

TEZ ONAYI

Erkan DİKMEN tarafından hazırlanan “Farklı Sıcaklıklarda ve Basınlarda Çalışan Bir Kurutucu Tasarımı Ve Değişken Kurutma Parametrelerinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından 05/03/2010 tarihinde yapılan tez savunmasında oy birliği ile Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Ali Kemal YAKUT

Süleyman Demirel Üniversitesi, Makina Eğitimi Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Prof.Dr. Mehmet KUNDUZ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof.Dr. Osman İPEK

Süleyman Demirel Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof.Dr. H. Mehmet ŞAHİN

Gazi Üniversitesi, Makina Eğitimi Anabilim Dalı

Yrd.Doç. Dr. Reşat SELBAŞ

Süleyman Demirel Üniversitesi, Makina Eğitimi Anabilim Dalı

Prof. Dr. Mustafa KUŞCU

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SICAKLIKLARDA VE BASINÇLARDA ÇALIŞAN BİR
KURUTUCU TASARIMI VE DEĞİŞKEN KURUTMA
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Erkan DİKMEN

Danışman: Ali Kemal YAKUT

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2010**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kurutma Olayı	2
1.2. Kurumayı Etkileyen Dış Koşullar	3
1.3. Kurumayı Etkileyen İç Koşullar	4
1.4. Kurumanın Aşamaları	5
1.5. Kurutucuların Sınıflandırılması	7
1.6. Kurutma sistemlerinde otomasyon	12
1.7 Ağaç Malzemenin Özellikleri.....	13
1.7.1 Kimyasal özellikleri	14
1.7.2. Fiziksel özellikleri.....	14
1.8 Ağaç Malzemesini Kurutma Metotları	18
1.8.1 Doğal kurutma	18
1.8.2 Klasik kurutma.....	19
1.8.3 Kondenzasyonlu kurutma.....	20
1.8.4 Vakum kurutma	21
1.9 Kurutmada Ağaç Malzemedede Ortaya Çıkan Problemler	22
2. KAYNAK ÖZETLERİ	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Materyal	32
3.1.1. Kurutma fırınının yapısı	32
3.1.2. Deney numunelerinin hazırlanması	42
3.1.3. Deneylerin yapılışı	43
3.2. Yöntem.....	46

3.2.1. Ağaç malzemesinin neminin bulunması	46
3.2.2. Termodinamik analiz	47
3.2.2.1. Kütle analizi.....	47
3.2.2.2. Enerji analizi	49
3.2.2.3 Ekserji analizi	52
3.2.3. Hata analizi	54
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	57
4.1. Farklı Kurutma Sıcaklığında Yapılan Deneyler	57
4.2. Farklı Vakumda Bekleme Süresinde Yapılan Deneyler	61
4.3. Farklı Ön Vakumlama Basıncında Yapılan Deneyler	66
4.4. Deney Sisteminin Enerji Analizi	70
4.5. Deney Sisteminin Ekserji Analizi.....	74
4.6. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi	75
5. SONUÇ	77
6. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ	83

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI SICAKLIKLARDA VE BASINÇLARDA ÇALIŞAN BİR KURUTUCU TASARIMI VE DEĞİŞKEN KURUTMA PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Erkan DİKMEN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ali Kemal YAKUT

Zaman ve enerji, kurutma işleminde önemli faktörlerdir. Teknolojik yenilikler sayesinde, kurutucuların tasarımı ve çalışma yöntemleri gelişmiştir. Günümüzde az yer kaplayan, modüler olan, kısa sürede ürün kurutabilen, az enerji harcayan ve kurutulan ürünün kalitesini iyileştiren kurutucular geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada, ağacın işlenmesi sonucunda elde edilen keresteleri vakumlu kurutma yöntemiyle kurutabilecek bir fırın tasarlanmıştır. Vakumlu kurutma fırınının ideal şartlarda çalışması, PLC otomasyon sistemi ile sağlanmıştır. Otomasyon sistemi için kereste kurutma yazılımı geliştirilmiştir. Kurutma sıcaklıklarına, çalışma basınçlarına ve vakumda bekleme sürelerine göre toplam dokuz deney yapılmıştır. Ortalama bağıl nemi % 45 olan keresteler, bağıl nemi % 8'e düşene kadar kurutulmuştur. Deneylerin her birinin kurutma süreleri 40~50 saat arasında gerçekleşmiştir. Yapılan deneylerde, PLC ve data-logger cihazları kurutma süresi boyunca veri kaydetmişlerdir. Kurutma fırınında bulunan cihazların ve genel kurutma sisteminin çalışma verimleri ve ekserjileri hesaplanmıştır. Sonuç olarak; çam cinsi keresteleri vakumlama yöntemiyle kurutmak için fırının kurutma sıcaklığı 50 °C, çalışma basıncı 0.80 bar ve vakumda (0.25 bar) bekleme süresi 10 dakika olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vakumlu kurutma, kereste, enerji, ekserji, otomasyon

2010, 83 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN OF A DRYING MACHINE WORKING AT DIFFERENT TEMPERATURES AND PRESSURES AND INVESTIGATION OF VARIABLE DRYING PARAMETERS

Erkan DİKMEN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof.Dr. Ali Kemal YAKUT

Time and energy are important factors in drying process. Design and working methods of dryers have developed by means of technological innovation. Today, dryers which are compact, modular, products that can dry in a short time, less energy-consuming and improve the quality of the dried product are trying to develop.

In this study, a kiln which can be dry the timbers processed by vacuum drying method is designed. Working of the vacuum drying kiln in ideal conditions is provided with PLC automation system. A software for automation system has been developed. Total nine experiments are made according to the drying temperatures, the operating pressure and the waiting time in vacuum. The timbers which have relative humidity on the average 45% has dried until the relative humidity dropped to 8%. Drying time of the each experiment has been realized between 40 ~ 50 hours. In the experiments, PLC and data-logger device has recorded the data during the period of drying. Work efficiency and exergy of devices of the dry kiln and of the general dry system were calculated. Consequently, ideal operating conditions to dry the pine timbers by vacuum method are identified that 50 °C for the drying temperature of kiln, 0.80 bar working pressure and 10 minutes as a waiting time in vacuum (0.25 bar).

Key Words: Vacuum drying, timber, energy, exergy, automation

2010, 83 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca literatür araştırmalarımnda yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Arzu ŞENCAN'a, deneysel çalışmamda yardımlarını esirgemeyen Makina Eğitimi Laboratuarında görevli Makine Teknikeri Cengiz BALTAÇI ve Makine Teknisyeni Mümin ULUSOY'a, Makine Eğitimi Bölümü'nde yüksek lisans öğrencisi olan Serkan GÖK'e de teşekkür ederim.

1527-D-07 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Denemelerde ve deneylerde kullandığım kerestelerin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen, tez sonuçlanmadan elim bir trafik kazasında kaybettiğimiz Gül Kereste sahibi Mustafa YILANLIOĞLU'nu rahmetle yâd ediyorum. Aynı zamanda araştırmanın yürütülmesinde maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm İYSAN işletme sahibi İbrahim YILDIRIM ve personeline; ARTEM Otomasyon'da Elektronik Mühendisi olan Eşref BÜYÜKÇİLİNGİR'e ve ARTEM Otomasyon'un diğer çalışanlarına da teşekkür ederim.

Tezimin bütün aşamalarında gösterdikleri fedakârlık ve destekleri ile beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Erkan DİKMEN
İSPARTA, 2010

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kuruma eğrisi.	5
Şekil 1.2. Çam ağacının enine kesiti.....	13
Şekil 1.3. Enine kesitten alınma konumuna göre daralma miktarı.....	17
Şekil 1.4. Kurutma fırını kesiti.....	20
Şekil 1.5. Orta ölçekli vakumlu kurutma fırını	21
Şekil 2.1. Kurutma esnasında (a) kerestenin merkez sıcaklığının değişimi, (b) kerestenin ortalama nem değişimi.....	27
Şekil 2.2. Klasik kurutma fırını	28
Şekil 2.3. Kurutma fırınında zamana bağlı sıcaklık ve nem değişimleri.....	29
Şekil 2.4. Kurutma ürünlerinin sıcaklığına ve nemine göre ekserji verimlilikleri... ..	30
Şekil 2.5. Kerestelerin kurutulması süresince kurutma fırınının ekserji değişimi ...	31
Şekil 3.1. Kurutma fırınının şekli.....	32
Şekil 3.2. Kurutma fırınının imalat aşamasında görüntüsü.....	33
Şekil 3.3. Hava serpantinli ısıtıcılar.....	33
Şekil 3.4. Salyangoz tipi vakum pompası.....	34
Şekil 3.5. Sulu tip vakum pompası	34
Şekil 3.6. Otomasyon panosu.....	35
Şekil 3.7. PLC yazılımının iş akış şeması.....	36
Şekil 3.8. Otomasyonun kurutma sisteminde yerleşimi	37
Şekil 3.9. Ahlborn data-loggerın kurutma sistemine bağlantısı.....	39
Şekil 3.10. Numune kerestelerin boyutları	42
Şekil 3.11. Kereste istifleri.....	42
Şekil 3.12. Numunelerin teraziye bağlantılı hali.....	43

Şekil 3.13. Kereste numunelerinin etüv fırınında kurutulması	46
Şekil 3.14. Kurutma fırınının sistematik gösterimi	48
Şekil 4.1. Farklı çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimi.....	58
Şekil 4.2. 40 °C sıcaklıkta yapılan deneyde basıncın zamana göre değişimi.....	59
Şekil 4.3. Sıcaklığa bağlı deneylerde fırın içi bağıl nem değerleri	60
Şekil 4.4. Sıcaklığa bağlı deneylerde kerestelerin ağırlık değişimi.....	60
Şekil 4.5. Sıcaklığa bağlı deneylerde tüketilen enerji	61
Şekil 4.6. Faklı ön vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerin sıcaklık değişimi	63
Şekil 4.7. Farklı vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerde basıncın zamanla değişimi.....	63
Şekil 4.8. Farklı vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerde bağıl nemin zamanla değişimi.....	64
Şekil 4.9. Farklı bekleme süresi olan deneylerde kurutulan kerestenin ağırlığının zamana göre değişimi.....	65
Şekil 4.10. Farklı bekleme sürelerinde yapılan deneylerde tüketilen enerji	65
Şekil 4.11. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde fırının sıcaklık değişimi	67
Şekil 4.12. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde fırın çalışma basınç değişimleri	68
Şekil 4.13. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kurutma havasının bağıl neminin zamanla değişimi	68
Şekil 4.14. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kerestenin ağırlığının kurutma süresince değişimi	69
Şekil 4.15. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kurutma fırının enerji tüketimi.....	70
Şekil 4.16. Deneye ait ısı enerji analizi	71
Şekil 4.17. Farklı deney şartlarında kullanılan fanın verimleri.....	72
Şekil 4.18. Farklı deney şartlarında kullanılan vakum pompasının verimleri	72

Şekil 4.19. Kurutma fırınının enerji verimi.....	73
Şekil 4.20. Deneye ait kullanılan enerjiler	74
Şekil 4.21. Sistemin genel ekserji verimleri	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Kurumayı etkileyen bazı parametreler ve bunların uygulamada ayarlanması yöntemleri.....	4
Çizelge 1.2. Çeşitli malzemelerin atmosferik koşullarda denge nemleri	7
Çizelge 1.3. Çeşitli kurutucuların kurutma etkinlikleri ve buharlaşma hızları	9
Çizelge 1.4. Islak bir üründen kurutulmuş katı üretiminde kullanılan kurutucu tipleri.....	10
Çizelge 1.5. Çeşitli kurutucularda kurutulabilecek maddelerden bazı örnekler	11
Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin kurutma bakımından özellikleri.....	15
Çizelge 1.7. Ağaç malzemesi kurutma yöntemleri.....	19
Çizelge 1.8. Kurutma deneyleri sırasında numunelerde ortaya çıkan kusurlar.....	23
Çizelge 2.1. Serbes (2003)'in yaptığı çalışmanın sonucu.....	26
Çizelge 3.1. Kurutma sisteminin otomasyonunda cihazlar ve sensörler	38
Çizelge 3.2. Kurutma sisteminin veri kaydetme cihazı ve sensörler.....	40
Çizelge 3.3. Deneyler yapılırken kullanılan değerler	45
Çizelge 3.4. Kereste numunelerinin özgül ağırlık test sonuçları.....	47
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar	57
Çizelge 4.2. Farklı vakumda bekleme süresinde yapılan deneylerin sonuçları	62
Çizelge 4.3. Farklı ön vakumlama basıncında elde edilen sonuçlar.....	66
Çizelge 4.4. Sensörlerin hata oranları.....	76
Çizelge 4.5. Hesaplanmış parametrelerin hata miktarları.....	76

SİMGELER DİZİNİ

$(C_p)_h$	Havanın özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$(C_p)_k$	Kerestenin özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$(C_p)_{sb}$	Su buharının özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$e_ç$	Çıkan havanın birim kütle ekserjisi [kJ/kg]
$E_{çıkın}$	Ekserji çıkışı [kJ]
e_g	Giren havanın birim kütle ekserjisi [kJ/kg]
E_{giren}	Ekserji girişi [kJ]
$E_{Qçıkın}$	Çıkan toplam ısı enerjisinin ekserjisi [kJ]
E_{Wfg}	Fanın harcadığı enerjinin ekserjisi [kJ]
E_{Wgiren}	Çıkan toplam işin ekserjisi [kJ]
E_{Wig}	Isıtıcıların harcadığı enerjinin ekserjisi [kJ]
E_{WVPg}	Vakum pompasının harcadığı enerjinin ekserjisi [kJ]
ΔE_{sistem}	Sistemde enerji değişimi[kJ]
$h_ç$	Çıkan nemli havanın entalpisi[kJ/kg]
h_d	Doymuş buhar entalpisi [kJ/kg]
h_{ds}	Doymuş sıvı entalpisi [kJ/kg]
h_g	Giren nemli havanın entalpisi [kJ/kg]
$m_ç$	Çıkan nemli havanın ağırlığı [kg]
$m_{çkh}$	Çıkan kuru havanın ağırlığı [kg]
$m_{çsb}$	Çıkan kuru hava içindeki su buharının ağırlığı [kg]
m_g	Giren nemli havanın ağırlığı [kg]
m_{gkh}	Giren kuru havanın ağırlığı [kg]
m_{gsb}	Giren kuru hava içindeki su buharının ağırlığı [kg]

m_k	Kurutulacak kerestenin ağırlığı [kg]
m_{kk}	Kurutulacak kerestenin tam kuru ağırlığı [kg]
m_{ks}	Kurutulacak kerestenin içindeki suyun ağırlığı [kg]
m_n	Kurutma süresince nemlendirme amaçlı buharlaşan suyun ağırlığı [kg]
Δm_{KH}	Kontrol hacminde değişim
$P_{fç}$	Fırının çalışma basıncı (Ön vakumlama) [bar]
P_{fv}	Vakumlama basıncı [bar]
P_o	Çevre basıncı [bar]
$Q_{çıkan}$	Sistemin kaybettiği toplam ısı [kj]
Q_{FI}	Fırının iç havasının ısıtılması için gerekli enerji [kj]
Q_{IK}	Toplam ısı kaybı [kj]
Q_K	Toplam kerestenin kullandığı ısı enerjisi [kj]
R_h	Havanın gaz sabiti [kj/kg ·K]
s_{ds}	Doymuş sıvı entropisi [kj/kg]
$T_ç$	Havanın fırından çıkış sıcaklığı [$^{\circ}$ K]
T_g	Havanın fırına giriş sıcaklığı [$^{\circ}$ K]
$T_{ç*}$	Havanın fırından çıkış sıcaklığı [$^{\circ}$ C]
T_{g*}	Havanın fırına giriş sıcaklığı [$^{\circ}$ C]
T_{fys}	Fırının dış yüzeyinin ortalama sıcaklığı [K]
T_{ks}	Fırının çalışma sıcaklığı [K]
T_o	Çevre sıcaklığı [K]
V_f	Fırının iç hacmi [m^3]
W_{Fg}	Fanın gerçek kullandığı enerji [kj]
W_{Ft}	Fanın teorik kullandığı enerji [kj]

W_{giren}	Sisteme verilen iş [kj]
W_{Ig}	Isıtıcıların gerçek kullandığı enerji [kj]
W_{It}	Isıtıcıların teorik kullandığı enerji [kj]
W_{VPg}	Vakum pompası gerçek kullandığı enerji [kj]
W_{VPt}	Vakum pompası teorik kullandığı enerji [kj]
η_F	Fanın çalışma verimi
$\omega_{fç}$	Havanın fırından çıktığı andaki özgül nemi [$kg_{su} / kg_{kuru\ hava}$]
ω_{fg}	Havanın fırına girdiği andaki özgül nemi [$kg_{su} / kg_{kuru\ hava}$]
η_{Fm}	Fanın elektrik motorunun mekanik verimi
ρ_h	Havanın yoğunluğu [kg/m^3]
η_I	Isıtıcının çalışma verimi
η_{VP}	Vakum pompası çalışma verimi
η_{VPm}	Vakum pompasının elektrik motorunun mekanik verimi

1. GİRİŞ

Kurutma, genel olarak, bir maddeden sıvının uzaklaştırılmasıdır. Burada sıvı, maddenin içeriğinde su veya herhangi bir madde olabilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda açısından bakıldığında kurutma, işlenen maddenin içeriğindeki sıvının istenilen miktara kadar maddeden uzaklaştırılması olayıdır (Günerbakan, 2005).

Kurutma işleminin tarihi eski çağlara dayanmaktadır. İnsanlar, tükettikleri zirai ve hayvansal ürünlerin bir kısmını uygun hava şartlarında kurutarak uzun süre muhafaza edilmesini sağlamışlardır. Bunu yaparken en fazla güneşten yararlanmışlardır. Eskiden günümüze kadar süregelen toprak ve seramikten yapılmış malzemeler, kullanılan hammaddenin işlendikten sonra kurutulması ve pişirilmesiyle elde edilmektedir. Bu da, geçmişten beri kurutma işleminin insanlar tarafından üretim faaliyetlerinde kullanıldığını göstermektedir. Günümüzde ise kurutma, hem evsel hem de endüstriyel faaliyetlerde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kurutmanın yaygın olarak kullanıldığı endüstriler arasında kimya, gıda, toprak-seramik, ziraat, tekstil ve ilaç endüstrisi sayılabilir.

Kurutma, enerjinin yoğun olarak kullanıldığı bir işlemdir. Günümüzde enerji üretiminin maliyetinin yüksek olması ve çevreye verdiği olumsuzluklar sebebiyle enerji tüketimine de dikkat edilmelidir. Bu yüzden endüstriyel kuruluşlar, enerji tüketiminde optimum enerji tüketimine yönelik yatırım yapmaktadır. Kurutma olayını yapan makinelerin en az enerjiyi tüketilebilecek şekilde günümüz teknolojisiyle desteklenerek tasarlanması ve çalıştırılması gerekmektedir. Bu sebeple yaptığımız tez çalışmada, düşük basınçlarda buharlaşmanın hızlandığı vakumlu kurutma olayında otomasyonu en etkili şekilde kullanarak kısa sürede ve en az enerjiyle çalışabilecek bir kurutma fırını tasarlamak amaçlanmıştır.

Kurutma uygulaması çeşitli amaçlar için yapılmaktadır. Bunları dört başlık altında toplamak mümkündür (Güngör ve Özbalta, 1997).

- **İstenilen Özelliklerde Ürün Elde Etmek:** Hammaddede istenilen nem içeriğinin ayarlanması, kurutmada en önemli amaçlarından biridir. Gıda ürünlerinin kurutulması, ağaç ürünlerinin kurutulması konuya örnek gösterilebilir.
- **Hacim veya Ağırlık Düşürmek:** Hammaddede bulunan su içeriğinin mümkün olduğu kadar düşük olması, o ürünün uzak mesafelere taşınmasını ekonomik hale getirmektedir. Örneğin su oranı yüksek kömürler, gemiye yüklenmeden önce belirli oranda kurutmaya tabi tutulmaktadır.
- **Ürünleri Sterilize Etmek ve Korumak:** Özellikle ilaç ve gıda endüstrilerinde elde edilen ürünlerin nem içeriği ayarlanarak, nemin sebep olduğu küflenme, çürüme ve bozulmalar önlenabilmektedir.
- **Çözelti ve Sulu Atık Çözeltilerden Yan Ürün Elde Etmek:** Bazı endüstriyel uygulamalarda, çözelti halinde bulunan ara ürünlerden son ürünlere geçmek için kurutma uygulanmaktadır. Süttten süt tozunun elde edilmesi, toz deterjan üretim esnasında sıvı halde iken kurutulup toz halinin elde edilmesi uygulamaları örnek gösterilebilir.

1.1. Kuruma Olayı:

Kuruma işlemi temel olarak, ısı ve kütle transferi olayıdır. Kurutma esnasında maddenin ısınması sırasında bu iki olay birlikte gerçekleşmektedir. Fakat kurumanın geçtiği aşamaya bağlı olarak biri diğerinden daha baskın olabilmektedir. Bu durum kuruma hızını kontrol etmektedir. Hangi mekanizmanın kurumayı kontrol ettiği, kurumanın geçtiği aşamaya, kurutulan maddenin özelliklerine ve kurumanın koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Dinçer and Şahin, 2004).

Kurumada ısı iletimi, konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon mekanizmalarından ikisi veya üçünün bir arada yürümesiyle gerçekleşmektedir. Isı aktarımının etkin olabilmesi için kurutulan madde ve kurutucu gazın çok iyi temas ettirilmesi ve iki

madde arasında yeterli bir sıcaklık ve nem farkının olması gerekmektedir. Bunu sağlamak amacıyla çok çeşitli kurutucular geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam etmektedir.

1.2. Kurumayı Etkileyen Dış Koşullar

Kurumayı etkileyen dış koşulların başında yüzeydeki serbest nemin uzaklaştırılması gelmektedir. Bununla beraber diğer başlıca parametreler, kurutma için kullanılan gazın sıcaklığı, nem oranı, hızı, gaz ile kurutulacak malzeme arasındaki temas şekli ve etkinliği ile malzemenin fiziksel formudur. Bu parametreler kurutucu tasarımında önemli rol oynamaktadır. Yüzeydeki serbest nemin uzaklaştırılması her zaman hızlı (hızlı kurutma gazı ve/veya yüksek sıcaklık) gerçekleşmeyebilir. Örneğin, seramik ve kereste gibi bazı malzemelerin kurutulması sırasında, yüzeydeki serbest nemin uzaklaştırılması tamamlandıktan sonra, kurumanın hızının aynı şekilde devam etmesi durumunda, yapı içinde büyük nem ve basınç farkı oluşmaktadır. Bunun sonucunda çatlamalar ve kırılmalar meydana gelebilir. Bunun önüne geçmek için kurumanın aşamasına bağlı olarak kuruma hızının ayarlanması gerekmektedir (Gündüz, 1994).

