek içinin opaklığının artması, yumuşak deri gibi bir kabuk oluşması, hoş olmayan hafif acımsı bir tat alması, kabuk renginde matlaşma ve sert, kaba ve ufalanabilir bir ekemek görünümü alır. Ekmeğin bayatlamasını kısaca, mikrobiyolojik bir bozulma olmaksızın ekmeğin kullanma değerinin ve tüketici tarafından beğenirliğinin azalması olarak tanımlayabiliriz [Ertaş, 2013].



Şekil 3.2. Bayat ekmek

Bayatlamış ekmeklerin çöpe atılmayarak tekrar değerlendirilmesi için TİSVA (Türkiye İsrat Önleme Vakfı) tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalara bazı belediyeler de dahil edilerek, şehirlerin birçok noktasına bayat ekmek toplama kutuları yerleştirilmiştir. Şekil 3.3 de Ankara Yenimahalle Belediyesi'nin örnek bir bayat ekmek toplama kutusu görülmektedir.



Şekil 3.3. Bayat ekmek toplama kutusu

3.1. Ekmekteki Nem Miktarı

Ekmek, yapısı itibariyle farklı nem difüzyonlarına sahiptir yani ekmeğin kabuk kısmı ile iç kısmı farklı neme sahiptir. Yapılan araştırmalar gösteriyor ki ekmeğin iç

kısımının nem içeriği %45 civarında iken, bu nem içeriğinin kabuk kısmında %12 civarında değişmektedir. Bu nem aralığı Şekil 3.4 de görülmektedir [Arıkan, 2006].



Şekil 3.4. Ekmekteki nem içeriği değişimi

Küfler gelişebilmek için neme ve oksijene ihtiyaç duyarlar. Ekmek içi nem miktarı %14'ün altına düşürüldüğünde yufkalarda ve peksimetde olduğu gibi bayatlama ve bozulma neredeyse durur. Sıcaklıkda, küflerin gelişmesinde en önemli etkindir ve 20-30 °C arasında en iyi gelişmeyi sağlar. Bu yüzden oda sıcaklığında ürünler saklanmamalıdır [Ertaş, 2013].

3.2. Bayat Ekmeği Kurutarak Değerlendirme Yolları

Bayat ekmeği değerlendirmenin birçok yolu vardır bunlardan biri ekmeği galeta unu (bayat ekmeğin kurutulup karıştırıcıda toz haline getirilmesi) haline dönüştürmektir. Galeta ununu elde etmek için ilk önce ekmeğin içindeki nemin alınması, böylelikle ekmeğin kırılgan ve ufalanabilir bir yapıya gelmesi sağlandıktan sonra karıştırıcı yardımıyla unufak oluncaya kadar kıyılır ve Şekil 3.5 de görüldüğü gibi galeta unu elde edilir [Ertaş, 2013].



Şekil 3.5. Galeta unu

Bir diğer yol ise ekmekler küpler şeklinde kesilerek kurutulur, böylece peksimet benzeri bir ürün elde edilir. Şekil 3.6 da görüldüğü gibi elde edilen ürünler tirit yapımında, çorba ve ayran içine karıştırılarak değerlendirilebilir.



Şekil 3.6. Tirit yemeği [Ertaş, 2013].

Kurutulmuş ekmeklerle yapılan diğer yemekler ise; ekmek pizzası tabanı, ekmek süpürgesi (Ankara dolaylarından bir tirit çeşidi), baharatlı kruton (ekmek cipsi), vişneli ekmek tatlısı, tavuk köftesi ve köfte harcı yapımında sıkça kullanılan bir üründür.

4. KURUTMA VE KURUTMA TEORİSİ

4.1. Kurutma

Kurutmanın tanımı kısaca bir maddenin bünyesindeki sıvının alınmasıdır. Tarım kesimindeki ve gıda sanayindeki uygulamalarda uygun bir yöntem ile ürünün bünyesinde taşıdığı sıvının alınmasına, çıkarılmasına veya buharlaştırılarak böylece nem miktarının düşürülmesine kurutma denir.

Başka bir ifade ile de kurutma; dayanma süreleri kısa olan ürünlerin içerisinde barındırdığı nemin alınarak saklamaya uygun hale getirme yöntemidir. Kurutma işlemi çeşitli ön hazırlık işlemlerinden sonra, kurutulacak ürünün yere, tepsiye veya bir platform üzerine serilmesi ile güneşe maruz bırakılarak veya gölgede hava geçişinin olduğu yerlerde yapılmaktadır [Bulduk, 2002].

Kurutma fırınlarında hava sıcaklığının ya da hava hızının artması; fırına verilen enerji miktarının artmasını sağlar. Bunun paralelinde, ürün içerisindeki nemin buharlaştırılması için verilmesi gereken enerji miktarının daha kısa sürede sisteme verilmesiyle, kurutma süresi de kısalmır. Kurutma havasının sıcaklığı, nemi ve ürün içerisindeki nem, kuruma hızını (kurutma şiddetini) belirler. Kurutma havasının neminin azaltılması da bu kurutma şiddetini artırarak kurutma süresini kısaltır. Dolayısıyla; kurutma süresinin kısaltılması kuruyan üründen ilkel yöntemlere nazaran daha erken faydalanılmasını sağlamaktadır.

Kurutulan ürün içindeki nem alınırken ürüne en uygun olan kurutma yöntemini seçmek günümüz enerji ve ekoloji dengeleri açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Üründen buharlaştırılan birim miktardaki nem için harcanan enerji miktarı da kurutma sistemlerinde önemli bir kısıttır.

Kurutma işlemi gerçekleşirken ürünlerdeki serbest nem kısa sürede atılmakta dolayısıyla kontrollü olmayan kurutma işleminden ve ürünlerdeki bağıl nemden dolayı kurutma süresi uzamaktadır.

Bir kurutma sisteminde harcanan enerji; herhangi bir yakıtın yanmasıyla ya da alternatif enerji kaynaklarından sağlanarak kurutma işlemi gerçekleşir. Açık bir sistemde atık havanın giriş havasıyla belirli oranlarda karıştırılarak giriş havasının sıcaklığı arttırılıp sistemin uygun kurutma şartlarını yakalama süresini kısaltacağından dolayı enerji tüketimi azalacaktır. Tamamen taze hava ile çalışan sistemlerde, taze hava ısıtılarak kurutma havasına dönüştürülüp ürün üzerinden geçirildikten sonra kurutma havasının tamamı egzoz edildiği için sistemlerde enerji tüketimi artmaktadır.

Kurutma işlemlerinde, basit olan kurutucular üreticiler tarafından tercih edilmekteydi. Ancak ilk zamanlarda kurutma işlemlerinin yapıldığı basit fırınlar kurutulmuş ürün üreticileri için tercih sebebi iken, sonradan kurutulan ürünlerin kalitesi açısından sıcaklık, ağırlık ve nem kontrolünün önemi ortaya çıktı ve bu sistemler daha basit ve daha ucuza temin edildiği için daha çok tercih edilmeye başlandı. Ayrıca ürünün sisteme yüklenmesinin ve sistemden boşaltılmasının da kolay olması tercih sebeplerindendir. Ürün kurutulurken harcanan enerji miktarı da son derece önemli olup, bu enerjinin elde edilmesi de, kullanılması da kolay olmalıdır. Yani ürünün kurutma maliyeti mümkün olduğu kadar düşük olmalı ve aynı zamanda kontrollü ve kaliteli bir kurutma yapılmalıdır.

Bir katının kurutulması iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan birincisi sıvıyı buharlaştırmak için gerekli olan ısı transferi, diğeri ise buhar ve iç sıvı kütlelerinin transferidir. Her bir işlemin oranını belirleyen faktörler kurutma hızını da belirler. Ticari kurutma işleminin en temel amacı; işlem için gerekli ısıyı verimli bir şekilde sağlamaktır. Isı transferi; iletim, taşınım ve ışıınım veya üçünün birleşimi şeklinde gerçekleşebilir. Endüstriyel kurutucu tipleri, katıya olan ısı transferi yöntemlerine bağlı olarak değişir. Genelde ısı, önce katının dış yüzeyine sonra da katının içine doğru hareket eder. Bu durumun tersi yüksek frekanslı elektrik akımları aracılığıyla oluşur. Bu durumda iç bölgedeki sıcaklık dış yüzeyden daha yüksektir ve ısı akışı içeriden dışarıya doğru oluşur [Heldman ve Singh, 1981].

4.1.1. Kurutmanın iç ve dış şartları

Bir ürünün kurutulması sırasında aynı anda iki temel prensip birden oluşur:

1. Sıcak gazdan, kurutulacak ürün bünyesinden buharlaşan sıvıya doğru ısı transferi.
2. Kurutulacak ürünün iç kısımlarından ürünün dış yüzeyine doğru, sıvı ya da buhar fazında, dış yüzeyden sıcak gaz içine doğru kütle transferi işlemleridir.

Bu işlemleri belirleyen şartlar aynı zamanda kurutma işlemlerini de belirleyen şartlardır. Bunlar iki kısımda incelenir:

1. Katı bünyesindeki sıvının katı yüzeyine gelmesi sürecinde oluşan, iç difüzyon, kılcallık gibi iç şartlar.
2. Kurutucu olarak kullanılan sıcak gazın hızı, sıcaklığı ve nemi gibi dış şartlardır [Aktaş, 2007].

4.1.2. Kurutma sistemi seçimi

Kurutma işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi de birim miktarda ürün kurutmak için, sistemde birim zamanda harcanan enerji miktarıdır. Diğer hususlar da ilk yatırım maliyeti ve ürüne uygun kurutma yöntemi ve tipi seçilmesidir.

Bir kurutma sistemi seçiminde izlenecek yol aşağıdaki gibi olmalıdır:

1. Uygun kurutucuların incelenmesi
2. Değişik tiplerin ön maliyetlerinin tahmin edilmesi
 - Yatırım maliyeti
 - İşletme maliyeti
3. Prototip veya laboratuvar ünitesinde kurutma testi davranışları en uygun cihazın tipini belirleyebilir. Bazen bir örnek tesiste bu doğrulanabilir
4. Kurutma deneylerinde kurutulan ürünlerin örnek ve kalitelerinin belirlenmesi [Ashrae, 2003-Parker, 1963].

Değişik ihtiyaçlar kurutucunun tasarım esaslarını belirler. Örneğin ürünün kurutucuda taşınması çok önemli olup kurutucuda kalma süresiyle yakından ilgilidir.

Ürünün başlangıçtaki durumu (sıvı, pasta, katı, toz, granüler, levha vb) tasarım esaslarında büyük etkiye sahiptir. Çizelge 4.1. de bazı ürünlerin kuruma sıcaklıkları ve kurutma süreleri verilmiştir. Çizelge 4.2. de ise kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan su başına harcanan enerji miktarı görülmektedir.

Çizelge 4.1. Bazı ürünlerin kurutma sıcaklıkları ve kurutma süreleri [Güngör ve Özbalta, 1997].

Malzeme Cinsi	Kurutma Sıcaklıkları °C)	Hafta	Gün	Saat
Meşe Tahtaları	32-52	1-4		
Yumuşak Tahtalar	70-105		2-14	
Tuğlalar	77			30
Kahve	50-72			12-48
Kauçuk	36-60		2-6	
Kabuksuz Hindistan Cevizi	65-92			4-20
Meşin ve Köseleler	26-38		2-6	
Meyveler	55-80			6-24
Üzüm	60-65			24
Elma	1.Kademe 70-78 2.Kademe 74			8
Şeftali, Armut	68			24-30
Sebzeler	50-65			2-18
Havuç	1.Kademe 70 2.Kademe 65			14-24
Soğan	1.Kademe 70-88 2.Kademe 55-60			10-15
Deriler	21-32			2-150
Fırın Boyaları	105-175			¼-6
Sabun	38-52			12-72
Tütün Yaprakları	29-55			12
Çay Yaprakları (Fanaj ve İlk Kurutma)	38			4-8
Çay Yaprakları (Kurutma)	70-110			1-2

Çizelge 4.2. Kurutucu tiplerine göre üründen uzaklaştırılan kg başına harcanan enerji miktarları [Başaran ve ark, 2004].

Kurutucu Tipleri	MJ/kg Uzaklaştırılan Su
Isı Pompalı Kurutucu	0,5-0,8
Direkt Egzoz Gazları İle Çalışan Kurutucu	3,2-3,8
Hava İle Çalışan Kurutucu 70-100 °C	4,5-5,5
Kazandan Alınan Egzoz Gazları İle Kurutma (400 °C)	5,0-6,0
Kazandan Alınan Egzoz Gazları İle Kurutma (200 °C)	9,0-12,0
Ters Akışlı Tepsili-Bantlı	8,0-16,0
Ters Akışlı Rafli-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 dahilinde 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 seçiminde karar verme:* Kurutma testlerinden ve belirtilen özelliklerin değerlendirilmesiyle kurutucu seçimine karar verilebilir [Güngör ve Özbalt, 1997].

Kurutma sistemlerinde taşınım ile kurutma, temasla kurutma ve ışınlama ile kurutma olmak üzere başlıca üç farklı kurutma yöntemi vardır. Taşınım ile kurutmada suyun buharlaşması için gerekli ısı, bir gaz tarafından yani; çoğunlukla olduğu gibi, hava tarafından sağlanır. Sıcak hava, kurutulacak materyalin içinden, üzerinden ve arasından geçirilir. Bu yöntem genel olarak sıcak hava ile kurutma tekniği olarak bilinir. Temasla kurutma yönteminde ise; buharlaşma için gerekli ısı, iletimle taşınır. Yani, kurutulacak madde hareketsiz kalırken veya hareket ederken bu sırada temas ettiği sıcak yüzeyden maddeye ısı taşınır. Işınlama ile kurutmada yapılan kurutmada, kurutulacak materyale ısı; herhangi bir maddi taşıyıcıya gerek duyulmaksızın sistemdeki bir ışınlama kaynağı ile ulaştırılmaktadır. Başka bir ifadeyle ışınlama ile kurutmada, mikrodalga, di-elektrik veya kızılötesi ışın gibi elektromanyetik enerji türlerinden yararlanılmaktadır [Başaran ve ark, 2004–Cemreoğlu ve ark, 2003].

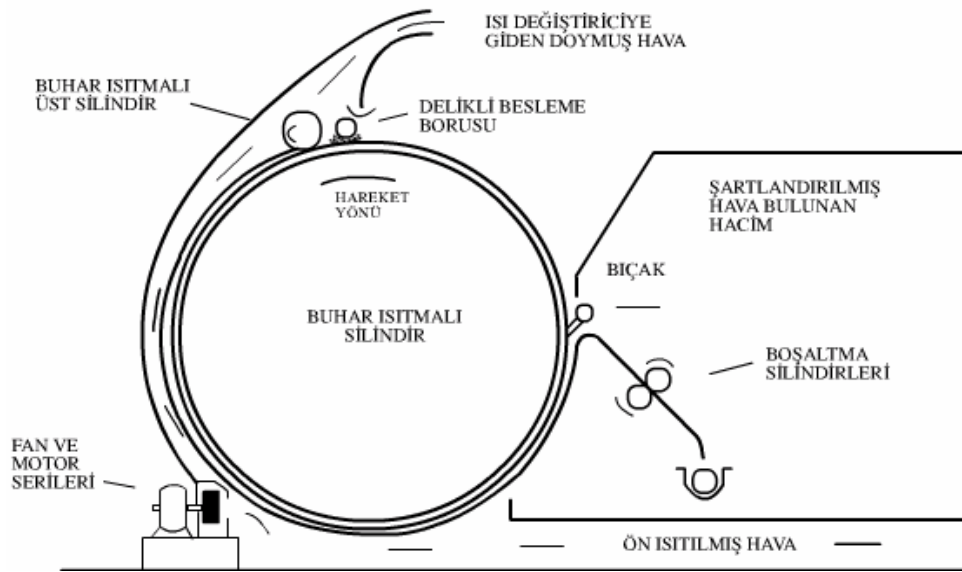
4.2. Kurutma Yöntemleri

Kurutma işlemlerinde kurutulacak ürüne göre kurutma sistemi seçilmesi gereklidir. Kurutulacak ürünün kurutma sonrası kalite değerleri kurutma esnasında havanın psikrometrik ve fiziksel özellikleri ile ilgilidir. Ayrıca birim zamanda kurutulacak ürün miktarı ve ürünün başlangıç ve son nem değerleri sistem seçimini etkileyecek hususlardır. Bugün birçok kurutma yöntemi (iletim, taşınım, kızılötesi vs.) kullanılmakta olup, bu kurutma sistemleri aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

4.2.1. İletim ile kurutma

Kurutma silindirleri veya topları, düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar doğrudan temaslı kurutmaya örnek verilebilir. Isıtma yüzeyi, kurutulacak malzeme ile temas halinde olmalıdır. Bu sistemlerde nem miktarı aşırı ısınmayı önlemektedir. İletim ile kurutma sistemleri genel olarak kağıt ürünlerinin kurutulmasında

kullanılmaktadır. İletim ile kurutmada; yüksek kurutma hızı ve sabit bir ısı ve kütle transferi koşulları sağlanamaz, ağ boyunca zayıf bir nem profili oluşur, sistem istenildiği gibi kontrol edilemez, işletilmesi genelde pahalıdır, makine etrafında istenmeyen çalışma koşulları oluşur. Şekil 4.1 de iletim prensibi ile çalışan bir kurutma sistemi görülmektedir.



Şekil 4.1. İletimle kurutma sistemi [Günerkan, 2005].

4.2.2. Kızılötesi ısıtım ile kurutma

Isıl ısıtım, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, gaz ısıtmalı akkor yansıtıcılar ve genelde elektrikle ısıtılmış yüzeyler ile sağlanır. Kızılötesi, sadece bir malzemenin yüzeyi ve etrafında etkilidir, bu sebeple ince tabakaların kurutulması için uygundur.

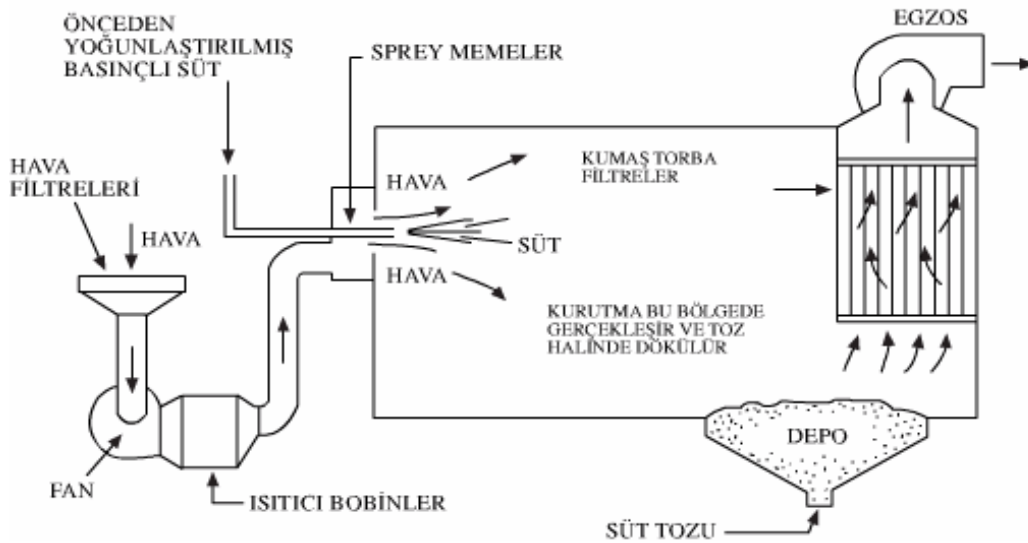
4.2.3. Taşınım ile kurutma

Hemen hemen bütün kurutucularda taşınım ile kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Hava ya da başka bir gazın ısı taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığı ve bu akışkanın sistemde dolaştırıldığı kurutma sistemleri, taşınım ile yapılan kurutma sistemleridir. Tünel kurutucular (ürünün hareket ettiği hava akışlı), kabinli ve bölmeli kurutucular

(tepsilere sererek sıcak havanın ürün üzerine gönderildiği) ve döner kurutucular (ürünün sıcak hava akımı içerisine gönderildiği), taşınım ile yapılan kurutma işleminde kullanılan kurutma tipleridir.

4.2.4. Sprey kurutucular

Sprey kurutucular, süt tozu, kahve, deterjan ve sabun kurutulmasında kullanılmaktadır. Kurutma süresinin kısa olduğu (5-15 saniye), gaz sıcaklığının 93°C ile 760°C arasında değiştiği kuruma tekniğidir. Sistemde egzoz havası içerisindeki malzeme parçacıkları, siklon ayırıcılar veya torba filtreler yardımıyla toplanır. Şekil 4.2 de bu yapıya uygun olarak süt tozu üretim sistemi görülmektedir.

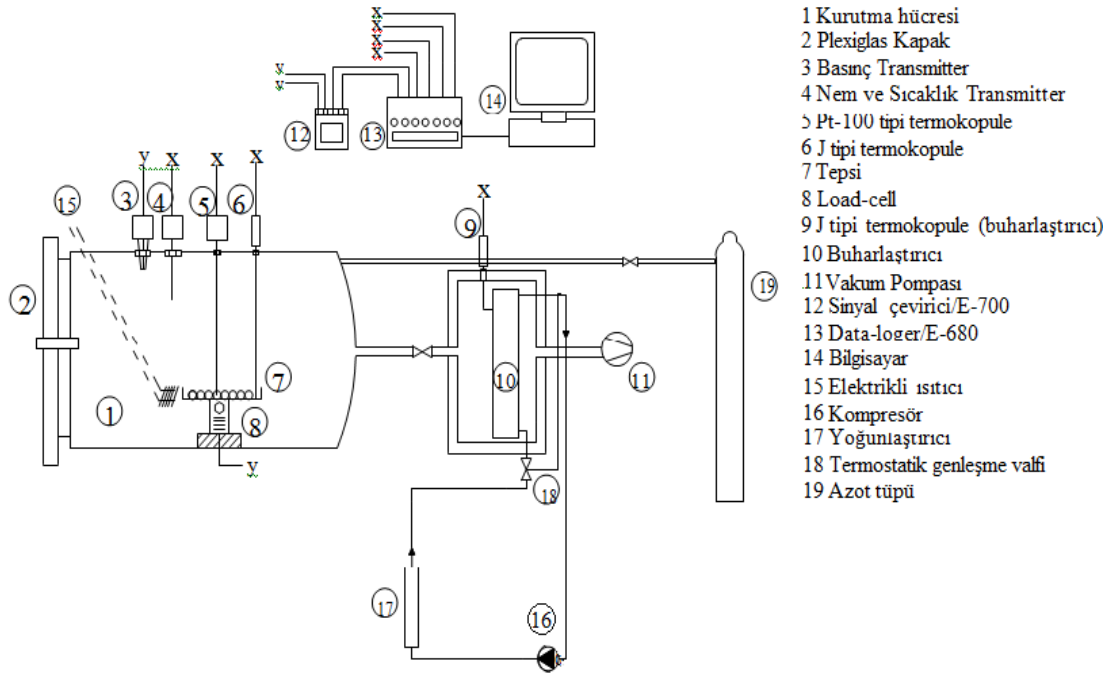


Şekil 4.2. Süt tozu üretim sistemi [Günerkan, 2005].

4.2.5. Dondurarak kurutma

Dondurmalı (şoklama) kurutma, eczacılık ürünleri, serumlar, bakteri ve virüs kültürleri, aşılarda, deniz ürünleri, süt vb. ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Malzeme önce dondurulur, sonra düşük sıcaklıklı bir yoğunlaştırıcı veya kimyasal kurutucuya bağlı yüksek vakum odasına yerleştirilir.