Buharlaşıma, malzemenin yüzeyindeki serbest nemin malzeme ile temasta olan bir hava filmi içinden geçerek difüzyon yoluyla çevreye aktarılmasıyla oluşmaktadır. Film, malzeme ile çevre arasında hem kütle hem de ısı aktarımına karşı bir dirençtir. Film kalınlığı, kurutma gazının hızının arttırılmasıyla incelmekte fakat tümü ile ortadan kalkmamaktadır. Malzemenin tüm yüzeyinde serbest nem olduğu sürece, bu filmin iç yüzeyi su buharı ile doymun durumdadır. Kuruma esnasında, malzeme yüzeyinde film ve kurutma gazı kütlesi boyunca devam eden bir basınç farkı oluşmaktadır ve buna bağlı buharlaşma gerçekleşmektedir. Buharlaşıma, malzemenin yüzey alanı ve tanecik yüzeyi ile gaz kütlesi içindeki buhar basıncı arasındaki farkla doğru orantılı; filmin kalınlığı ile ters orantılı olarak artmaktadır (Berberovic, 2007).

Buharlaşıma hızını arttırmak için değiştirilmesi gereken parametreler ve bunun pratikte nasıl yapıldığı Çizelge 1.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Kurumayı etkileyen bazı parametreler ve bunların uygulamada ayarlanması yöntemleri (Berberovic, 2007)

Parametre Değişimi	Pratikte Uygulanan Yöntem
Malzemenin yüzeyini büyütme	Malzemenin boyutunu, mümkün olduğu kadar düşük tutmak (tanecik halinde hazırlamak)
Gaz hızını arttırmak	Bir fan vasıtasıyla gazın debisini ayarlamak
Gazın nem oranını mümkün olduğunca düşük tutmak	Kurutucuya beslenen taze havanın debisini ayarlamak
Gazın sıcaklığını mümkün olduğunca yüksek tutmak	Kurutucuya beslenen gazı ısıtmak, kurutucuya yanma gazları göndermek, kurutucu içine ısıtma yüzeyleri yerleştirmek.

1.3. Kurumayı Etkileyen İç Koşullar

Kurutma işlemi sırasında malzeme yüzeyinde serbest nem buharlaşırken, malzeme içinde sıcaklık ve nem farkı oluşmaktadır. Bununla beraber kurutulan malzemenin yapısı içerisindeki su, difüzyon, kılcal akış ve basınç altında malzemenin içinden yüzeye doğru hareket etmektedir. Suyun yüzeye akışı ile, iki önemli durum ortaya çıkmaktadır. Buna göre (Menon and Mujumdar, 1987);

- Malzemedeki nem, kritik nem oranının altına düştüğü andan itibaren kuruma sürecini etkilemeye başlar. Bu koşullarda kurumanın ilerleyebilmesi için, ya sıcaklığın artırılması veya kuruma süresinin uzatılması gerekmektedir.
- Suyun yapı içindeki hareketi sırasında, bazı malzemelerde gerilmelere ve bunun sonucunda kırılmalara-çatlamalara neden olabilmektedir. Bunun için kurutmanın kontrollü yürütülmesi gerekmektedir.

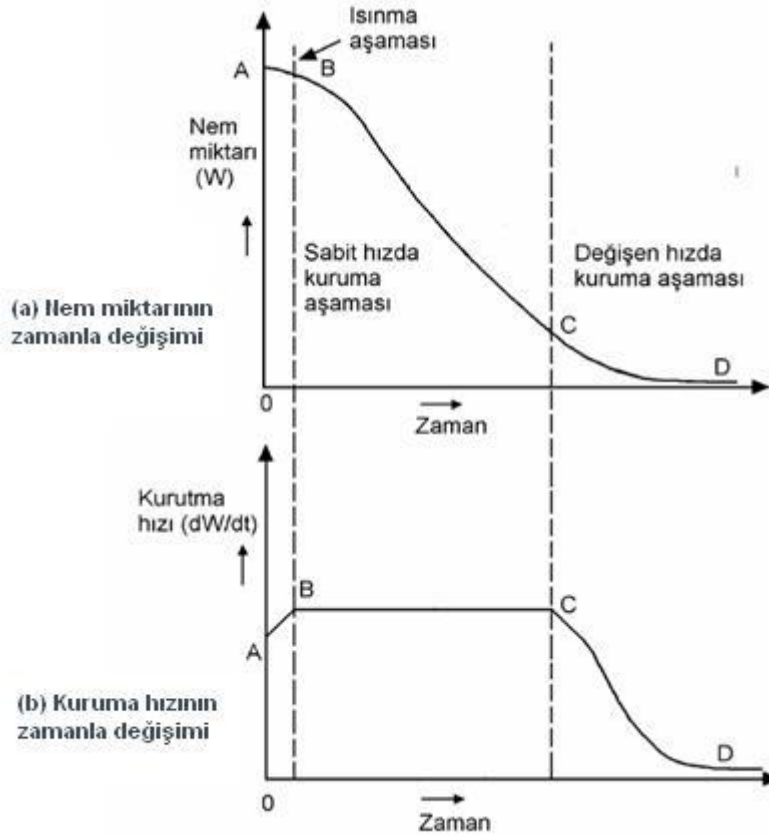
Kurumayı etkileyen malzeme özellikleri; tanecik boyutu, gözeneklilik özellikleri ve suyun yapı içindeki konumudur.

1.4. Kurumanın Aşamaları

Nem içeren bir maddenin kurutulması genelde üç aşamadan geçerek gerçekleşmektedir (Molnar, 1995).

1. Isınma aşaması.
2. Sabit hızda kuruma aşaması.
3. Düşen hızda kuruma aşaması.

Şekil 1.1’de kuruma sürecinde, malzemenin nem içeriğinin ve kuruma hızının zamanla değişimini gösteren eğriler gösterilmektedir. (a) da görüldüğü gibi, nem başlangıçta hızlı bir şekilde uzaklaştırılmakta, ancak daha sonra kuruma yavaşlamaktadır. (b) de ise bu kuruma aşamalarındaki kuruma hızlarının değişimi görülmektedir (Molnar, 1995).



Şekil 1.1. Kuruma eğrisi (Molnar, 1995).

- **Isınma Aşaması, [A-B]:** Kuruma sürecinin başlangıcını gösteren bu aşamada, malzeme ısınmaktadır. Önemli bir buharlaşma söz konusu değildir. Isınma süresi, kurutucunun çalışma koşulları ve kurutulacak malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak kısa veya uzun olabilmektedir.
- **Sabit Hızda Kuruma, [B-C]:** Serbest yüzey nemi taşıyan malzemelerin kurutulması sırasında, ilk aşamada yüzeydeki nem buharlaşmaya başlar ve buharlaşma hızı sabittir. Bu sürede sıvı filmi ve malzemenin yüzey sıcaklığı hemen hemen aynıdır. Bununla beraber yüzey sıcaklığı, gazın yaş termometre sıcaklığı birbirine yakın veya yüksek olabilmektedir. Fark ne kadar yüksek olursa kuruma hızı artar. Kuruma hızı, kurutucunun ısı ve kütle aktarım özellikleri, gazla temasta olan malzeme yüzeyi, malzeme ile gazın nem oranları ve sıcaklıkları arasındaki fark gibi çalışma koşullarına bağlı değişkenlik gösterir. Şekil 1.1’de C noktasından sonra yüzeydeki sıvı filmi çok incelmış ve yer yer kuru-sıcak noktalar oluşmaya başlamıştır.
- **Düşen Hızda Kuruma, [C-D]:** Malzemenin serbest nem değerinin altına düştükten sonra kuruma hızı aşamalı olarak düşmeye başlamaktadır. Bir taraftan yüzeydeki serbest nem buharlaşırken bir taraftan da malzemenin bünyesindeki nem çeşitli yollarla yüzeydeki serbest nem bölgesine taşınmaktadır. Kuruma sırasında, önce malzemenin yüzeye yakın bölgeleri kuruduğundan ve daha derinlerdeki suyun uzaklaştırılması söz konusu olduğundan, kuruma hızı gittikçe azalmakta, kuruma süresi uzamaktadır. Kuruma süresi yaklaşık malzemenin kalınlığına bağlı olarak karesiyle artmaktadır. Bu yüzden nemin çok düşük değerlere indirgenmesi gerektiğinde kurutulacak malzemenin mümkün olduğu kadar küçük boyutlarda hazırlanması, enerji tüketiminin azaltılması açısından yararlı olacaktır. Ayrıca kurutmada enerji tasarrufu için dikkat edilecek husus, gereğinden fazla kurutmayı hiçbir zaman yapmamaktır.
- **Denge Nemi:** Bir maddenin içerdiği nem, belli bir değerde buhar basıncı oluşturmaktadır. Bu durum, kurutulacak maddenin özelliğine ve sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kurutma sonucunda maddenin buhar basınçlarının

eşitlendiği, yani nem alış-verişinin dengeye oturduğu zamanda maddenin sahip olduğu nem miktarına denge nemi denir. Atmosfere açık bir şekilde değerlendirilecek malzemelerin nemini, denge neminin altına düşecek şekilde kurutma gereksizdir. Böyle bir işlem kurutucunun veriminin düşmesine ve fazla enerji tüketmesine yol açar. Çizelge 1.2’de çeşitli malzemelerin denge nemleri görülmektedir (Molnar, 1995).

Çizelge 1.2. Çeşitli malzemelerin atmosferik koşullarda denge nemleri (Molnar, 1995).

Malzeme	%Denge Nemi (Kuru temel)	Malzeme	%Denge Nemi (Kuru temel)
Beyaz ekmek	6.2	Odun (ortalama)	9.2
Deri	16.0	Pamuk (Nem çek.)	18.5
Kağıt (Gazete)	5.3	Pamuklu Giysiler	6.0
Kauçuk	0.6	Sabun	10.0
Keten Giyecekler	5.1	Un	8.0
Naylon	3.1	Yün	12.8
Orlon	1.4		
Not: Atmosferik koşullar: 25 °C sıcaklık ve %55 bağıl nem			

1.5. Kurutucuların Sınıflandırılması

Endüstride değişik özelliklere sahip çok sayıda maddenin kurutulması söz konusu olduğundan, çok sayıda kurutucu geliştirilmiş ve piyasaya sürülmüştür. Bu kurutucular kurutulacak maddenin yapısı, boyutu ve şekli, miktarı, besleme ve ısıtma şekli, çalışma şekli (kesikli veya sürekli), kuruma süresi gibi çok sayıda etken göz önüne alınarak geliştirildiğinden kesin bir sınıflandırma yapmak oldukça güçtür. Ancak kurutucular, bazı kıstaslar temel alınarak çeşitli gruplara ayrılmıştır. En ayrıntılı sınıflandırmalardan biri Kröll (1978) tarafından yapılmıştır. Bu sınıflandırma, katı madde ve operasyon türü temel alınarak yapılmıştır. Keey (1972)

tarafından yapılan sınıflandırmada ise kurutucular 39 ana ve 70 alt gruba ayrılmıştır. Porter vd. (1985) nemli katı maddenin ısıtılma şekli, fiziksel özellikleri ile taşınma ve depolanma özelliklerine göre kurutucuları sınıflandırmıştır. Keey (1972) ise maddenin ısıtılma şeklini, çalışma sıcaklığını ve maddenin kurutucu içinde gördüğü işlemleri temel alarak sınıflandırma yapmıştır (Menon ve Mujumdar, 1987).

Temelde kurutma sistemleri konveksiyon ve kondüksiyon tipi olarak ikiye ayrılırlar.

a) Konveksiyon kurutucular; doğrudan temaslı (direkt) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda, kurutma gazı/havası doğrudan kurutulacak madde ile temasa getirilmektedir. Sıcak gazın, kurutulacak madde ile doğrudan temas etmesi nedeniyle kuruma daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Gazın kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olmadığı uygulamalarda bu tip kurutucular kullanılmaktadır (Menon ve Mujumdar, 1987).

b) Kondüksiyon kurutucular; dolaylı temaslı (indirek) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda kurutulacak madde ile kurutma için kullanılan gaz/hava doğrudan değil, bir ısı değiştirici yüzey vasıtasıyla temasa gelmektedir. Bu tip kurutucular, kurutucu gazın kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Menon ve Mujumdar, 1987).

Bunları yanı sıra, bu iki grubun dışında kalan ve kurutma için herhangi bir gaz kullanmayan kurutucular bulunmaktadır. Bunların en bilinenleri, mikrodalga ve infrared tipi kurutuculardır. Bu kurutucuların çalışması, elektromanyetik ve infrared ışınları vasıtasıyla kurutma prensibine dayanmaktadır. Bu kurutucular genelde tekstil, film ve bazı boya maddelerinin kurutulmasında kullanılmaktadırlar (Menon ve Mujumdar, 1987).

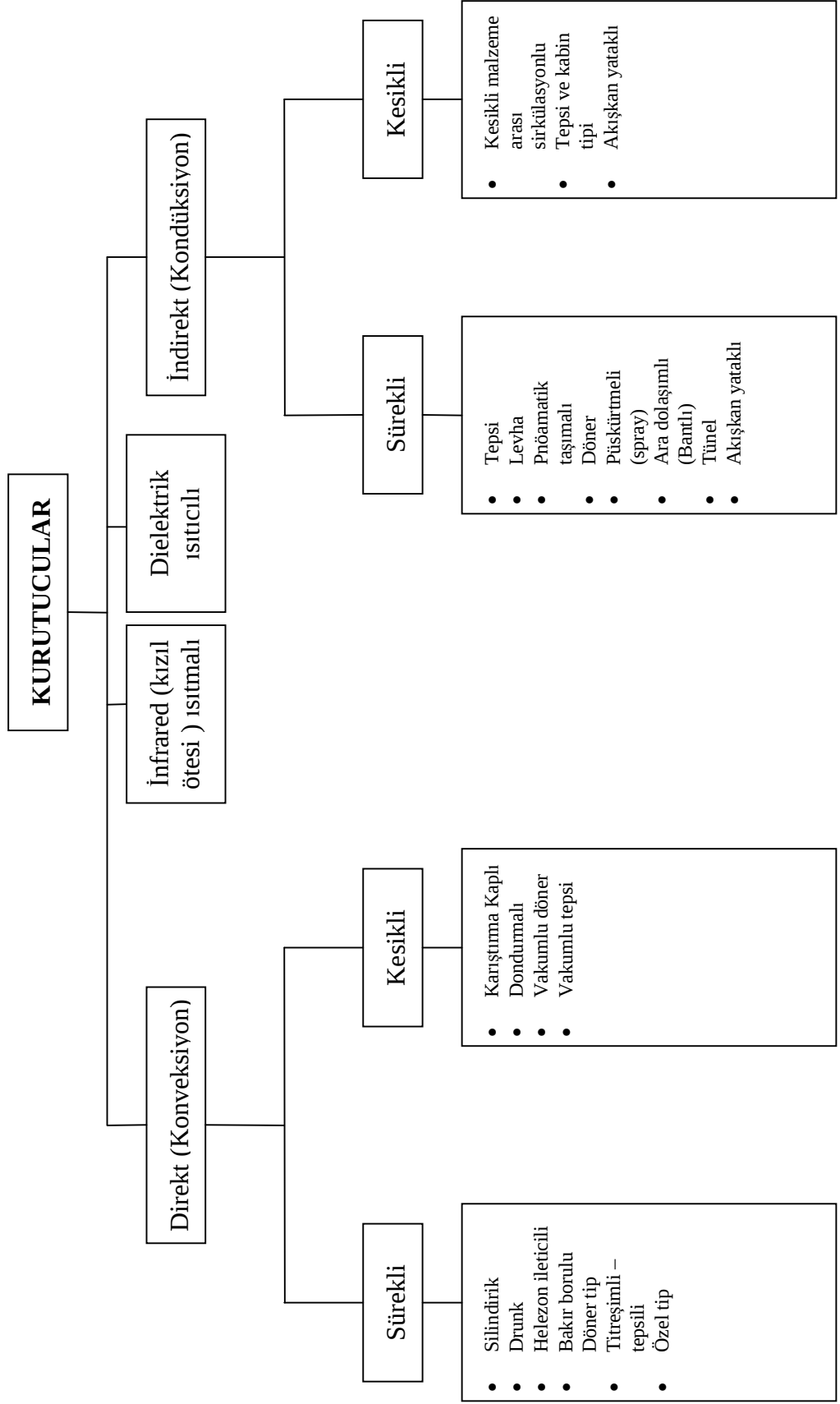
Çizelge 1.5'te belli başlı bazı kurutucuların buharlaştırma hızları verilmiştir. Çizelge 1.3'te belli başlı bazı kurutucuların buharlaştırma hızları verilmiştir. Kurutucuların çalışma şekli, kullandığı ısı transferi yöntemi ve özgün özellikleri temel alınarak yapılan sınıflandırılması Çizelge 14'te verilmiştir. Çizelge 1.5'te ise kurutulacak

nemli maddenin formu temel alınarak seçilecek en uygun kurutucu örnekleri verilmiştir.

Çizelge 1.3. Çeşitli kurutucuların kurutma etkinlikleri ve buharlaşma hızları (Walas, 1990; Strumilla et al., 1995).

Kurutucu Tipi	Buharlaşma Hızı		Buharlaşma Hızı (%)
	kg su/hm ²	kg su/hm ³	
Doğrudan - Sürekli			
Akışkan yatak		800 - 2500	20 - 80
Bant			40 - 60
Döner	30 - 80		40 - 70
Hava sürüklemeli		4 - 100	50 - 75
Sprey	2 - 50		20 - 50
Tünel			35 - 40
Doğrudan Kesikli			
Raflı			95
Dolaylı - Sürekli			
Tank(Drum)			85
Döner			75 - 90
Dolaylı - Kesikli			
Karıştırmalı tava			90
Vakumlu döner			<70
Vakumlu raf			-
İnfrared			30 - 60
Dielektrik			60
*Kurutma Etkinliği = (Buharlaşma için harcanan enerji / Kurutucuya verilen toplam enerji) x 100			

Çizelge 1.4. Islak bir türünden kurutulmuş katı üretiminde kullanılan kurutucu tipleri (Güngör ve Özbalta, 1997)



Çizelge 1.5. Çeşitli kurutucularda kurutulabilecek maddelerden bazı örnekler (Walas, 1990).

Kurutucu Tipi	Kurutulan Maddeler
Sprey Kurutucu	Lastik kimyasalları, sülfonatlar, anorganik fosfatlar, seramikler, killer, kahve, deterjan, farmosetik ürünler, pigmentler, mürekkep, anorganik sülfonatlar, lignosülfat esaslı ağaç artıkları, melamin ve üre aldehit, reçineler, polivinil klorürü, süt, yumurta, nişasta, maya, silikajel, üre, tuzlar
Tank (Drum) Kurutucu	Patates, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, tereyağı, kaymağı alınmış süt, dekstrin, maya, poliaktriloamid, sodyum benzoat, aseatalar, fosfatlar, şelatlar, alüminyum oksit, m - disülfürik asit, baryum sülfat, kalsiyum asetat, - karbonatlı - fosfatlar, kostik soda, ferrosülfat, yapıştırıcılar, kurşun asetat, sodyum benzensulfonat, sodyum klorür.
Vakum Tank (Drum) Kurutucular	Şuruplar, kaymağı alınmış süt, maltlanmış süt, kahve, malt ekstratları ve yapıştırıcı.
Vakumlu Döner Kurutucular	Plastikler, organik polimerler, naylon çipler, her türlü kimyasallar, plastik lifli maddeler, organik kıvamlaştırıcılar, selüloz asetat, nişasta ve sülfür pulcukları.
Bant Kurutucular	Maya, kömür briketleri, yapay lastik, katalizörler, sabun, yapıştırıcılar, silika jel, titanyum dioksit, üre formaladehit, killer, beyaz kurşun, krom sarısı ve metalik stearatlar
Döner Çok Rafli Kurutucular	Pulvarize kömür, pektin, penisilin, çinko sülfat, atık çamur, pirofosforik çinko tozları, çinko oksit peletleri, kalsiyum karbonat, borik asit, kırılğan kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, kalsiyum klorit pulcukları, kafein, anorganik floridler, 40°C civarında ergiyebilen kristaller, elektronik saflıkta fosforlar ve solvent - ıslak organik katı maddeler.
Akışkan Yataklı Kurutucular	Laktoz esaslı tanecik malzemeler, farmosetik kristaller, kömür, kum, kireçtaşı, demir cevheri, polivinil klorür, asfalt, tanecik halindeki nem çekiciler (desiccant), aşındırıcı maddeler ve tuzlar.
Hava –Süpürmeli (Pnömatik) Kurutucular	Maya filtre kekleri, nişasta, kanalizasyon çamuru, jips, meyve bulpları, bakır sülfat, kil, krom sarısı, yapay kazein ve potasyum sülfat.
Dondurucu Kurutucular	Et, deniz ürünleri, sebzeler, meyveler, kahve, derişik maya ürünleri (beverages), farmosetikler, veteriner ilaçları ve kan plazması.
Dielektrik Kurutucular	Pişmiş maddeler, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, mobilya kerestesi, kaplamalar (veneers), kontraplak, yapay tahta, su - esaslı köpük plastik plakalar ve bazı tekstil ürünleri.
Infrared Kurutucular	Tekstil, kâğıt ve film, boya ve mine yüzey parlaticıları, gözenekli olmayan bulk maddeler.

1.6. Kurutma Sistemlerinde Otomasyon

Genel anlamda otomasyon, bir işin insan ile makine arasında paylaşılmasıdır. İnsan gücün yoğun olduğu otomasyon sistemleri yarı otomasyon, makinenin yoğun olduğu sistemler de tam otomasyon olarak isimlendirilirler. Tüm dünyanın açık bir pazar haline geldiği rekabetçi koşullarda üretim hızı, standart, güvenli ve verimli kılmak, günümüzde bir zorunluluk haline gelmiştir. Endüstride bu zorunluluğun karşılığı şüphesiz ki otomasyondur (Kurtulan, 2008).

Otomasyon, fabrika sahibine zaman, kalite, hız ve kâr olarak geri dönmektedir. Bu faydalarının yanı sıra ilk kurulum maliyeti olarak dezavantajları vardır. Bununla beraber toplumsal olarak fabrikada çalışan sayısının azalmasına sebebiyet vermektedir (Kurtulan, 2008).

Enerji tasarrufunun önem kazandığı, az enerji ile çok ürün elde etmenin üretimin temel felsefesi olarak kabul gördüğü çağımızda, tüm üretici firmalar ürettikleri ürünlerde en iyi kaliteyi yakalamaya çalışmaktadırlar. Enerji tasarruflu ürün elde etmenin yolu da kaliteli malzeme, kaliteli işçilik ve iyi bir otomatik kontrolden geçmektedir (Yılmaz ve Yavuz, 2006).

Kurutma işlemi ve kurutucu seçiminde dikkate alınması gerekli temel etkenler, istenen niteliklere sahip ürünün elde edilmesinde minimum enerji tüketimi ve mümkün maksimum kuruma hızına ulaşmaktır. Kurutma işlemlerinde, ısı ve kütle transferinin birçok uygulaması iç içedir. Ayrıca kurutulacak ürünlerin, cinsi, miktarı, kütlesi, gözenek yapısı vb. özellikleri de kurutma işlemlerini çok karmaşık bir hale getirmektedir. Kurutma alanında yapılan araştırmaların özünü de, bu karmaşık yapıların gelişen teknolojik uygulamalarla sadeleştirilmesi ve bu sistemlerin enerji tüketimlerinin azaltılarak verimlerinin yükseltilmesi teşkil etmektedir. Bunun sağlanması da, başta kurutma sistemine uygun otomasyon sistemleri ile mümkündür (Yılmaz ve Yavuz, 2006).