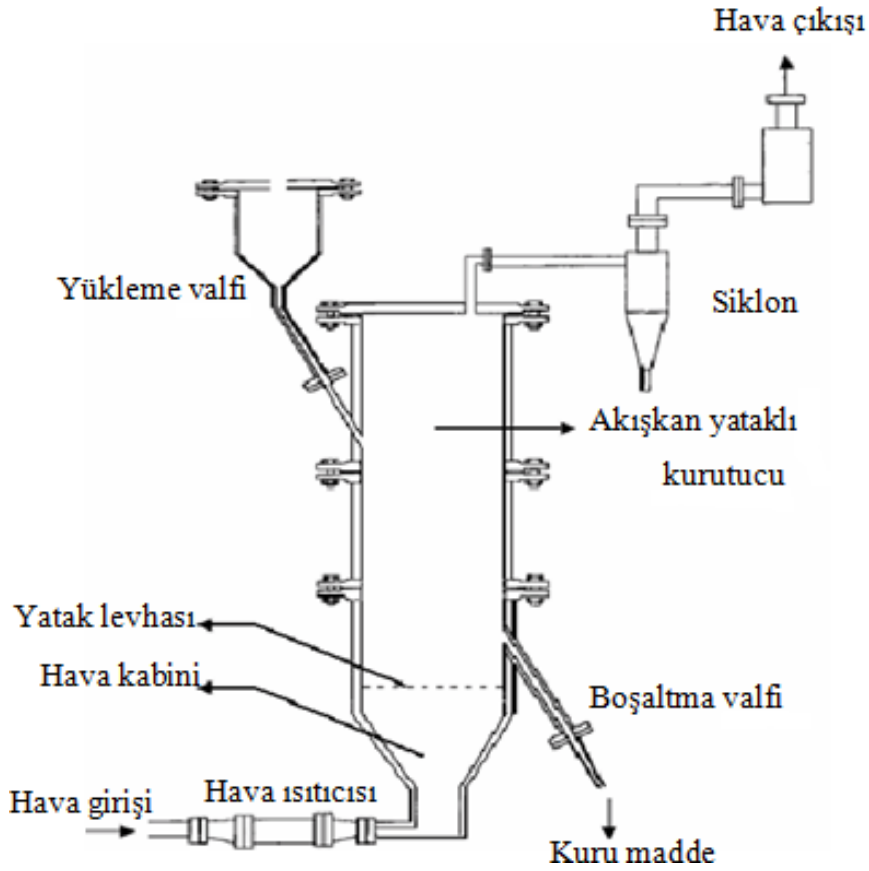
Donmuş malzemeye ısı, kızılötesi ışıyım ile iletilir, uçucu madde (genelde su) gaz haline gelir, yoğunlaşır veya kimyasal kurutucu ile soğurulur. Birçok dondurucu kurutma işlemi, düşük basınçlar altında -40°C ile -10°C sıcaklık aralığında gerçekleşir. Bu işlem pahalı ve yavaş olmasına rağmen, ısıya duyarlı malzemeler için oldukça uygundur. Şekil 4.3 de dondurarak kurutma ünitesinin sistem şeması verilmiştir [Günerkan, 2005].



Şekil 4.3. Dondurarak kurutma sistem şeması [Kırmacı, 2008].

4.2.6. Akışkan yataklı kurutma

Akışkan yataklı kurutma sistemlerinde kurutma havasının kurutulacak olan katı parçacıklara alttan belli bir hızda verilmesine dayanır. Ayrıca tanecikler ve kurutma havası arasındaki ısı transferi, tozlu veya tanecikli madde ile akışkan arasında yakın temas olduğu için oldukça iyidir. Bu temas, hassas malzemelerin yüksek sıcaklık farklarından etkilenmeden kurutulmasını sağlar. Akışkan yataklı sistemlerde kurutulan malzemelere örnek olarak kömür, kireç taşı, çimento, kabuklar, dökümhane kumu, fosfat kayası, plastik tıbbi malzeme ve yiyecekler verilebilir. Şekil 4.4 de akışkan yataklı kurutma ünitesinin sistem şeması verilmiştir.



Şekil 4.4. Akışkan yataklı kurutucu [Yüzgeç, 2005]

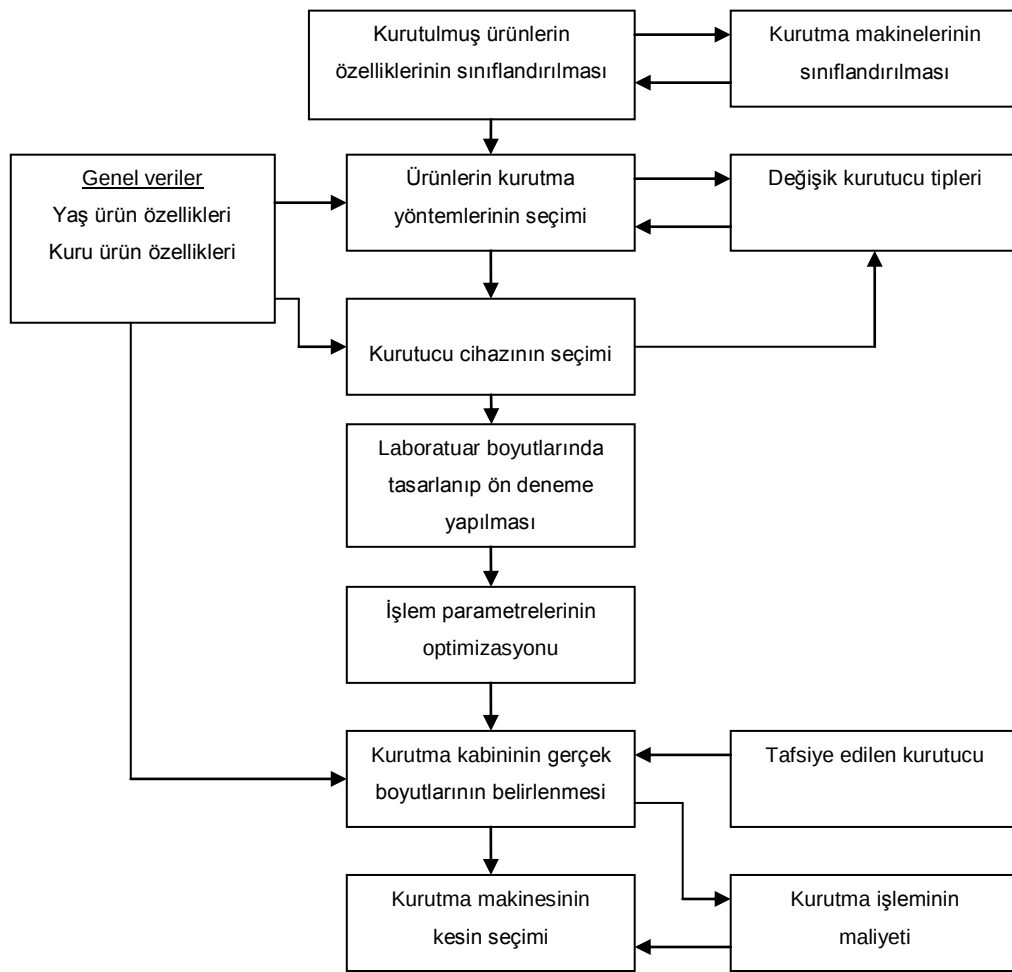
4.2.7. Alevli (flaş) kurutma

Alevli (flaş) kurutma sistemlerinde düzgün bir şekilde bölünmüş katı parçacıklar sıcak gaz akımı içerisinde yayılarak hızlı ve düzgün bir şekilde kurutulabilir. Ticari uygulamalarda; pigment (boya maddesi), sentetik reçine, yiyecek maddeleri, sulu bileşikler, alçıtaşı, kil ve tahta kurutulmaktadır [Günerkan, 2005].

4.3. Kurutucu Seçimi

Kurutma işleminin gerek ürün kalitesi ve gerekse işletmenin karlılığı açısından başarısı, uygun bir kurutucunun seçilmesine bağlıdır. Her türlü kurutma işlemine uygun çok amaçlı bir kurutucu tipinin olmaması nedeni ile ilk adım olarak, kurutma yöntemi ve kurutucunun doğru seçimine önem vermek gerekmektedir.

Yapılmak istenen kurutma için uygun kurutucu seçimi, birçok etkenin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir işlemdir. Kurutulacak malzemenin özellikleri, ısıtıcı tipi, enerji kaynağı, kurutma havası ile malzeme arasındaki hidrodinamik koşullar özellikle ele alınmalıdır. Seçim sırasında teknolojik ihtiyaçlar, ekonomik çalışma ve elde edilen kuru ürünün kalitesi de önemli kriterler olarak ele alınmalıdır. Kurutucu seçimi sırasında dikkate alınacak unsurlar şekil ve etkileşimleri Şekil 4.5 ile verilmiştir [Lee, D., A., 1986, Yağcıoğlu, 1999].



Şekil 4.5. Kurutucu seçimi için işlem adımları [Yağcıoğlu, 1999].

Kurutucu seçiminde ilk hareket noktası; kurutmaya hazırlanmış ürünlerin özelliklerinin belirlenmesidir. Kurutulacak ürünlerin kinematik ve statik kuruma özellikleri ve kurumuş üründen beklenen şekil ve dış görünüm özellikleri öncelikle

belirlenmelidir. Ürünlerin kinematik ve statik kuruma özellikleri, soğurma ve yüze çekme (adsorpsiyon), eşsıcaklıkları ile kritik nem, denge nemi, kurutma sıcaklığı, kuruma hızı gibi parametrelerin belirlenmesi için bilinmesi gereken önemli unsurlardandır.

Kurutulacak ürünlerdeki başlangıç ve son nem miktarı, kurutma havası sıcaklığı, hava hızı ve bağıl neminden etkilenme derecesi, uygun nem miktarına kadar kurutma süresi, kurutulacak ürünlerin hacmine ve miktarına bağlı olarak kurutma sistemleri tasarlanmalıdır. Kurutmadaki ısı transfer şekli de oldukça önemli bir kriterdir. Kütle transferini hızlandıracak dolayısıyla kurutma uygulamasını verimli hale getirecek sistemler tercih sebebi olacaktır.

5. ISI POMPASI SİSTEMİ

5.1. Isı Pompası

Yaşadığımız yüzyıl içinde tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de önem kazanan enerji bunalımının, birlikte getirdiği sakıncaları bir ölçüde olsa azaltmak amacıyla; ısı enerjisi ihtiyacının en az 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 [Oktay, 1997].

Geleneksel kurutucularda, kurutucudan gelen nemli hava atmosfere bırakılır, bunun sonucu olarak da nemli havanın içerdiği buharlaşma gizli ısı 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 [Hawladar ve ark, 2003].

Bu çalışmada bu prensibe dayalı ısı pompalı bir sistem tasarlanmış ve hayat ekmek kurutularak analiz edilmiştir.

5.1.1. Isı pompası sistemlerinin tarihçesi

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 makinalarının kullanılabilineceğini öne sürmüştür. Kelvin 1852 yılında yayınladığı yazısında, kompresör ile bağlantılı genişletici kullanan bir sistem tanıtmıştır fakat

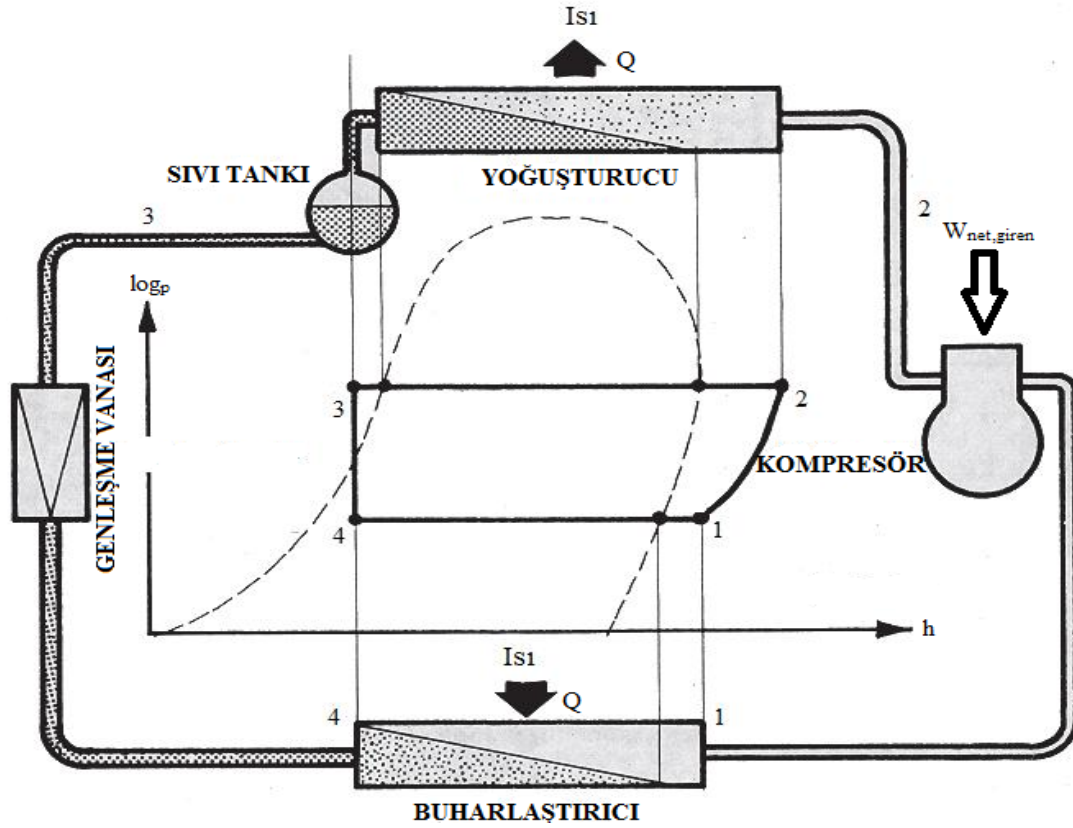
normal ısıtma masraflarına oranla makinanın masrafının çok daha yüksek olması nedeniyle, bu hava-ısıtma ısı pompası o zamanlar kurulamamıştır.

Sıkıştırılmış buharla çalışan ısı pompasının prensibinin ilk olarak İsviçre’de, 1870-1880 yılları arasında Salina Bex’de mühendis Paul Piccard tarafından gerçekleştirilmesi dikkate değerdir. Böyle 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 makina da 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 [Erbil, 2002].

5.1.2. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi

Bir soğutma devresinde “soğutkan” adı verilen soğutucu akışkanın bir yerde soğutma sağlayarak bir takım durum değişikliklerinden sonra, yeniden başlangıç konumuna gelmesine “soğutma çevrimi” denir. Çevrim sırasında bir miktar soğutkan yoğunlaştırılıyor ve buharlaştırılıyorsa buna; “buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi” denir. Soğutma uygulamalarında en sık uygulanmakta olan ve en çok tercih edilen sistem buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemidir. Bu tip soğutma çevriminde sistemde kompresör, kondenser (yoğusturucu), genişleme elemanı (kısılma vanası veya kılcal boru) ve evaporatör (buharlaştırıcı) bulunur. Sistem elemanları boru ile birbirlerine seri olarak bağlanırlar ve kapalı bir devre oluşturulur. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin elemanları Şekil 5.1 de verilmiştir.



Şekil 5.1. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi [Çoban, 2013].

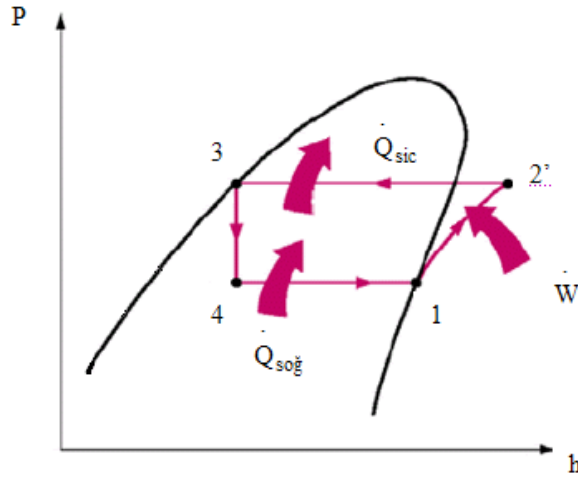
Soğutma devresi olarak oluşturulan kapalı sistemin içinde hava kalmayacak şekilde vakumlandıktan sonra sistem içerisine bir miktar soğutkan ilave edilir. Sistemin çalışmasını anlamak için genleşme vanasını tam açık kabul edecek olursak, kompresör çalışmaya başladıktan sonra sistem içerisindeki soğutkan az bir basınç farkı ile dolaşacaktır. Genleşme vanasının yavaş yavaş kısıldığını düşünüldüğü takdirde sistemde iki basınç bölgesi oluşacaktır. Bu basınç bölgeleri genleşme vanasının gerisinde kompresörün basma ucuna kadar yüksek basınç bölgesi ve genleşme vanasından sonra yine kompresörün emiş ucuna kadar alçak basınç bölgesidir. Genleşme vanası kısıldıkça basınçlar arasındaki oran artacaktır. Yüksek basınç bölgesindeki akışkan sıkıştırıldıkça sıcaklığı da artacaktır. Basınç şiddeti sistemdeki soğutkanın ısı özelliğine bağlı olarak, belirli bir basınçta ve çevre sıcaklığından yüksek sıcaklıkta yoğuşturucuda yoğuşacaktır. Bu yoğuşma sırasında yoğuşma gizli ısıyı açığa çıkar çevre sıcaklığından yüksek sıcaklıkta olduğu için çevreye ısı atılır.

Diğer taraftan genleşme vanasından sıvı halde geçen akışkan, oluşturulan bu düşük basınçta ve düşük sıcaklıkta buharlaştırıcıda buhar hale geçerken çevreden ısı çeker. Sıvı halden gaz hale geçen soğutkan buharlaşma gizli ısını buharlaştırıcıdan alır buharlaştırıcı sıcaklığı çevre sıcaklığının altında olacak şekilde ayarlandığından çevreden buharlaştırıcıya ısı akışı olur. Yoğuşturucudan atılan ısı buharlaştırıcıda geri kazanılmış olur. Kazanılan bu ısı da akışkana geçer ve buharlaştırıcının bulunduğu ortamda soğuma meydana gelir.

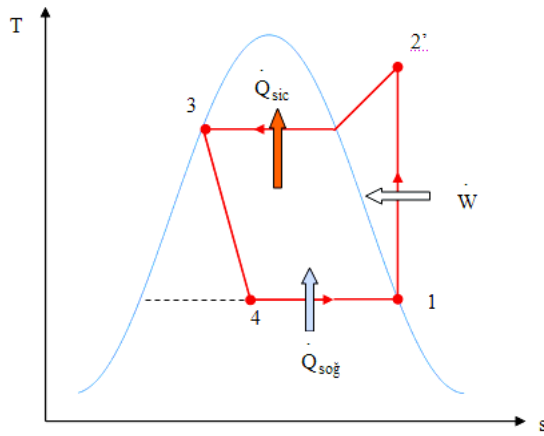
Şekil 5.2 de ideal buhar sıkıştırırmalı ısı pompası çevriminin P-h diyagramı; Şekil 5.3 de ise buhar sıkıştırırmalı ısı pompası çevriminin T-s diyagramı gösterilmiştir. T-s ve P – h diyagramlarında çevrimi oluşturan hal değişimleri şöyledir:

- 1– 2' : Kompresörde izentropik (tersinir – adyabatik) sıkıştırma
- 2'–3 : Yoğuşturucuda çevreye sabit basınçta ısı atılması
- 3 –4 : Genişleme vanasında sabit entalpide genişleme
- 4 –1 : Buharlaştırıcıda soğutucu akışkanın sabit basınçta ısı çekmesi

Buharlaştırıcıdan çıkan doymuş buhar kompresörde izentropik olarak daha yüksek bir basınç ve sıcaklığa sıkıştırılarak kızgın buhar haline getirilir (1 – 2' durumu). Daha sonra yoğuşturucuya giren kızgın buhar, kullanılabilir ısını dışarıya vererek sabit basınçta yoğuşur (2' – 3 durumu). Doymuş sıvı haldeki yüksek basınçlı akışkanın basıncı ve sıcaklığı genişleme vanasında buharlaştırıcı şartlarına getirilir (3 – 4 durumu). Buharlaştırıcıya giren akışkanın sıcaklığı ısı kaynağının sıcaklığından düşük olduğundan, ısı kaynağından akışkana sabit basınçta ısı geçişi olur ve akışkan buharlaşır (4 – 1 durumu). Buradan sonra çevrim yeniden başlar ve bu şekilde devam eder.

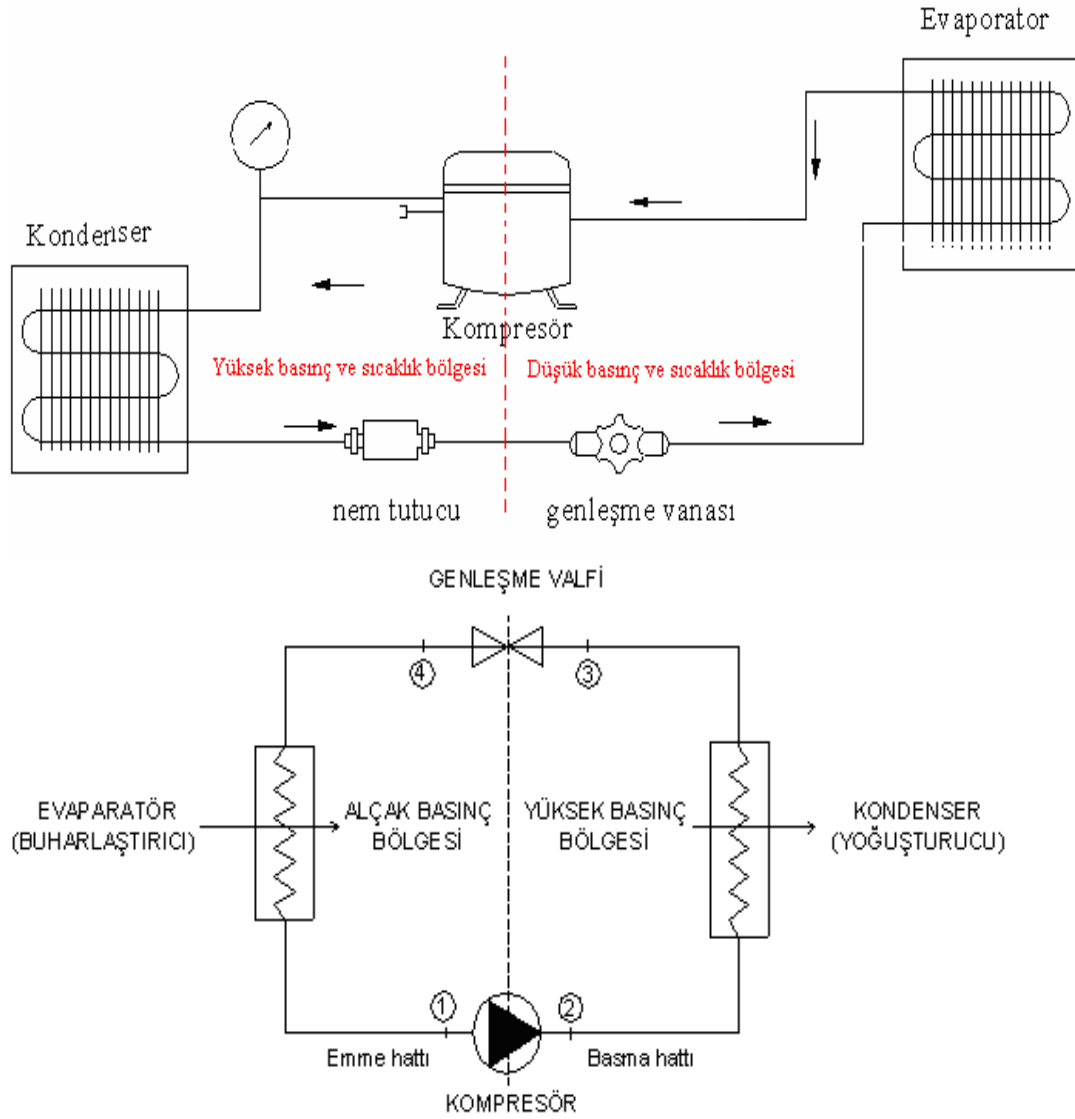


Şekil 5.2. Isı pompası sisteminin P-h diyagramı



Şekil 5.3. Isı pompası sisteminin T-s diyagramı

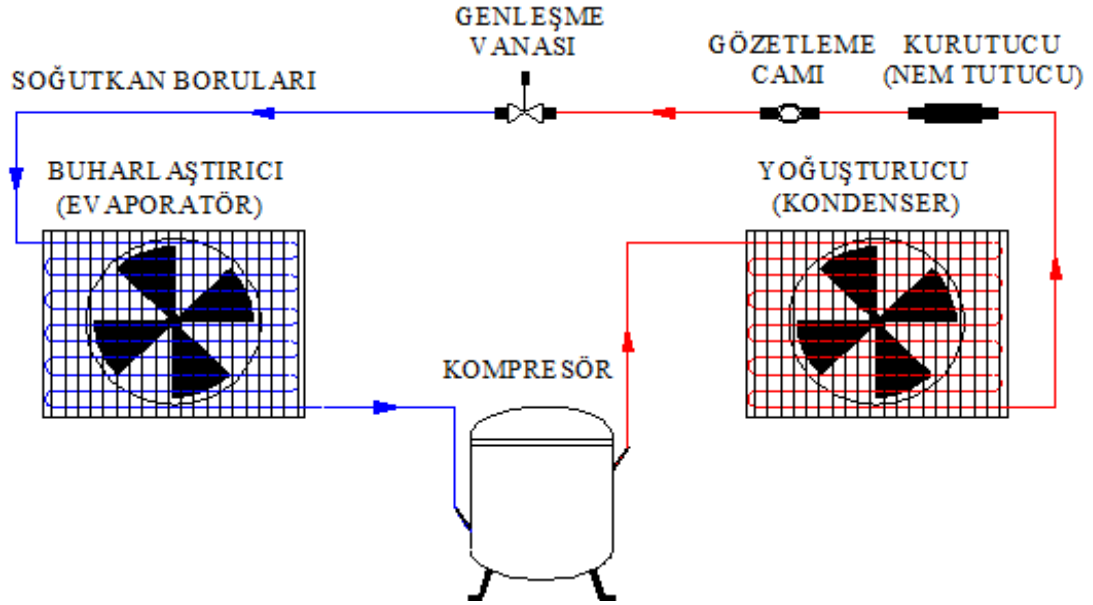
Şekil 5.4 de de görüldüğü gibi çevrimde iki farklı basınç ve iki farklı sıcaklık bölgesi bulunur. Basınçlar, emme hattındaki buharlaşma basıncı ya da alçak basınç bölgesi ile basma hattındaki yoğunlaşma basıncı veya yüksek basınç bölgeleridir. Sıcaklıklar ise emme hattındaki düşük sıcaklık bölgesi ve basma hattındaki yüksek sıcaklık bölgeleridir. Sistemde kullanılan gazın ısıl özelliği dikkate alınarak soğutulacak hacmin iç şartlarına göre düşük sıcaklık ve dış şartlara göre de yüksek sıcaklık sağlayacak şekilde basınçlar kompresör gücü, gaz miktarı ve genişleme vanası (veya kılcal boru uzunluğu) gibi üç değişkenin bileşkesi ile ayarlanır.



Şekil 5.4. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin farklı basınç ve sıcaklık bölgeleri

- 1-2 : Doymuş buharın bir kompresör yardımıyla buharlaşma basıncından yoğuşma basıncına sıkıştırılması,
- 2-3 : Sabit basınçta soğutularak yoğuşma (doymuş sıvı haline kadar),
- 3-4 : Isı ve iş alışverişi olmaksızın, akışa direnç gösteren bir genleşme vanasından geçirilerek, sıvının basıncının yoğuşma basıncından buharlaşma basıncına düşürülmesi,
- 4-1 : Sabit basınçta ısıtılarak buharlaştırma [Özko1, 1999].

Buhar sıkıştırırmalı çevrimin ana elemanları



Şekil 5.5. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin ana kısımları

- Kompresör:* Soğutucu gazın sistemde dolaşmasını sağlar. Soğutucu gazın alçak basınç bölgesinden emilerek, yüksek basınç bölgesine basılması işlemini gerçekleştirir.
- Yoğuşturucu (Kondenser):* Yüksek basınç altında sıkıştırılmış soğutkanın buhar halden sıvı hale geçtiği bölümdür. Yüzeyi genişletilerek çevreye ısı geçişi kolaylaştırılmıştır.
- Buharlaştırıcı (Evaporatör):* Genleşme vanasından sonra düşük basınç bölgesi elemanı ve akışkanın sıvı halden buhar hale dönüştüğü bölümdür. Genellikle serpantin şeklinde olup, çevreden ısı çektiğinden soğutma burada gerçekleşir. Buhar sıkıştırırmalı soğutma çevriminin ana elemanları Şekil 5.5 de verilmiştir.
- Genleşme vanası:* Yüksek basınç bölgesinden gelen soğutucu akışkanın, alçak basınç bölgesine kontrollü bir şekilde akmasını sağlar. Genleşme vanası üzerinde

ısı alışverişi olmaz. Küçük sistemlerde genleşme vanası yerine kılcal (kapiler) boru kullanılabilir.

- e) *Soğutkan (soğutucu gaz)*: Soğutma sisteminde uygulanan yüksek basınçta sıvı hale ve düşük basınçta buhar hale kolayca dönüşebilen akışkanlar soğutkan olarak kullanılabilir. Bu özelliğinin yanında sisteme ve çevreye zarar vermeyen pek çok özellik akışkan seçiminde önemli olmaktadır. [Özko1, 1999].

Buhar sıkıştırmalı çevrimin yardımcı elemanları

- a) *Termostat*: İstenilen soğutma ya da ısıtma sağlandığında sistemin durdurulup çalışmasını sağlayan elemandır. Soğutma termostatları ısıtma termostatlarından farklı çalışırlar. Isıtma termostatları yüksek sıcaklığa ulaşıldığında sistemi durdurur ve sıcaklık düşüncü çalıştırır, soğutma termostatları istenilen soğukluğa düşüncü sistemi durdurur ve sıcaklık yükselince sistemi çalıştırır.
- b) *Prosestat*: Belli basınçlar arasında sistemin devreye girmesini veya devreden çıkmasını sağlar. Ayarlanmış en yüksek ve en düşük basınçlar arasında sistemin çalışmasını kontrol eder bu basınç değęerlerinin dışında sistemi durdurur. Sadece bir basınç bölgesine bağlanan tipleri olduğu gibi hem yüksek hem de düşük basınç bölgesini kontrol eden kombine tipleri de mevcuttur.
- c) *Kurutucu (Dryer)* : Soğutma sistemlerinde su buharının bulunması sistemin isleyişini bozar. Kompresör sistemdeki su genleşme ve kılcal çıkısında donma ve tıkanmalara yol açar ve pistonun aşınmasına neden olur. Sistemin havası boşaltılırken su buharı da dışarı atılır. Vakumlama süresi su buharının da dışarı atılmasına olumlu bir katkıdır ancak sistemin iç yüzeyleri su buharı ile sıvanmış haldedir. Sistem çalışmaya başladığında bu su buharı akışkana karışarak dolaşmaya baslar. Bunun için sistemdeki nemin tamamen alınması gerekir. Akışkanın dolaşımı sırasında su buharını almak için genleşmeden önce mutlaka bir kurutucu ilave edilmeli ve sistem her açıldığında kurutucu değıştirilmelidir.

d) *Gözetleme Camı*: Soğutkanın durumunu (sıvı veya gaz halini) belli bir noktadan gözlemlememize yardımcı olur.

5.1.3. Isı pompası sistemi

Isı pompası, ısı makinesinin tersi bir çevrime göre çalışan, bir iş yapılması ile ısıyı soğuk kaynaktan, sıcak kaynağa ulaştıran bir makinedir. Isı pompaları ve soğutma makineleri aynı çevrime göre çalışırlar. Soğutma makinesiyle bir mahalin soğutulması, ısı pompası ile bir mahalin ısıtılması esastır.

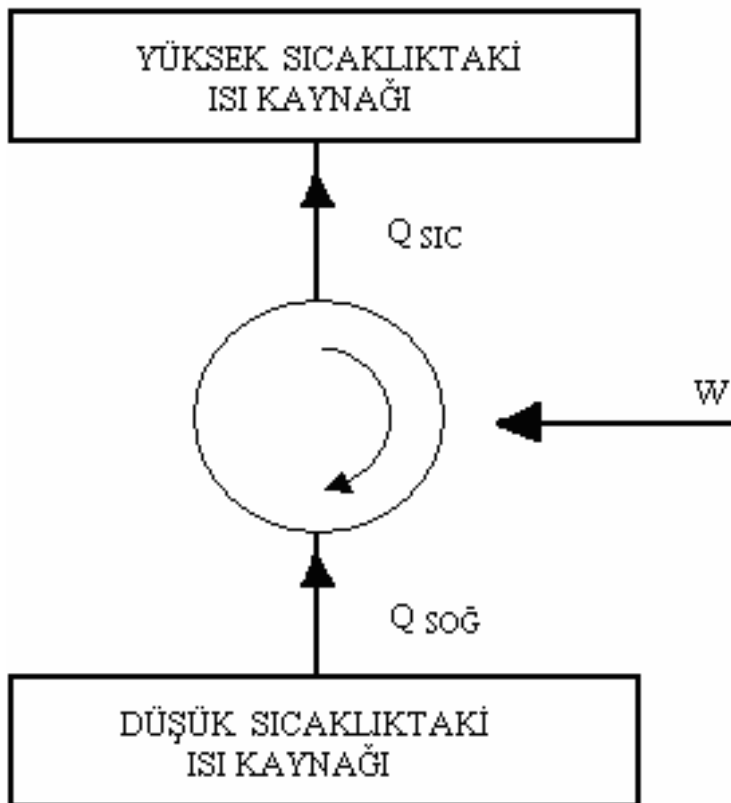
Bazı hallerde sadece ısıtma gayesi ile ısı pompası kullanılması verimli olmayabilir. Çeşitli gayelerle hem soğutma ve hem de ısıtma gereken hallerde ısı pompası en uygun çözüm yolu olmaktadır [Boran, 1993].

Soğutma makineleri ve ısı pompalarının kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı; düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdan ısı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimi tamamlaması için yapılması zorunlu bir işlemdir, fakat amaç değildir. Isı pompasının amacı ise, bir ortamı sıcak tutmaktır. Bu işlevi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı enerji deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerji deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ise kapalı bir ortam ya da herhangi bir akışkan (hava, su vb.) olabilir.

Bilindiği gibi, Termodinamiğin 2. Kanunu'na göre, ısı yüksek sıcaklıktaki ortamdan, daha düşük sıcaklıktaki ortama kendiliğinden geçer. Fakat Termodinamiğin II. Kanunu'nun diğer ifadesinde ise, düşük sıcaklıktaki bir ortamda bulunan bir ısının, yüksek sıcaklıktaki bir ortama taşınması, ancak dışarıdan ilave iş vermekle mümkündür. Isı pompasında ısıya rasyonel olarak yüksek seviyedeki sıcaklığa getirmek için, mekanik bir enerji kullanılmaktadır. Dolayısı ile ısı pompası tersinir bir işlemi mümkün kılar, yani ısı soğuk ortamdan alınıp, sıcak ortama verilir. Bunun sonucunda sıcak ortam daha sıcak, soğuk ortam daha soğuk hale gelir.

Isı pompalarının kurutma işlemlerinde kullanıldığında, enerji verimliliği açısından iyi cihazlar oldukları bilinmektedir. Kurutma uygulamalarında, yoğuşma gizli ısısı ile yoğuşturucuda duyulur ısıtma yapması ısı pompalarını etkili kılmaktadır. Günümüzde değerli ürünlerin kurutulmasında ısı pompalarının çok iyi kontrol edilebilmeleri, onları uygulamada daha önemli hale getirmiştir.

Isı pompası sistemlerinde, sistemde yoğuşturucudaki ısı atımını artıracak herhangi bir değişiklik buharlaştırıcıda da ısı çekimini artırır ve bunun tersi de mümkündür. Buharlaştırıcıdaki ısı çekiminin artması, yoğuşturucudaki ısı atımının artmasını da sağlayacaktır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Isı pompası prensip şeması [Oktay, 1997].

Böylelikle ısı pompaları ile atılan enerjiden de yararlanmak mümkündür. Fabrika ve otel, sinema gibi yerlerde atılan ısı enerjisinden yararlanılarak enerji tasarrufu sağlanmasında günümüzde tercih edilen uygulamalardan bir tanesi olmaktadır.

Öncelikle atılan ısınn enerji olarak büyüklüğü, sıcaklığı, geri kazanma yolları, ısı alınan soğuk ortam, konstruktif özellikler, atılan akışkanın fiziksel ve kimyasal özellikleri, verimlilik ve benzeri hususlar ile kullanma gayesi göz önüne alınarak çok yönlü inceleme yapılması gerekmektedir. Bazı hallerde sadece ısıtma amacıyla ısı pompası kullanılması verimli olmayabilir. Çeşitli amaçlarla hem soğutma ve hem de ısıtma gereken hallerde, ısı pompaları en uygun çözüm yolu olabilir. Kurutma tesisleri, spor tesisleri, gıda ve tarım sanayinden bazı çift yönlü uygulamaları örnek olarak verebiliriz [Hawlader ve ark, 2003].

5.1.4. Isı pompalarının sınıflandırılması

Isı pompası sistemlerinde, buharlaştırıcıların ısı çektiği ortamlara “ısı kaynakları” denir. Isı pompası için çok önemli olan bu kaynakların ısı pompası ile uyum sağlayabilmesi, kaynak sıcaklığının fazla değişmemesine ve kaynak sıcaklığının mümkün olduğu kadar büyük olmasına bağlıdır.

Kaynak sıcaklığının doğrudan kullanılamadığı yerlerde devreye ısı pompası girer. Isı pompasının en yüksek verimde çalışabilmesi, ısınn çekildiği ve atıldığı kaynakların aynı sıcaklıkta olması ile mümkündür. Isı kaynağını seçerken aşağıdaki faktörler göz önüne alınmalıdır [Kılıç, 2006].

- a) Coğrafi durum,
- b) İklim şartları,
- c) İlk maliyet,
- d) Uygunluk,

Bir ısı pompasının teknik ve ekonomik performansı, ısı kaynağının karakteristiğine bağlıdır. Sistemlerde kullanılan ısı pompaları; ideal bir ısı kaynağına, ısıtma dönemi boyunca yüksek ve fazla değişmeyen sıcaklığa, bol bulunabilirliğe, aşındırıcı ve kirlenici etkenler taşınamasına, uygun termofiziksel özelliklere, düşük yatırım ve işletim maliyetine sahip olmalıdır. Çoğu durumda ısı kaynağının bulunabilirliği, en önemli etken olmaktadır.

Isı pompalarında ısı kaynağı olarak;

- Çevre havası
- Toprak
- Deniz, nehir, göl suyu
- Yeraltı suları
- Artık sıvılar
- Artık gazlar
- Artık ısılar
- Güneş
- Kaya

kullanılabilir [Aktaş, 2007].

a) Birincil Isı Pompaları

Isıyı doğal kaynaktan çeken ısı pompalarına birincil ısı pompaları denir. Bu sistemlerin ısı kaynakları; yer altı suyu, yer üstü suyu, toprak ve dış havadır.

b) İkincil Isı Pompaları

İkincil ısı pompaları, esas olarak ısıyı geri kazanılan sistemlerden çekerler. Elde edilen bu ısı, artık ısı birikiminden bağımsız olan tüketilecek yere ihtiyacı oranda verilir. Kanalizasyon pis sularından ısı çeken ısı pompaları, ikincil ısı pompalarına bir örnektir. Isı kaynağı sıcaklığı 10 °C'den büyüktür.

c) Üçüncül Isı Pompaları

Elde edilen artık ısı direkt olarak tekrar prosese geri verilirse, örneğin ısı pompalı çamasır makinelerinde, kurutma, klima sistemi ve diğerleri, bu ısı pompası üçüncül ısı pompası olarak adlandırılır. Bu tür ısı pompaları için ısı kaynağı genelde 20 °C'den fazla bir sıcaklık gösterir.

Isı Pompalarının Proses Türüne Göre Sınıflandırılması

a) Kompresörlü Isı Pompaları

Buharlaştırıcıdan buharın emilmesi ve yoğunlaştırıcı basıncına kadar sıkıştırılması mekanik bir kompresörle yapılıyor ise, bu tip ısı pompalarına kompresörlü ısı pompaları denir.

b) Absorbsiyonlu Isı Pompaları

Soğutucu absorbsiyonlu ısı pompasında uygun bir emici eriyik sirkülasyonu ile hareket eder. Kompresörlü ısı pompalarına göre daha sessiz çalışırlar.

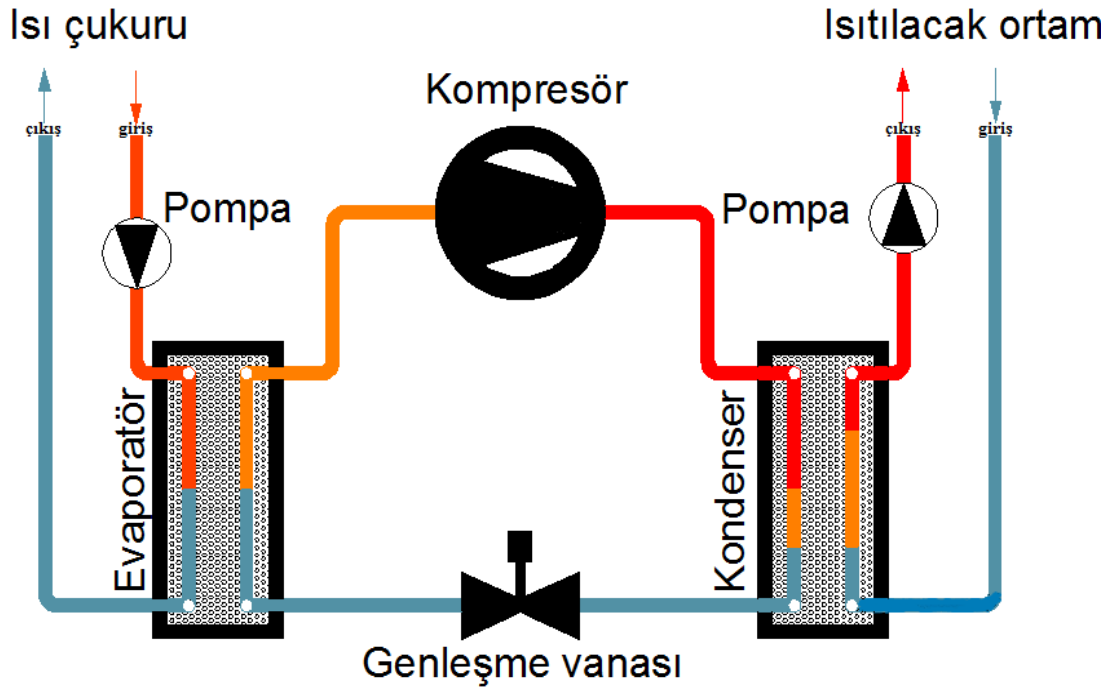
c) Buhar-Jet Isı Pompaları

Soğutucunun hareketi bir enjeksiyon vasıtasıyla gerçekleştirilir.

Isı Kaynakları ve Isı Dağıtıcı Sistemlere Göre Sınıflandırılması

Kompresörlü ve absorbsiyonlu ısı pompaları, kullanılan ısı kaynaklarına göre, örneğin toprak veya yeraltı suyu ve ısı dağıtıcı sistemlere göre, örneğin sıcak su ısıtmaları veya sıcak hava ısıtmaları olarak sınıflandırılabilirler (Şekil 5.7).

Isı pompasının veya bir ısı pompası tesisinin tanımlanmasında, ilk olarak soğuk taraftaki ısı taşıyıcısı veya ısı kaynağı, ikinci olarak sıcak taraftaki ısı taşıyıcısı yani ısı dağıtıcı sistem söylenir [Aktaş, 2007].



Şekil 5.7. Toprak kaynaklı ısı pompası sistem şeması

a) Hava / hava ısı pompası sistemi

Sistem bir ortamda havadan aldığı ısıyı başka bir ortamda yine havaya atıyorsa buna “havadan-havaya ısı pompası” denir. Söz konusu sistem dört yollu vana yardımı ile iki yönlü kullanılabilir.

b) Hava / su ısı pompası sistemi

Burada ısı kaynağı olarak havadan yararlanan ve ısı pompasının sıcak kısmında suyu dolaştıran bir ısı pompasından söz etmiş oluruz. Isıtılan bu su, örneğin döşemeden ısıtmalı bir sistem için kullanılır.

c) Hava / toprak ısı pompası sistemi

Isı atılan ya da çekilen ortamlardan birisi toprak, diğeri hava ise buna “havadan toprağa - topraktan havaya” ısı pompası denir [Aktaş, 2007].

d) Toprak / su ısı pompası sistemi

Topraktan suya ısı pompası sisteminde; asıl ısı pompası cihazı salamura / su ısı pompası, ısı kaynağı; toprak ve ısı pompasının sıcak kısmındaki ısı taşıyıcısı sudur. Bu ısı pompasının soğuk kısmında salamura ve sıcak kısmında ise suyun dolaştırıldığını ifade eder.

e) Su / su ısı pompası sistemi

Isı atılan ya da ısı çekilen ortamların her ikisi de su ise buna “sudan - suya ” ısı pompası denir [Aktaş, 2007].

Isı Pompalarının İşletme Şekline Göre Sınıflandırılması

Isı kaynağı, cihaz türü ve ısı pompaları ile ısı pompaları tesislerinin adlandırılmasından bağımsız olarak, ısı pompalarının işletme şekline göre de sınıflandırılabilir. Çeşitli enerji taşıyıcılarıyla birçok ısı üreticilerinin kombinasyonu ile yeni sistemlerin gelişimi, bu sistemlerin karakteristiklerine göre sınıflandırılmasını gerekli kılmıştır.

Göz önüne alınan enerji taşıyıcısının sayısına bağlı olarak ısıtma tekniğinde üç çeşit işletme şeklinden söz edilir.

- a) Monovalent (Tekli) işletme sekli.
- b) Bivalent (İkili) işletme sekli.
- c) Multivalent (Çoklu) işletme sekli [Aktaş, 2007].

5.1.5. Isı pompalarında verimi etkileyen faktörler

Isı pompası sisteminde, büyük kompresörler kullanıldığında verim artmakta olup, sistemde buz çözümü (defrost) için ne kadar az enerji ve süre harcanırsa verim o kadar artmaktadır. Isı pompalarında verimi etkileyen faktörleri;

1. Seçilen kompresörün ve motorun verimi,
 2. Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu tasarımı,
 3. Buz çözümü sisteminin verimliliği
- şeklinde sıralamak mümkündür [Aktaş, 2007].

5.2. Isı Pompası Sisteminin Otomatik Kontrolü

5.2.1. Otomatik kontrol sistemi

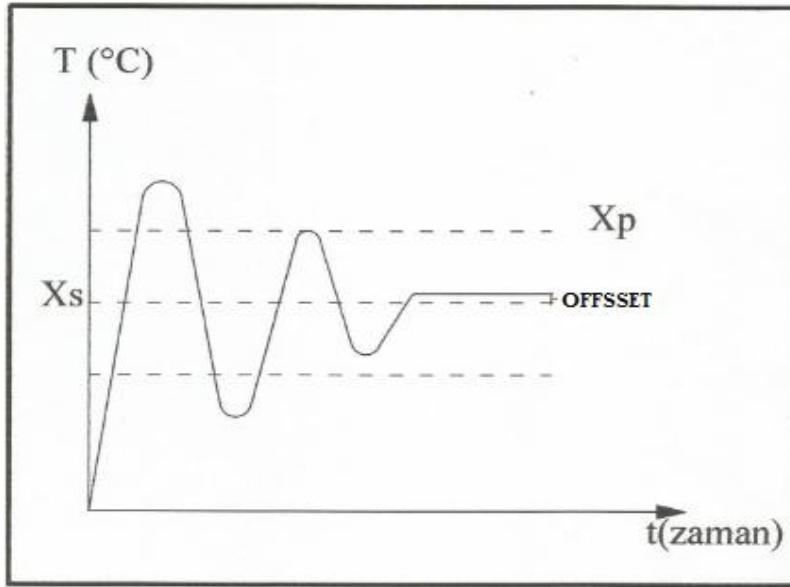
Isı pompası sistemleri karmaşık olmayan ancak çeşitli cihazlarla optimize edildiğinde ve ortam için istenilen şartları sağlaması istenildiğinde kontrolü zorlaşan sistemlerdir. Bu sorunların giderilmesi ve istenilen şartların sağlanması için devreye otomatik kontroller girer. Isı pompası sistemlerinin otomatik kontrolünde; PID kontrol ve aç-kapa kontrol sistemleri kullanılır.

İklimlendirme ve soğutma işlemlerini düzenlemede çok karmaşık kontrol sistemlerinin sıklıkla kullanıldığı bir disiplin olarak, otomatik kontrol kendini göstermektedir. Bu sistemler önceden belirlenen şartları, hiç kimsenin denetimi olmaksızın sağlarlar. Oda sıcaklığını ve bağıl nemini ayarlanan değerde tutan havalandırma santrali otomatik kontrol sistemlerine örnek verilebilir [MMO, 2003].

5.2.2. Oransal kontrol (P kontrol)

Oransal kontrolde, nihai kontrol elemanı, kontrol edilen değişkenin değişim miktarına bağlı olarak konumlanır. Kontrol elemanının oransal bandı (X_p) içinde kontrol edilen değişkenin her değerine karşılık nihai kontrol elemanının bir tek konumu vardır. Diğer bir deyişle kontrol edilen değişken ile nihai kontrol elemanı arasında doğrusal bir bağlantı kurularak gereksinim duyulan enerji ile sunulan enerji arasında bir denge oluşturulur.