1.7. Ağaç Malzemenin Özellikleri

Ağaç kök, gövde ve dallardan ibaret bir bitkidir. Herhangi bir ağaç gövdesinden Şekil 1.2'deki gibi enine bir kesit incelenecek olursa farklı yapıda 2 kısım görülür. Bunlardan dış kısım kabuk (peridermis), iç kısım odun olarak isimlendirilir. Kabuk ile odun arasında gözle görülmeyen ve kambiyum (soymuk) adı verilen bir tabaka bulunur. Odun kısmı yakından incelendiğinde, bir öz etrafında iç içe geçmiş halkalardan oluştuğu görülecektir. Kesit resminde açık renkli dış kısma diri odun, koyu renkli iç kısma öz odun, öz etrafında iç içe geçmiş halkalara yıllık büyüme halkaları, özden çevreye doğru uzanan çizgilere özışını denir. Halkalar, kışın ağaç büyümesi durduğunda daha belirgin hale gelir. Tropik bölgelerde sürekli büyüme olduğundan halkalar belirgin halde oluşmamaktadır (Bozkurt ve Erdin, 1987).



Şekil1.2. Çam ağacının enine kesiti (Bozkurt ve Erdin, 1987).

Literatürde ağaç için odun, kereste, tahta gibi genel ifadeler kullanılmakla birlikte çalışmamızda “ağaç malzeme ve kereste” terimleri tercih edilmiştir. Ağaç malzeme kimyasal ve fiziksel özellikleri olmak üzere iki başlıkta incelenebilir.

1.7.1. Kimyasal özellikleri

Odunun genel kimyasal elementleri karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) den oluşmaktadır. Çok az miktarda (<%1) Azot (N) ve kül bulunmaktadır. Bu kimyasal elementler çeşitli kombinasyon şekilleri ile bazı kimyasal bileşikler halinde odunun yapısında bulunurlar. Odunun genel kimyasal bileşikleri, selüloz, hemiselüloz ve lignindir. Az miktarda pektin vardır (Örs ve Keskin, 2001).

Odunun %90'ını oluşturan esas bileşikler dışında ilave olarak birçok organik ve inorganik madde hem hücre çeperi üzerine hem de hücre lümeni üzerine yerleşmiştir. Bu yan bileşikler ekstraktif maddeler olarak tanımlanır. Bunların bazılarının çözeltimesi çok güç olmaktadır. Organik esaslı ekstraktif maddeler içerisinde çok bilinenleri uçucu yağlar, tanenler, reçineler, sakız, lateks, alkoloidler ve renk maddeleridir. Bunlardan tanenler ve reçineler kurutma sırasında renklenmelere ve lekelenmelere neden olmaktadır. İnorganik esaslı maddeler içerisinde en bilinenleri ise silis ve kalsiyum tuzlarıdır. Bunlar biçme ve işleme zorlukları yaratmaktadır (Örs ve Keskin, 2001).

Odun düşük sıcaklıklarda ve düşük konsantrasyondaki kimyasal maddelere dayanıklı olduğundan tank yapımında kullanılabilir. Kimyasal yapısındaki selüloz ve ligninden dolayı odun, düşük konsantrasyondaki asitlere karşı dayanımı bazlara karşı olan dayanımından yüksektir (Bozkurt ve Erdin, 1987).

1.7.2. Fiziksel özellikleri

Farklı ağaç malzemelerini birbirinden ayıran fiziksel özellikler mevcuttur. Bu fiziksel özelliklerin belli başlıları özgül kütle, lif doygunluğu nemi, denge nemi, taze hal rutubeti, ağaç malzemesi nemidir. Çizelge 1.6'da bazı ağaç türlerinin fiziksel özellikleri verilmiştir.

- **Özgöl kütle:** Ağaç malzemesinin yoğunluğu demektir. Kerestenin tam kuru haldeyken özgöl kütlesi (δ_0), tam kuru haldeki kerestenin ağırlığının (m_0) hacmine (V_0) oranıdır.

$$\delta_0 = m_0 / V_0 \text{ [gr/cm}^3\text{]} \quad (2.1)$$

Kereste uzun süre su içinde bırakılarak ağaç malzemenin tüm gözeneklerinin su ile dolmasına tam yaş hal denir. Kereste kurutma fırınında $103 \pm 2^\circ\text{C}$ de ağırlığı değişmez hale gelene kadar kurutularak ağaç malzemedeki gözeneklerdeki suyun tamamen buharlaştırılması sonucunda tam kuru hal elde edilir (Örs ve Keskin, 2001).

Yapılan çalışmalar, bir ağaç malzemenin tam kuru haldeki özgöl kütle değerinin, onun kolay veya geç kuruduğu hakkındaki bilgiyi en doğru şekilde verdiğini ortaya koymaktadır. Ağaç malzemesinin özgöl kütlesinin artması ile ağaç malzemenin kuruması güçleşmekte, suyun difüzyon hızı düşmektedir (Ceylan, 2007).

Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin kurutma bakımından özellikleri (Gündüz, 1994).

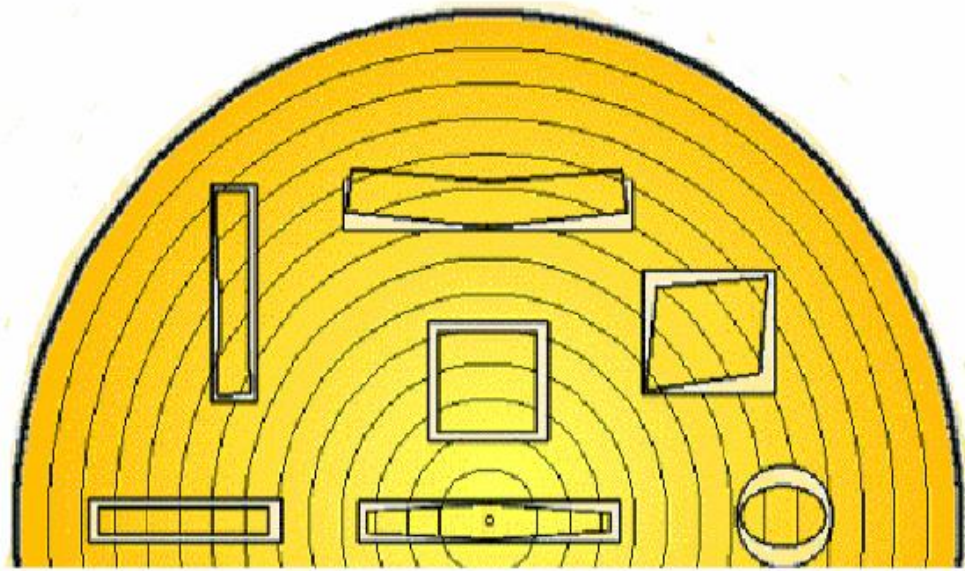
Ağacın cinsi	ÖZELLİKLER					
	Özgöl ağırlık (gr/cm ²)		Lif doygunluğu rutubet derecesi (%)	Taze hal rutubet miktarı (%)		Hacimsel yoğunluk değeri (kg/m ³)
	Tam kuru	Hava kurusu		Diri odun	Öz odun	
Toros Karaçamı (Dursunbey)	0.520	0.56	30	150	50	464
Uludağ Göknarı	0.400	0.43	34	135-190	45-80	359
Toros Sediri	0.487	0.52	21	116,6	39,3	437
Çoruh Meşesi (Belgrad)	0.806	0.86	26	109,1	92,8	666
Doğu Kayını	0.630	0.66	29,1	82,2	50,6	531

- **Lif doygunluk rutubeti (LDR):** Ağaç malzemesindeki serbest suyun dışındaki liflere bağlanmış su miktarıdır. Bu değer %20 ila %40 arasında değişkenlik göstermektedir. Genelde ortalama olarak LDR %28 kabul edilir. Bu özelliğin kurutma fırınlarının çalışma periyotlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereklidir (Örs ve Keskin, 2001).
- **Denge rutubeti:** Ağaç malzemesinin nemi, çevre hava sıcaklığına ve bağlı nemine bağlı higroskopik dengeye geldiği değerdir. Kaynaklarda denge nemi yerine hava kurusu rutubeti denmektedir. Normal sıcaklıkta kapalı mekânlarda ağaç malzemenin denge nemi % 7-15 arasındadır. Ağaç malzemesi bulunduğu ortamdan su alıp verebilen malzeme olmasından dolayı kereste fazla kurutulup fırından çıkartıldığı zaman nem alır. Ya da bunun tam tersi kurumanın tam yapılamadığında fırın dışında bekleme yaparken çevreye nem vererek, gerekli denge nemini sağlar (Ceylan, 2007).
- **Taze hal rutubeti:** Kesimden hemen sonraki ağaç malzemesinde bulunan nem miktarıdır. Taze hal rutubeti; ağaç türlerine göre, aynı ağaç türünde ağaçtan ağaca ve hatta ağacın gövdesinin içinde farklılıklar gösterebilir. Genelde, taze hal rutubet değeri %200 ila %20 arasında değişmektedir (Örs ve Keskin, 2001).
- **Ağaç malzemesi nemi (r):** Kuru halindeki ağırlığına göre içeriğindeki su kütlesi miktarıdır. Kerestenin rutubet miktarı (r), kerestede su miktarının (m_s) kerestenin tam kuru haldeki kütlesine (m_0) oranıdır (Örs ve Keskin, 2001).

$$r = m_s / m_0 \quad (2.2)$$

- **Ağacın çalışması:** Ağaç malzeme bünyesine su alıp verebilen gözenekli bir malzemedir. Ağaç malzeme kullanıldığı ortamdaki sıcaklık ve nem şartlarına göre ortamdan nem alarak nemlenme veya ortama nemini vererek kuruma yapar. Bu olay sırasında ağacın boyutlarında genişleme veya daralma meydana gelir. Bu duruma ağacın çalışması denir. Ağacın çalışması lif doygunluk rutubeti (% 0 – 30 arasında) sınırları içerisinde gerçekleşir. Şekil 1.3’de görüldüğü üzere ağaç

malzemenin çalışması her yönde aynı olmayıp liflere paralel yönde en az, yıllık halkalara teğet yönde en fazla olmaktadır. Bundan dolayı i gerilmeler meydana gelmekte ve sonuçta çatlama, çarpılma, eğilme, çekme gibi kusurlar oluşmaktadır (rs ve Keskin, 2001).



şekil 1.3. Enine kesitten alınma konumuna göre daralma miktarı (Simpson, 1991)

- **Rutubet meyli:** Ağaç malzemenin kurutulması esnasında malzemenin iç ve dış tabaka arasında oluşan nem farkına denir. Taze kesilmiş ağaın bünyesi yaklaşık aynı rutubet değerindedir. Ağaç malzemesi kurumaya tabi tutulduğunda gözenekli malzeme olduğundan önce dış yüzeyi kurumaya başlar. Bu yüzden i ile dış tabakalar arasında nem farklılığı ortaya çıkar. Rutubet meyli kurutma olayında, kurutmanın gidişi, hızı ve kalitesi hakkında bilgi verir (Erden, 1977).
- **Kurutma meyli:** Ağaç malzemenin kurutulması sırasında herhangi bir andaki ortalama nemin, o andaki fırın içindeki sıcaklık ve bağıl nemin ağaç malzemede meydana getirebileceği ortalama denge nemine oranıdır. Kurutma meylinin azalması ağaç malzemesinde oluşacak kurutma kusurlarının ortaya çıkma riskini azaltır, fakat bununla beraber kurutma süresini uzatır. (Erden, 1977).

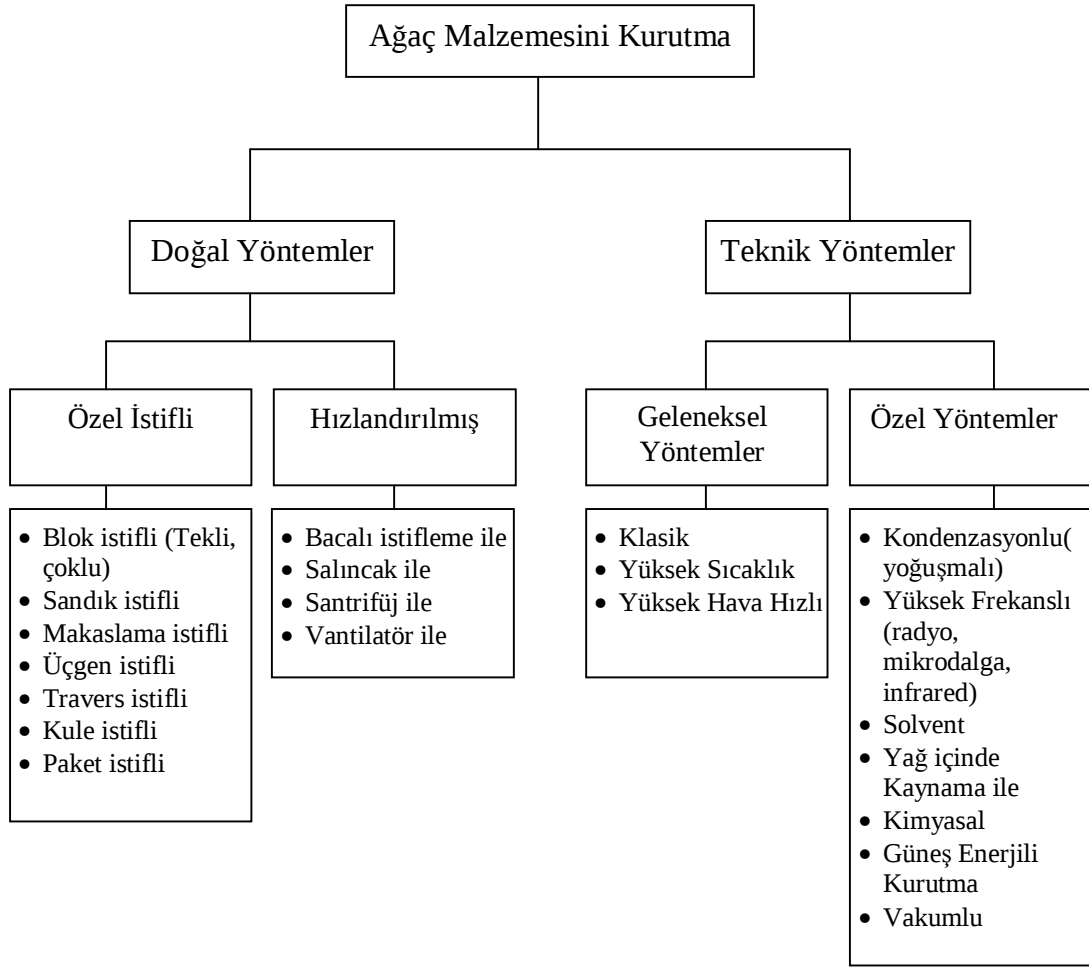
1.8. Ağaç Malzemesini Kurutma Metotları

Ağaç malzemesinin kurutulmasında doğal ve teknik yöntemler olmak üzere iki temel metot kullanılmaktadır. Zamanla teknolojinin gelişmesi ile birlikte bu yöntemlerin alt basamaklarında pek çok uygulama metotları ortaya çıkmıştır. Şu an için kullanılan metotlar Çizelge 1.7’de sınıflandırılmıştır. Piyasada masraflarının düşük olması sebebiyle daha çok doğal kurutma yöntemleri tercih edilmektedir. Teknolojinin gelişmesi, enerjinin verimli kullanılabilmesi ve özel ağaçtan yapılmış ürünlerin elde edilebilmesi için kondenzasyonlu ve vakumlu kurutma yöntemleriyle çalışan kurutma sistemleri yaygınlaşmaktadır (Erden, 1977).

1.8.1. Doğal kurutma

Kerestenin açık hava iklim şartlarında denge rutubetine ulaşmaya kadar bekletilmesi, doğal kurutma yöntemidir. Kereste, düzenlenmiş uygun bir yerde tekniğine uygun bir şekilde istiflenerek, açıkta veya sundurmalar altında kurutulmaktadır. Bu yöntemle ürün kurutulması, kontrol edilemeyen hava sıcaklığı, bağıl nemi ve rüzgârı etkisi altında gerçekleşmektedir. Güneş ışınları yardımıyla direkt veya dolaylı olarak keresteler ısınmakta ve sıcaklık etkisiyle havanın nem alma miktarı artmaktadır. İstiflerin iç-alt kısımlarında kerestelerdeki nemin buharlaşmasıyla ortamdaki hava soğuduğundan nemli hava istiflerin alt kısımlarında toplanmaktadır. Bu olumsuz etkiyi azaltabilmek için istiflerin alt kısımları rüzgârı iyi alacak şekilde yapılması gerekmektedir. Doğal kurutmaya ağaç malzemesinin nemi en fazla %12-15’e kadar düşürülebilmektedir. Kullanım yerine göre ağaç malzemesinin nemi %8’e kadar kurutulmalıdır. Tam kurutulmadan elde edilmiş mobilya, lambri vb. gibi ürünlerde zamanla ağacın çalışması yüzünden deformasyonlar ortaya çıkmakta, böylece büyük değer kaybına sebebiyet vermektedir. Doğal kurutmada ağaç malzemesindeki rutubet değerinin daha da düşürülmesi ve kurutma hızının artırılması için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; bacalı istifleme, salıncaklı kurutma, buharlama, elektrik devresinde tutma, vantilatör yardımıyla kurutma (Örs ve Keskin, 2001).

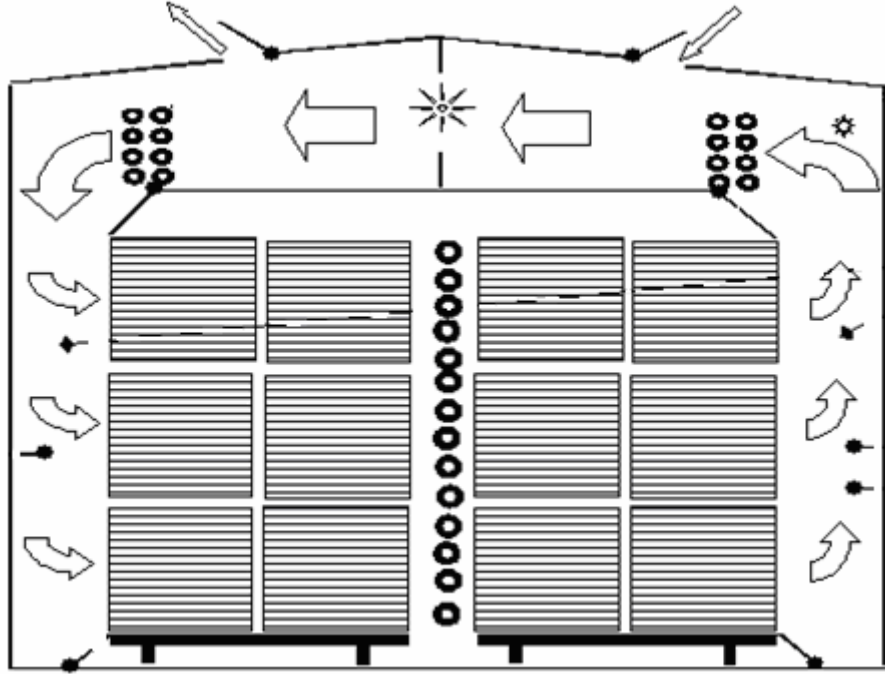
Çizelge 1.7. Ağaç Malzemesi Kurutma Yöntemleri (Yılmaz ve Doğan, 2001).



1.8.2. Klasik kurutma

Ağaç malzemesi kurutmada en yaygın kullanılan yöntemdir. Fırındaki ağaç malzemeleri, ortamda bulunan 100 °C'nin altındaki nemli hava yardımıyla yapılan kurutma olayıdır. Klasik kurutma yönteminde, fırın dışından (çevre) sıcaklığı düşük taze hava fırın içerisine alınmaktadır. Ağacın cinsine bağlı ayarlanan sıcaklığa fırın içindeki hava ısıtılmaktadır. Isınan havanın nem tutma özelliği arttığından ağaç malzemelerinden nem almaya başlar. Bir süre sonra sıcaklığa bağlı olarak havanın yüklenebileceği nemi ağaçtan alma işlemi bittikten sonra sıcak-nemli-hava aspiratörler yardımıyla fırın dışına (çevreye) atılır. Atılan hava miktarı kadar fanlar yardımıyla çevreden taze hava fırın içine alınır. Bu işlem ağaç kuruyana kadar devam eder. Her bir işlemde ısıtılmış hava atılmakta ve enerji israf edilmektedir. Eğer tedbir

alınmazsa enerji maliyetleri yüksek olmaktadır. Örnek olarak Şekil 1.4’de kurutma fırınının kesiti görünmektedir. Fakat bunun dışında fırın kapasitesine göre farklı boyutlarda ve buna göre kerestenin istiflenmesi olmaktadır (Serbes, 2003).



Şekil 1.4. Kurutma fırını kesiti (Milli eğitim B., 2006)

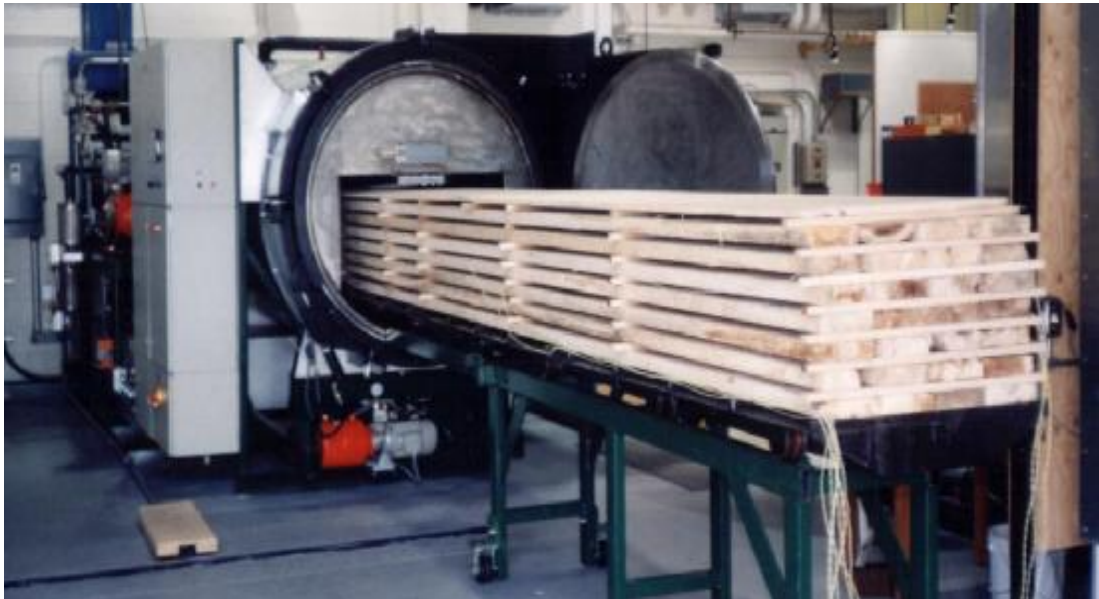
1.8.3. Kondenzasyonlu kurutma

Yoğuşturma metodlu kurutma ise, fırın içinde bulunan havadaki nemin ayrıştırılmasıyla ağaç malzemesinin kurutulmasıdır. Fırın içindeki hava ısıtılarak ağaç malzemesinden nemi aldıktan sonra yoğuşturma bölümünde sıcak nemli hava soğutularak üzerindeki fazla nemi bırakmaktadır. Aynı soğuk az nemli hava, ısıtılarak yine ağaç malzemesine doğru yönlendirilmektedir. Sistem kapalı çevrimde fırın içinde çalışarak havanın çok az kısmını dışarı atmakta ve buna bağlı olarak az miktarda havayı dışarıdan almaktadır. Genelde bu fırınlar 40-50 °C’lerde çalıştığından kurutma süreleri uzun olmasına rağmen günümüzde klasik kurutma fırınlarıyla aynı sürede kurutabilecek şekilde dizayn edilebilmektedir. Bu tarz kurutma sistemlerine ısı pompası takviye etmek suretiyle, klasik kurutma

sistemlerine nispetle daha az enerji kullanılarak kurutma yapılabilir (Erden, 1997).