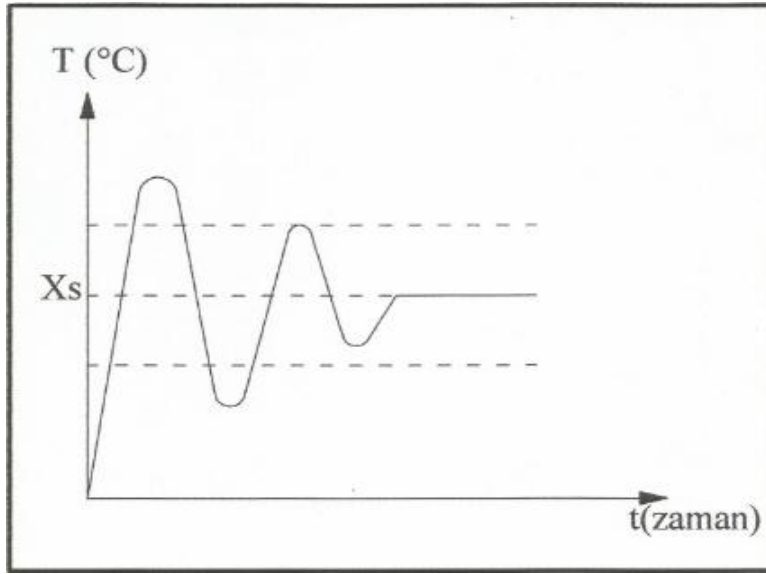
Şekil 5.8 de sembolize edilen oransal kontrol reaksiyon eğrisinden de gözüktüğü gibi, set değeri ile sistemin oturduğu ve sabit kaldığı değer arasındaki farka offset denir.



Şekil 5.8. Oransal kontrolün offset değeri

5.2.3. Oransal – integral kontrol (PI kontrol)

Şekil 5.9 da görüldüğü gibi oransal kontrolde oluşan offset'i azaltmak veya ortadan kaldırmak için kontrol cihazı integratör (integral alıcı devre) kullanılır. Ölçülen değer ile set edilen değer arasındaki fark sinyalinin zamana göre integrali alınır. Bu integral değeri, fark değeri ile toplanır ve oransal band kaydırılmış olur. Bu şekilde sisteme verilen enerji otomatik olarak arttırılır veya azaltılır ve proses değişkeni set değerine oturtulur [Değirmenci, 2003].



Şekil 5.9. Offset'i olmayan oransal-integral kontrol

Şekil 5.8 de offset'i olmayan bir oransal-integral kontrol reaksiyon eğrisinden de görüldüğü gibi, oransal-integral eğrisinin set değerinin ilk yükselme noktası, üst tepe değeri (overshoot) ve alt salınım değeri (undershoot) olarak tanımlanır. Set değeri etrafında sistem birkaç kere salınım yaptıktan sonra dengeye oturur [Değirmenci, 2003].

5.2.4. Oransal-türevsel kontrol (PD kontrol)

Oransal kontrolde oluşan offset, oransal-türevsel kontrol ile de azaltılabilir. Oransal-türevsel kontrolde set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyalinin türevi alınır. Türevi alınan fark sinyali tekrar fark sinyali ile toplanır ve oransal devreden geçer. Bu şekilde düzeltme yapılmış olur. Ancak türevsel etkinin asıl fonksiyonu üst salınım-alt salınım değerleri azaltmak içindir. Üst salınım-alt salınım değerleri azaltırken bir miktar offset kalabilmektedir [Değirmenci, 2003].

5.2.5. Oransal-integral-türevsel kontrol (PID kontrol)

Kontrolü güç, diğer kontrol türlerinin yeterli olmadığı sistemlerde tercih edilen bu kontrol türünde; oransal kontrolde oluşan offset integral fonksiyonu ile giderilir.

Meydana gelen üst tepe değerler bu kontrole türevsel etkinin eklenmesiyle en düşük seviyeye indirilir veya tamamen ortadan kaldırılır.

Gerek dengeye oturma zamanı, gerek reaksiyon zamanı ve gereksede üst ve alt salınımların en elverişli değerleri sistemden sisteme farklılık gösterbilir. Bu nedenle her sistem için P,I,D değerleri ayarları birbirinden farklı olmalıdır [Değirmenci, 2003].

6. TEORİK ANALİZ

6.1. Kuru Ağırlığın Belirlenmesi

Deneye başlamadan önce bayat ekmeklerin tamamen kurumuş haldeki ağırlığını belirleyebilmek için belli miktar bayat ekmekle ön çalışma yapılmıştır.

Ön çalışma; etüv fırınında bayat ekmeğin ağırlık değişimine göre nem kontrolünün belirlenmesi ve sabit sıcaklıkta (103 ± 2 °C) etüv fırınının içinde tutulan, belirli aralıklarla bayat ekmeklerin tartılması ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması şeklinde yapılmıştır.

Ön çalışmada alınan ölçüm sonuçları bayat ekmeğin ağırlık değişimi %1 ‘den az olana kadar devam etmiştir. Bu deneyler etüv fırınında yapılarak üç defa tekrarlanmıştır.

Üç deneyde de aynı miktar bayat ekmek yarım saatte bir kontrol etmek suretiyle fırında tutulmuş ve ölçüm sonuçları kayıt altına alınmıştır. Ağırlık ölçümleri bayat ekmeklerin nem içeriği sabit kalana kadar alınmaya devam edilmiş olup; son ölçümler arası ağırlığın % 1 ‘den az olduğu an bayat ekmek kuru kabul edilmiştir.

Ağırlık ölçümleri yapılırken her üç deneyde de Mettler Toledo marka dijital ağırlık ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Bayat ekmeklerin kuru esasa göre hesaplanan su oranı;

$$SO_{KA} = \frac{YA - KA}{KA} \quad (6.1)$$

Bayat ekmeklerdeki yaş esasa göre hesaplanan su oranı;

$$SO_{YA} = \frac{YA - KA}{YA} \quad (6.2)$$

Altı deneyden alınan numuneler ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak kuru ağırlık değeri;

Yapılan deneyler sonucunda bayat ekmeklerdeki ayrılabilir nem oranı (MR);

$$MR = \frac{M_{Ct}}{M_{CS}} \quad (6.3)$$

eşitliğinden faydalanılarak hesaplanır.

Altı farklı deneyde alınan sonuçlara göre kurutma hızları (DR);

$$DR = \frac{M_{Ctb} - M_{Cts}}{dt} \quad (6.4)$$

eşitliğinden hesaplanabilir [Aktaş, 2007].

6.1.1. Isıtma tesir katsayısı (ITK)

Kurutma sistemde, yoğuşturucudan kurutma odasına üflenen ısı miktarı ($\dot{Q}_K$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\dot{Q}_K = \dot{m}_{ia} \cdot c \cdot (T_{ia} - T_{aai}) \quad (6.5)$$

$$\dot{m}_{ia} = \rho_{ia} \cdot \dot{V}_i \quad (6.6)$$

Karışım havası sıcaklığı (T_k) sistem için aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$T_k = \% \dot{V}_1 \cdot t_1 + \% \dot{V}_2 \cdot t_2 \quad (6.7)$$

Yoğuşturucu sıcaklığı (T_K) ile buharlaştırıcı sıcaklığı (T_E) arasında ideal bir soğutma çevrimi için en yüksek ısıtma tesir katsayısı ($COP_{c,h}$) Carnot çevrimi ile aşağıdaki eşitlik ile belirlenir.

$$COP_{c,h} = \frac{T_K}{T_K - T_E} \quad (6.8)$$

Sistemde, enerji tüketimi ısı pompasının kompresöründe meydana gelmektedir. Ayrıca sistemde diğer ekipmanlar da söz konusu olabilir, örneğin fan, pompa vb.

Bir ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı ($COP_{hp,h}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$COP_{hp,h} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c} \quad (6.9)$$

Bütün sistem için ısıtma tesir katsayısının (COP_{ws}) hesaplanmasında tüketim cihazları için (kompresör, fan, pompa ve diğer ekipmanlar) aşağıdaki eşitlik kullanılır [Ceylan ve ark, 2007].

$$COP_{ws} = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{W}_c + \dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2}} \quad (6.10)$$

Termodinamiğin ikinci yasası hal değişimlerinin herhangi bir yönde değil, fakat belirli bir yönde gerçekleşebileceğini belirtir. Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarını sağlamayan bir hal değişimi gerçekleşemez.

Tersinir bir makine için Q_K/Q_E oranı T_K/T_E oranıyla yer değiştirebilir. Burada T_H ve T_L sırasıyla yüksek sıcaklıktaki ve düşük sıcaklıktaki ısı depoların mutlak sıcaklıklarıdır.

İş doğrudan ısıya dönüştürülebilir, fakat ısı'nın işe dönüştürülmesi ancak ısı makinelerinin kullanımıyla olabilir [Çengel, Y. ve Boles, M., 1991].

$$\eta_{th,tr} = 1 - \frac{T_E}{T_K} \quad (6.11)$$

Bu T_K ve T_E sıcaklıklarındaki ısı depolar arasında çalışan bir ısı makinesinin sahip olabileceği en yüksek verimdir. Tersinir soğutma makinesi ve ısı pompasının COP değerleri de benzer biçimde aşağıdaki bağlantılarla verilir:

$$COP_{SM,tr} = \frac{1}{\frac{T_K}{T_E} - 1} \quad (6.12)$$

$$COP_{IM,tr} = \frac{1}{1 - \frac{T_E}{T_K}} \quad (6.13)$$

Bunlar da T_K ve T_E sıcaklık sınırları arasında çalışan bir soğutma makinesinin veya ısı pompasının sahip olabileceği en yüksek etkinlik katsayılarıdır [Çengel, Y. ve Boles, M., 1991].

Kurutma işleminde anlık olarak değişen devir sayısı değerlerine göre kurutma odasına üflenen havanın debisi ($\dot{V}$) hesaplanırken

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.14)$$

eşitliğinden faydalanılabilir.

6.1.2. Özgül nem çekme oranı

Kurutma fırınlarında en önemli verim etkinliği 1 kg nem kaldırmak için harcanması gereken enerjidir. Özgül nem çekme oranı (SMER) olarak tanımlanan bu ifade Eş. 6.14 de olduğu gibi hesaplanabilir.

$$SMER = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_c} \quad (6.15)$$

Özgül nem çekme oranı ($SMER_{ws}$) tüm sistem için aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$SMER_{ws} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{W}_c + \dot{W}_{f1} + \dot{W}_{f2}} \quad (6.16)$$

6.1.3. Hata analizi

Tasarlanan ve imalatı yapılan deney setlerinde deneyler yapılırken, deneyi yapan kişi ne kadar tecrübeli olursa olsun ve dikkat ederse etsin, yinede deney sonuçlarında bazı hatalar görülebilir. Genel olarak hataları üç grupta toplamak mümkündür.

Birinci grup hatalar dikkatsizlikten ve tecrübesizlikten kaynaklanan hatalardır. Ölçme cihazlarının yanlış seçiminden veya ölçme sistemlerinin yanlış dizaynından ortaya çıkan hatalar bu gruba alınabilir.

İkinci grup hatalar, sabit veya sistematik olarak adlandırılan hatalardır. Bunlar genellikle tekrar edilen okumalarda görülen ve nedenleri çoğunlukla bilinmeyen hatalardır [Genceli, 2000].

Üçüncü grup hatalar ise rasgele hatalardır. Bunlar ise deneyi yapan elemanların değişmesinden, deneyi yapanların dikkatlerinin azalmasından, elektrik geriliminin değişmesinden, ölçüm cihazlarının ısınmasından dolayı ortaya çıkan elektronik

ölçme aletlerindeki salınımlardan veya ölçme aletlerindeki histerisiz olaylarından kaynaklanabilir. Bu durumlardan ortaya çıkan hatalar dikkate alınarak toplam hata

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.17)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [Akpınar, 2005].

Tasarlanan bu kurutma sisteminden alınan deney sonuçları, yukarıdaki eşitliklerden faydalanılarak hesaplamalar bu eşitlikler doğrultusunda yapılmış ve sonuçlara ulaşılmıştır.

6.1.3. Su aktivitesi

Gıda maddelerinin hasattan veya üretimden başlayarak, tüketimine kadar kalitelerinin korunması büyük önem taşımaktadır. Gıdaların muhafazasında ve kalitelerinin korunmasında içerdiği suyun rolü büyük olmaktadır. Bilindiği gibi bütün gıda maddeleri çeşitli oranlarda su içermekte ve yüksek su içerikli gıdaların kalitesi ve güvenliği, en iyi şekilde suyun kimyasal, biyokimyasal ve mikrobiyolojik etkilerini kontrol altında tutularak korunabilmektedir [Özay ve ark., 1993].

Su aktivitesi (a_w) gıdalarda kolaylıkla ölçülebilen bir fizikokimyasal özellik olup, gıda teknolojisinde önemli bir parametredir. Nemden farklı olarak a_w , gıda kalitesinde; fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kararlılığı belirlemektedir. Su aktivitesi değeri aşağıdaki eşitlik ile;

$$a_w = \left(\frac{f_w}{f_w^o} \right) \approx \left(\frac{p_w}{p_w^o} \right) \quad (6.18)$$

hesaplanır [Certel ve Ertugay, 1996].

7. DENEY SETİ VE KURULUMU

7.1. Deney Setinin Hazırlanması

Kurutmadaki önemli unsurlar; kurutma havası sıcaklığı, kurutma havası hızı ve kurutma havası bağıl nemidir. Bu unsurların istenilen şartlarda kontrol edilmesi ısı pompası destekli kurutma sisteminde kontrol sistemi ile olması düşünülmüştür. Oransal, integral, türevsel (PID) kontrol sistemi; sisteme girilen sıcaklık set değerinin kurutma odası giriş sıcaklığı ile fazla fark olmadan kurutma odasını set edilen değerde tutan bir kontrol sistemidir. PID kontrol sisteminde kurutma havasının sıcaklık değerleri kontrol cihazlarına girilmektedir. Bu sistemin bir özelliği de girilen bant değerlerinde otomatik kontrol yapılarak sistemi çalıştırabilmesidir.

Isı pompası destekli PID kontrollü kurutma fırının tasarlanmasında kurutulacak ürünlerin özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Kurutulan ürünlerdeki nem içeriği azaldıkça ürün yüzeyindeki sıcaklık değeri artacaktır. Kurutulan ürünün sıcaklık değerinin artmasından dolayı oluşabilecek bozulmaların (kararma, tad değişmesi, vb.) olmaması için kurutma havası sıcaklığı PID ve kurutulan ürün yüzey sıcaklığı ise aç-kapa kontrollü olarak kurutma fırını tasarlanıp imal edilmiş ve farklı şartlarda deneyler yapabilmek için üç modda sistem geliştirilmiştir.

Otomatik kontrol sistemli fırın ile ürünün yapısına uygun sıcaklık değeri (35-50°C arası) ayarlanabilmekte bu da ürünün istenilen şartlarda kurutulacağı düşünülmektedir. 50°C'nin üstünde yapılacak kurutma uygulamalarında ek ısıtıcıya ihtiyaç duyulacaktır.

Tasarlanıp imalatı yapılan kurutma sistemi kompresör, yoğuşturucu (kondenser), buharlaştırıcı (evaporatör), kurutucu (dryer), kılcal boru, fan, anemometre (hız ölçer), ağırlık ölçer (load-cell), kurutma odası ve otomatik kontrol cihazlarından oluşmaktadır.

Bayat ekmek kurutulması üç sistemde deneysel olarak analiz edilecektir. Bu deneysel analiz üç farklı düzen ile gerçekleştirilmiştir. Birinci sistemde bayat ekmeklerden geçirilen sıcak hava dar bir kesitten tahliye edilmeye çalışılmıştır. İkinci sistemde ise tahliye edilen hava ısı pompası sisteminin ısı kaynağı olmuştur. Üçüncü sistemde yapılan ısı ve psikrometrik analizler sonucunda kurutma havası, bayat ekmeklerden geçtikten sonra üç parçaya ayrılmıştır; havanın %40'ı evaporatöre, %35'i tekrar kullanılmak üzere kurutma odası giriş fanına ve %25'i de dışarı atılacağı tespit edilmiştir. Üç sistemde de amaç enerji tüketimlerini ve kurutma sürelerini analiz etmektir. Her bir sistem iki ayrı modda 40°C ürün yüzey – 45°C kurutma havası ve 45°C ürün yüzey - 50°C kurutma havası sıcaklıklarında denenmiştir. Böylece altı farklı deney yapılarak en elverişli tasarım belirlenmeye çalışılmıştır.

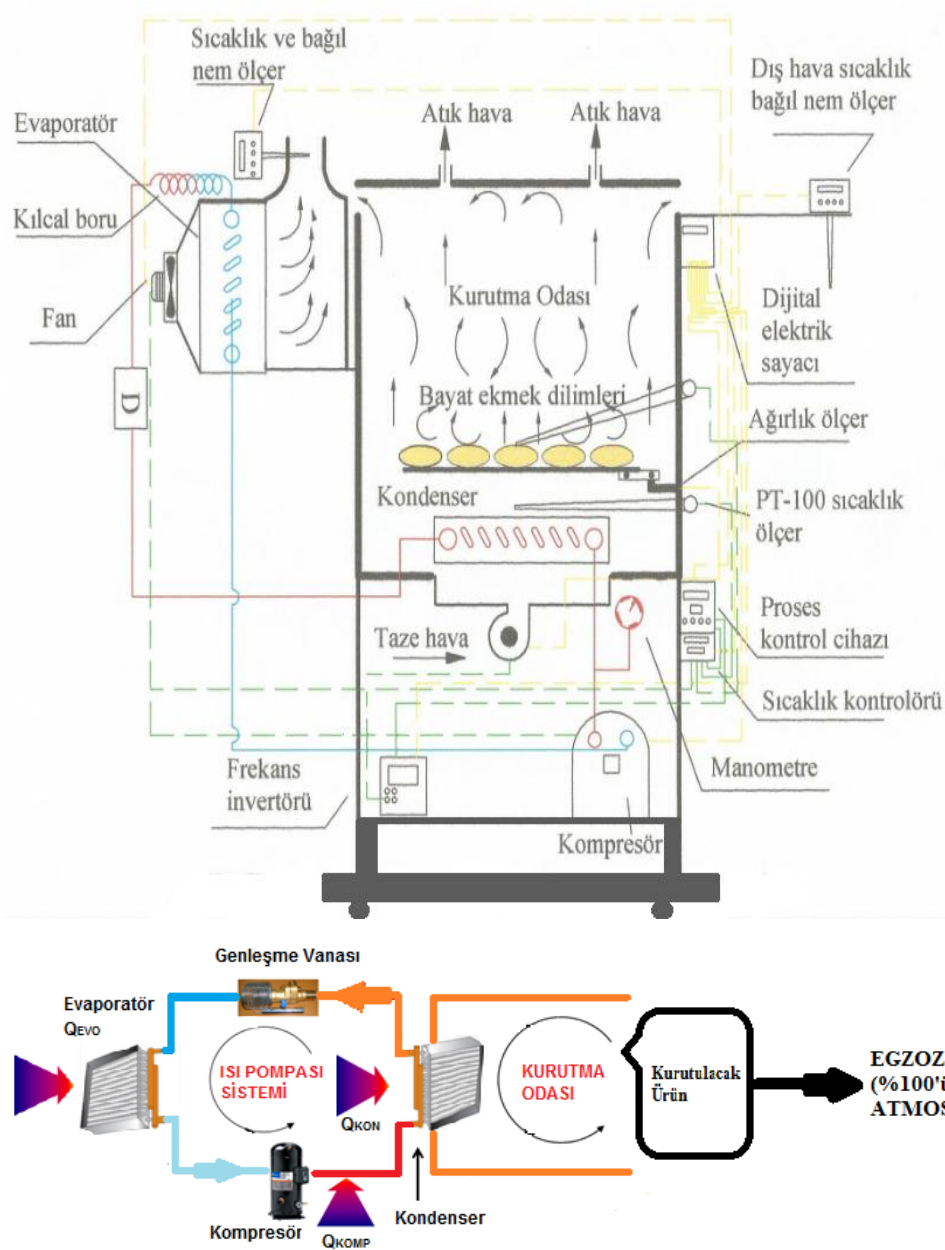
Kurutma sisteminde PID kontrol cihazında ayarlanan sıcaklık değeri ile üfleme havası sıcaklığı set edilen değere en yakın sıcaklıkta tutulmaktadır. Hava hızını anemometre ile bağlı nem değeri ise termohigrometre yardımı ile ölçülmüştür. Kurutma sisteminde süreç kontrol (proses kontrol) cihazından set edilen sıcaklık değerine göre salyangoz fanın devri ayarlanacaktır. Set edilen değer termokupl ile ölçülen sıcaklıktan büyükse salyangoz fandan üflenlen havanın debisi azalacaktır. Böylelikle daha az debideki dış hava kondenserden geçirilerek sıcaklığın, set edilen değere ulaşması sağlanacaktır. Set edilen değer termokupl ile ölçülen sıcaklıktan küçükse salyangoz fandan üflenlen havanın hızı artmaktadır. Dolayısı ile daha fazla debideki dış hava kondenserden geçirilerek termokupl ile ölçülen sıcaklığın set edilen değere ulaşmasını sağlamaktadır. Bu uygulama üç sistemdede aynı şekilde gerçekleşmiş, sadece egzoz edilen havanın şekilleri ile oynanarak sistemin daha verimli olması ve daha az enerji tüketmesi sağlanacaktır. Çizelge 7.1 de sistem ekipmanlarının çalışma şekli görülmektedir.

Çizelge 7.1. Sistem ekipmanlarının çalışma şekli

Cihaz	Kullanım amacı
Kompresör	Kurutulan ürünün yüzey sıcaklığına bağlı olarak aç-kapa döngüsüyle kontrol edilmiştir.
Fan Devri (Hava Debisi)	Proses kontrol cihazına girilen sıcaklık değerine göre kurutma havası sıcaklığının sağlanması için fan devri PID olarak kontrol edilmiştir.
Elektronik Sayaç (Enerji Tüketimi)	Deneyler esnasında anlık ve enerji tüketiminin ölçülmüştür.
Ağırlık (Kütle Değişimi)	Yük hücresi ile ürünlerin kütle değişimi anlık gözlemlenmiş ve değerler kayıt altına alınmıştır.

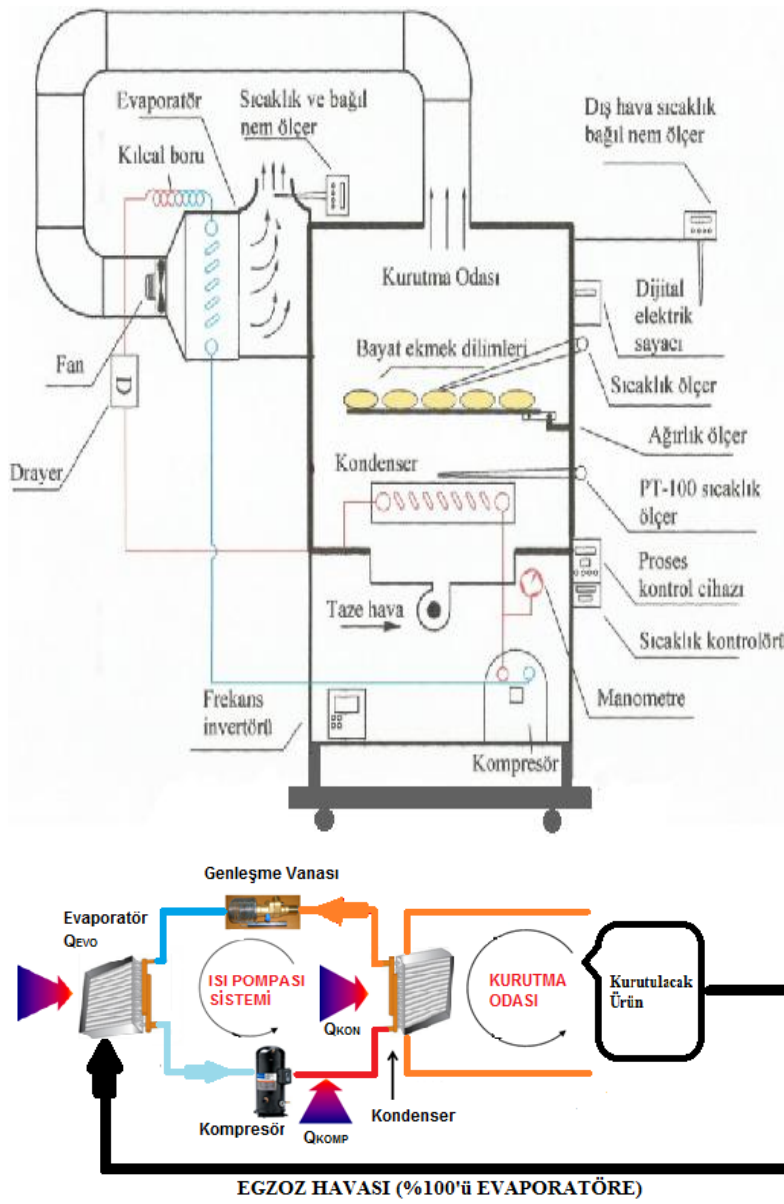
Isı pompası destekli PID kontrollü bayat ekmek kurutma fırını Şekil 7.1, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 de üç farklı şekilde görülmektedir. Isı pompası sisteminde soğutkan olarak R-134a gazı kullanılmıştır.