1.8.4. Vakum kurutma

Kurutma fırınının iç ortam basıncı düşürülerek ağaç malzemesindeki suyun yüzeylere doğru hareketini ve yüzeylerden buharlaşmasını çabuklaştırmak amaçlı vakumlu kurutma yöntemi kullanılır. Burada ağaç malzemesinin ısıtılması önem arz eder. Vakumlu sistemlerde ağaç kurutma iki yöntemle sağlanmaktadır. Şekil 1.5’deki gibi sistem tam vakumda kurutma yapacaksa ağaçlar ısınan levhalar arasına yerleştirilir. Fırın içindeki hava en az seviyeye indirildiği için ısıtma kondüksiyon (iletim) ile olacaktır. Diğer yöntem ise periyodik vakumlama yapılarak, fırın içindeki hava ile sağlanır. Fırın içindeki ısıtılan hava yardımıyla ağaçlar ısıtılır. Fırın içi vakumlama yapılarak basıncı düşürülür ve bir süre bekletilir. Böylece fırın içindeki sıcak nemli hava tamamen dışarıya atılmış olur. Bekleme sürecinde ağaç malzemesinin içindeki nemin yüzeye çıkması beklenilmiş olur. Yeniden dışardan taze hava alınır. Bu periyod devam eder. Kuruma süresi vakumlu kurutmalarda klasik kurutmaya göre daha kısadır. Enerji maliyeti olarak vakum pompasının harcadığı fazla enerji vardır (Ceylan, 2007).



Şekil 1.5. Orta ölçekli vakumlu kurutma fırını (Garrahan, and Kidlark, 2001).

1.9. Kurutmada Ağaç Malzemedeki Ortaya Çıkan Problemler

Kurutma sırasında ağaç malzemesi üzerinde bazı kusurlar oluşabilmektedir. Bu kusurlar, doğal olarak kurutmanın kalitesini düşürmektedir. Kurutma sistemlerinin tasarlanmasında ve çalıştırılmasında bunları göz ardı etmemek gerekir. Çizelge 1.8’de yapılan deneylerde meydana çıkmış kurutma kusurlarının resimleri verilmiştir. Genelde karşılaşılan kurutma kusurları ve nedenleri aşağıda sunulmuştur (Örs, ve Keskin, 2001).

- **Çok hızlı kurutma:** Bu durumda kurutmanın sonucunda kerestenin dış yüzeyinde buruşma ya da bal peteği şeklinde bir görüntü oluşur. Hızlı kurutmadan dolayı nemlendirme problemi yaşanacağından kerestede çatlama oluşur.
- **Çok yavaş kurutma:** Kurutmanın sonucunda kereste yüzeyinde lekelenme, küf oluşumu, çürüme, eğrilik ve çarpıklıklar meydana gelir.
- **Yanlış istifleme:** Bu durum sonucunda çarpılma, özellikle eğilme, düzensiz kuruma meydana gelebilir.
- **İşletme hataları:** Kerestenin kurutulması sırasında fazla kurutulması veya tam kurutulmamış olmasıdır. Bunun yanı sıra ağacın cinsine göre uygulanan yöntem de yanlış seçilmiş olabilir. Bu durumda kerestede ya çatlama ya da küf oluşumları gözlemlenebilir. Aynı zamanda çarpılmalar da ortaya çıkabilir.

Çizelge 1.8. Kurutma deneyleri sırasında numunelerde ortaya çıkan kusurlar

KUSUR	RESİMLİ GÖSTERİMİ
Ağaç kurutma süresinin uzaması sonucu oluşan küflenmeler	
Yüksek sıcaklıkta kurutma sonucu kerestenin yüzeyine çıkan çıra özü	
Kurutma esnasında oluşan çarpıklıklar	
Kurutma esnasında oluşan çatlaklar	

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Eskiden günümüze kadar insanoğlu kurutma olayını kullanmıştır. Gıda ürünlerinden kullanılacak malzemelere kadar farklı yöntemlerle kurutma yapılmıştır. İnsanlar uzak mesafelere göç ederken bozulmaması için gıdaları kurutarak muhafaza etmişlerdir. Ağaç malzemeyi yaş halde büküp şekil vererek ve bu haliyle doğada kurutarak, evlerinin çatılarını, sallarını ve mızraplarını yapmışlardır. En bilinen yöntem doğada sergi yaparak kurutma yapılmasıdır. Günümüzde kurutma teknik ve doğal olarak iki grupta toplanır. Gelişen teknolojiyle birlikte, doğal kurutma grubunda farklı metotlar geliştirilmiş; teknik kurutmada da çok değişik yöntemler geliştirilmiş, geliştirilmeye de devam etmektedir.

Burdurlu (1988) ahşabın klasik kurutma, yoğunlaşmalı (kondenzasyonlu) ve mikrodalga kurutma teknikleriyle kurutulması üzerine araştırma amaçlı yüksek lisans tezi sunmuştur. Yaptığı çalışmada, ülkemizde ahşap kurutma üzerine yazılan kitapların 1970’li yıllardan sonra ortaya çıktığı ve ahşap kurutmada kullanılan yöntemlerin ne olduğu açıkça görülmektedir. Çalışmada öncelikli olarak mevcut ahşabın geleneksel yöntemlerle kurutma, kondenzasyonlu kurutma ve mikrodalga ısıtma ile kurutma üzerine araştırma bulguları ortaya konmuştur. Klasik kurutmanın yanı sıra mikrodalga tekniğiyle kısa sürede ve keresteleri istifleme yapmadan kurutma yapılabildiği, fakat kuruluş maliyetinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacı, kondenzasyonlu kurutmanın uzun zaman almasına rağmen ahşaptaki yapısal değişikliğin azlığından dolayı tercih edilebileceğini ortaya koymuştur.

Zırzakıran (1990) yapmış olduğu tez çalışmasında, doğal kurutma ve kondenzasyonlu kurutma yöntemleriyle gürgen ($0,15 \text{ m}^3$) ile çam ($0,17 \text{ m}^3$) cinsi kerestelerin kurutulması üzerine yaptığı deneylerin sonuçlarını sunmuştur. Gürgen cinsi kerestelerin neminin temmuz ayında doğal kurutmayla 12 günde % 15’e, kondenzasyon metoduyla 8 günde % 11,5’e düştüğünü; çam cinsi kerestelerin ise aynı ayda yapılan deneylerde neminin doğal kurutma yöntemi ile 10 günde %8’e, kondenzasyonlu kurutmada 8 günde %8’e indiğini tespit etmiştir. Sonuçta; kereste kurutulmasında doğal kurutmanın ekonomik olması avantajının yanı sıra bazı

olumsuzlukları beraberinde getirdiğini ortaya koymuştur. Malzemenin dış şartlardan etkilenmesi, kurutmanın kontrol edilemeyişi ve kurutma süresinin çok uzaması bu dezavantajlardandır. Kondenzasyonlu kurutma yönteminin doğal yöntemle göre daha tercih edilebilir olduğunu yaptığı deneylerle ortaya koymuştur.

Vakumlu kurutma sistemleri genelde tam vakum yapıp ağaçların kondüksiyonla veya mikrodalga gibi yöntemlerle ısıtılarak kurutması şeklinde çalışmaktadır. Fırın içindeki hava ile ısıtma yapılacaksa periyodik vakumlama yöntemi ile kurutma yapılmalıdır. Serbes (2003) yapmış olduğu çalışmada ağaç kurutma yöntemlerinden klasik kurutma ile periyodik vakumlu kurutma metoduyla çalışan fırınları inceleyerek mukayese etmiştir. Kayın ve çam cinsi keresteleri kurutarak yaptığı deneylerinde bu iki yöntemle kurutulan kerestelerin öz kütleli değişimini ve eğim mukavemetini incelemiştir. Deneylerini alüminyumdan yapılmış klasik kurutma fırınında yapmıştır. Elde ettiği sonuçlar Çizelge 2.1’de görülmektedir. Kerestelerin deneye başlamadan önceki değerlerini ve kurutma sonucu elde edilen değerlerini vermiştir. Buna göre vakum altında kurutulan ağacın eğilmeye karşı mukavemetinin arttığı ve daha kısa sürede kuruduğu tespit edilmiştir.

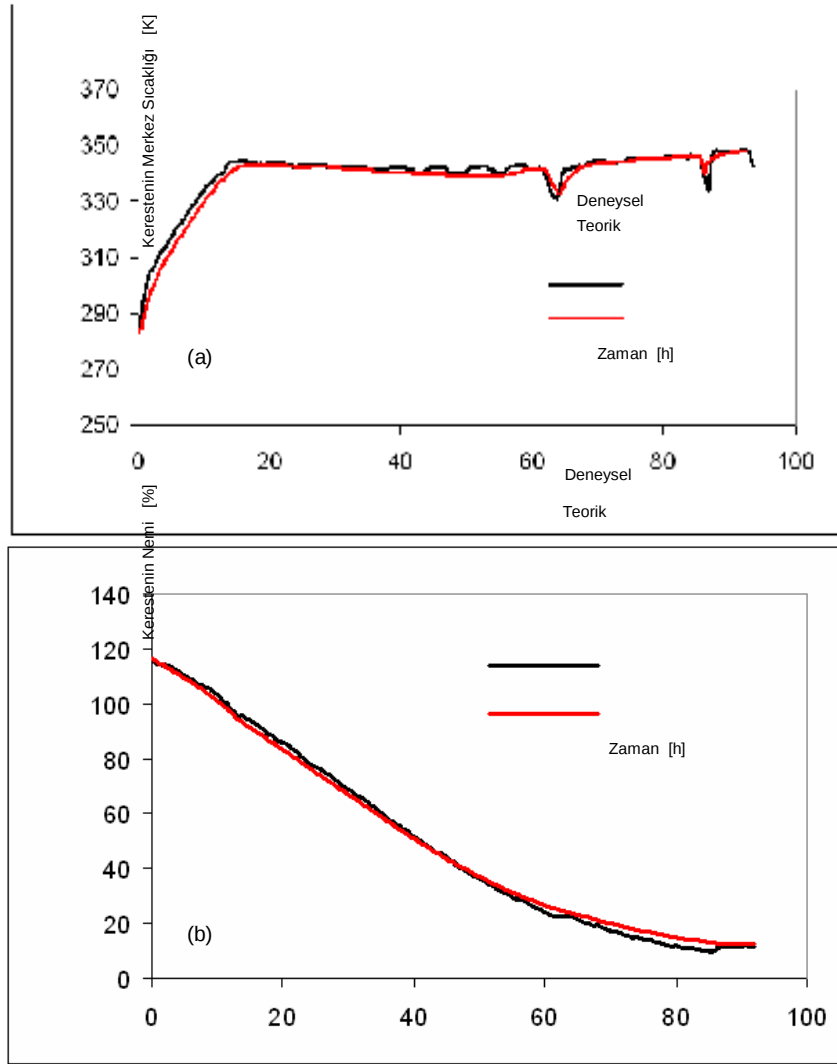
Kurutma olayının temeli malzemeden sıvının ayrıştırılmasıdır. Harcanacak enerjiyle malzeme üzerinden kütle transferi gerçekleştirilir. Gündüz (1994) yapmış olduğu çalışmada, gözenekli malzemelerle çevre arasında meydana gelen ısı ve kütle geçişi olayını ele almıştır. Ağaç, higroskopik bir malzeme olmanın yanında gözenekli yapı özelliğine de sahiptir. Buna binaen kereste için matematiksel bir modelleme yapılarak, kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferi olayı bir bilgisayar programı yardımıyla grafiklerle ortaya konmuştur. Farklı cinslerde ağaçların kurutulması için otomasyon yazılımlarına yardımcı olacak bir çalışma yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Serbes (2003)'in yaptığı çalışmanın sonucu

Ağaç Türü	Başlangıç değerleri		Klasik Kurutma				Vakumla kurutma				
	Kurutmaya başlamadan önce ağacın nemi (%)	Kurutma sonunda ağacın nemi (%)	Kurutma Sıcaklığı (°C)	%9 Nemde Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Eğilme Dirençleri (N/mm ²)	Kuruma Süresi (gün)	Kurutma Sıcaklığı (°C)	Vakum Basıncı (mmBar)	%9 Nemde Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Eğilme Dirençleri (N/mm ²)	Kuruma Süresi (gün)
Doğu Kayını	40	9	60–45	0.68	12.789	18	50	550	0.78	16.222	7
Sarı Çam	40	9	60–50	0.50	9.287	10	40	450	0.55	13.587	4

Kurutma sistemlerinin simülasyonu günümüzde önem kazanmaktadır. Simülasyonlar, kurutma fırınları imal edilmeden sistemin ağaç türüne ve boyutlarına göre ne kadar enerji kullanacağı ve malzemeyi ne kadar sürede kurutacağı hakkında fikir vermektedir. Simülasyon üzerine hazır paket programlar veya bilimsel araştırmalarla ortaya çıkmış kişisel programlar vardır. Bu tip çalışmaların doğruluğunu ortaya koymak için deneysel çalışmalar yapılarak hatalar karşılaştırılır.

Berberovic (2007) yapmış olduğu master çalışmasında kütle ve ısı transferi denklemleriyle klasik kurutma fırınları için bir matematiksel model oluşturmuştur. Deneysel çalışma için 500 adet kısa boylu kereste kullanılmış, kurutma olayı atmosfer basıncında klasik fırında yapılmıştır. Elde etmiş olduğu teorik ve deneysel sonuçlarından bir tanesi Şekil 2.1'de grafikte görülmektedir. Buna göre teorik çalışma sonucu elde edilen veriler ile deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

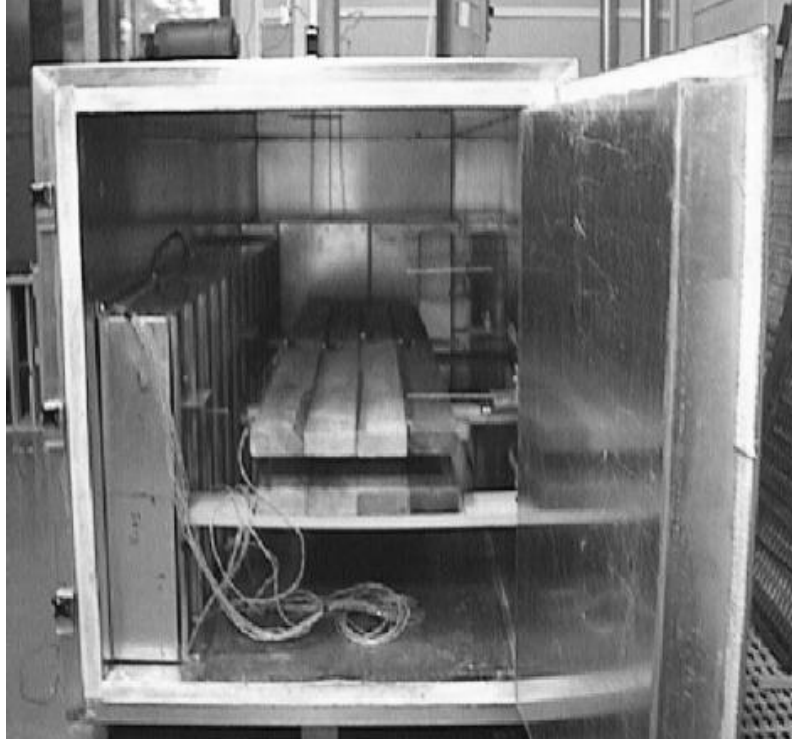


Şekil 2.1. Kurutma esnasında (a) kerestenin merkez sıcaklığının değişimi, (b) kerestenin ortalama nem değişimi (Berberović, 2007)

Awadalla vd. (2004) ağaç kurutma işleminde teorik olarak zamana bağlı ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu elemanlar metoduyla, simülasyon yazılımlarından biri olan TRNSYS programı yardımıyla modelleme yapmışlardır. Klasik kurutma tüneli ile güneş enerjili kurutma tüneli olmak üzere 2 farklı grupta çalışılmıştır. Deneyler ve simülasyon yardımıyla elde ettiği sonuçlar karşılaştırdığında maksimum $\pm \%10$ 'luk sapmayla yaklaşık sonuçlar elde etmiştir.

Yan et al. (2001) klasik kurutma fırınlarında daha kısa sürede kaliteli kereste kurutmak için otomasyon sistemleri kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır.

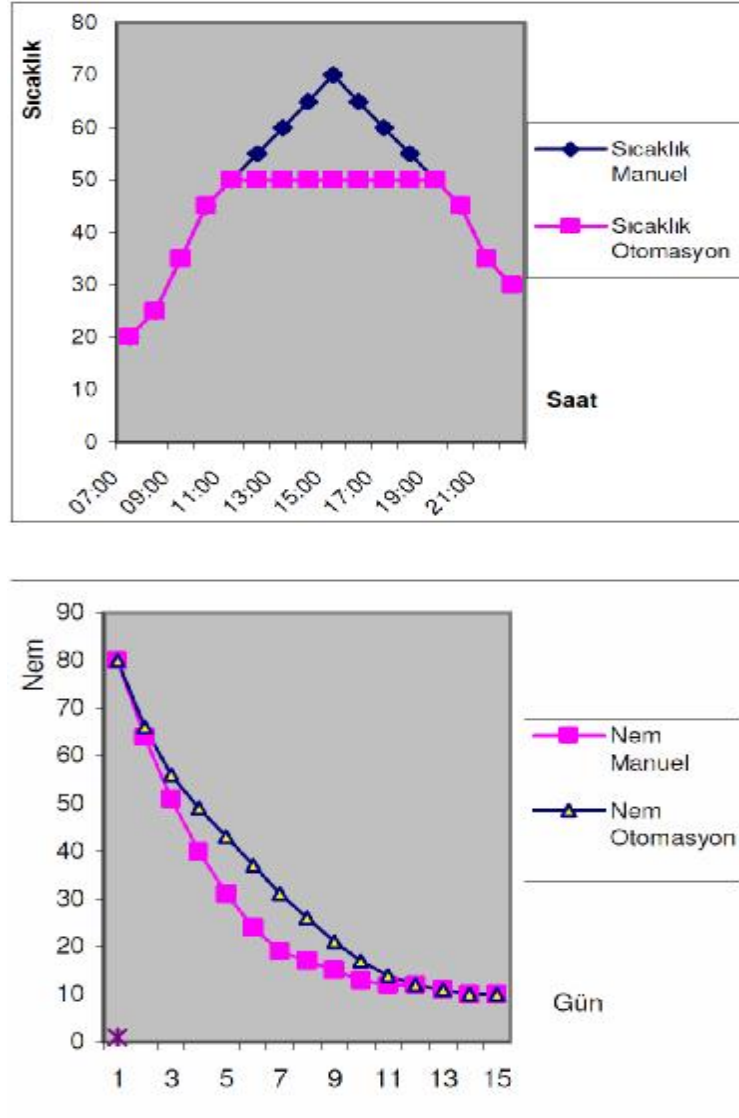
Kullanmış oldukları yöntemler, PID (proportional-integral-derivative) ve FLC (fuzzy logic control)'dir. Deneysel çalışma için kullanılan sistem, Şekil 2.2'de görülmektedir. Sistemin çalışmasında PID kontrolünde ayarlanan değerlerle çalışma esnasında kaydedilen değerler arasında % 3-5 arasında sapma olmuştur. FLC kontrolünde maksimum % 3, genelinde % 1 hata ile sistemin çalışmasının sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.2. Klasik kurutma fırını (Yan et al., 2001)

Otomasyon sistemi ile simülasyonun bir arada olduğu otomatik kontrol sistemleri (SCADA otomasyonu) çok pahalı olduğu için kurutma sistemlerinde uygulanmamaktadır. Ancak Aker (2006)'ın yapmış olduğu çalışmada, Muğla üniversitesinde DPT projesi yardımıyla kurulmuş, güneş enerjili ve ısı pompalı kereste kurutma fırınının otomasyonunu SCADA sistemiyle yapılmıştır. SCADA otomasyonu denetim sürecinde, merkezi yönetim, denetleme ve bilgi toplama sistemi kurmuştur. Bu sistemin en büyük avantajı otomasyon yanında simülasyon yapılabilmesidir. Sistem elemanları simülasyonda tek tek incelenerek en ideal çalışma oluşturulmuştur. Sistem PLC yardımıyla uygun otomasyonda çalıştırılmış;

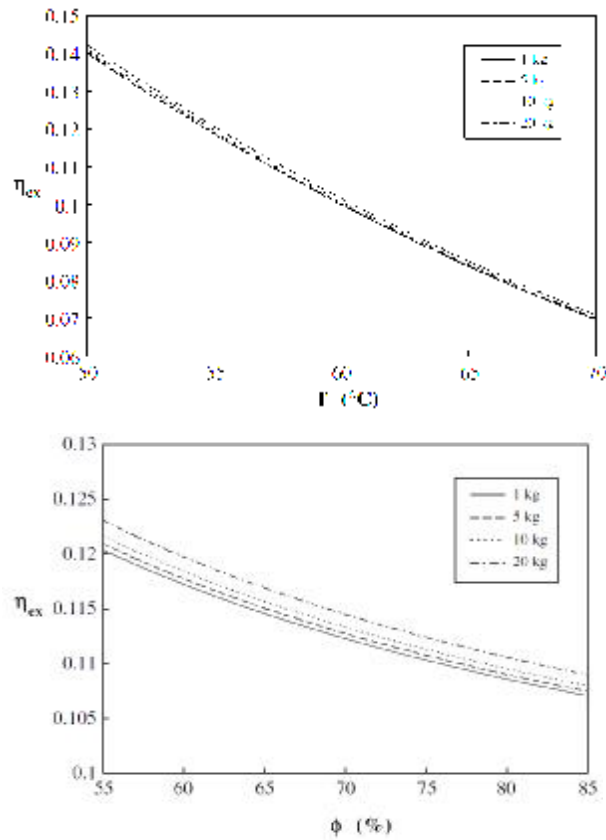
otomasyonlu ve otomasyonsuz çalışma şartları Şekil 2.3'deki gibi sunulmuştur. Doğal olarak sistemin otomasyonda kurutulmasında sıcaklık değerleri dahi kontrol edilerek kurutmanın daha kaliteli olmasının sağlandığı grafikten anlaşılmaktadır. Sonuçta ise bu tip sistemlerin klasik kurutmalara göre maliyet analizleri yapılmıştır. Yatırım maliyetlerinin 1 yıl geçmeden sistemin yapmış olduğu enerji tasarrufuyla kendini ödediğini ortaya koymuştur



Şekil 2.3. Kurutma fırınında zamana bağlı sıcaklık ve nem değişimleri (Aker, 2006).