Şekil 7.1 de ısı pompalı, kurutma havası sıcaklığı PID olarak kontrol edilen ve aynı zamanda ürün yüzey sıcaklığı aç-kapa olarak kontrol edilen fırınının tasarımında görüldüğü üzere; kurutma odası çıkış havası, 1 cm çapındaki altı adet delik yardımıyla ve kapak kenarlarından 0,5 cm boşluk bırakılarak tahliye edilmesi amaçlanmıştır. Böylelikle kurutma havasının ürüne daha fazla nüfuz etmesi düşünülmüştür.



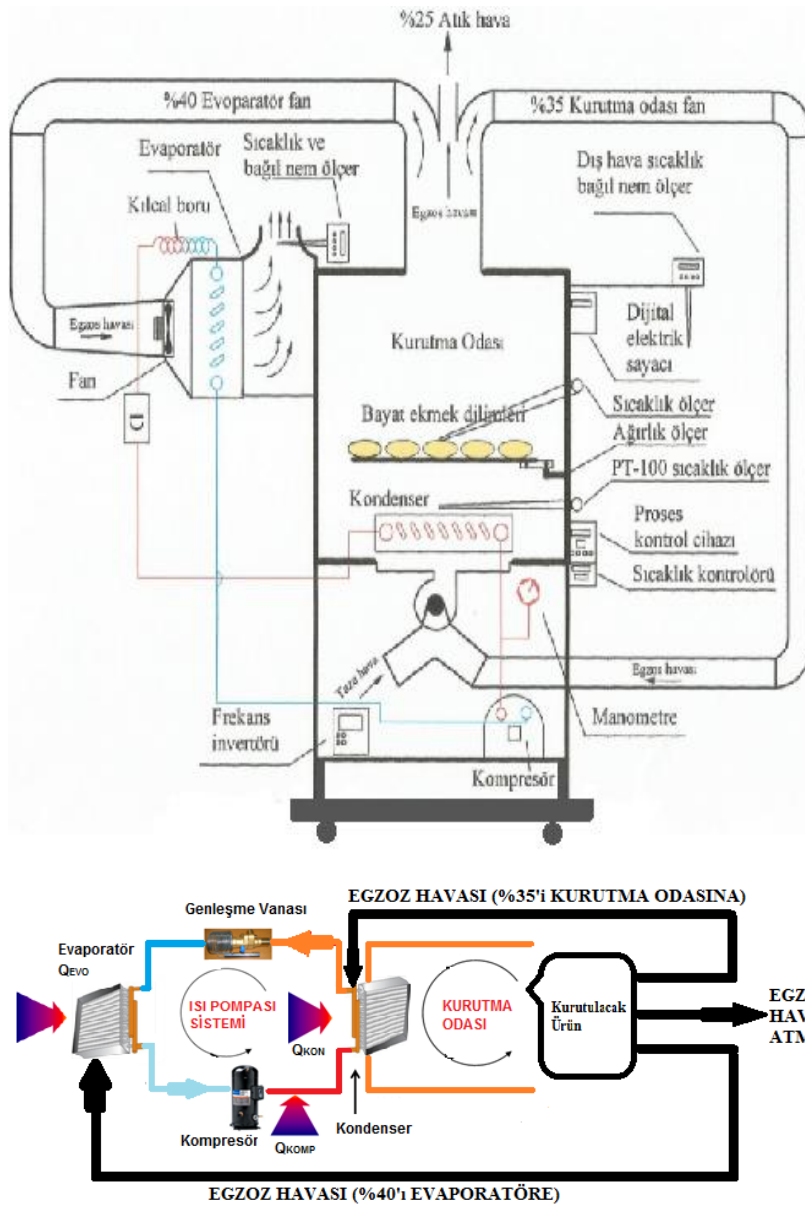
Şekil 7.1. Isı pompalı bayat ekmek kurutma fırını sistem-1

Şekil 7.2 de ısı pompalı kurutma fırınında görüldüğü üzere; kurutma odası çıkış havasının tamamı buharlaştırıcı yüzeyine 10 cm çapında fleks kanal ile gönderilmiştir. Bu tasarımda sistemdeki buharlaştırıcıya kurutma odası çıkış havası gönderilerek buharlaştırıcının ısı çekme potansiyeli artırılmıştır. Buharlaştırıcıdaki soğutucu akışkan kompresöre daha sıcak gittiği için sistem daha kısa sürede rejime girmiştir. Bu sistem tasarımında, kurutma odası çıkış havasının %100'ünden faydalanılmasından dolayı sistemin daha verimli hale geleceği düşünülmüştür.



Şekil 7.2. Isı pompalı bayat ekmek kurutma fırını sistem-2

Şekil 7.3 de ısı pompalı kurutma fırınında görüldüğü üzere; kurutma odası çıkış havasının bir kısmı (% 40) buharlaştırıcıya, bir kısmı (% 25) atmosfere ve bir kısımda (% 35) tekrardan kurutma odasına gönderilmiştir. Bu karışım oranları yapılan psikrometrik analizler sonucunda belirlenmiştir. Bu sistem tasarımında buharlaştırıcının ısı çekme potansiyeli sistem 1'e göre artarken sistem 2'ye göre biraz daha azalmış olduğu düşünülmüştür. Hesaplamalar yapılarak kurutma odası çıkış havası belirli çaplardaki kanallar yardımıyla, belirli hızlarda ve belirli oranlarda gönderilmesi planlanmıştır.



Şekil 7.3. Isı pompalı bayat ekmek kurutma fırını sistem-3

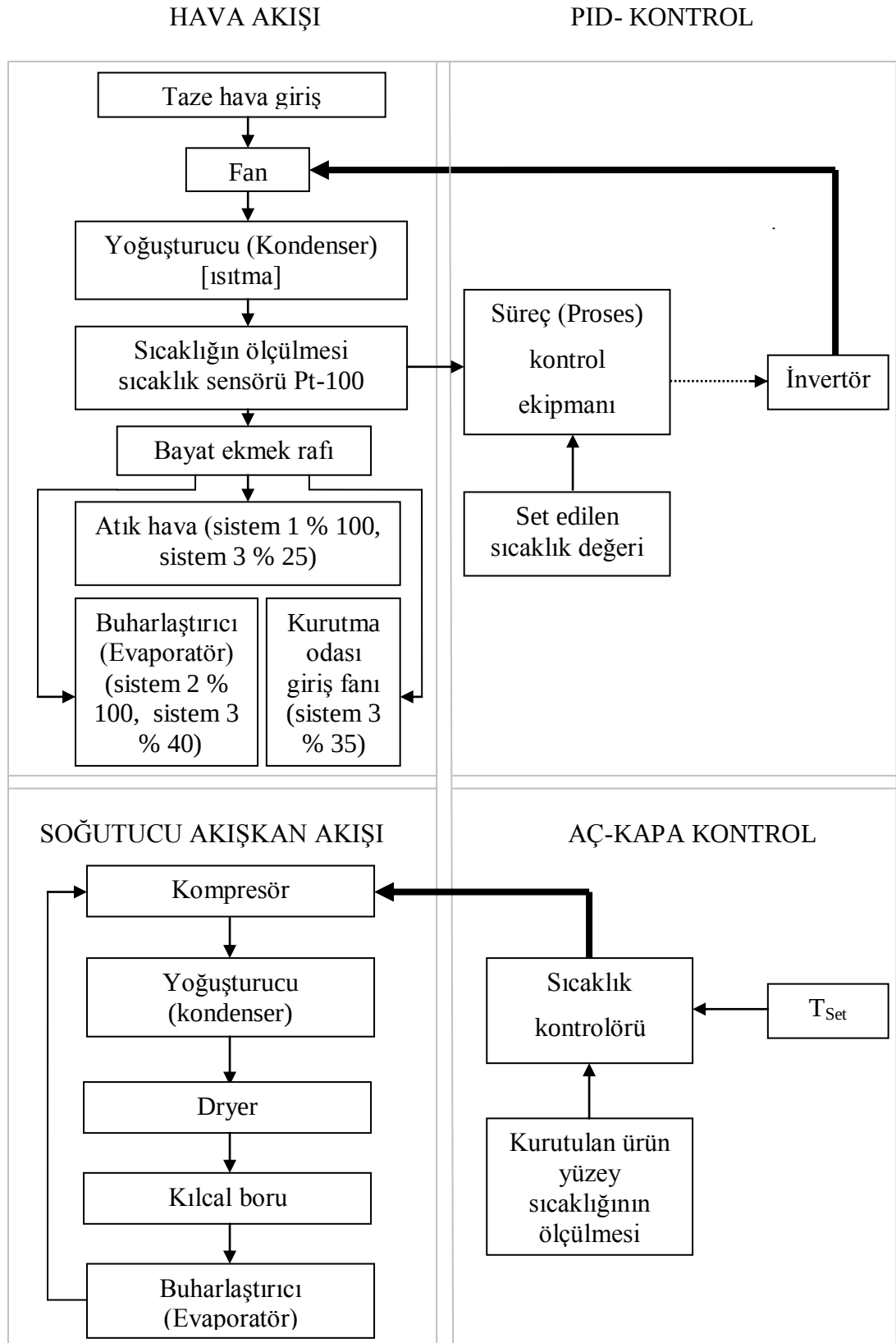
Isı pompalı kurutma sisteminde kurutma odası, üfleme havası sıcaklığı PID kontrol ve ürün yüzey sıcaklığı aç-kapa kontrol edilerek yapılan deneylerde uygun üfleme havası sıcaklığı ve ürün yüzey sıcaklığı kontrol altına alınmıştır. Ürün ağırlık değişimleri kurutma sistemi durdurulmadan ağırlık ölçer yardımıyla kayıt altına alınmıştır.

Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri Çizelge 7.2 de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Isı pompalı kurutma sisteminin imalatında kullanılan ekipmanlar ve teknik özellikleri

Kullanılan cihaz	Teknik Özellikleri
Kompresör	1/3 HP, R 134a, 220-240 V
Buharlaştırıcı	1/3 HP
Yoğuşturucu	1/2 HP
Frekans invertörü	3 fazlı indüksiyon motorları için, AC değişken hız sürücüsü, Güç aralığı 0,25 kW - 4 kW, 0,33 HP - 5 HP
Dijital elektrik sayacı	Geniş aralıklı hassas ölçüm, monofaze, çok tarifeli, 50Hz, 220V
Proses kontrol ekipmanı	PC440, 4 W,100-240V AC, Transmitter kaynağı 24V DC, PID kontrol.
Salyangoz fan	125 W, 350 m ³ /h, 2600 d/d, 50 Hz, 230 V IN:0,45A

Şekil 7.4 de görüldüğü üzere, sistemde kurutma odası üfleme havası sıcaklığını oransal-integral-türevsel (PID) olarak ve ürün yüzey sıcaklık değerini ise aç-kapa olarak kontrol edilebilecektir,



Şekil 7.4. Kurutma havası ve soğutucu akışkan akışının, PID ve aç-kapa kontrol sistem şeması

Şekil 7.4 de görüldüğü gibi sistemde hava ve soğutucu akışkan akışının, sırasıyla PID ve aç-kapa kontrol sisteminin ilişkisi gösterilmiştir. Ölçülen sıcaklık değeri ve set edilen sıcaklık değeri arasındaki farka göre invertör salyangoz fanı kumanda etmektedir. Kurutma sisteminde kurutma havası sıcaklık set edilen değerde tutulmaya çalışılacaktır. Böylelikle sistemde kurutma esnasında olabilecek sıcaklık dalgalanmalarına sebebiyet verilmeyecektir. Sistemde ölçülen ürün yüzey sıcaklık değeri ile set edilen sıcaklık değeri birbirine eşit olduğunda, sıcaklık kontrolörü tarafından kompresör durur, böylelikle ekmek yüzey sıcaklığı istenilen değerin üzerine çıkamaz.

Hava akışı diyagramında da görüldüğü gibi, set edilen sıcaklık değerindeki kurutma havası ürün üzerinden geçtikten sonra; 1. sistemde tamamen egzoz edilecek, 2. sistemde egzoz havasının tamamı evaporatör yüzeyine gönderilecek, 3. sistemde ise egzoz havası belirli oranlarda üç'e ayrılıp fan, evaporatör ve egzoz kanalına gönderilmiştir.

PID ve aç-kapa kontrol sisteminde istenilen hava debisi ve sıcaklık değeri kontrol edilebilmektedir. Kurutma sisteminde kurutma havası sıcaklığına bağlı hava debisi istenilen düzeyde arttırılıp azalmaktadır.

8. DENEYLERİN YAPILIŞI

8.1. Kuru Ağırlığın Belirlenmesi

Deneylere başlamadan önce temin edilen bayat ekmeğin kuru ağırlığının belirlenmesi için ön hazırlık işlemleri yapılmıştır. Kuru ağırlığın belirlenmesindeki usul, bayat ekmeklerin sıcaklığının kontrol edilebilen bir etüv fırınında (103 ± 2)°C de, çevre (atmosfer) basıncında kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak kuru madde miktarının belirlenmesidir.

Fırından taze olarak alınan ekmekler 15 mm genişliğinde kestirilerek 2-3 gün arasında kapalı poşet içerisinde dolapta bekletilip bayatlatıldıktan sonra kuru ağırlığı belirlenmek üzere hazır hale getirilmiştir, daha sonra aşağıdaki işlem sırası izlenmiştir.

- a) 15 mm olarak kesilip hazır hale getirilen bayat ekmekler etüv fırınında (103 ± 2)°C’ da kurutulmaya başlanmıştır.
- b) 3 saatlik kurutma periyotları sırasınca ağırlık değişimi her 30 dakikada bir takip edilmiş ve değerler kaydedilmiştir. En son iki ölçüm arasındaki fark %1’den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ağırlık ölçümleri Mettler Toledo marka dijital ağırlık ölçüm cihazı ile yapılmıştır. İki ölçüm arasındaki fark %1’den daha az olduğu durumda bayat ekmekler kuru kabul edilmiştir.
- c) Bu işlem sırası yapılan üç deneyde de uygulanmıştır.

Bayat ekmeğin kuru baza göre başlangıç nem miktarı Eş. 6.1 ile;

$SO_{KA} = 0,55$ gsu/g kuru madde olarak belirlenmiştir.

Bayat ekmeğin yaş baza göre başlangıç nem miktarı Eş. 6.2 ile;

$SO_{YA} = 0,35$ gsu/g yaş madde olarak belirlenmiştir.

8.2. Bayat Ekmeğın Kurutulması

Başlangıç nem miktarları belirlenmiş olan bayat ekmeklerin, ısı pompalı kurutucuda kurutma kabineine yerleştirilerek, kurutma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kurutma sisteminde bayat ekmekler için uygun kurutma havası sıcaklık değerleri literatüde yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak, kurutma havası sıcaklık değerleri 45°C, 50°C ürün yüzey sıcaklıkları 40°C ve 45°C olarak belirlenmiştir. Sistemde istenilen kurutma havası sıcaklığına bağlı olarak fan devrini PID kontrol ile sağlanmakta ve istenilen en yüksek ürün yüzey sıcaklığına bağlı olarak da kompresör aç-kapa olarak kontrol edilmektedir. Bu kontrol cihazından sıcaklıklar ayarlanarak kurutma işlemi başlatılmıştır. PID ve aç-kapa kontrol cihazın ekranına girilen ve ekran üzerinden takip edilen değerler aşağıda sıralanmıştır.

- Dış hava sıcaklığı ve bağıl nem (°C, φ (%))
- Ürün ağırlığı (g)
- Evaporatör sıcaklık ve basınç değeri (°C, bar)
- Kondenser sıcaklık ve basınç değeri (°C, bar)
- Set edilen sıcaklık değerleri (°C)
- Kurutma odası girişinde havanın sıcaklığı ve bağıl nemi (°C, φ (%))
- Kurutma odasından çıkışta hava sıcaklığı ve bağıl nemi (°C, φ (%))
- Evaporatörden çıkan havanın sıcaklığı ve bağıl nemi (°C, φ (%))

Kurutma işlemi sırasında bayat ekmeklerdeki ağırlık değişimi her on dakikada bir ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Yapılan deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri Çizelge 8.1 de kullanılan cihazlar verilmiştir. Bu cihazlarla yapılan ölçümler sırasında oluşabilecek toplam hatalar Eş. 6.17 ile belirlenmiştir.

Çizelge 8.1. Deneyler esnasında kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri

Kullanılan cihaz	Teknik Özellikleri	Toplam hata
Dijital tartı	En yüksek ölçülebilecek miktar 6100 g, ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ g.	$\pm 0,014$ g
Bağıl nem ve sıcaklık sensörü	0-100% bağıl nemde ± 2 % ölçüm hassasiyeti, $-40, +120$ °C sıcaklıkta ± 1 °C ölçüm hassasiyeti, çalışma sıcaklığı $-10, +60$ °C.	$\pm \% 0,022$ $\pm 0,173$ °C
Yük hücresi	L6D model, Nominal çıkış (mV/V) 2.0, 5-12 V, çalışma sıcaklığı -35 $+60$ °C, hassasiyeti $\pm \% 0,02$	$\pm \% 0,035$ g
Su aktivitesi ölçüm cihazı	Su aktivitesi a_w değeri 0–1 arasında olduğunda ölçüm hassasiyeti $\pm 0,001$.	$\pm 0,002$
Isıl çift	Hassasiyeti $\pm 0,1$ °C	$\pm 0,15$ °C
Hava hızı ölçüm cihazı	Sıcaklık $-20, +70$ °C, hız 0-20 m/s ölçüm hassasiyeti $\pm 0,01$ m/s, $\pm 0,1$ °C.	$\pm 0,02$ m/s

Deney setinde elektronik dijital elektrik sayacı kullanılarak deneyler esnasında harcanan enerji miktarı ölçülmüştür. Şekil 8.1 de elektronik dijital elektrik sayacı görülmektedir.



Şekil 8.1. Elektronik dijital elektrik sayacı

Deney setinin belirli kısımlarına yerleştirilen sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazları ile deneyler esnasında ölçülen bağıl nem ve sıcaklık değerleri not edilmiştir. Şekil 8.2 de havanın bağıl nemi ve sıcaklık ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 8.2. Sıcaklık ve bağıl nem ölçüm cihazı

8.3. Kurutma İşleminin Sonlandırılması

Yapılan kurutma işleminde üç ayrı sistem için deneyler; 40 °C ürün yüzey, 45 °C kurutma havası sıcaklığında ve 45 °C ürün yüzey, 50 °C kurutma havası sıcaklığında

ve ortalama 0,36-0,54 m/s arasında kurutma havası hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneylerde aşağıdaki hususlar da göz önünde bulundurularak, kontroller yapılmış ve kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Isı pompalı kurutucuda kurutulan bayat ekmeklerin son nem içeriği Eş. 6.1 den hesaplanarak bulunmuştur.

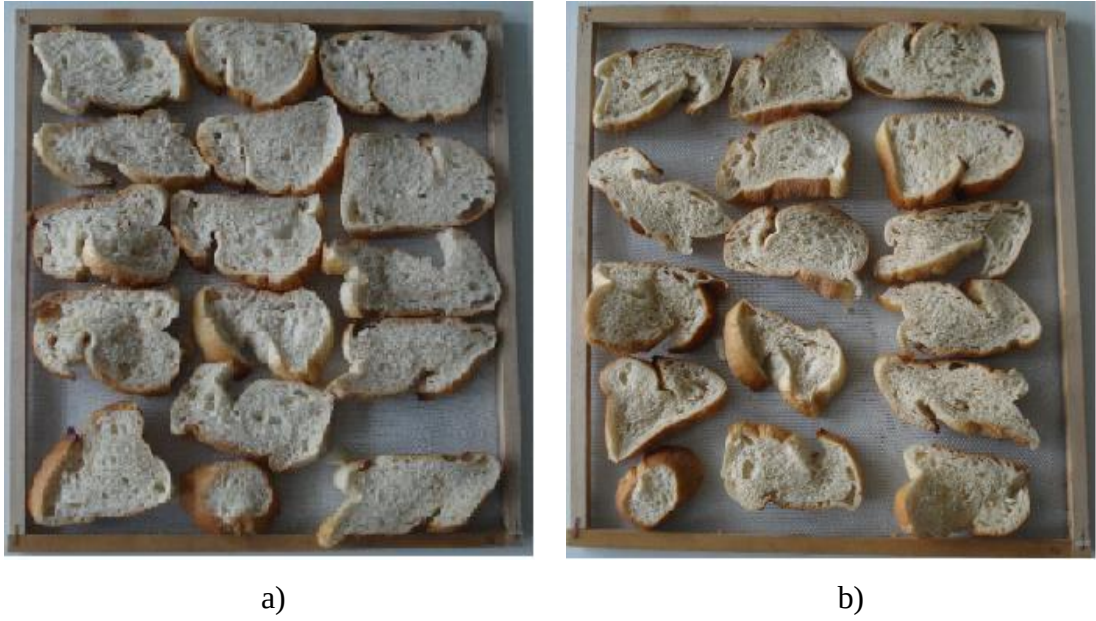
- Bayat ekmeklerde yapılan duyu analizi
- Su aktivitesi ölçüm değerleri



Şekil 8.3. Su aktivitesi ölçüm cihazı

Şekil 8.3 de görüldüğü gibi, kurutulan bayat ekmekler ufalandıktan sonra 25 °C oda sıcaklığında, altı deneyden elde edilen kurutulmuş bayat ekmeklerin su aktivitesi değerleri üç kez ölçülmüştür. Bu üç değerın ortalaması alınarak her bir deney için ölçüm sonuçları Çizelge 9.1 de verilmiştir.

Bayat ekmeklerin kurutma sonrası duyu analizi yapılmıştır. Yapılan duyu analizleri sonucunda görünümünde herhangi bir renk değişimi, tadında ve kokusunda herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir. El ile yapılan duyu analizi de kurutulmuş ekmekler kırılgan yapıya geldiği görülmüştür. Kurutma öncesi ve sonrası elde edilen bayat ekmeklere ait resimler Şekil 8.4 de verilmiştir.

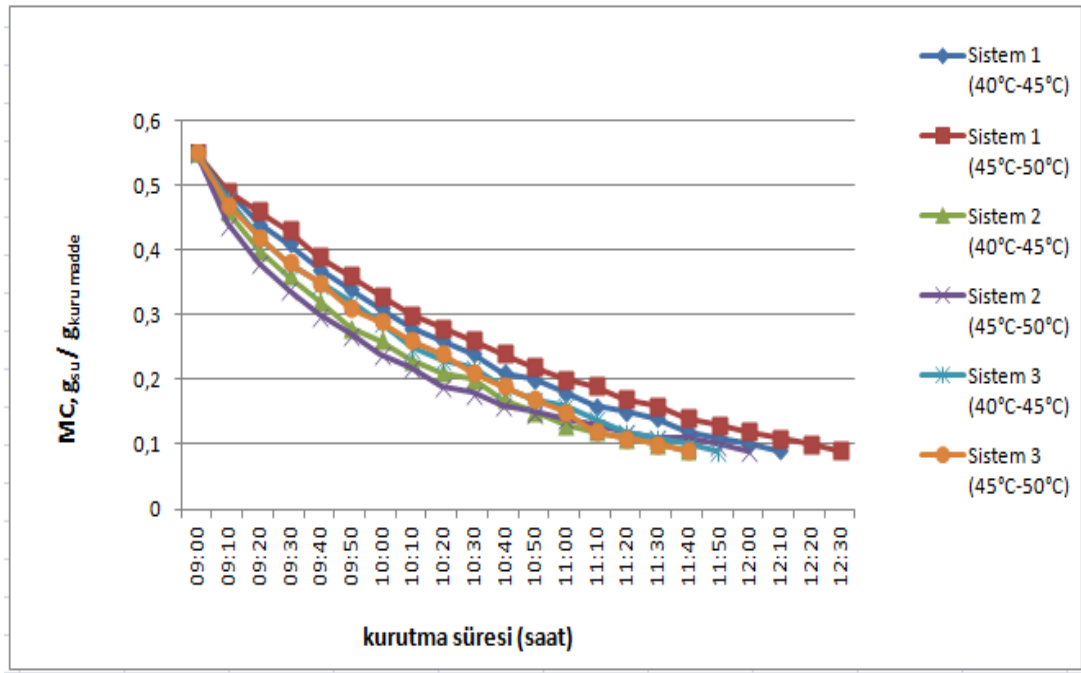


Şekil 8.4. Bayat ekmeklere ait kurutma öncesi ve kurutma sonrası resimler
a. Kurutma öncesi, b. Kurutma sonrası

Şekil 8.4 de görüldüğü gibi bayat ekmek dilimleri kurutulduktan sonra gözenek yapılarının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bayat ekmek dilimlerinin içinde bulunan nemin çekilmesinden dolayı gözenek yapılarının büyüdüğü görülmüştür.