Kurutma sistemlerinin verimli çalışmalarının yanında ekserji verimlilikleri önemlilik kazanmaktadır. Dinçer and Şahin (2004), kurutma işleminin termodinamik analizde yeni bir modeli olan ekserji analizi yapmıştır. Ortaya koymuş olduğu örnek modelde

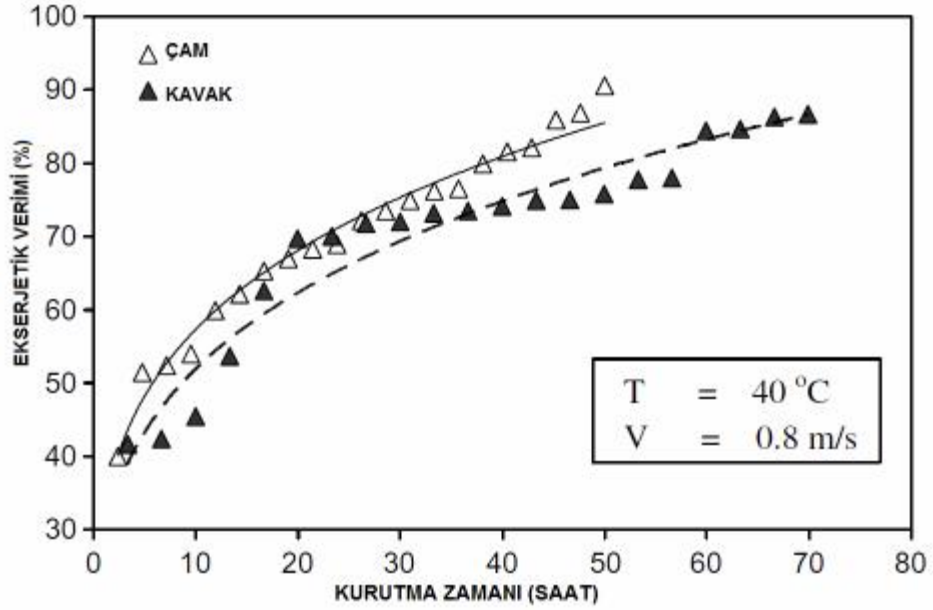
kurutma havası, kurutulacak ürün, dışarı atılan nemli havanın ekserji analizlerini yapan bir model oluşturmuşlardır. Şekil 2.4'te verilen grafikler, sistemin ekserji veriminin kurutulacak ürünün miktarına göre değil, kurutma sıcaklığına ve kurutulacak ürünün nemine bağlı olduğunu göstermektedir. Sonuçta, kurutma sistemlerini oluşturan donanımların en uygun şekilde seçimi ve en uygun şekilde çalışma ayarlarının yapılması için örnek bir sistem modeli ortaya konmuştur.



Şekil 2.4. Kurutma ürünlerinin sıcaklığına ve nemine göre ekserji verimlilikleri
(Dinçer and Şahin, 2004)

Ceylan vd.(2007) ısı pompalı kereste kurutucusunun enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Isı pompa destekli kereste kurutma fırınında çam ve kavak cinsi ağaçlardan elde ettikleri kereste numunelerini kurutmuşlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlarla sistemin ekserji analizini yapmışlardır. Şekil 2.5 yapmış oldukları deneysel çalışmanın ekserji verimlerini göstermektedir. Ağaç ürünleri nemi hemen bırakmadığından sistemin ilk çalışma sürecinde ekserji verimi düşüktür. Zamanla

sistemde ürün kuruma başlayınca ekserji veriminin artmaya başladığı Şekil 4'te açıkça gözükmemektedir.



Şekil 2.5. Kerestelerin kurutulması süresince kurutma fırınının ekserji değişimi
(Ceylan, vd., 2007)

Literatürde kurutma üzerine birçok çalışma mevcuttur. Fakat kereste kurutma konusunda klasik kurutma dışında kalan yöntemlerde yapılan çalışmalar çok kısıtlıdır. Kurutma sistemleri ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda, klasik kurutma dışındaki yöntemler hakkındaki araştırmaların teorik boyutta ya da laboratuvar şartlarında kaldığı görülmektedir. Günümüzde yapılan çalışmalar ise, daha çok piyasa şartlarına uygun sistemler kurulması ve bunlar üzerinde uygulanan deneysel çalışmalar şeklindedir. Gün geçtikçe var olan kurutma tekniklerinde kullanılan ekipman-cihazların teknolojinin değişimiyle yenilendiğinde deneysel çalışmaların yenilenmesi önem arz etmektedir.

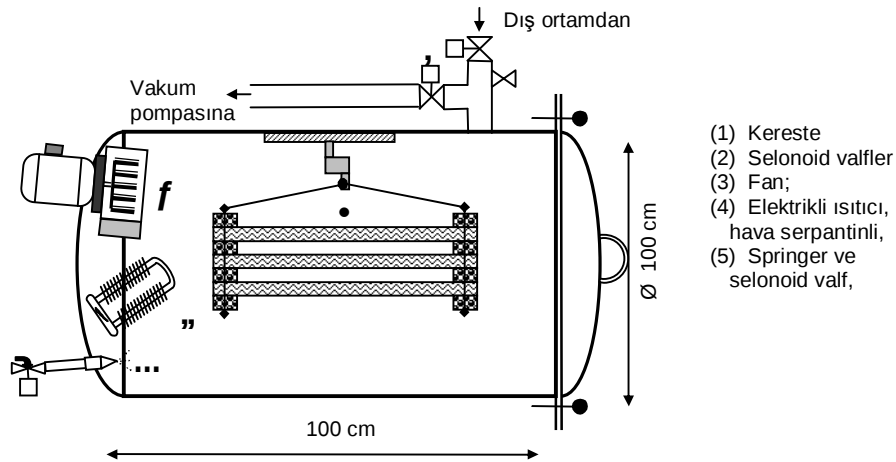
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada; hava sızdırmayan bir yapıya sahip kurutma havasının düzgün dağılımının sağlandığı, hava serpantinli ısıtıcıları bulunan, istenilen basınçlarda çalışmanın sağlandığı otomasyon sistemli bir kurutma fırını imal edilmiştir. Kurutma fırınında, farklı çalışma şartlarında çam cinsi keresteler kurutulmuştur. Kurutma fırınında yapılan deneylerden elde edilen veriler PLC ve veri toplama ünitesi ile kayıt altına alınmıştır.

3.1.1. Kurutma fırının yapısı

Tasarımı ve imalatı yapılan kurutma fırını, 1 m çapında 1 m uzunluğunda olup yaklaşık 0,80 m³ 'lük hacme sahiptir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kurutma fırınının şekli

Kurutma ortamında nem bulunduğundan fırının kurutma yapılan bölümlerinde paslanmaz krom-nikel sac kullanılmıştır. Sistem vakum basıncında çalıştığından herhangi bir çökme veya deformasyon olmaması için tank dışına mukavemet artırıcı lama malzeme ile yapılan kemerler ilave edilmiştir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere fırının kapakları bombeli şekilde imal edilmiş ve kuvvetlendirilmiştir. Kurutma tankı

10 cm kalınlığında cam yünüyle, kapakları ise 5 cm kalınlığında kauçuk-köpük ile izole edilmiştir.



Şekil 3.2. Kurutma fırınının imalat aşamasında görüntüsü

Kurutma fırınının ısıtılması elektrikli rezistanslarla sağlanmıştır. Şekil 3.3'te her biri 1.5 kW'lık güce sahip olan hava serpantinli rezistanslar görülmektedir. Rezistanslar fırın içerisinde, fanın çıkış ağzının hemen önüne yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Hava serpantinli ısıtıcılar

Fırın içinde havanın sirkülasyonunu sağlamak için, Şekil 3.4'te görülen 2000 m³/h hava debili radyal salyangoz tipi fan kullanılmıştır. Fanların motor gövdeleri 50 °C sıcaklığa dayanmadığından fanın motoru fırın dışına konulmuştur. Fanın elektrik motorunun çalışma verimi kataloguna göre 0.85 dir.



Şekil 3.4. Salyangoz tipi vakum pompası

Sistemden çekilen kurutma havasının nemli ve sıcak olması sebebiyle 10 m³/h debili sulu tip vakum pompası kullanılmıştır (Şekil 3.5) . Vakum pompasının elektrik motorunun verimi 0.85 dir.



Şekil 3.5. Sulu tip vakum pompası

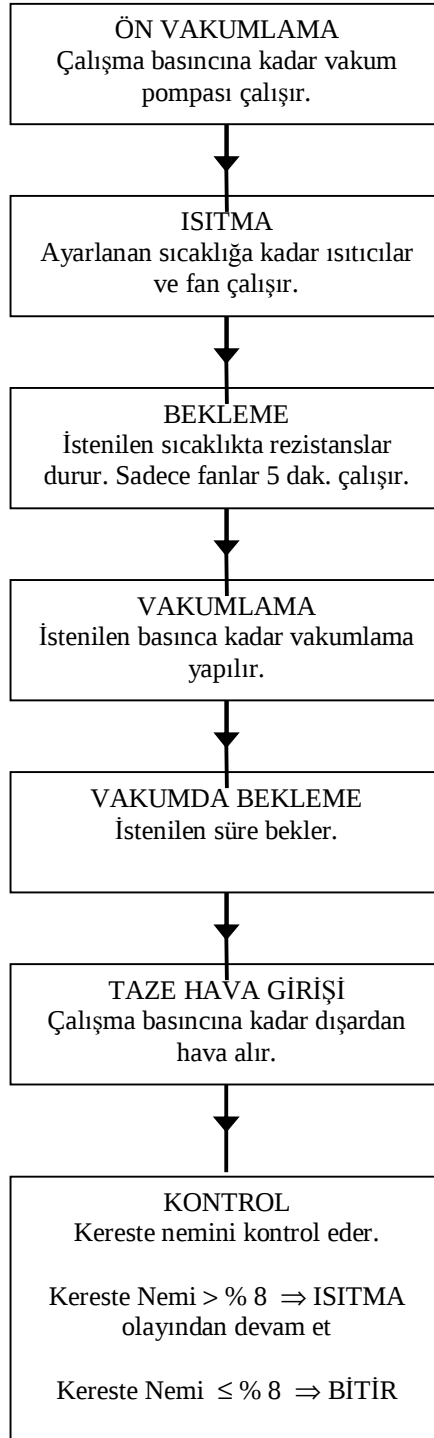
Sistemin hava giriş çıkışlarında ve su girişlerinde selenoid valfler kullanılmıştır. 220 Volt kontrollü havanın girişinde ve çıkışında 1" çapında 2 adet selenoid valf, su girişinde ise 1/2" çapında 1 adet selenoid valf kullanılmıştır.

Deneyisel vakumlu kurutma fırınının otomasyon sistemi; ölçüm ekipmanları (sensörler), programlanabilir lojik kontrol (PLC= Programmable Logic Controller) denetimi ve dokunmatik özellikli kontrol ekranı birimlerinden oluşmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Otomasyon panosu

Kurulan deney sisteminde 3 adet sıcaklık, 1 adet hava nemi, 1 adet basınç, 3 adet ağaç nemi sensörlerinden gelen sinyaller PLC'nin veri toplama (analog) ünitesi tarafından toplanmaktadır. Sistemin çalışması için yapılan yazılımın iş akış şeması Şekil 3.7'de verilmiştir. İş akış şemasına bağlı kalarak PLC'ye yazılım oluşturulmuştur. Yazılım, yapılan çalışma için özgün olarak geliştirilirken birçok deneme yapılmıştır.



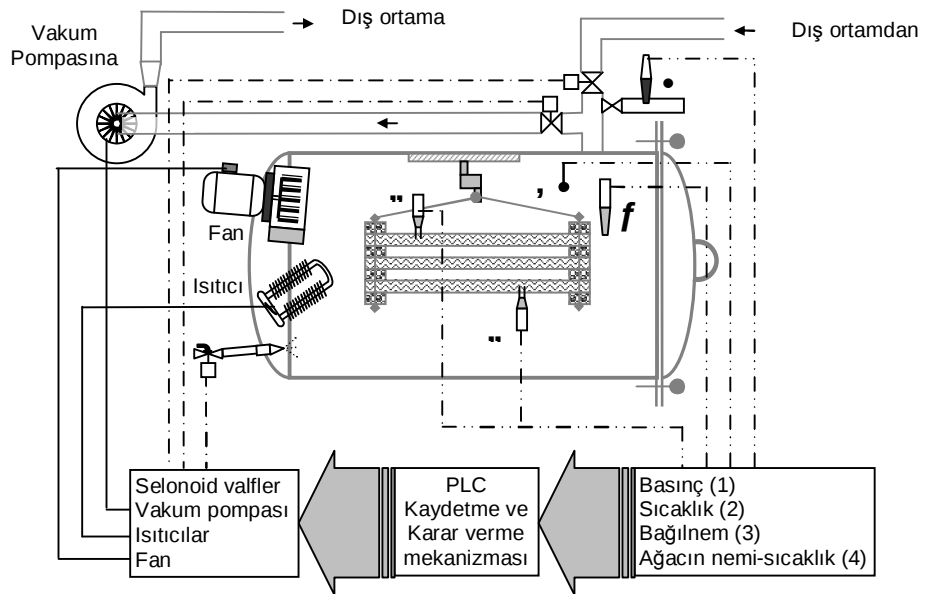
Şekil 3.7. PLC yazılımının iş akış şeması

Deneylerin yapılacağı şartlar, PLC'nin kumanda-kontrol panelinde ayarlanmıştır. Kurutma sisteminin çalışma ayarlarına bağlı olarak otomasyon yardımıyla;

- Kerestenin istenen sıcaklığa getirilmesi,
 - Vakumlamayla sıcak nemli kurutma havasının ortamdan uzaklaştırılması,
 - Vakumda bekletilmesi,
 - Dışarıdan çalışma basıncına kadar taze hava girişi sağlanması,
- işlemleri yapılmaktadır.

PLC sistemi, kurutma fırınının çalışması esnasında kendisine bağlı sensörlerden gelen bilgiyi belli periyotlarla kaydetmektedir. Ayrıca PLC, sistem durduğunda kurutma fırınının çalışma süresini, vakum pompasının, fanın ve ısıtıcıların tükettiği enerjiyi kaydetmektedir.

Otomasyon sistemi Şekil 3.8'de görüldüğü üzere 1 adet PLC, 1 adet analog modül, 3 adet adaptör, 9 adet 220-380 voltluk kontaktör, fan hız ayarlayıcı, 1 adet termik, 3 adet güç sayacı, 11 adet sigorta ve gerekli bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Otomatik kontrol panosunda kullanılan cihazların markaları ve özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

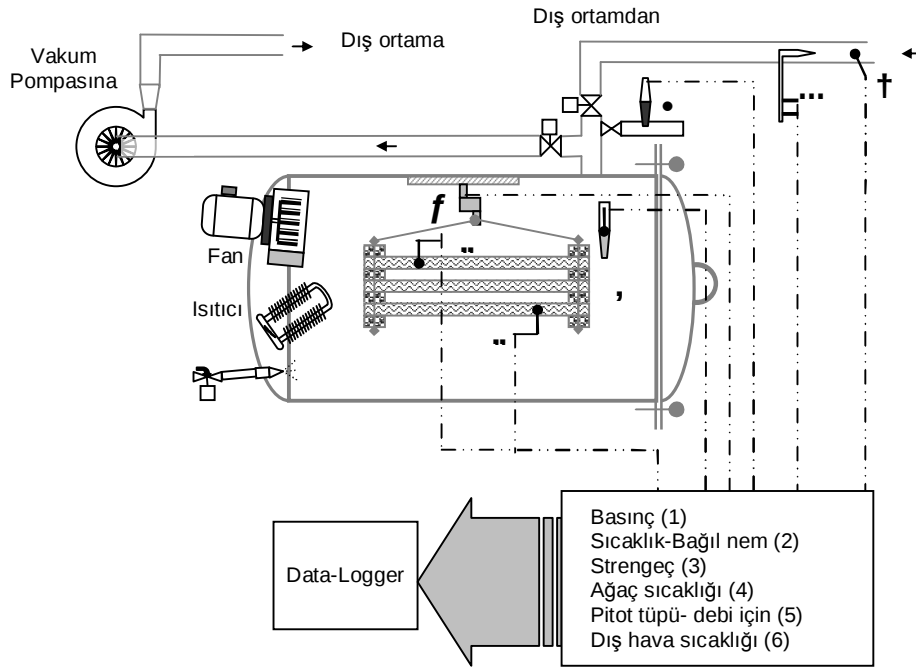


Şekil 3.8. Otomasyonun kurutma sisteminde yerleşimi

Çizelge 3.1. Kurutma sisteminin otomasyonunda cihazlar ve sensörler

CİHAZ	MARKA	ÖZELLİK
PLC	 Unitronics vision350	• 3,5 inç ekran 256 renk • Dokunmatik ekran • 4,5 MB hafıza • 20 dijital giriş • 2 analog giriş • 12 röle çıkışı • RS232 bağlantı
Analog modül (PLC ile çalışmaktadır)	 Unitronics expansion modül	• Analog sinyal üreten sıcaklık, nem, basınç gibi tüm sensörler bağlanabilir
Güç sayacı	 Entes ES32-L	• 220 volt mono faz • ± 4 waat
Nem sensörü	 Dwyer 657C-1	• Polimer film nem sensörü • 0-100 % bağıl nem • ± 2 % hassasiyet • 4-20 mA çıkış sinyali • 24 volt
Basınç sensörü	 Dwyer 683	• 0-16 bar basınç transmitter • $\pm 0,25$ % hassasiyet • 4-20 mA çıkış sinyali • 24 volt
Sıcaklık sensörü	 Tetecis portatif tip	• K tipi termokupl • -200 ila +200°C • $\pm 0,2$ % hassasiyet • 0,1 ° ölçüm çözünürlüğü

Deneysel kurutma fırınının çalışması esnasında elde edilen veriler kaydedilmiştir. Bu amaçla sertifikalı Ahlborn veri kaydedicisi ve sensörleri kullanılmıştır. Şekil 3.9’da görüldüğü şekliyle Ahlborn veri kaydetme sistemiyle fırın içi nem-sıcaklık, fırının basıncı, ağacın sıcaklığı, ağacın ağırlığı, giren havanın miktarı, giren havanın sıcaklığı ve çıkan havanın sıcaklığı takip edilmiştir. Ayrıca ağaç nem sensörüyle kurutulan ağaçların nem değerleri ölçülmüştür. Kullanılan data-logger ve sensörler hakkında ayrıntılı bilgi Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

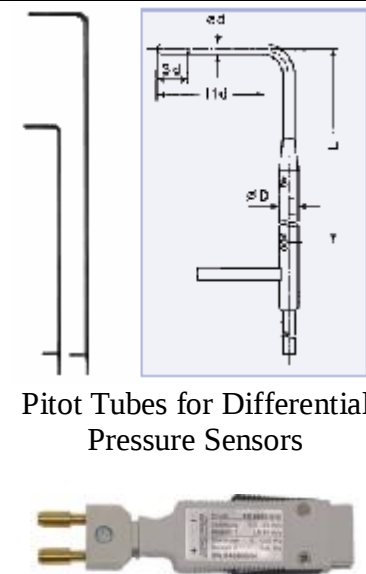


Şekil 3.9. Ahlborn data-loggerin kurutma sistemine bağlantısı

Çizelge 3.2. Kurutma sisteminin veri kaydetme cihazı ve sensörler

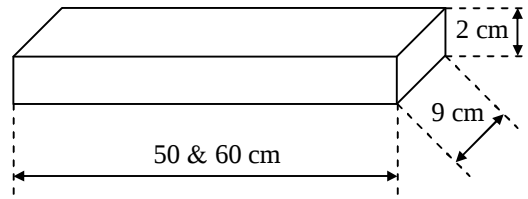
CİHAZ	MARKA	ÖZELLİK
Data-logger	 Almemo 2890-9	• Delta-sigma 24-bit, 50 ölçüm/sn • RS 232 bilgisayar çıkışı, • Analog sinyal, hafıza kartı, röle modülü veya network çıkışı • Grafik, 128x128 piksel, 16 satır, arkadan aydınlatmalı • 512 kB dahili (100,000 veri) • 6 NMH şarjlı batarya, 1600 mA, 2.5 saatte hızlı şarj. • 204 x 109 x 44 mm (B x E x Y), 550 gr. ABS plastik (maksimum 70 °C)
Ağaç nem sensörü	 Moisture Sensor Type FHA636MF	• Ölçüm aralığı ahşap için %7- %30 nem • Plastik saplı 40 x 130 mm (E x B), 260 gr. • 0 – 60 °C çalışma sıcaklığı • 0 – 2 V sinyal çıkışı • 7,5 – 12 V güç kaynağı • Maks.10mA akım tüketimi
Ağırlık sensörü	 Tension and Compression Sensor	• ± 4 waat • Ölçüm aralığı 2kN, • Yük limiti maksimum %150. • Dinamik yük maks: %70. • 23°C referans ısısı. • $< \pm 0.2\%$ gerilim hassasiyeti • $< 0.15\text{mm}$ normal ölçme yolu • -10 to $+70^\circ\text{C}$ etkin aralık. • $< 0.07\%$ 30 dak. sürüklenme hatası ve statik yük

Çizelge 3.2. (devam)

CİHAZ	MARKA	ÖZELLİK
Debimetre	 Pitot Tubes for Differential Pressure Sensors Differential pressure and Pitot tube measurement Measuring connector type	• Yarı küre kafalı pitot tüp • Pitot tüp ucunda 3d dinamik basınç ölçmek için açıklık vardır. • Statik basınç ölçme için üstünde 12 delik mevcuttur. • Nikel kaplamadır. • 350 °C'ye kadar dayanıklıdır. • $\pm 0,5\%$ hassasiyet • 25°C nominal sıcaklık • Maksimum 1,5% sıcaklık sapması • -10 ile +60°C ve 10 ile 90%RH çalışma aralığı • 40m/s basınç farkı
Sıcaklık-Nem sensörü	 Kimo TH 100	• Polimer film nem sensörü • Ekranlı • 0-100 % bağıl nem • Kapasitif ve Pt100 sensör • $\pm 2,95\%$ hassasiyet • 4-20 mA çıkış sinyali • 24 volt
Basınç sensörü	 Temperature-Compensated Pressure Sensors Type FD821408R	• 0 - 1,6 bar basınç transmitter • $\pm 0,25\%$ hassasiyet • 4-20 mA çıkış sinyali • 24 volt
Sıcaklık sensörü		• K tipi termokupl • -200 ila +200°C • $\pm 0,2\%$ hassasiyet • 0,1 ° ölçüm çözünürlüğü • Ölçen kısım CrNi kaplı • Ahlborn konektör • Tectis K tipi termokupl

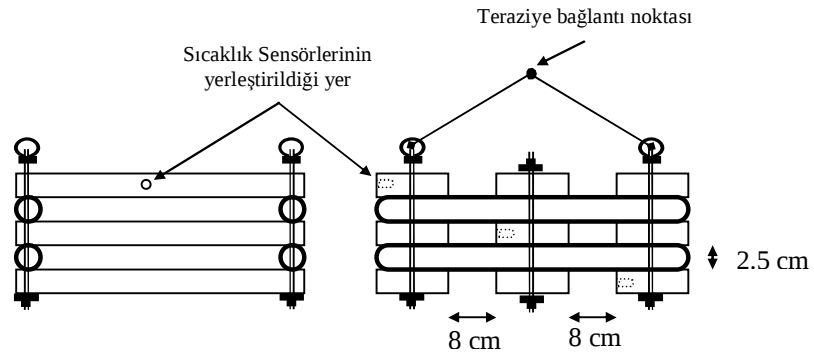
3.1.2. Deney numunelerin hazırlanması

İmal edilen kurutma fırınında çam kerestelerinin kurutulması amaçlanmıştır. Çam ağacından işlenerek kereste haline getirilen numuneler 2009 yılı Nisan ayında Isparta sanayisinden temin edinmiştir. Numuneler Şekil 3.10’da görüldüğü üzere 50~60 x 9 x 2 cm boyutlarında hazırlanmıştır. Deneylerin yapılacağı zamana kadar keresteler, arasında 1 cm kalınlığında çıtalara yardımıyla boşluk olacak şekilde istiflenerek dondurucuya yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Numune kerestelerin boyutları

Kereste numuneleri her deney için üçer adet yan yana ve üçer adet üst üste gelecek şekilde Şekil 3.11’de görüldüğü gibi 9 adet hazırlanmıştır. Numunelerin bu şekilde hazırlanmasındaki amaç, kurutma esnasında kereste istifinin altında, üstünde ve ortasında kalan kerestelerin tepkilerinin daha iyi takip edilmesidir.



Şekil 3.11. Kereste istifleri

İstiflerin arasında çita görevini $\varnothing$ 25 mm çapındaki plastik borular sağlamıştır. Kurutma esnasında ortam neminden etkilenmemesi için plastik malzeme

kullanılmıştır. Kereste istifinin askıda kalabilmesi için galvaniz kaplı vidalı bir mille birbirine bağlanmıştır. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi keresteler üstündeki halkalardan çelik halatla teraziye bağlanmıştır.



Şekil 3.12. Numunelerin teraziye bağlantılı hali

3.1.3. Deneylerin yapılışı

Bu çalışmada farklı basınçlarda ve sıcaklıklarda çalışabilen deneysel bir kurutma fırını tasarlanarak imal edilmiştir. Ayrıca kurutma fırınına otomasyon sistemi eklenmiştir. Deneylerin yapımı aşamasında kurummasını önlemek amacıyla fırında kurutulacak çam keresteleri yaşken temin edilmiş ve naylonla üzerleri kapatılarak – 15°C’de çalışan dondurucuya konmuştur.

Kereste kurutulmasında TSE 2456 (1976) göre kurutma havasının hızı 3 m/s olması gerektiğini vurgulanmıştır. Yüksek hızlarda ağaçlarda çarpılma gibi şekil

değişikliklerinin olmaktadır. Denemeler de fan dan çıkan kurutma havasının hızı kurutulan kereste istiflerinin yüzeylerinde en fazla 3 m/s en az 2 m/s olacak şekilde fan ayarlanmıştır.

Otomasyon sistemi yardımıyla çalışma sıcaklığı, çalışma basıncı, vakumlama basıncı, bekleme süreleri ayarlanarak farklı çalışma şartlarında çok sayıda deney yapma imkânı olmuştur. Otomasyon sistemi sayesinde ağaçlar gerekli kuruluğa ulaştığında kurutma fırını kendiliğinden deneyi sonlandırmaktadır. Deneyler, üç farklı çalışma şartı için yapılmıştır. Bunlar:

- **Kurutma fırınının çalışma sıcaklığı:** Kurutma fırınında 40°C, 50°C ve 60°C olmak üzere üç farklı çalışma sıcaklığında deneyler yapılmıştır. Çam ağacı keresteleri, orta sertlikte ve çıra özlü ağaçlardandır. Bu tür ağaçlarda çıra özünün akmaması için çam ağacı keresteleri genel olarak 45–55 °C sıcaklıkları arasında çalışan fırınlarda kurutulmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda kurutma süresinin uzaması ve daha yüksek sıcaklıklarda da kurutma esnasında keresteden çıra özünün yüzeye çıkması söz konusu olabileceği/olacağı için bu sıcaklıkların dışında deneyler yapılmamıştır.
- **Vakumda bekleme süresi:** Vakumlu tip kurutma fırınlarında kerestenin iç kısmındaki suyun yüzeye ulaşabilmesi için bir süre vakumda beklenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada deneyler 5, 10 ve 15 dakika bekleme süreleri için yapılmıştır. Vakumda bekleme süresinin daha fazla arttırılması direkt olarak kurutma süresini uzatmaktadır.
- **Kurutma fırınının çalışma basıncı:** Kurutma fırınında 0.6 bar, 0.7 bar ve 0.8 bar olmak üzere üç farklı çalışma basıncında deneyler yapılmıştır. Basıncın düşmesiyle havanın ısıtılma süresi kısaltmakta, fakat pompanın tükettiği enerji artmaktadır.

Deneylerin yapılmasında kullanılan çalışma şartları dışında yapılan deneylerde kurutulan kerestelerde istenilen kalitenin dışına çıkıldığı tespit edildiğinden daha

fazla deneylerin yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Deneyler esnasında kullanılan kerestelerin özellikleri ve PLC otomasyon sisteminde ayarlanan farklı çalışma şartları Çizelge 3.3'te görülmektedir.

Çizelge 3.3. Deneyler yapılırken kullanılan değerler.

AÇIKLAMA		Fırının Çalışma Sıcaklığı			Vakumda Bekleme Süresi			Fırının Çalışma Basıncı		
		1. Deney	2. Deney	3. Deney	1. Deney	2. Deney	3. Deney	1. Deney	2. Deney	3. Deney
PLC ayarları	Kurutma sıcaklığı [°C]	40	50	60	50			50		
	Çalışma basıncı [bar]	0.8			0.8			0.60	0.70	0.80
	Vakumlama basıncı [bar]	0.25			0.25			0.25		
	Vakumda bekleme süresi [dak.]	10			5	10	15	10		
Kereste	Boyutları [cm]	2 x 9 x 55 (9 adet)			2 x 9 x 50 (9 adet)			2 x 9 x 60 (9 adet)		
	Hacmi [m ³]	0.00891			0.0081			0.00972		
	Yüzey alanı [m ²]	1.1214			1.0224			1.2204		
	Ağırlığı[kg]	9.58	9.65	9.35	6.65	6.49	6.71	8.95	8.90	8.86
	Bağıl Nemi[%]	66	67	62	26	24	28	42	41	40
	Özgül kütlesi (tam kuru) [kg/m ³]	647.27								

3.2. Yöntem

3.2.1. Ağaç malzemesinin neminin bulunması:

Ağaç malzemede çok çeşitli rutubet ölçme metotları olmasına rağmen en doğru sonuç veren yöntem, eldeki ağacın ağırlığı ile aynı ağacın tam kuru haldeki ağırlığını oranlayıp rutubeti tespit etmektir.

TSE 4087'ye göre ağaç malzeme 103 ± 2 °C'de kurutma odasında kurutulur ve kurutma numune parçaları 6 veya 4 saatlik aralarla tartılır. Birbirini izleyen iki tartı arasında kütle farkının her bir deney parçası için % 1'den az olması halinde tam kuru rutubet haline gelmiş olur.



Şekil 3.13. Kereste numunelerinin etüv fırınında kurutulması

Deneysel çalışmada kurutma yapılacak kerestelerden 4 adet numune ilk önce tartılmış, sonra 10 gün gölgede bekletilerek kurutulmuş, daha sonra ise 16 saat Şekil 3.13 görülen özel etüv fırınında 100 °C’de kurutmaya tabi tutulmuştur. Numunelerin sonuçları Çizelge 3.4’de sunulmuştur. Bu çalışmada 4 numunenin ortalaması, kerestenin özgül kütesinin tespitinde kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Kereste numunelerinin özgül ağırlık test sonuçları

Numuneler		1	2	3	4	Ortalama
Numunelerin Boyutları (mm)	Fırınlanmamış	105 x 93 x 20.5				
	Fırınlanmış	104 x 89 x 20	104 x 91.5 x 19	104 x 88 x 19	104 x 91 x 20	
Ağaç numunelerin hacmi (Tam kuru hal) [cm ³]		185.12	180.804	173.888	189.28	182.3
Numunelerin ilk ağırlıkları (gr)		163	130	131	135	139.8
Denge rutubetinde numunenin ağırlıkları (gr)		150	119	120	123	128
Tam kuru halde numunenin ağırlığı (gr)		139	109	111	113	118
Özgül Kütle (Tam kuru hal) [gr/cm ³ , (kg/m ³)]		0.75086 (750.86)	0.60286 (602.86)	0.63834 (638.34)	0.59700 (597)	0.64727 (647.27)

3.2.2. Termodinamik analiz

Kurutma işleminde, kurutulacak malzemenin en kısa sürede ve en az enerji ile işlem yapılması istenir. Kurulan kurutma sisteminin kütle ve enerji analizlerinde kullanılan semboller Şekil 3.14’te verilmiştir.

3.2.2.1. Kütle analizi

Kurutulacak kerestenin kütlesi, kerestenin tam kuru haldeki ağırlığı ile içeriğinde bulunan suyun ağırlığının toplamı olarak tanımlanır.

$$m_k = m_{kk} + m_{ks} \quad (3.1)$$

$$m_{gsb} - m_{\zeta sb} = - (m_{ks} + m_n) \quad (3.5)$$

yeniden yazılacak olursa

$$m_{\zeta sb} = m_{gsb} + m_{ks} + m_n \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir.

3.2.2.2. Enerji analizi

Termodinamiğin 1. yasası olan enerjinin korunumu, genel olarak

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir. Kurutma sistemimizde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri olmazken sadece giren ve çıkan havanın önemi vardır. Yapılan çalışmada giren iş tanımları elektrikle yapıldığından ısı enerjisi girişi yoktur. Bununla beraber fanın ve vakum pompasının harcadığı enerji karşısında sistemde iş çıkışı yoktur. Buna göre ifadeyi daha ayrıntılı olarak yazacak olursak (Çengel ve Boles, 2008),

$$W_{giren} - Q_{çıkan} = [\sum m_g \cdot h_g - \sum m_{\zeta} \cdot h_{\zeta}] \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Kurutma havası nemli olduğu için giren ve çıkan havanın entalpileri şöyledir (Çengel ve Boles, 2008):

$$h_g = T_{g^*} \cdot (C_p)_h + \omega_{fg} \cdot h_{d(tg)} \quad (3.9)$$

$$h_{\zeta} = T_{\zeta^*} \cdot (C_p)_h + \omega_{f\zeta} \cdot h_{d(t\zeta)} \quad (3.10)$$

Deneyisel çalışma yaptığımız sistemimizde; fan, ısıtıcı ve vakum pompası iş yapmaktadır. Kurutma sisteminde, fan ve vakum pompasının yaptığı iş suyun buharlaştırmasını hızlandırmak, ısıtıcıların yaptığı iş ise suyu buharlaştırmaktır.

a) Isıtıcılar: Elektrikli rezistanslarla fırın ısıtılmaktadır. Bir Δt zaman aralığında yapılan elektrik iş;

$$W_{It} = V_I \cdot I_I \cdot \Delta t \quad (3.11)$$

Isıtıcıların verimleri, tükettikleri elektrik enerjisinin neredeyse tamamını elektrik enerjisine dönüştürebildikleri için verimleri 1 kabul edilir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_I = W_{It} / W_{Ig} \cong 1 \quad (3.12)$$

b) Fan: Fırın içinde havanın sirkülasyonunu sağlayacak elektrik motorlu fan kullanılmıştır. Fanın yaptığı iş (Çengel ve Boles, 2008);

$$W_{Ft} = m_{fan} \cdot (V_{fan}^2 / 2) \quad (3.13)$$

olarak ifade edilir. Elektrik motorlu fanın verimi, fan verimiyle motorun mekanik veriminin çarpımı verir. Buna göre;

$$\eta_F = W_{Ft} / (W_{Fg} \cdot \eta_{Fm}) \quad (3.14)$$

c) Vakum pompası: Vakum pompasının görevi, fırının içindeki havanın dışarıya atılmasını sağlamak olduğu için kompresör gibi çalışmaktadır. Kurutma havası ayarlanmış sıcaklığa ulaştığında ve gerekli bekleme süresi tamamlandığında, vakum pompası çalışmaya başlayarak emdiği havayı dışarıya atmaktadır. İzantropik hal değişimine göre kompresörün yaptığı iş (Çengel ve Boles, 2008);

$$W_{VPt} = m_{\zeta} \cdot [(k \cdot R_k \cdot T_{ks}) / (k-1)] \cdot [(P_o / P_{fv})^{(k-1)/k} - 1] \quad (3.15)$$

İzontropik hal değişiminde hava için $k=1.4$ kabul edilir. Vakum pompası elektrik motoruyla çalışmaktadır. Buna göre vakum pompasının verimi,

$$\eta_{VP} = W_{VPt} / (W_{VPg} \cdot \eta_{VPm}) \quad (3.16)$$

Kurutma fırın sistemine giren enerjiler;

$$W_{giren} = W_{Fg} + W_{Ig} + W_{VPg} \quad (3.17)$$

şeklinde formüle edilir.

Yapılan çalışmanın deneysel sisteminde ısı enerjisi çıkışı vardır. Bunlar; fırının ısınması, kerestenin ısınması, nemlendiriciden ve keresteden suyun buharlaşması için gerekli ısı enerjilerinden ve toplam ısı kaybından oluşmaktadır. Buna göre,

$$Q_{çıkan} = Q_{FI} + Q_K + Q_N + Q_{IK} \quad (3.18)$$

Sistem ilk çalıştığında fırın içindeki havanın ısıtılması için gerekli ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_{FI} = (V_f \rho_h) \cdot (C_p)_h \cdot (T_{ks} - T_o) \quad (3.19)$$

Kurutulan kerestenin ısıtılması ve keresteden ayrılan suyun ısıtılması için ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_K = (m_k \cdot (C_p)_k \cdot (T_{ks} - T_o)) + (m_{ks} \cdot h_{ds}) \quad (3.20)$$

Kurutma esnasında nemlendirme ünitesinden ayrılan suyun ısıtılması için gerekli ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_N = m_n \cdot h_{ds} \quad (3.21)$$

Kurutma fırınının dış izolasyonundan kaynaklanan ısı kaybı vardır (Incropera and DeWitt, 2004). Bu da,

$$Q_{IK} = (F \cdot K \cdot (T_{ks} - T_o)) \quad (3.22)$$

formülü ile ifade edilir. Kurutma sisteminin verimi, elde edilen enerjinin verilen enerjiye oranıyla bulunur (Akpınar et al., 2006).

$$\eta = (Q_{çıkan} + (\sum m_c \cdot h_c)) / (W_{giren} + (\sum m_g \cdot h_g)) \quad (3.23)$$

3.2.2.3. Ekserji analizi

Ekserji, belirli bir çevrede bulunan sistemin iş potansiyelidir ve sistemin, çevre ile dengeye gelmesiyle elde edilebilen en fazla yararlı iş miktarını temsil eder. Termomekanik ekserji, herhangi bir durum ile çevrenin, sadece sıcaklığı ve basıncı ile dengeye geldiği durumdaki ekserjisidir (Akpınar et al., 2006).

$$\text{Ekserji} = \underbrace{(h - h_0)}_{\text{iç enerji}} - T_0 \underbrace{(s - s_0)}_{\text{entropi}} + P_0 \cdot \underbrace{(u - u_0)}_{\text{iş}} + \underbrace{\frac{V^2}{2g}}_{\text{kinetik}} + \underbrace{(z - z_0)}_{\text{potansiyel}} \cdot g + \dots \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir. Deneysel sistemin ekserji analizi yapılırken, iç enerji ve entropi değişiminin yanında deneyler atmosfer basıncının altında yapıldığından basınç etkileri dikkate alınmıştır. Diğer ifadeler ihmal edilmiştir. Genel ekserji dengesi,

$$\sum E_{X_k} = \sum E_{X_g} - \sum E_{X_ç} \quad (3.22)$$

$$\sum E_{X_k} = [m_g e_g - m_ç e_ç] + \sum E_{Q_{çıkın}} + (E_{W_{çıkın}} - E_{W_{giren}}) \quad (3.23)$$

şeklinde ifade edilir. Dinçer ve Şahin (2004), yapmış olduğu çalışmalarında kurutma sistemlerinin ekserjisinde giren-çıkan havayı kuru hava ve su buharı diye ayrıştırarak ekserji analizi yapmıştır. Buna göre,

Giren kuru hava

$$e_g = \{[(C_p)_h + \omega_g (C_p)_{sb}] \cdot (T_g - T_0)\} - T_0 \{[(C_p)_h + \omega_g (C_p)_{sb}] \cdot \ln(T_g/T_0)\} - T_0 [(R_h + \omega_g \cdot R_{sb}) \cdot \ln(P_g/P_0)] \\ + T_0 \{[(R_h + \omega_g R_{sb}) \cdot \ln((1 + 1.6078 \cdot \omega_0) / (1 + 1.6078 \cdot \omega_g))] + 1.6078 \cdot \omega_g \cdot R_h \cdot \ln(\omega_0 / \omega_g)\} \quad (3.24)$$

formülü ile, çıkan kuru hava ise

$$e_ç = \{[(C_p)_h + \omega_ç (C_p)_{sb}] \cdot (T_ç - T_0)\} - T_0 \{[(C_p)_h + \omega_ç (C_p)_{sb}] \cdot \ln(T_ç/T_0)\} - T_0 [(R_h + \omega_ç R_{sb}) \cdot \ln(P_ç/P_0)] \\ + T_0 \{[(R_h + \omega_ç R_{sb}) \cdot \ln((1 + 1.6078 \cdot \omega_0) / (1 + 1.6078 \cdot \omega_ç))] + 1.6078 \cdot \omega_ç \cdot R_h \cdot \ln(\omega_0 / \omega_ç)\} \quad (3.25)$$

formülü ile ifade edilir. Sistemin kullandığı elektrik enerjisi direkt giren iş ekserjisi olarak alınır.

$$E_{Wgiren} = E_{WFg} + E_{Wlg} + E_{WVPg} \quad (3.26)$$

Kurutma esnasında ortaya çıkan ısıların ekserjisi;

$$E_{Qçıkan} = E_{QFI} + E_{QK} + E_{QN} + E_{QIK} \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bunlar ayrıntılı şekilde sırasıyla yazılacak olursa,

Fırın içindeki havanın ilk ısıtılması (Çengel ve Boles, 2008);

$$E_{QFI} = (1 - T_o/T_{ks}) \cdot (V_f \cdot \rho_h) \cdot (C_p)_h \cdot (T_{ks} - T_o) \quad (3.29)$$

Kurutulan kerestenin ve buharlaşacak suyun ekserjisi (Dinçer and Şahin, 2004);

$$E_{QK} = m_{kk} \cdot (C_p)_k \cdot \ln(T_{ks}/T_o) + m_{ks} \cdot [(h_{ds}(T_g) - h_{ds}(T_o)) - (T_o \cdot (s_{ds}(T_g) - s_{ds}(T_o)))] \quad (3.30)$$

Nemlendirme ünitesinden buharlaşan suyun ekserjisi (Çengel ve Boles, 2008);

$$E_{QN} = m_n \cdot [(h_{ds}(T_g) - h_{ds}(T_o)) - (T_o \cdot (s_{ds}(T_g) - s_{ds}(T_o)))] \quad (3.31)$$

Fırının yüzeyinden kaybedilen ısı kaybının ekserjisi (Çengel ve Boles, 2008);

$$E_{QIK} = (1 - T_o/T_{fys}) \cdot (F \cdot K \cdot (T_{ks} - T_o)) \quad (3.32)$$

şeklinde formüle edilir.

Ekserji verimi, sisteme giren ekserjiyle kaybolan ekserjinin farkının giren ekserjiye oranı ya da sistemden çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı olarak tanımlanır (Akpınar et al., 2006).

$$\eta_{EX} = (\sum E_{X_g} - \sum E_{X_k}) / \sum E_{X_g} = \sum E_{X_g} / \sum E_{X_g} \quad (3.33)$$

Kurutma sistemine göre biraz daha ayrıntılı yazılacak olursa;

$$\eta_{EX} = \{(m_g \cdot e_g) + \sum E_{Q_{\text{Çıkan}}}\} / \{(m_g \cdot e_g) + E_{W_{\text{Giren}}}\} \quad (3.34)$$

şeklinde formüle edilir.

3.2.3 Hata analizi

DeneySEL bulguların hata analizi için Kline ve McClintock tarafından geliştirilen belirsizlik analizi yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , e bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ise;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.35)$$

yazılır. Her bir bağımsız değişken değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$, ve R büyüklüğünün hata oranı W_R ise (Genceli, 1998);

$$W_R = [((\partial R / \partial x_1) \cdot w_1)^2 + ((\partial R / \partial x_2) \cdot w_2)^2 + \dots + ((\partial R / \partial x_n) \cdot w_n)^2]^{1/2} \quad (3.36)$$

a) Giren-çıkan havanın enerjisi için;

Kurutma fırınına giren havanın ve çıkan havanın enerjisi Denklem 3.9 ve 3.10 ile hesaplanır. Giren hava için yapılacak hat analizi çıkan hava içinde geçerli olacağından sadece giren havanın enerji hesabı için hata analizinde kullanılan denklem verilmiştir. Giren havanın kütlesi, ölçülen debi yardımıyla tespit edilmiştir. Buna göre giren hava;

$$\Phi_g = \sum m_g \cdot h_g = m_g \cdot (T_g \cdot (C_p)_h + \omega_{fg} \cdot h_{d(tg)}) \quad (3.37)$$

Giren havanın kütlesi ve sıcaklığı ölçülmüştür. Buna göre;

$$W_{\Phi_g} = [((\partial \Phi_g / \partial m_g) \cdot w_{Mg})^2 + ((\partial \Phi_g / \partial T_g) \cdot w_T)^2]^{1/2} \quad (3.36)$$

Hata oranları;

w_{Mg} = Giren havanın ağırlığı (debi x yoğunluk x zaman)

w_T = Sıcaklık sensörü

b) Giren işin enerjisi için;

Kurutma olayından giren iş, ısıtıcıların, fanın ve vakum pompasının kullandığı elektrik enerjisidir. Denklem 3.17 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{W_{giren}} = [((\partial W_{giren} / \partial W_{Fg}) \cdot w_{es})^2 + ((\partial W_{giren} / \partial W_{Ig}) \cdot w_{es})^2 + ((\partial W_{giren} / \partial W_{VPg}) \cdot w_{es})^2]^{1/2} \quad (3.37)$$

Hata oranları;

w_{es} = Elektrik güç metre (elektrik sayacı)

c) Çıkan ısı enerjisi- fırın içindeki havanın ısıtma enerjisi için;

Kurutma fırının ilk çalıştırıldığında kurutma sıcaklığına kadar olan ısıtma enerjisi Denklem 3.19 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{Q_{Fi}} = [((\partial Q_{Fi} / \partial \Delta T_{Fi}) \cdot w_T)^2]^{1/2} \quad (3.38)$$

Hata oranları;

w_T = Sıcaklık sensörü

d) Çıkan ısı enerjisi- kerestenin ve içeriğindeki suyun ısıtma enerjisi için;

Kurutulacak nemli kerestelerin ısıtılmasına harcanan enerji Denklem 3.20 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QK}=[((\partial Q_K / \partial m_k) \cdot w_{Mk})^2 + ((\partial Q_K / \partial m_{ks}) \cdot w_{Mk})^2 + ((\partial Q_K / \partial \Delta T_{KI}) \cdot w_T)^2]^{1/2} \quad (3.39)$$

Hata oranları;

w_{Mk} = Ağırlık sensörü (kereste ağırlığının ölçülmesi)

w_T = Sıcaklık sensörü

e) Çıkan ısı enerjisi- nemlendiricinin kullandığı enerjisi için;

Kurutma fırınında bulunan nemlendiriciden buharlaşacak suyun ısıtılmasında harcanan enerji Denklem 3.21 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QN}=[((\partial Q_N / \partial m_n) \cdot w_m)^2]^{1/2} \quad (3.40)$$

Hata oranları;

w_m = Terazî (Su miktarı ölçme)

f) Çıkan ısı enerjisi- ısı kaybı sebebiyle harcanan enerjisi için;

Kurutma fırının yüzeyinden oluşan ısı kaybı sebebiyle harcanan enerji Denklem 3.22 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QIK}=[((\partial Q_{IK} / \partial \Delta T_{IK}) \cdot w_T)^2]^{1/2} \quad (3.41)$$

Hata oranları;

w_T = Sıcaklık sensörü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; farklı şartlarda deney yapılabilecek bir kurutma sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneyler, farklı kurutma sıcaklıklarında, farklı basınçlarda ve vakumda bekleme sürelerinde yapılmıştır. Deneysel kurutma fırınının farklı çalışma şartlarında çalıştırılmasıyla elde edilen bulgular ve analizle bu bölümde sunulmuştur.