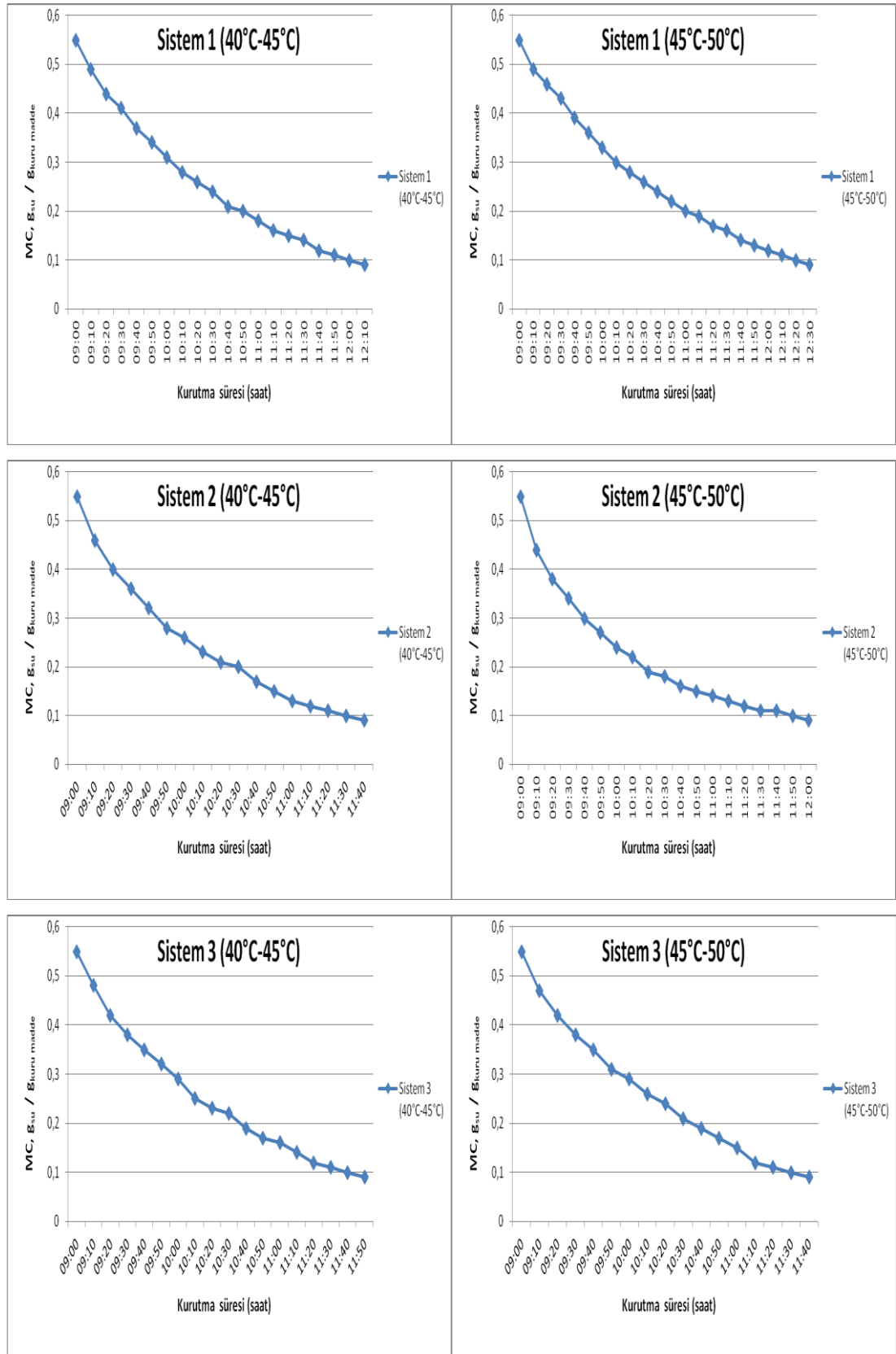
9. DENEY SONUÇLARI

Bayat ekmeklerin başlangıç nem miktarı kuru baza göre Eş. 6.1 den hesaplanarak $0,55 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$ olarak bulunmuştur. Yapılan deneyler süresince bayat ekmeklerin kuru baza göre nem miktarının değişimi Şekil 9.1 de ve Şekil 9.2 de gösterilmiştir.



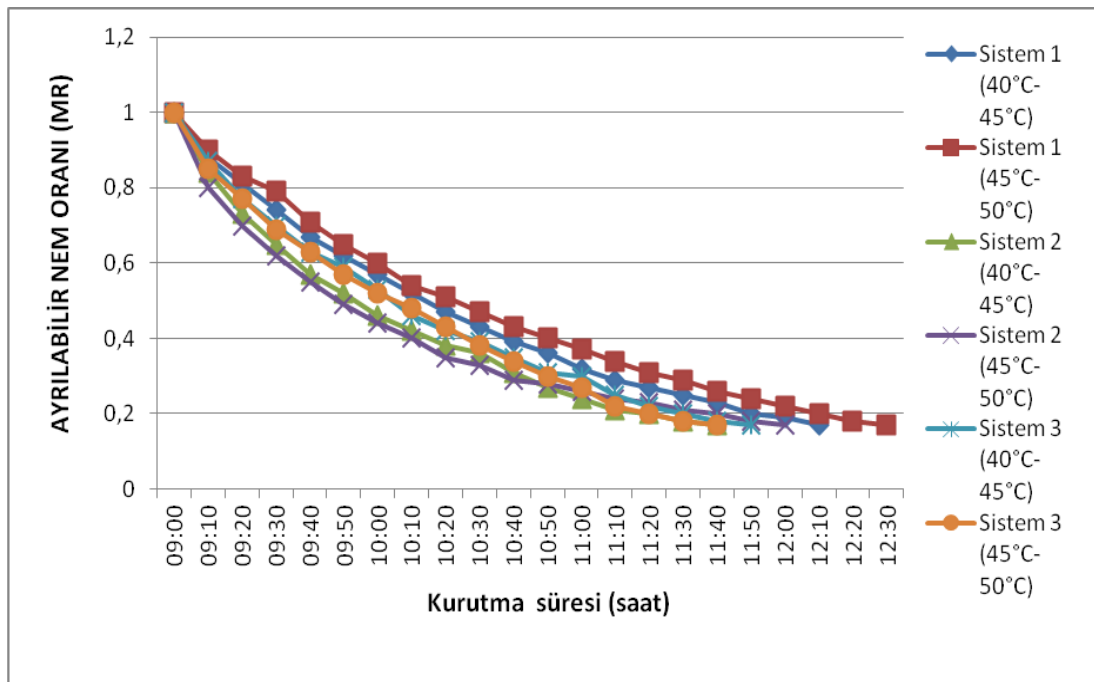
Şekil 9.1. Nem miktarının kurutma süresine göre değişimi

Bayat ekmek dilimleri farklı günlerde, tasarlanan kurutucular kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Sistem 1 (40 °C - 45 °C) de 3,17 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$, sistem 1 (45 °C - 50 °C) de 3,5 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$, sistem 2 (40 °C - 45 °C) de 2,67 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$, sistem 2 (45 °C - 50 °C) de 3 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$, sistem 3 (40 °C - 45 °C) de 2,83 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$, sistem 3 (45 °C - 50 °C) da 2,67 saat'lik kurutma işleminde $0,09 \text{ g}_{\text{su}} / \text{g}_{\text{kuru madde}}$ nem miktarına indirilmiştir.

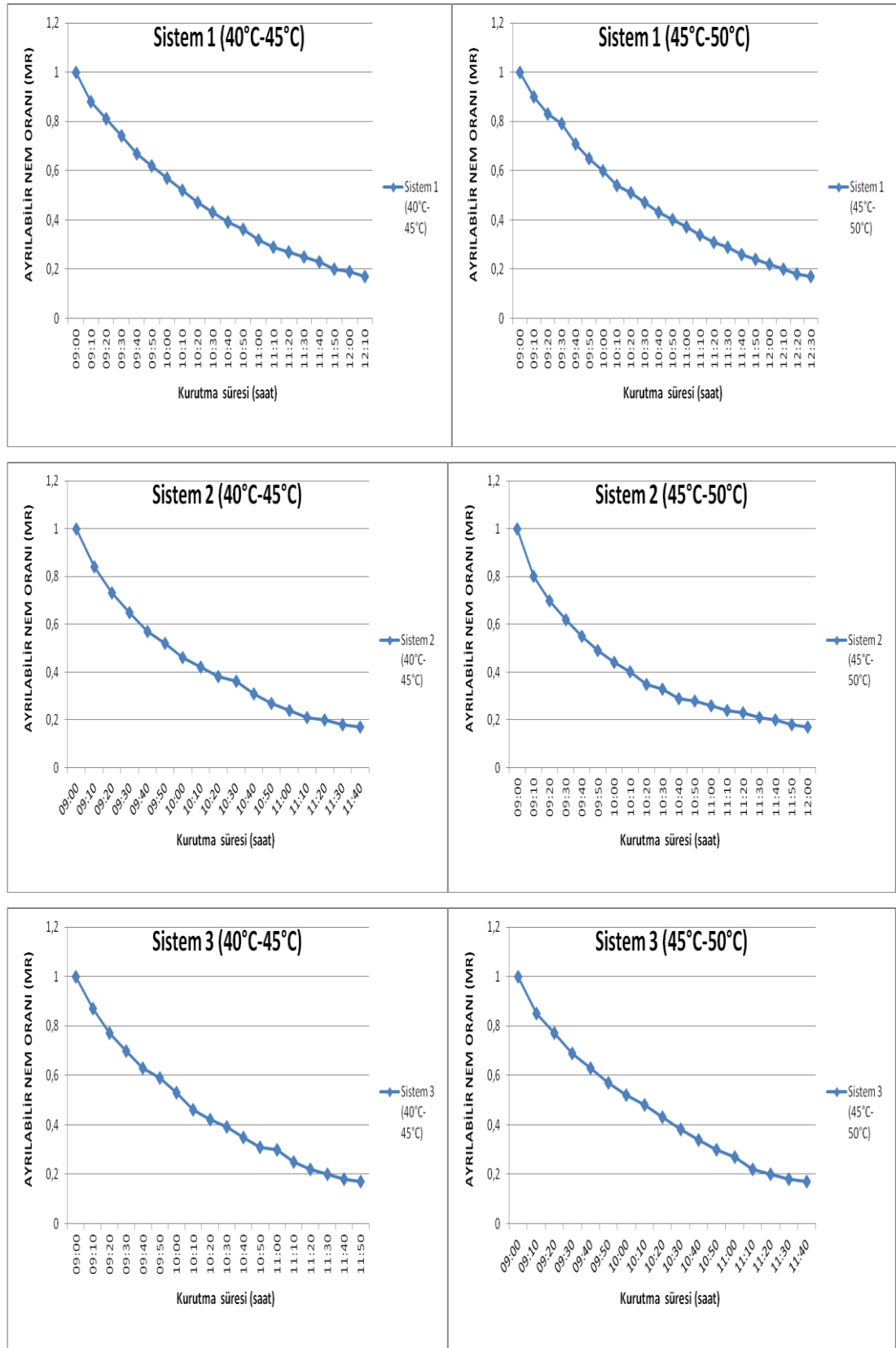


Şekil 9.2. Sistemlerin ayrı ayrı nem miktarlarının kurutma süresine göre değişimi

Yapılan deneyler sonucunda bayat ekmeklerdeki ayrılabilir nem oranının kurutma süresine göre değişimleri Eş.6.3 den hesaplanarak Şekil 9.3'te ve Şekil 9.4'te gösterilmiştir. Elde edilen verilerin sonuçlarına göre ürünlerdeki ayrılabilir nem oranı değişimleri birbirlerine yakın iken sistem 2 (45°C-50°C) deneyinde başlangıçta ayrılabilir nem oranı değişiminin diğerlerine göre daha hızlı olduğu kurutma süresinin sonuna doğru da sistem 3 (45°C-50°C) deneyi ayrılabilir nem oranı değişiminin hızlandığı görülmektedir.



Şekil 9.3. Kurutma süresine göre ayrılabilir nem oranı değerleri



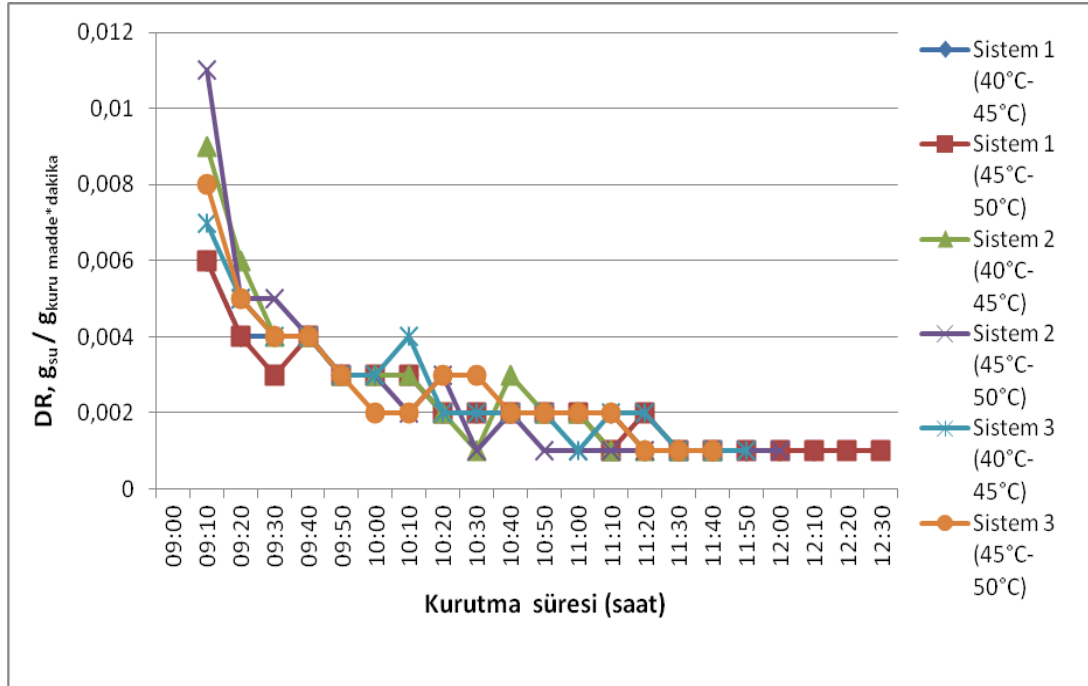
Şekil 9.4. Kurutma süresine göre ayrılabilir nem oranlarının ayrı ayrı gösterimi

Yapılan deneyler sonucunda bayat ekmeklerin kurutma süresine göre kurutma hızı değerlerinin değişimi Eş. 6.4 ile hesaplanarak Şekil 9.5 ve Şekil 9.6 da gösterilmiştir. Elde edilen verilerin sonuçlarına göre aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır.

Sistem 1 (40°C-45°C) deneyinin sistem 1 (45°C-50°C) deneyine göre 20 dakika daha kısa sürede istenilen nem içeriği değerine ulaşmıştır. Kurutma hızına etki eden iki önemli parametre, hava sıcaklığı ve hava hızıdır. Sistem 1 (40°C-45°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,38 m/s iken sistem 1 (45°C-50°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,31 m/s olarak ölçülmüştür. Sistem 1 (45°C-50°C) deneyinde set edilen 50°C üfleme havası değerini tutturmak için sistem 1 (40°C-45°C) deneyine göre daha düşük hızlarda kurutma yapıldığından deney süresi uzamıştır.

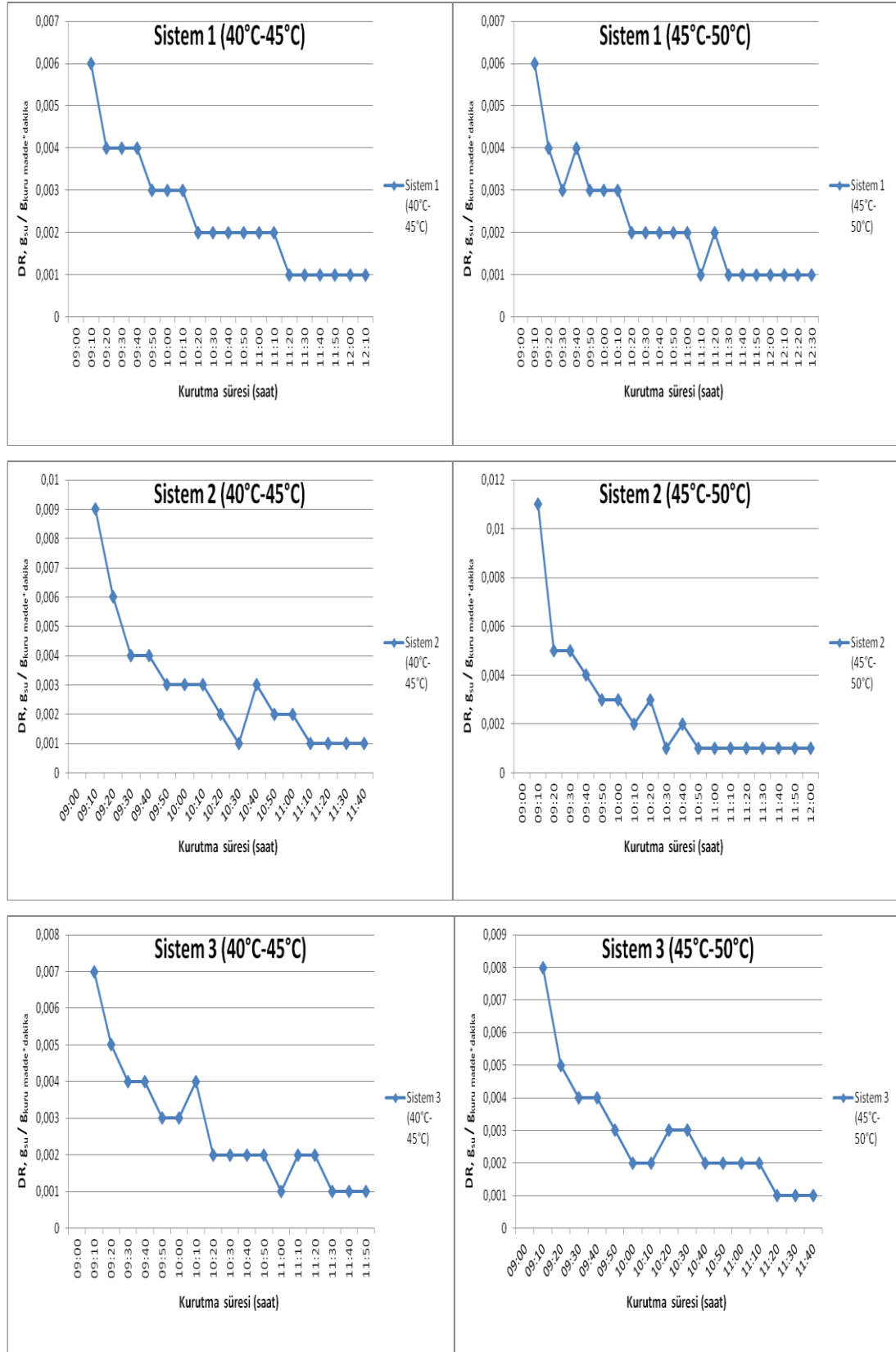
Sistem 2 (40°C-45°C) deneyinin sistem 2 (45°C-50°C) deneyine göre 20 dakika daha kısa sürede istenilen nem içeriği değerine ulaşmıştır. Sistem 2 (40°C-45°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,58 m/s iken sistem 2 (45°C-50°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,49 m/s olarak ölçülmüştür. Sistem 2 (45°C-50°C) deneyinde set edilen 50°C üfleme havası değerini tutturmak için sistem 2 (40°C-45°C) deneyine göre daha düşük hızlarda kurutma yapıldığından deney süresi uzamıştır.

Sistem 3 (45°C-50°C) deneyinin sistem 3 (40°C-45°C) deneyine göre 10 dakika daha kısa sürede istenilen nem içeriği değerine ulaşmıştır. Sistem 3 (40°C-45°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,53 m/s iken sistem 3 (45°C-50°C) deneyinin ortalama hava hızı 0,59 m/s olarak ölçülmüştür. Sistem 3 (45°C-50°C) deneyinde hem sıcaklığın hemde hava hızının yüksek olmasından dolayı kurutma süresi sistem 3 (40°C-45°C) deneyine göre daha kısa sürmüştür.



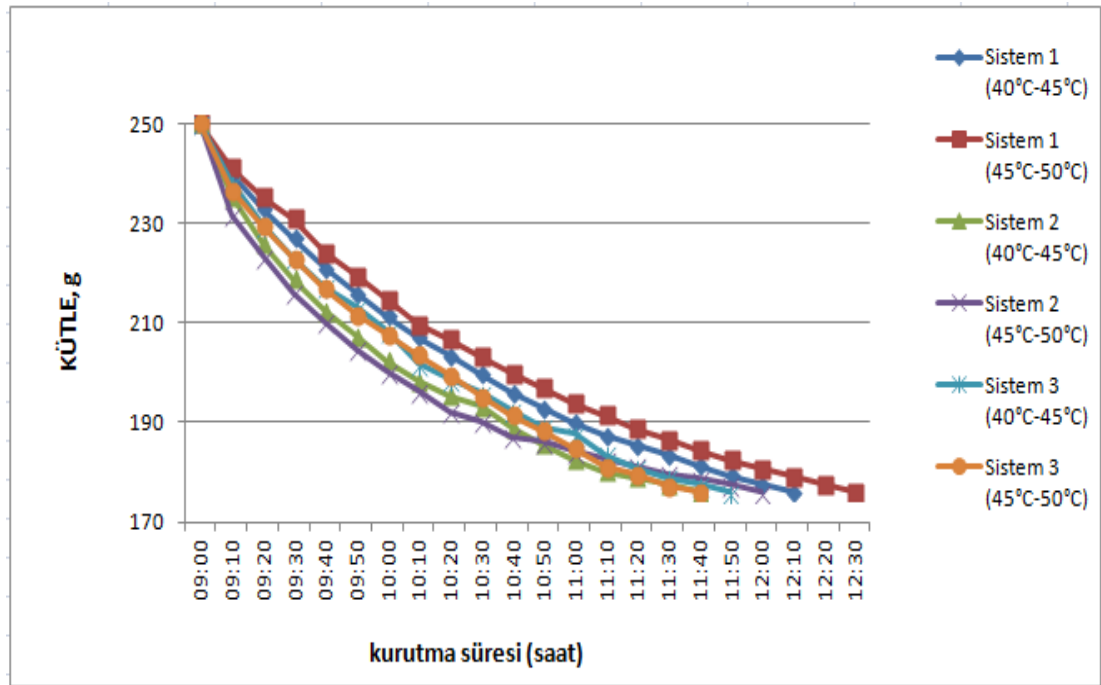
Şekil 9.5. Bayat ekmeklerin kurutma süresine göre kurutma hızı değerleri

Şekil 9.5 de görüldüğü gibi, deneysel analizleri yapılan üç ayrı sistemin de kurutma hızlarına bakıldığında sistem 1'in diğer sistemlere göre performansının daha düşük olduğu görülmüştür. Sistem 2 ile sistem 3 kurutma hızları bakımından karşılaştırıldığında sistem 2 (40°C-45°C)'nin daha hızlı olduğu görünüyor. Bunun nedeni, sistem 3 (45°C-50°C)'de kurutma odasından çıkan nem alma potansiyeli düşük havanın, tekrardan dış hava ile belirli oranlarda karıştırılarak kurutma odasına gönderilmesinden kaynaklanmıştır. Sistem 3 (45°C-50°C)'nin sistem 2 (40°C-45°C)'yi deneyin sonlarına doğru yakalamasının nedeni kurutulan üründen çekilen nem içeriğinin giderek azalması sonucunda sistem 3 (45°C-50°C)'de kurutma odasına giren havanın nem alma kapasitesinin deneyin sonlarına doğru artmasından kaynaklanmıştır.