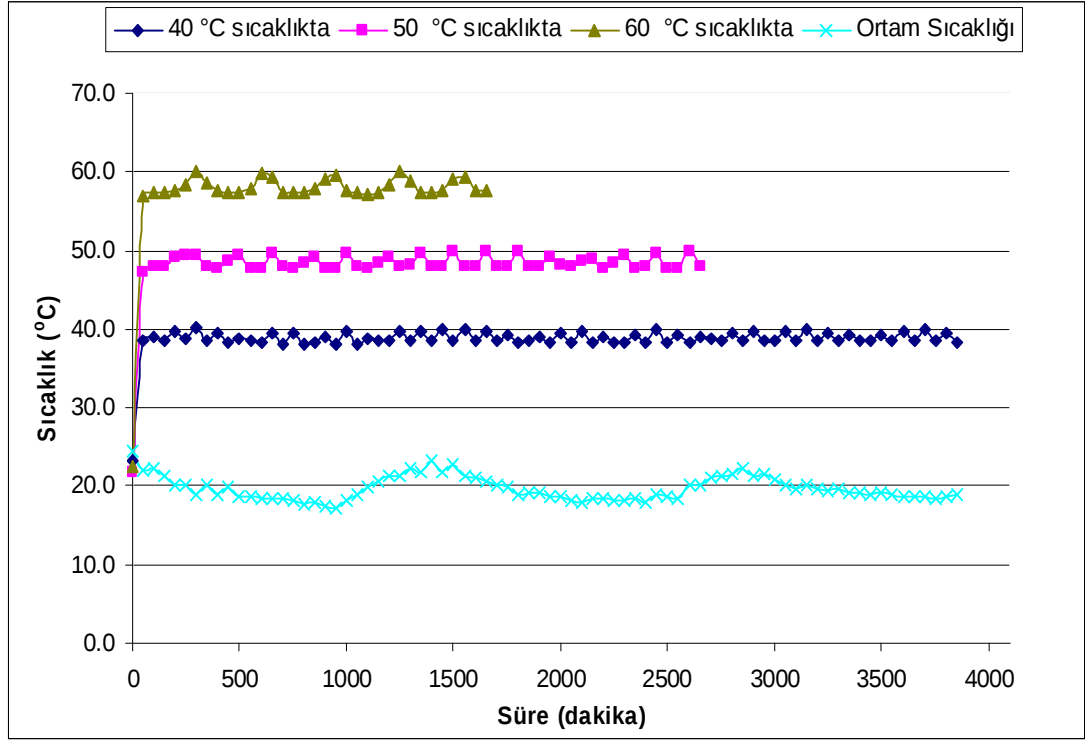
4.1. Farklı Kurutma Sıcaklığında Yapılan Deneyler

Diğer çalışma parametreleri sabit tutularak 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarında deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen bazı sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kurutma hızı fazla olduğundan kurutma daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Bununla beraber yüksek sıcaklıkta yapılan kurutma deneyinin sonucunda kerestede istenmeyen çatlamların olduğu ve çıra özünün kereste yüzeyine çıktığı tespit edilmiştir. Keresteler kuruduğunda sistem otomatik olarak durduğu için ağırlıkları arasında küçük farklılıklar vardır.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.

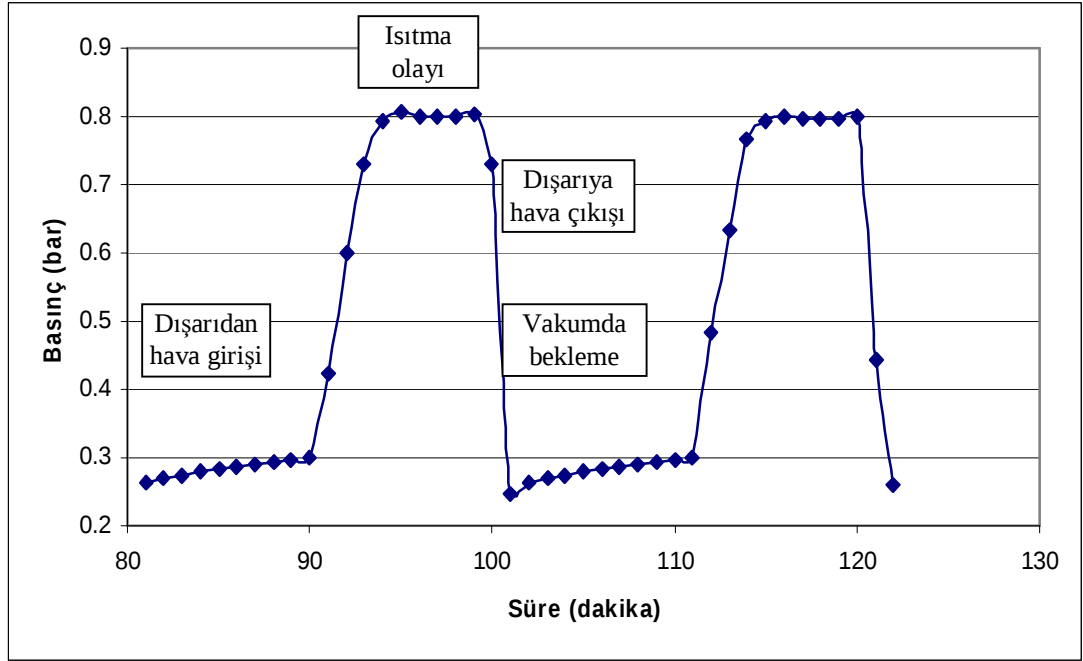
AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Kurutma sıcaklığı [°C]	40	50	60
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	6.23	6.27	6.29
Kurutulmuş kerestenin bağıl nemi [%]	8.1	8.7	9
Keresteden buharlaşan su [kg]	3.35	3.38	3.06
Kurutma süresi [dakika] [(saat: dakika)]	4145 (69 : 08)	2649 (44 : 09)	1682 (28 : 02)
Kurutma fırının dışardan aldığı hava miktarı [m ³]	90	55	33
Taze giren havanın ortalama sıcaklığı [°C] ve bağıl nemi [%]	20 °C ve % 36		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

Kurutma süresi boyunca kerestedeki sıcaklık değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Verilen grafikte 60°C’de yapılan deneylerde sıcaklık düşüşlerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, fırın iç ortamı ile dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark sebebiyle oluşan ısı kayıplarının daha fazla olmasıdır. Kurutma fırını ilk 20 dakika içerisinde istenilen sıcaklıklara ulaşmaktadır.



Şekil 4.1. Farklı çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimi

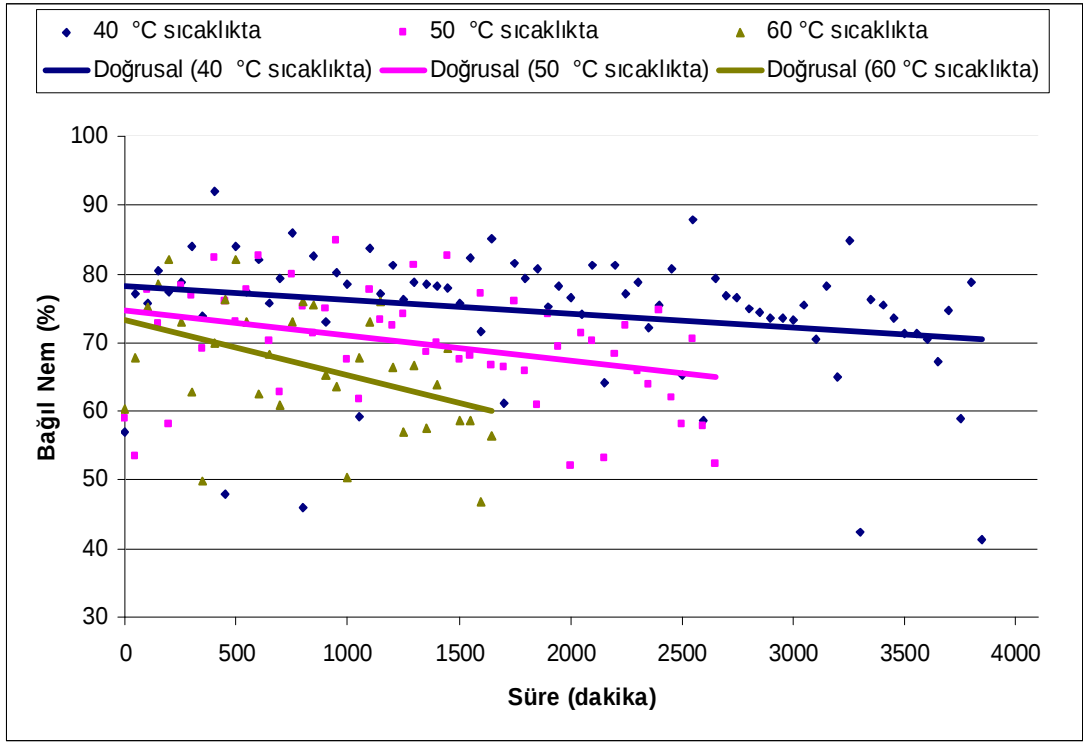
Şekil 4.2’de, 40 °C çalışma sıcaklığında basıncın zamana göre değişiminin bir kısmı görülmektedir. Sistem çalışırken, önce çalışma basıncı 0,8 bar değerine, sonra nemli sıcak hava oluştuğunda 0,25 bar basıncına vakumlama yapılmıştır. Diğer çalışma sıcaklıklarında da çalışma basınçları ve bekleme süreleri benzer bir değişkenlik göstermiştir.



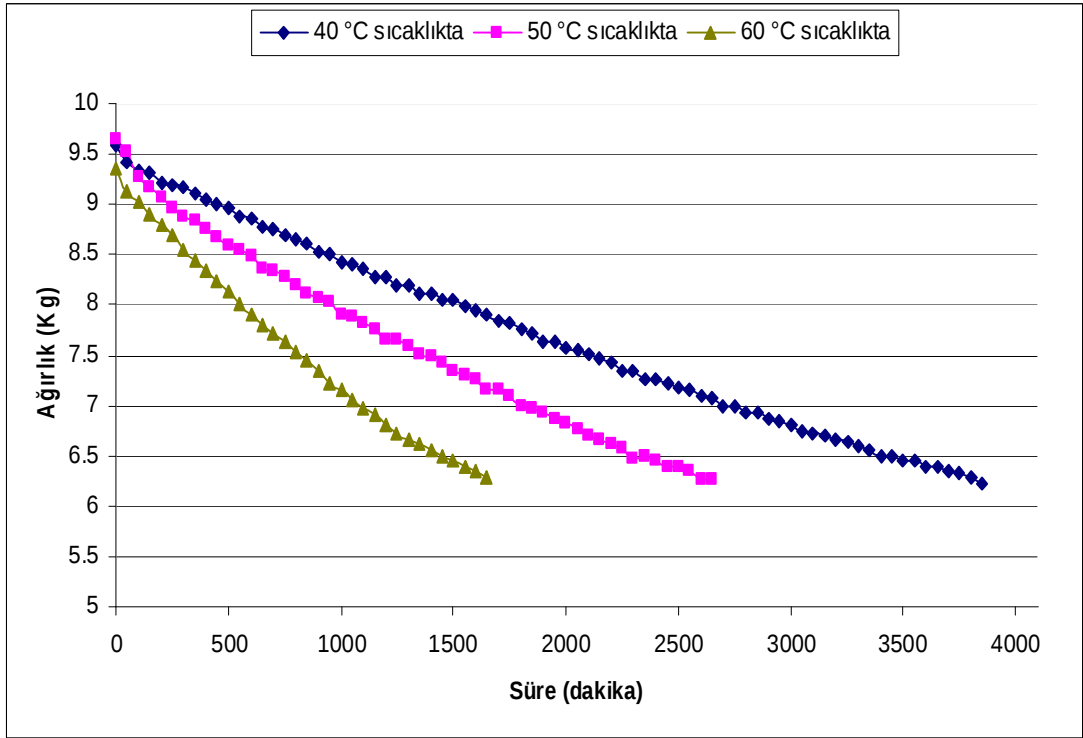
Şekil 4.2. 40 °C sıcaklıkta yapılan deneyde basıncın zamana göre değişimi

Şekil 4.3'te kurutma fırınının iç ortamındaki hava neminin kurutma süresi boyunca değişimi verilmiştir. Bağıl nem değerlerinin zamanla ve sıcaklığın etkisiyle azaldığı görülmektedir. Yapılan deneylerde farklı kurutma sıcaklıklarındaki kerestenin aynı nem değerine ulaşmadığı gözlenmiştir. Bunun sebebi kereste kurtulurken ortamda nemlendirme amaçlı bulunan sudur. Deneylerde ortalama 1 kg su buharlaşmıştır.

Kurutulan numuneler başlangıçta ortalama olarak aynı ağırlıkta olduğundan kurutma sonunda da genel olarak aynı ağırlığa ulaşmışlardır. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi buharlaşan su ile kerestelerin ağırlıkları her çalışma sıcaklığında farklı bir eğimle azalmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla kuruma hızı artmakta ve kuruma süresi kısalmaktadır.

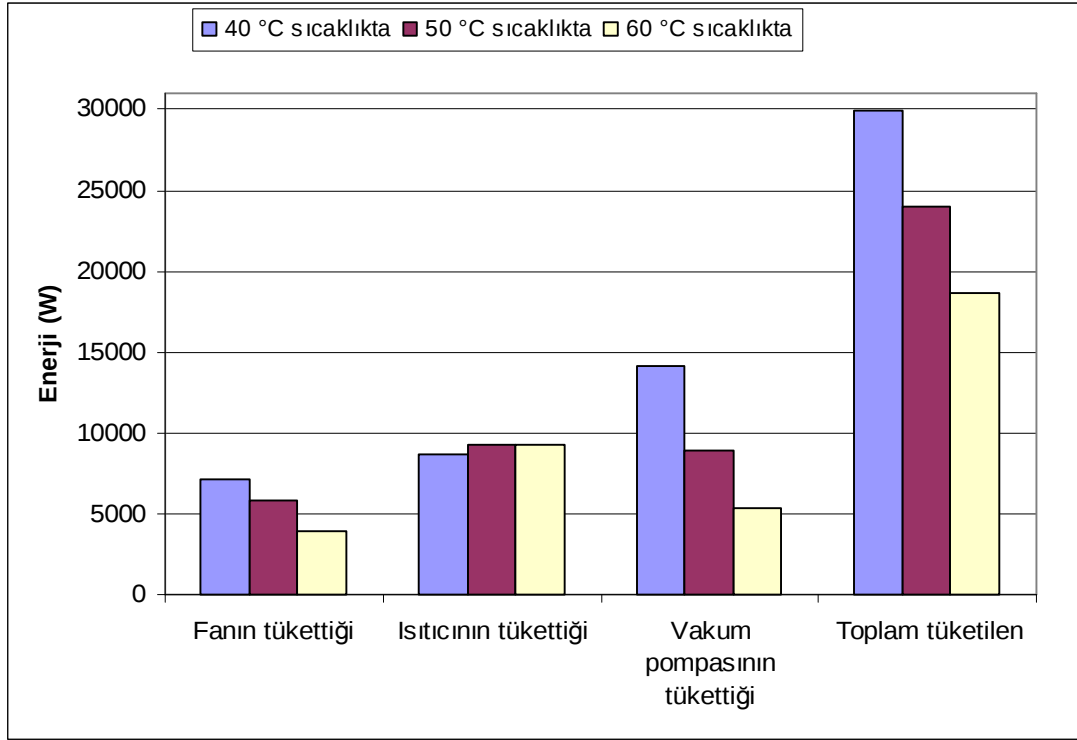


Şekil 4.3. Sıcaklığa bağlı deneylerde fırın içi bağıl nem değerleri



Şekil 4.4. Sıcaklığa bağlı deneylerde kerestelerin ağırlık değişimi

Deneyssel olarak imal edilen sistemde; fanda, ısıtıcılarda ve vakum pompasında enerji tüketilmektedir. Tüketilen enerjilerin dağılımı Şekil 4.5'teki grafikte görülmektedir. Kurutma zamanına bağlı olarak sistemdeki enerji tüketimini, fan ve vakum pompası belirlemektedir. Buharlaşan su miktarı her deney için eşit olduğundan tüm çalışma sıcaklıklarında ısıtıcılar yaklaşık olarak aynı enerjiyi tüketmişlerdir.



Şekil 4.5. Sıcaklığa bağlı deneylerde tüketilen enerji

4.2. Farklı Vakumda Bekleme Süresinde Yapılan Deneyler

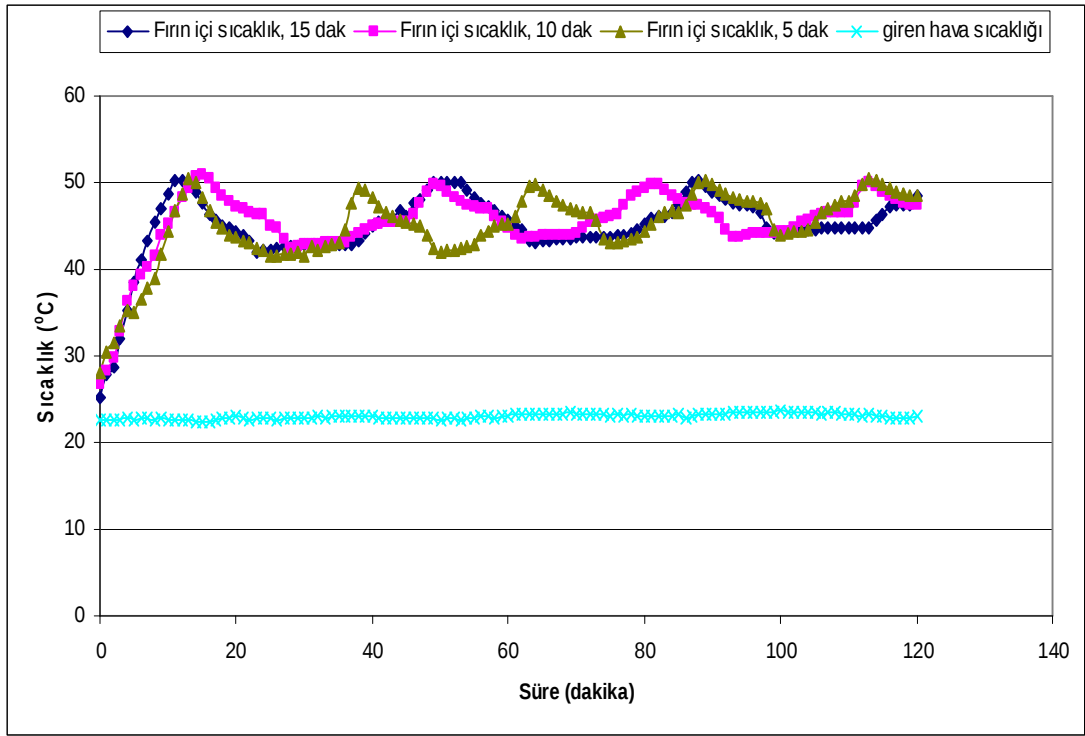
Diğer çalışma parametreleri sabit tutularak 5, 10 ve 15 dakika vakumda bekleme sürelerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir. Vakumda 5 dakika bekletilerek yapılan deneylerde kerestelerin daha kısa sürede kuruduğu görülmüştür. Deneylerde kullanılan keresteler birbirine yakın ağırlıkta olduğundan kurutma sonunda da birbirine yakın ağırlıkta ve nem değerindedir.

Çizelge 4.2. Farklı vakumda bekleme süresinde yapılan deneylerin sonuçları

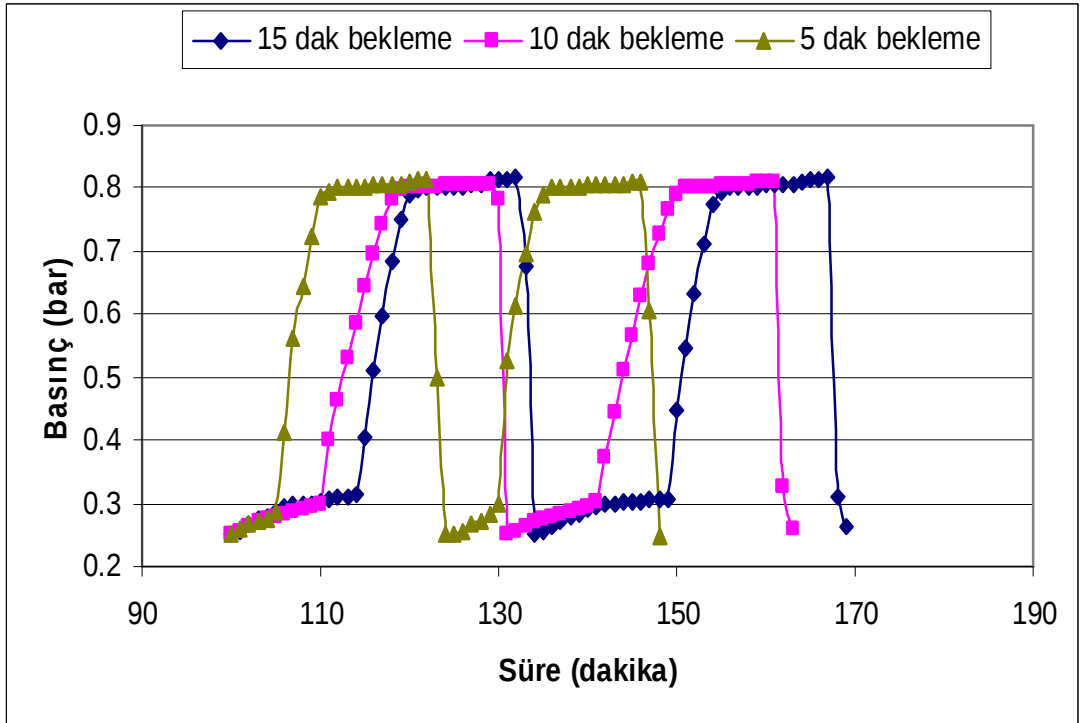
AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Vakumda bekleme süresi [dakika]	5	10	15
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	5.67	5.69	5.68
Kurutulmuş kerestenin bağıl nemi [%]	8.2	8.5	8.3
Keresteden buharlaşan su [kg]	1.98	1.8	2.03
Kurutma süresi [dakika] [(saat: dakika)]	2476 (41 : 16)	3008 (50 : 08)	3298 (54 : 58)
Kurutma fırınının dışarıdan aldığı hava miktarı [m ³]	42	40	37
Taze giren havanın ortalama, sıcaklığı [°C] ve bağıl nemi [%]	23 °C ve % 37		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

Şekil 4.6’da farklı vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerin kurutma süresi boyunca oluşan sıcaklık değişimleri verilmiştir. Vakumda bekleme süresi 15 dakika olan deneylerde ısıtıcıların devreye girme süresinin arası artmakta, vakumda bekleme süresi 5 dakika olan deneylerde ise ısıtıcıların devreye girme süresi azalmaktadır. Isıtıcıların devreye girme sürelerinin artması, fırın içerisindeki sıcaklığın düşmesine sebep olmaktadır. Yapılan deneylerde kurutma fırınının izolasyonu sayesinde fırın sıcaklığı 42 °C’nin altına inmemiştir.