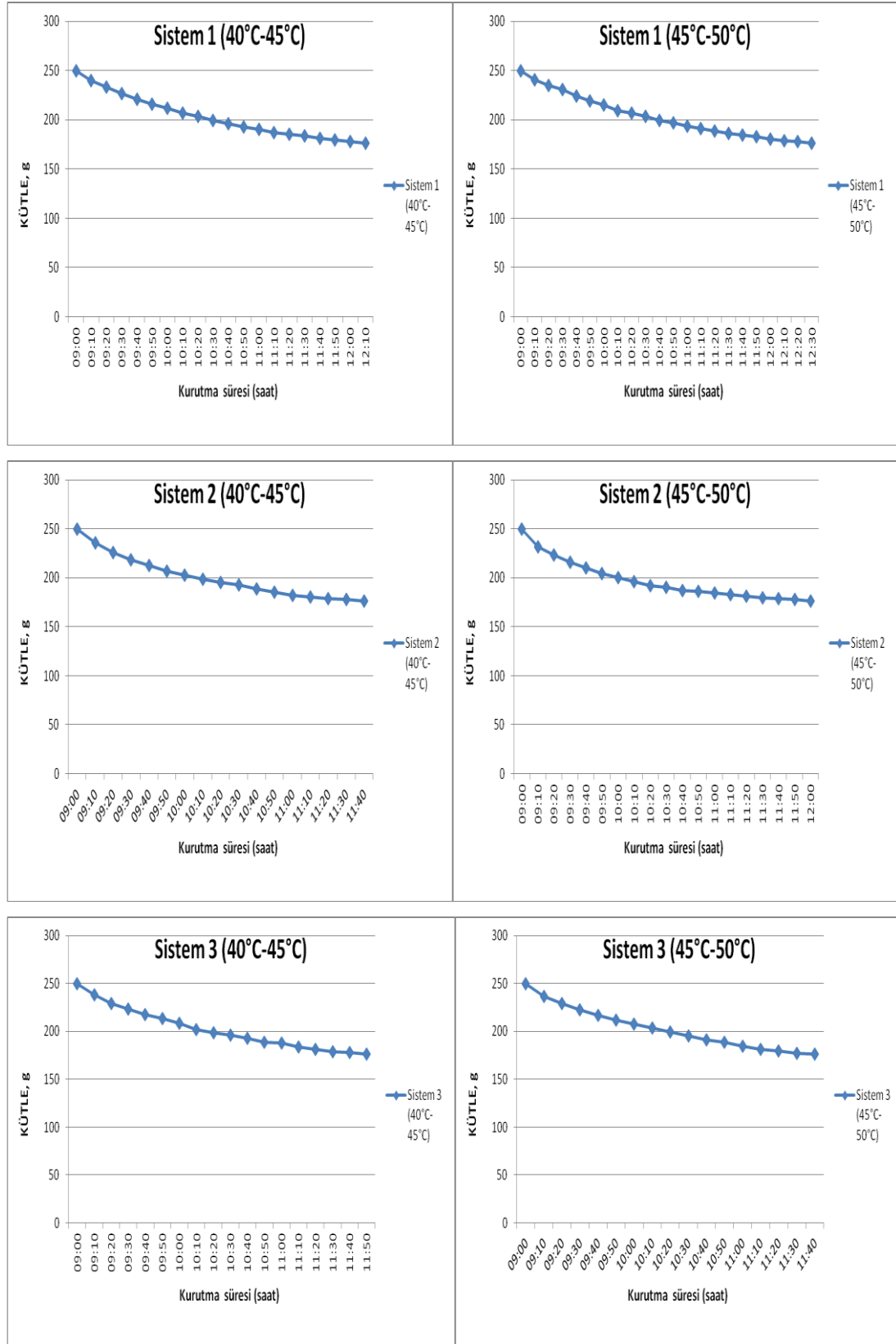


Şekil 9.6. Kurutma süresine göre kurutma hızının ayrı ayrı gösterimi

Yapılan deneyler öncesinde ayarlanan sıcaklık değerleri ile sistem kontrol altına alınmıştır. Kurutma esnasındaki kütle değişimleri yük hücresi tarafından anlık olarak takip edilmiştir. Ürünün kütlesinin zamana göre değişimi Şekil 9.7 de ve Şekil 9.8 de gösterilmiştir. Sistem 2 ve sistem 3'ün, sistem 1'e göre kurutma süreleri daha kısadır. Sistem 3'ün sistem 2'ye göre kurutma süresinin daha uzun olmasının nedeni kurutma odasından çıkan bağıl nemi yüksek hava belli oranda (%35) kurutma odasına gönderildiğinden dolayı kurutma odası giriş havasının bağıl nemi artmıştır. Bu nedenle kurutma işlemi sistem 2'ye göre biraz daha uzun sürmüştür.

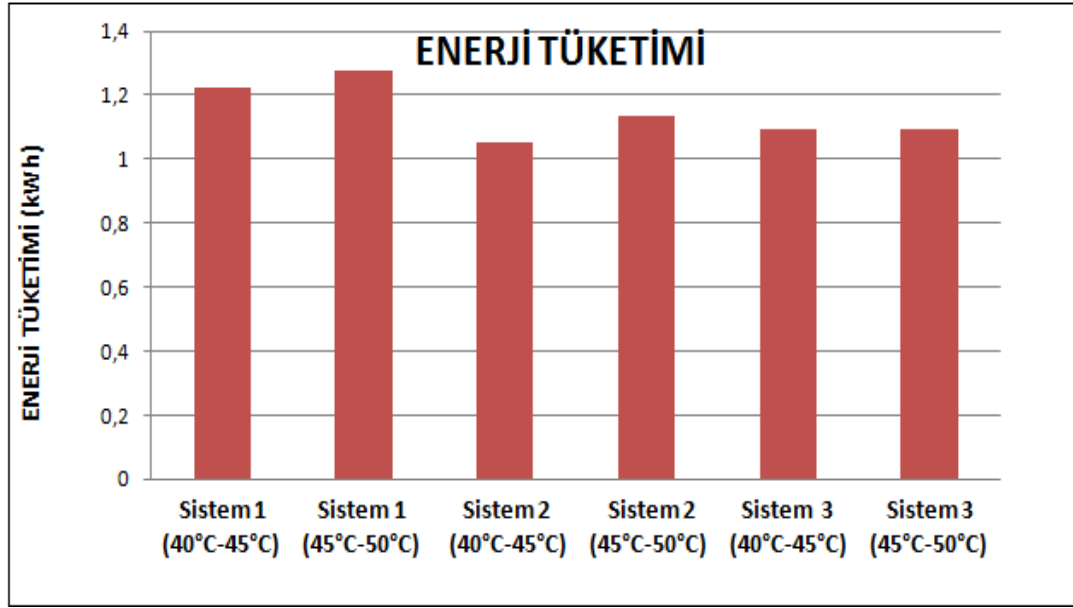


Şekil 9.7. Bayat ekmeklerin kütlesinin zamana göre değişimi



Şekil 9.8. Sistemlerin her birindeki bayat ekmeklerin kütlesinin zamana göre değişimi

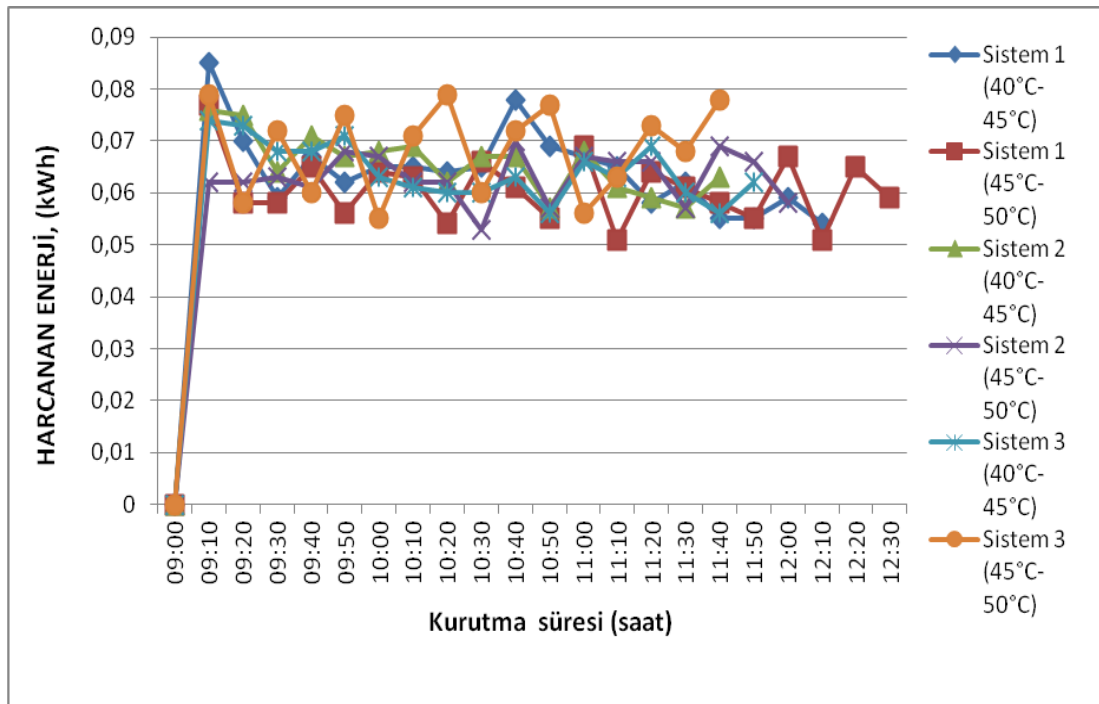
Şekil 9.9 da görüldüğü gibi sistem 1'in enerji tüketimi sistem 2 ve sistem 3'e göre daha fazla olmuştur. Bunun en temel nedeni sistem 2 ve sistem 3 de kurutma odası çıkış havası ısısından faydalanılması, sistem 1 de faydalanılmamasıdır.



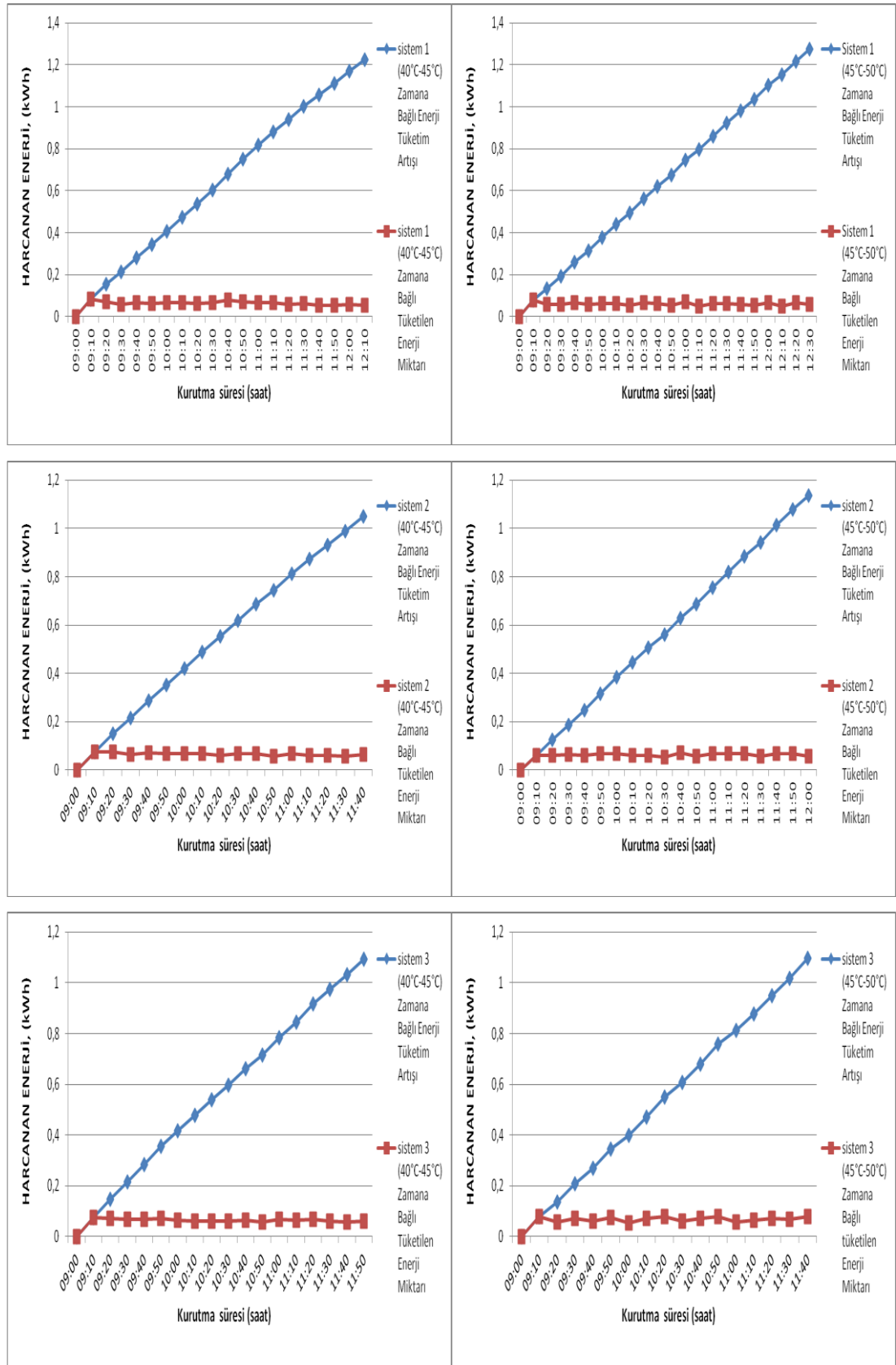
Şekil 9.9. Yapılan deneylerde zamana göre enerji tüketim değerleri

Şekil 9.10 da görüldüğü gibi yapılan deneylerde zamana göre enerji tüketimlerinde farklılıklar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni PID kontrole girilen üfleme havası sıcaklığı ayar değerinden dolayı, sistem o sıcaklığı yakalamak için frekans invertörü sayesinde fanın devrinin yükseltip düşürmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca buna ek olarak aç-kapa kontrol ile istenilen ürün yüzey sıcaklığına ulaşıldığında kompresör devreden çıkarak set edilen ürün yüzey sıcaklık değerinin üstüne çıkılmamıştır. Kompresör devreden çıktığı sürece sadece fanların tükettiği enerji söz konusu olduğundan enerji tüketiminde anlık değişimler olmuştur. Sistem 2 de evaporatörün kurutma odasından çıkan havayı ısı kaynağı olarak kullandığından sistem performansı artmıştır. Yine sistem 3 de kurutma havasının kurutma odasından çıktıktan sonra bir kısmı (% 40) buharlaştırıcıya, bir kısmı (% 35) tekrar kurutma odasına ve kalan kısımda (% 25) dışarı atılmıştır.

Şekil 9.10 da ve şekil 9.11 de görüldüğü gibi sistem 3 deki hava dağılımları sistem 3'ün sistem 1'e göre enerji tüketim miktarının azalmasına neden olmuştur. Sistem 2'deki enerji tüketiminin sistem 3 den az olmasının nedeni ise sistem 3 de kurutma odası dönüş havasının bir kısmını (% 35) tekrar kurutma odasına gönderilmesinden dolayı, kurutma odasına giren havanın bağıl nem değerinin sistem 2'ye göre daha fazla olması, kuruma süresinin ve enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. Ayrıca sistem 3 de kurutma odası çıkış havasının % 40'lık kısmının evaporatöre gönderilmesi sistem 2'ye göre buharlaştırıcının daha az ısı çekerek, soğutucu gazın sıcaklığının daha düşük sıcaklıklarda kompresöre gönderilmesinden dolayı sistem 2'ye göre daha fazla enerji harcamasına neden olmuştur. Bu durum deney sonuçlarına göre yapılan termodinamik analizlerde de görülmüştür.

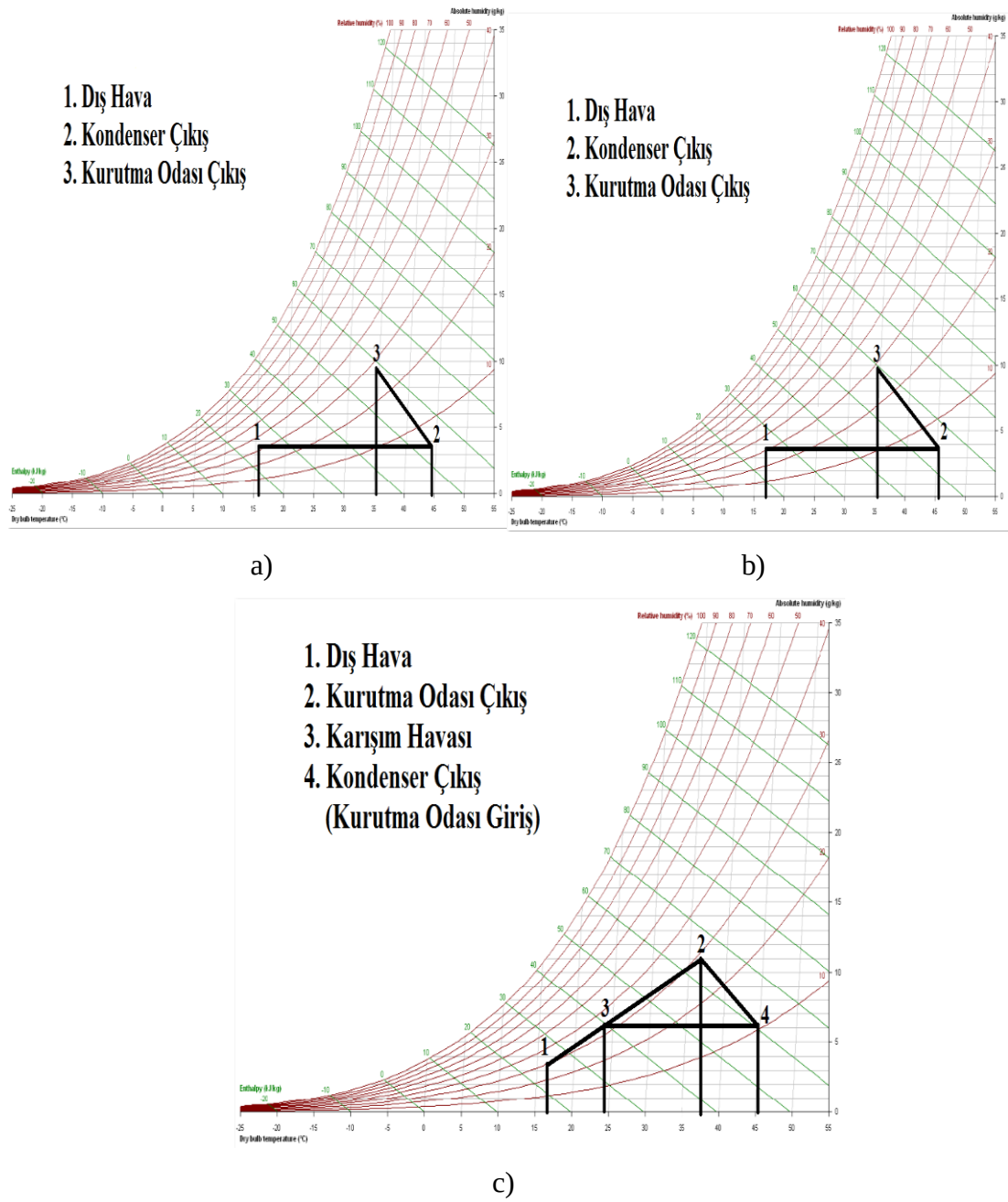


Şekil 9.10. Yapılan deneylerde zamana bağlı anlık tüketilen enerji miktarları



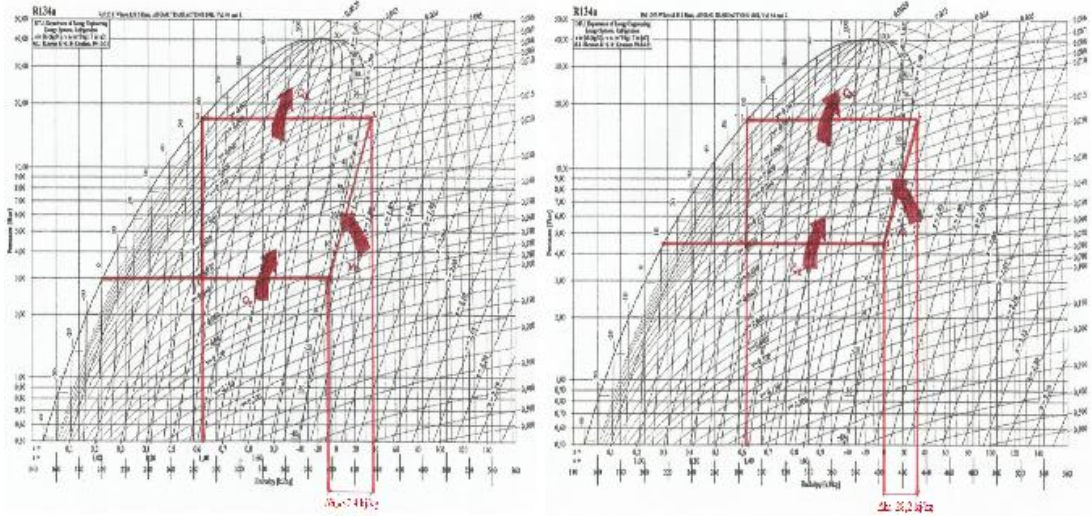
Şekil 9.11. Yapılan deneylerin ayrı ayrı enerji tüketim değerleri

Şekil 9.12 de yapılan deneyler sonucunda sistemlerin psikrometrik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizlerin sonucuna göre sistem 1 ile sistem 2 arasında fazla bir farkın olmadığı görülmüştür. Bunlardan farklı olarak sistem 3'ün analizinde karışım havası devreye girmiş olup %35 dönüş havası %65 taze hava alınarak kurutma odasına giren havanın sıcaklık ortalamasının 24°C olduğu Eş. 6.7 den hesaplanmıştır.



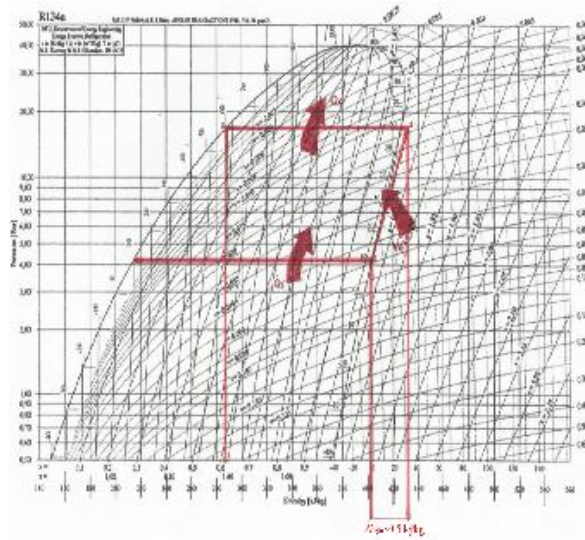
Şekil 9.12. Sistemlerin taslak psikrometrik analizi
a. Sistem 1, b. Sistem 2, c. Sistem 3

Isı pompası sistemi, buharlaşma sıcaklığı 0°C , yoğuşma sıcaklığı da 60°C olacak şekilde tasarlanan sistem çalışma şartları 45°C - 50°C üfleme havası sıcaklığında ve 40°C - 45°C ürün yüzey sıcaklığında çalıştırılmıştır. Şekil 9.13 de görüldüğü üzere üç sistemin çevrim analizleri deney sonuçlarına göre yapılmıştır.



a)

b)



c)

Şekil 9.13. Üç sistemin çevrim analizi

a. Sistem 1 ($\Delta h=24,44$ kJ/kg), b. Sistem 2 ($\Delta h=19,77$ kJ/kg),

c. Sistem 3 ($\Delta h=20,81$ kJ/kg)

Çizelge 9.1. Deney sonuçları

SİSTEM 1			SİSTEM 2		SİSTEM 3	
Hesaplanan ve ölçülen değer	40°C-45°C	45°C-50°C	40°C-45°C	45°C-50°C	40°C - 45°C	45°C-50°C
COP_{ws}	2,84	2,96	4,28	5,28	4,64	4,74
COP_{hp}	3,41	3,39	4,81	5,65	4,96	5,31
$SMER_{ws}$	60,46	57,95	70,41	65,14	67,7	67,52
$SMER_{hp}$	73,87	66,26	79,1	73,74	76,73	75,5
25 °C’de ölçülen su aktivitesi değeri (a_w)	0,395	0,388	0,366	0,356	0,368	0,346
Kurutma süresi (saat)	3,17	3,5	2,67	3	2,83	2,67
Ortalama ürün yüzey sıcaklığı °C	37,5	38,6	36	39,9	37,7	41,5
Ortalama kurutma havası sıcaklığı °C	44,9	49,3	44,7	49,6	44,9	49,5
Min. - Max. hava hızları (m/s)	0,27-0,45	0,27-0,39	0,33-0,61	0,32-0,65	0,31-0,66	0,32-0,63
Ortalama hava hızları (m/s)	0,36	0,31	0,53	0,54	0,54	0,53

Yapılan analizlerin sonuçlarına göre; sistem 1’in harcadığı enerji miktarı tasarlanan diğer iki sisteme göre daha fazla olmuştur. Bunun nedeni, kurutma odası çıkış havasının evaporatör yüzeyine değil de doğrudan egzoz edilmesinden kaynaklanmıştır. Sistem 2’nin sistem 3 den daha az enerji tüketmesinin nedeni ise sistem 2’nin dönüş havasının %100’nünde buharlaştırıcıya gönderilmesidir. Sistem 3 de kurutma odası çıkış havasının bir kısmı (%40) evaporatöre, bir kısmı (%35) tekrar

kurutma odasına gönderildiği için, kurutma odasına giren havanın bağıl nem oranının sistem 2'ye göre daha yüksek olmasından kurutma süresi az da olsa uzamıştır ve enerji sarfıyatı artmıştır.

Deney sonuçlarına göre tüm sistemin ısıtma tesir katsayısı (COP_{ws}) Eş. 6.10'a göre hesaplanmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır; sistem 1 (40°C-45°C) 2,84, sistem 1 (45 °C-50 °C) 2,96, sistem 2 (40°C-45°C) 4,28, sistem 2 (45°C-50°C) 5,28, sistem 3 (40°C-45°C) 4,64, sistem 3 (45 °C-50 °C) 4,74, sonuçlarına ulaşılmıştır. Görüldüğü üzere performans katsayısının (COP_{ws}) en düşük olduğu deney sistem 1 (40°C-45°C) iken en yüksek olduğu deney sistem 2 (45°C-50°C)'dir (Çizelge 9.1).

Deney sonuçlarına göre ısı pompası sisteminde ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) Eş. 6.9'a göre hesaplanmış ve şu sonuçlar bulunmuştur; sistem 1 (40°C-45°C) 3,41, sistem 1 (4 °C-50°C) 3,39, sistem 2 (40°C-45°C) 4,81, sistem 2 (45°C-50°C) 5,65, sistem 3 (40°C-45°C) 4,96, sistem 3 (45°C-50°C) 5,31, değerlerindedir. Görüldüğü üzere ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) en düşük olduğu deney sistem 1 (45 °C-50 °C) iken en yüksek olduğu deney sistem 2 (45°C-50°C)'dir.

Isı pompalı, PID ve aç-kapa kontrollü bayat ekmek kurutma sisteminde özgül nem çekme oranı ($SMER_{ws}$) tüm sistem için Eş. 6.16'ya göre hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarına göre özgül nem çekme oranı ($SMER_{ws}$) en düşük olan sistemin sistem 1 (45°C-50°C) iken en yüksek özgül nem çekme oranının ($SMER_{ws}$) ise sistem 2 (40°C-45°C) olduğu görülmüştür. Sistem fanı ve buharlaştırıcı fanının enerji tüketimleri, toplam enerji tüketiminden çıkartılarak hesaplanan özgül nem çekme oranına ($SMER_{hp}$) göre; en düşük özgül nem çekme oranının ($SMER_{hp}$) sistem 1 (45°C-50°C) iken en yüksek özgül nem çekme oranının ($SMER_{hp}$) ise sistem 2 (40°C-45°C) olduğu görülmüştür.

Yapılan sistem tasarımlarının kurutma verimliliği üzerindeki etkisine ait sonuçlar Çizelge 9.1 de görülmektedir. Buna göre sistem 2 ve sistem 3'ün kurutma sistemi açısından uygun bir yöntem olduğu, bu iki sisteminde birbirine göre üstünlüğünün olduğu görülmüştür.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Türkiye’de ve Dünya’da yoğun bir şekilde tüketilen ekmeğin bayatladıktan sonra atılarak israf edilmesinin önüne geçilmek istenmiştir. Uygun şartlarda (hava hızı, havanın sıcaklığı, ürün yüzey sıcaklığı, vb.) kurutma işleminden geçirildikten sonra hem uzun süre saklama koşulları hemde çeşitli kullanım alanlarının olması nedeniyle bayat ekmekler ekonomiye tekrar kazandırılmıştır. Ekmek, ısı pompalı üfleme havası sıcaklığı PID olarak ve ürün yüzey sıcaklığı da aç-kapa döngüsüyle kontrol edilerek kurutma fırınında farklı şartlarda kurutulmuştur. Bayat ekmeğin israf edilme potansiyeli ve ısı pompasının kurutucu olarak kullanılması durumunda; bu geri dönüşümün, teknik açıdan uygun olduğu bu deneysel tez çalışmasında görülmüştür.

Uygun teknikler ile kurutulmayan ürünlerde, aflatoksin oluşması, esmerleşme, tad değişikliği ve büzülme gibi ürün kalitesini bozucu etkiler görülmektedir. Bu çalışmada, ısı pompalı kurutma fırını ile Türkiye için önemli bir israf kaynağının tekrar sofralara döndürülerek ya da çeşitli gıdalara katkı maddesi olarak kullanılması ve böylece ülke ekonomisine katkı sağlanması planlanmıştır.

Tasarlanan, imal edilen ve deneysel olarak analizi yapılan, ısı pompalı fırında farklı şartlarda deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalarda tüm sistemin ısıtma tesir katsayısının (COP_{ws}), sistem 2 ($45^{\circ}C-50^{\circ}C$)’de yapılan deneylerin diğer sistem şartlarında yapılan deneylere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Ürün daha yüksek sıcaklıklarda da kurutulabilirdi ancak hem enerji tasarrufu açısından hemde ürün yüzeyinde bozulmalar gerçekleşmemesi için $50^{\circ}C$ ’nin altındaki ürün yüzey sıcaklık değerleri ($40^{\circ}C-45^{\circ}C$) tercih edilmesi durumunda enerji verimliliği açısından, bayat ekmeğin kurutulmasındaki en ideal sistem ve sıcaklık değerinin sistem 2 ($40^{\circ}C-45^{\circ}C$) olduğu tespit edilmiştir.

- Sistem 3'ün sistem 2'ye göre mahzurlu yanı; kurutma odasından çıkan nem alma potansiyeli düşük havanın dış hava ile belirli oranlarla (% 35) karıştırılıp sisteme tekrar verilmesinden dolayı sistem 3'ün kurutma süresi uzamış ve buna bağlı olarak da enerji sarfıyatı sistem 2'ye göre artmıştır.
- Sistem 3'ün kurutma safhasının son anlarında diğer sistemlere göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kurutulan üründen çekilen nem miktarının deneyin sonlarına doğru azalması sonucunda daha düşük bağıl nemdeki hava kurutma kabinini terk etmiş ve sistem 3 de kurutma kabinini terk eden bu hava tekrardan kurutma kabinine gönderilmiştir.
- Bu deneysel çalışmada hem kurutma havası sıcaklığı hemde kurutulan ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilmiştir. Kurutma esnasında ürün yüzey sıcaklığının kontrolü kurutulan ürünün kalitesi için önemli bir özelliktir. Ürün yüzey sıcaklığı kontrol edilerek ürünlerdeki sıcaklıktan dolayı oluşabilecek yüksek sıcaklığa bağlı bozulmaların (reaksiyonlar) önüne geçilmiştir.
- Yapılan bu çalışmalarda ürün yüzey sıcaklığının kontrol edilmesinin amacı, kurutma sonlarına doğru, bayat ekmek dilimlerindeki nem içeriklerinin azalmasından dolayı ürün yüzey sıcaklığında hızlı bir artma olacağından dolayı kurutulan bayat ekmeklerin rengi pembeleşecektir hatta yüzeylerinde kararma olacaktır. Bu hadisenin yaşanmaması için kurutulan ürünün yüzey sıcaklığı kontrol edilmiştir. Ürün yüzey sıcaklığı set değerini sistem yakaladığı an kompresör devreden çıktığı için, kurutma odası sıcaklığı kompresörün devreden çıktığı anlarda bile PID kontrol sayesinde frekans invertörünün fan devrini ayarlamasıyla kurutma odası üfleme sıcaklığının set değerinde kalmasını sağlamıştır.
- Bu kurutma metodunun üç ayrı sistemle denenmesi kurutma işlemi sırasında kurutma odasından atılan duyulur ve gizli ısıyı yüksek havanın tekrar değerlendirilerek ısı pompalı kurutucunun performans katsayısı artmış ve kurutma süresi kısalmıştır.

- 15 mm kalınlığında dilimlenen bayat ekmekler kuru baza göre üç sistemde de $0,55 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru madde}}$ başlangıç nem miktarından $0,09 \text{ g}_{\text{su}}/\text{g}_{\text{kuru madde}}$ son nem miktarına kadar kurutulmuştur.
- Yapılan bu çalışma ile kurutulan bayat ekmeklerin teknik kurutma ile yılın 12 ayı kurutma yapılabilmesi sağlanabilmektedir.
- Yapılan duyuşal analizler, su aktivitesi ve nem miktarı değerleri açısından da kurutulan bayat ekmeklerin istenen özelliklerde olduğu görülmüştür.
- Enerji verimliliği açısından, kurutma odası çıkış havasının tamamının evaporatör yüzeyine gönderilmesiyle kurutma odası çıkış havasının ısısından faydalanmak üzere tasarlanan sistem 2'nin ve kurutma odası çıkış havasının ısısından belirli oranlarla hem evaporatör yüzeyine hemde kurutma odası giriş havasına gönderilmek üzere tasarlanan sistem 3 yüksek performans katsayılarından dolayı ısı pompalı kurutuculara örnek bir model olacaktırdır.
- Deney sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda elde edilen ısıtma tesir katsayısı (COP_{hp}) değerlerinin literatürde yapılan birçok çalışmaya göre oldukça iyi olduğu görülmüştür. Özellikle sistem 2 ve 3 kurutma uygulamalarında kullanıldığında frekans invertörlü bir kompresöre sahip ısı pompası sistemi ile ciddi oranda enerji tasarrufu yapılabilecektir.
- Bu sistemde yapılan 6 deneyde kurutma odası sıcaklığı ortalama $\pm 0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyet ile istenilen değerde tutulmuştur. Kompresörün devreden çıktığı anlarda bile sıcaklığın set edilen değere yakın olduğu gözlemlenmiştir. PID kontrol için ortalama $\pm 0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ değeri kompresörün devrede olmadığı anlardaki dalgalanmadan kaynaklanmıştır. Kompresör devrede değilken sıcaklığın set edilen değerde kalması için frekans invertörünün kurutma odası girişindeki fanın devrini kısıması ile sağlanmıştır.

- Yapılan deneylerde 40 °C ürün yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde ortalama ürün yüzey sıcaklığı 37,1 °C ve 45 °C ürün yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde de ortalama ürün yüzey sıcaklığı 40,0 °C olarak ölçülmüştür. Kurutulan bayat ekmek dilimlerinin tadında, renginde değişim gözlenmediği için bu deneylerde ürün yüzey sıcaklığı kontrolü başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Sistem 3 de kurutma uygulamalarına bir model olabilir hatta kurutma evrelerine göre otomatik kontrol ile evaporatöre ve kurutma odasına tekrar giden hava debileri ayarlanabilir.
- Yapılan bu prototip sistemler, endüstriyel çalışmalara örnek olabilir ve kurutulan bayat ekmekler uygun teknikler ile gıda maddesi olarak tekrar kullanılabilir.
- Bu sisteme hem ısı hemde fotovoltaik panellerle güneş enerjisi desteği verilebilir.
- Bayat ekmekler yürüyen bantlı bir sistemde hareket ettirilerek endüstriyel boyutta kurutma uygulamaları yapılabilir.
- Yapılan bu sistemde, kurutma süresinin kısaltılabilmesi için sistem kızılötesi (infrared) kurutma teknolojisi entegre edilebilir.
- Ürünün kurutulacağı bölgede taze havanın bağıl nemi yüksek ise sisteme giren kurutma havasının neminin alınması gerekebilir.
- Bu sistem ile farklı ürünlerin de (üzüm, fındık, kivi vb.) uygun psikrometrik şartlarda kurutulabilmesi mümkün olabilir.
- Isı pompası sistemleri sadece kurutma sistemlerinde değil sıcaklık ve bağıl nem kontrolünün yapıldığı farklı enerji sistemlerinde de başarılı ve verimli bir şekilde kullanılabilir.

- Kurutma yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirse ürünün yapısında bozulmalar (tat, koku, renk vb.) olabilir.

KAYNAKLAR

1. 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).
2. Akpınar, E., K., “Deneyisel çalışmalardaki hata analizine bir örnek: kurutma deneylerindeki hata analizi”, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 46: 41-48 (2005).
3. Aktaş, M., “Isı pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve deneyisel incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 60 (2007).
4. Aktaş, M., Aktekeli, Z., Doğan, H., Ceylan, İ., ‘‘Güneş enerjisi destekli, ısı pompalı kırmızı biber kurutucusunun tasarımı, imalatı ve performans deneyleri’’, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30, 1, 111-120 (2010).
5. Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H., “Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Politeknik Dergisi*, 8 (4): 329-336 (2005).
6. Aktaş, M., Özdemir, M.B., “Yaz iklimlendirme sistemlerinde kanal çaplarının bilgisayar programı ile hesaplanması”, *Karaelmas Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Teknoloji Dergisi*, 7(3): 381-386 (2004).
7. İnternet: Anonim “Türkiye’de ekmek İsrafi araştırması” <http://www.ekmekisrafetme.com/Upload/Resim/EkmekYayinlar/TurkiyedeEkmekIsrafi.pdf>, 8-94 (2013).
8. Arıkan, A., “Ekmek ve unlu mamül ambalajları”, *Ambalaj Bülteni*, 32 – 34 (2006).
9. Ashrae, Fundamentals, “Phsicological factors in drying and storing farm crops”, *(SI), Chapter*, 11: 4-7 (1997).
10. Ashrae, Applications Handbook, “Industrial drying systems”, *(SI), Chapter* 28, 1-2 (2003).
11. Başaran, B., Bitlisli, B.O., Sarı, Ö., Özbalta, N. ve Güngör A., “Deri kurutulmasında yeni teknolojiler: ısı pompalı kurutucular”, *I. Ulusal Deri Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ege Üniversitesi, İzmir, 634-642, 644-647 (2004).
12. Boran, K., “Isı pompasının sudan havaya, havadan havaya, sudan suya deneyisel olarak incelenmesi ve optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı*, 1-86 (1993).

13. Bulduk, S., “Gıda Teknolojisi”, **Detay Yayıncılık**, Ankara, 41 (2002).
14. Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., “Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi” **Gıda Teknolojisi Derneği**, Ankara, 28, 541 – 542, 544-570 (2003).
15. Certel, M., Ertugay, M.F., “Gıdalarda su aktivitesinin termodinamiği”, **Gıda Dergisi**, 21: 193-199 (1996).
16. Ceylan, İ., Doğan, H., “Nem kontrollü kondenzasyonlu kereste kurutma fırını”, **II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.**, 155- 166 (2004).
17. Ceylan, I., “Energy analysis of PID controlled heat pump dryer”, **Engineering**, 1:188–95 (2009).
18. Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., “Isı pompalı destekli bir kurutucuda kerestelerin kurutma süresinin belirlenmesi”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 22(4):847-854 (2007).
19. 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).
20. Çengel, Y. ve Boles, M., “Carnot çevrimi”, **Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik Kitabı**, 2: 237-249 (1991).
21. İnternet: Çoban, T., “Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi” <http://turhancoban.com/programlar/soğutucu%20akiskanlar/sogutmacevrimi1.html>, 1-23 (2013).
22. Değirmenci, M. ve ark., “Otomatik kontrol tesisatı”, **Makina Mühendisleri Odası Kitabı**, 318: 14-20 (2003).
23. Demiray, E., Tülek, Y., “Domates kurutma teknolojisi ve kurutma işleminin domatesteki bazı antioksidan bileşiklere etkisi” , **Gıda Teknolojileri Dergisi**, 3, 9-20 (2008).
24. Doğan, V., “Su-toprak kaynaklı ısı pompalarının araştırılması”, **Tesisat Mühendisleri Derneği**, 57-71 (2003).
25. Erbil,T., “Güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı hibrit ısı pompası tesisinin enerji ve ekserji analizinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü**, İzmir, Türkiye, 29: 30-43 (2002).
26. İnternet: Ertaş, N., “Ekmeğin muhafazası ve bayatlamasının önlenmesi ile değerlendirme yolları”, <http://www.tukcev.org.tr/assets/panel/ekmek/Yrd.Doc.Dr.Nilgün.Ertas.pdf>, 1 – 44 (2013).

27. Fatouh, M., Metwally, A.B., Helali A., Shedid, M.H., “Herbs drying using a heat pump dryer”, *Energy Conversion and Management*, 47(15-16): 2629-2643 (2006).
28. Genceli, O.F., “Deneysel bulguların analizi”, *Ölçme Tekniği Kitabı, Birsen Yayınevi, İstanbul*, 21-47 (2000).
29. Günerkan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36(13): 1-10 (2005).
30. Güngör, A. ve Özbalt, N., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*, İzmir, TES046(737): 739-744 (1997).
31. Gönen, E., “Isı pompası destekli PLC kontrollü bir kurutucuda defne yaprağı kurutulması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitim Bölümü*, 1-88 (2012).
32. Heldman, D.G., and Singh, R.P., “Food dehydration”, *Food Process Engineering*, Second Edition, New York, 261-323 (1981).
33. Hawlader, M.N.A., Chou, S.K., Jahangeer, K.A., Rahman, S.M.A. and Eugene Lau, K.W., “Solar-assisted heat-pump dryer and water heater”, *Applied Energy*, 74, 186 (2003).
34. Hawlader, M.N.A., Jahangeer, K.A., “Solar heat pump drying and water heating in the tropics”, *Solar Energy*, 80(5): 492-499 (2006).
35. Hawlader, M.N.A., Rahman, S.M.A., Jahangeer, K.A., “Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer”, *Energy Conversion and Management*, 49, 1612-1619 (2008).
36. Jia, X., Clements, S., Jolly, P., “Study of heat pump assisted microwave drying”, *Drying Technology*;11(7):1583–616 (1993).
37. Kılıç, H., “Güneş enerjisi destekli ısı pompasının tasarımı, imalatı ve performans deneyleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü*, Ankara, 7-8 (2006).
38. Kırmacı, V., “Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerinin yapılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü*, Ankara, 70-100 (2008).
39. Lee, D., A., “Aspects of new dryer selection”, *Drying* 86, Edited by Mujumdar A., S., *Hemisphere Pub. Corp.*, 2: 625-636 (1986).

40. Lee, K.H., Kim, O. J., "Investigation On Drying Performance And Energy Savings Of The Batch-Type Heat Pump Dryer", ***Drying Technology***, 27, 565-573 (2009).
41. Oktay, Z., "Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması", ***III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı***, 751-755 (1997).
42. Oktay, Z., "Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması", ***Makine Mühendisleri Yayını***, Teskon Program Bildirileri, 0-47, 750-759 (1997).
43. Oktay Z., Hepbaşlı A., "Performance evaluation of a heat pump assisted mechanical opener dryer", ***Energy Conversion and Management***, 44: 1193-1207 (2003).
44. Oktay, Z., "Isı pompası destekli bir kurutucunun performansına etkiyen etkenlerin araştırılması", ***Tesisat Kongresi***, 178(12): 114-124 (1997).
45. Onat A., İnan A.T., Gül Z., "Farklı geometrik yapıdaki kırmızı biberlerin PLC kontrollü güneş enerjili - gizli ısı depolamalı kurutucuda kurutulması", ***G., Ü., Teknik Eğitim Fakültesi, Politeknik Dergisi***, 6(1): 379-384 (2003).
46. Özay, G., Pala, M., Saygı, B., "Bazı gıdaların su aktivitesi (a_w) yönünden incelenmesi", ***Gıda Dergisi***, 18: 377-383 (1993).
47. Özgüven, M., Bux, M., Koller, W.D., Şekeroğlu, N., Kırpık, M., "Trocknung von ätherisches Öl führenden Pflanzen mit Solarenergie in der Türkei", ***Fachtagung für Arznei- und Gewürzpflanzen***, 7. bis 9. September 2004, Jena, Germany, 1-29 (2004).
48. Özkol, N., "Uygulamalı soğutma tekniği", ***TMMOB Makine Mühendisleri***, Ankara, 115: 18-56 (1999).
49. Parker N.H., "Aids to dryer selection", ***Chemical engineering***, 70, 115 (1963).
50. Seyhan, U., O. ve ark., "Hesaplamalı Isı-Kütle Geçişi ile Yoğuşma ve Buharlaştırmanın Modellenmesi", ***Tesisat mühendisliği dergisi***, 131: 37-42 (2012).
51. Söylemez, M.S., "Optimum heat pump in drying systems with waste heatrecovery", ***Journal of Food Engineering***, 74: 292-298 (2006).
52. İnternet: Süzer, S., "Buğday tarımı" ***Yetiştirme Tekniği Böl. Başk. Trakya Tarımsal Araştırma Enstitüsü samisüzer@ttae.gov.tr***, 1-11 (2013).
53. Thorvalddson, K., ve Janested, H., "A model for simultaneous heat, water and vapour diffusion", ***Journal of Food Engineering***, 40: 167-172 (1999).

54. TMO, “Türkiye’de ekmek israfı araştırması”, **Toprak Mahsulleri Ofisi**, 2: 10-99 (2013).
55. Toğrul, H., Toğrul, İ., İspir, A., “İnfrared Kurutucuda Muzun Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi”, **III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı**, Antalya, 22-29 (2005b).
56. Yağcıoğlu A., “Tarım ürünlerini kurutma tekniği”, **Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları**, İzmir, 536 (1999).
57. Yagcıoğlu, A., Degirmencioğlu, A., Çagatay, F., “Drying Characteristics of Laruel Leaves Under Different Drying Conditions”, **7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy**, Adana, 565-569 (1999).
58. Yılmaz, S., Ceylan, İ “Çapraz akımlı sulu yıkayıcıda kurutma havası neminin alınması”, **Teknoloji Dergisi**, 5, 1-2, 29-33 (2002).
59. Yüzgeç, U., “Kurutma sürecinin modellenmesi ve akıllı öngörülü denetimi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-35 (2005).
60. Queiroz, R., Gabas, A.L., Telis, V.R.N., “Drying Kinetics of Tomato by Using Electric Resistance and Heat Pump Dryers”, **Drying Technology**, 22, 1603-1620 (2004).

EKLER

Ek.1. Kurutma sistemi ile ilgili resimler



Şekil 1.1. Hava hızı ve sıcaklık ölçer



Şekil 1.2. Sıcaklık ve bağıl nem ölçer



Şekil 1.3. Kurutma ünitesi kanal



Şekil 1.4. Frekans invertörü

Ek.1. (Devam) Kurutma sistemi ile ilgili resimler



Şekil 1.5. Kurutulma ünitesi ısıtma serpantini



Şekil 1.6. Kurutulmuş bayat ekmek dilimleri



Şekil 1.7. Proses kontrol cihazı serpantini



Şekil 1.8. Kompresör

Ek.1. (Devam) Kurutma sistemi ile ilgili resimler



Şekil 1.9. Kurutulmaya hazırlanmış bayat ekmek dilimleri



Şekil 1.10. Kurutulmuş bayat ekmek dilimleri



Şekil 1.11. Su aktivitesi ölçüm cihazı

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKTEKELİ, Burak
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 12.04.1986, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 536 703 47 37
 e-mail : burakaktekeli06@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü	2008
Lise	Ankara Kayabayazıtöğlü Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004-2005	Bilim Doğalgaz Ltş.	Teknisyen
2008-2009	Migros Türk Taş. Aş.	Satış elemanı
2011-2012	Hakkari Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı	Bakım onarım Şube Müd. V.
2013-2013	Alper Bektaş Mühendislik İnş. Tah. Ltd. Şti.	Şantiye şefi