5, 10 ve 15 dakika vakumda bekleme sürelerinde basıncın kurutma süresine göre değişimi Şekil 4.7’de görülmektedir. Deneyler, aynı ön vakum basıncında yapılmıştır. Vakumda bekleme süresinin artması, basıncın yükselmesine sebep olmaktadır.

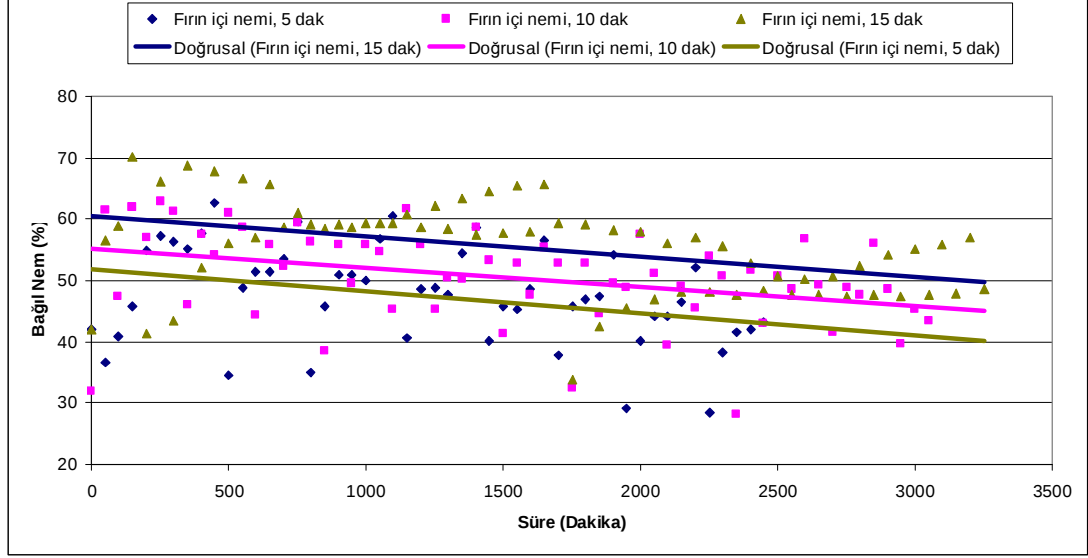


Şekil 4.6. Farklı ön vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerin sıcaklık değişimi



Şekil 4.7. Farklı vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerde basıncın zamanla değişimi

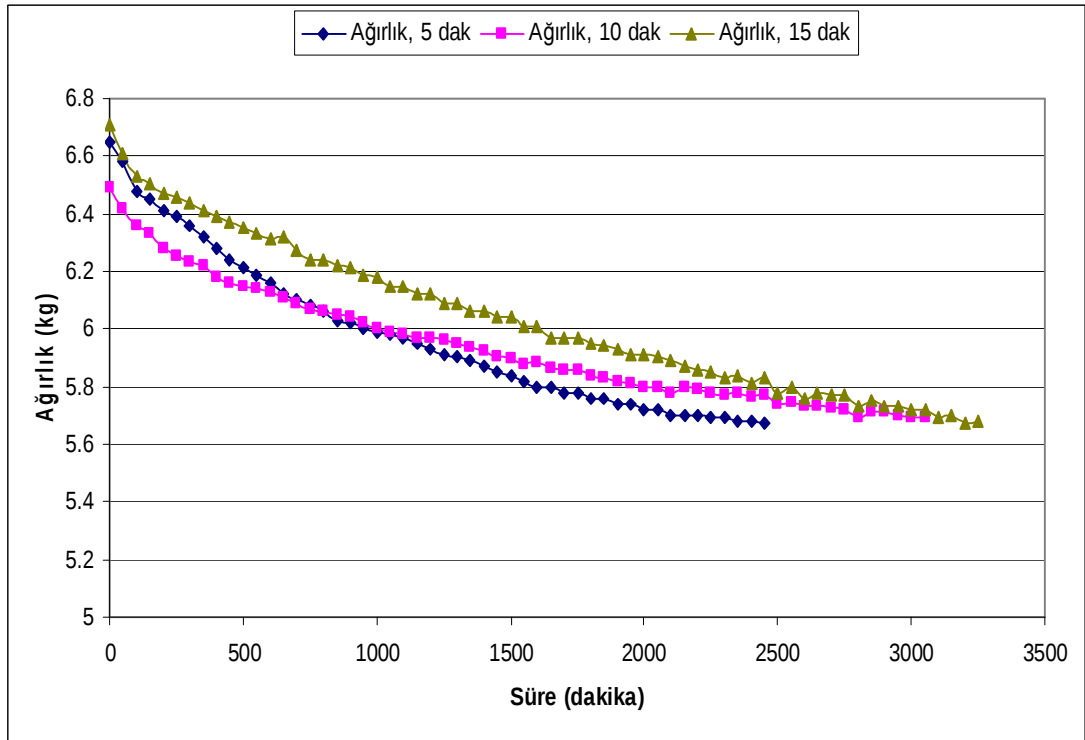
Farklı vakumda bekleme süreleri için, fırın içindeki kurutma havasının bağıl nem değerinin zamanla değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir. Bütün bekleme süreleri için bağıl nem değeri birbiriyle benzer bir azalma eğilimi göstermiştir.



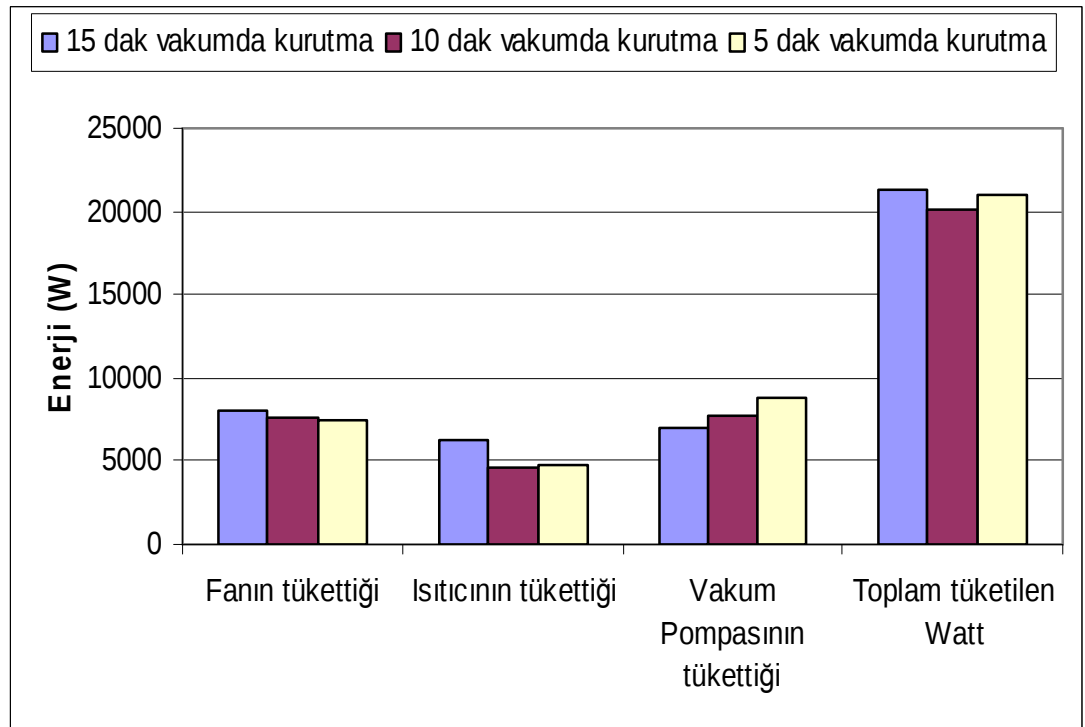
Şekil 4.8. Farklı vakumda bekleme sürelerinde yapılan deneylerde bağıl nemin zamanla değişimi

Şekil 4.9’da kurutulan kerestelerin zamana bağlı olarak ağırlıklarındaki değişim görülmektedir. Bu deneyin başlangıcında keresteler çok nemli değildir ve keresteler için minimum değer olan % 8 lik nem değerine kadar kurutulmuştur. Kurutmanın olayının başlangıcında hızlı şekilde suyun buharlaşmasıyla kerestelerin ağırlıkları azalmaktadır. Kurutma olayının sonuna doğru suyun buharlaşması yavaşladığından kurutma hızı da düşmektedir.

Farklı vakumda bekleme süreleri için kurutma fanının, ısıtıcıların ve vakum pompasının harcadığı enerji Şekil 4.10’da görülmektedir. Deneylerde kurutma süresinin uzamasıyla ısıtıcıların enerji tüketiminin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca vakumda bekleme süresinin azalmasından dolayı kurutma süresi boyunca sistemdeki hava giriş-çıkış sayısı artmakta, buna bağlı olarak da vakum pompasının enerji tüketiminde artış görülmektedir.



Şekil 4.9. Farklı bekleme süresi olan deneylerde kurutulan kerestenin ağırlığının zamana göre değişimi



Şekil 4.10. Farklı bekleme sürelerinde yapılan deneylerde tüketilen enerji

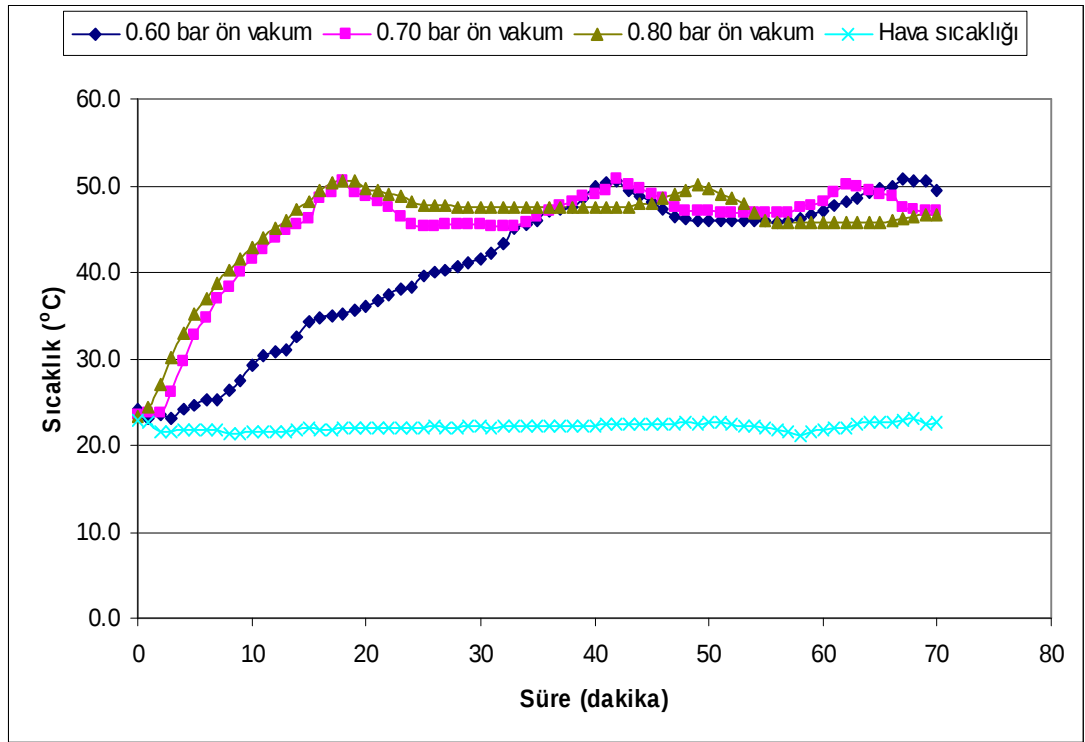
4.3. Farklı Ön Vakumlama Basıncında Yapılan Deneyler

Diğer çalışma parametreleri sabit tutularak 0.6, 0.7 ve 0.8 bar ön vakumlama basınçlarında deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kurutma zamanı ve kurutulan kerestelerin ağırlıkları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Keresteler yaklaşık olarak aynı kurutma sürelerinde kurumuş ve aynı nem değerine ulaşmıştır. Ayrıca sisteme giren veya çıkan hava miktarı da tüm ön vakumlama basınçlarında birbirine yakın değerlerdedir.

Çizelge 4.3. Farklı ön vakumlama basıncında elde edilen sonuçlar.

AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Ön vakumlama basıncı [bar]	0.6	0.7	0.8
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	6.92	6.90	6.95
Kurutulmuş kerestenin bağıl nemi [%]	10	10	10
Keresteden buharlaşan su [kg]	2.03	2	1.91
Kurutma süresi [dakika] [(saat: dakika)]	2881 (48 : 01)	2865 (47 : 45)	2544 (42 : 24)
Kurutma fırınının dışarıdan aldığı hava miktarı [m ³]	37	38	40
Taze giren havanın ortalama sıcaklığı [°C] ve bağıl nemi [%]	22 °C ve % 38		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

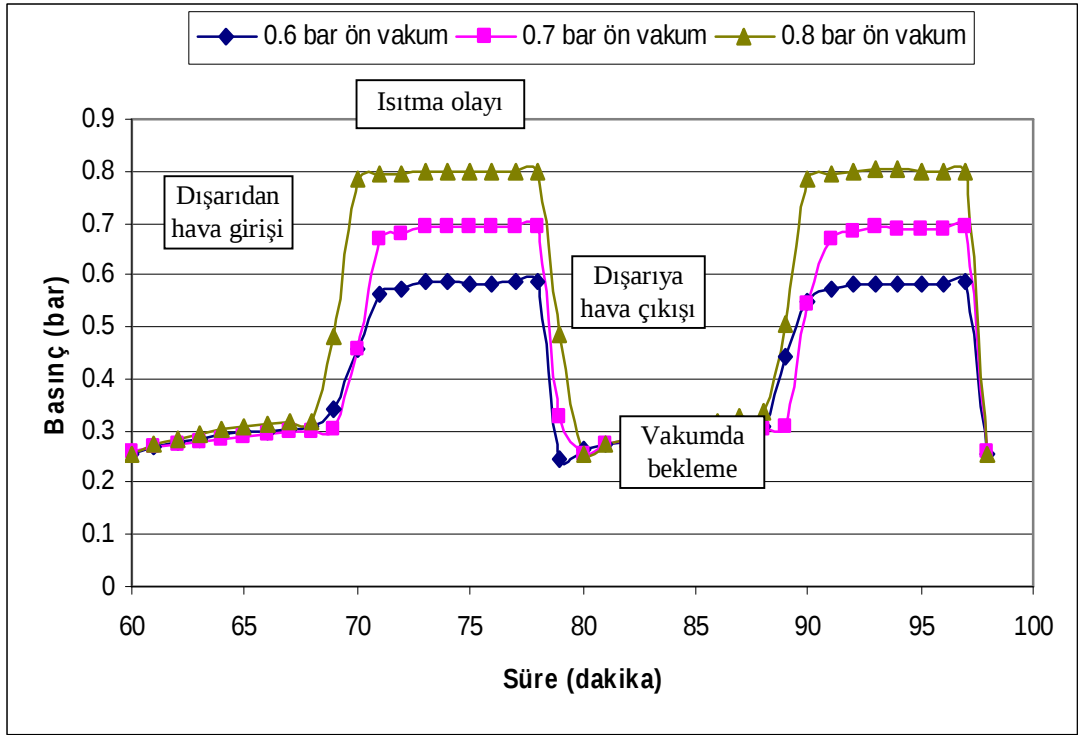
Farklı ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde, fırın sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.11'de görülmektedir. 0.8 ile 0.7 bar basınçlarda yapılan deneylerde 20 dakika içerisinde, 0.6 bar basınçta yapılan deneyde ise 40 dakika içerisinde fırın çalışma sıcaklığına ulaşılmıştır. 0.6 bar basınçta fırın içindeki ısıtma havasının az olması sebebiyle kurutulacak kerestelerin ısınması zaman almıştır. Bu da, fırın sıcaklığının istenilen sıcaklık seviyesine ulaşmasını geciktirmiştir.



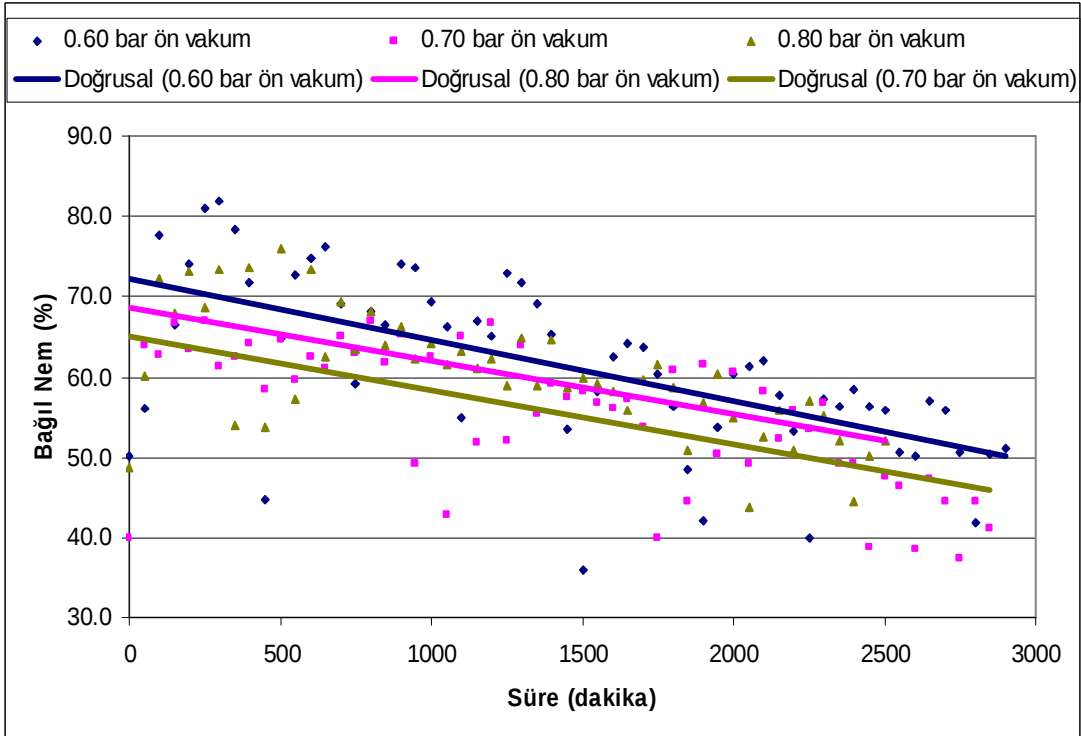
Şekil 4.11. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde fırının sıcaklık değişimi

Şekil 4.12’de kurutma fırınının çalışma basınçları görülmektedir. Deneylerde vakumlama basıncı 0.25 bardır. 0.8 bar ön vakumlama basıncında fırın içindeki hava miktarı, 0.6 bar ön vakumlama basıncına göre fazladır. Bundan dolayı havanın ısıtılması, 0.8 bar ön vakumla basıncında yapılan deneylerde en uzun sürmüştür.

Farklı ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde, kurutma süresi boyunca fırın içindeki bağıl nem miktarının değişimi Şekil 4.13’te verilmiştir. 0.6 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde nem değerinin, 0.8 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneydekenden daha düşük olduğu görülmüştür. Kurutma havasının az miktarda olması ve sık aralıklarla hava değişimi olması, kurutma havasındaki nemin düşük seviyelerde olmasına sebebiyet vermektedir.

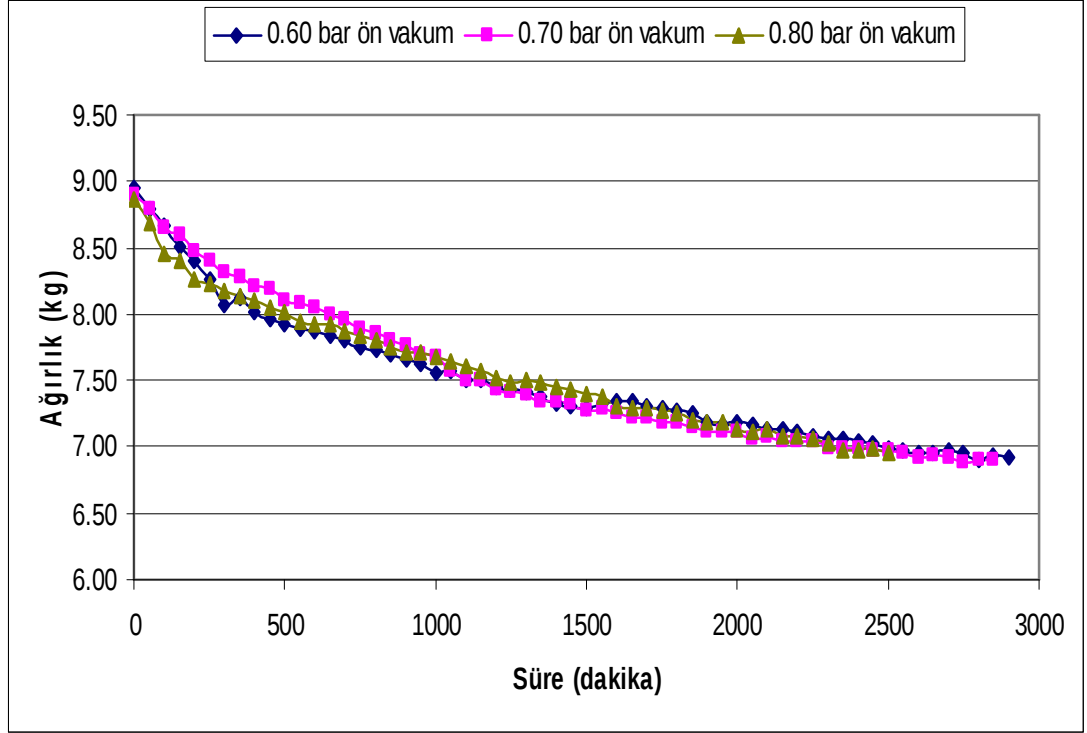


Şekil 4.12. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde fırın çalışma basınç değişimleri



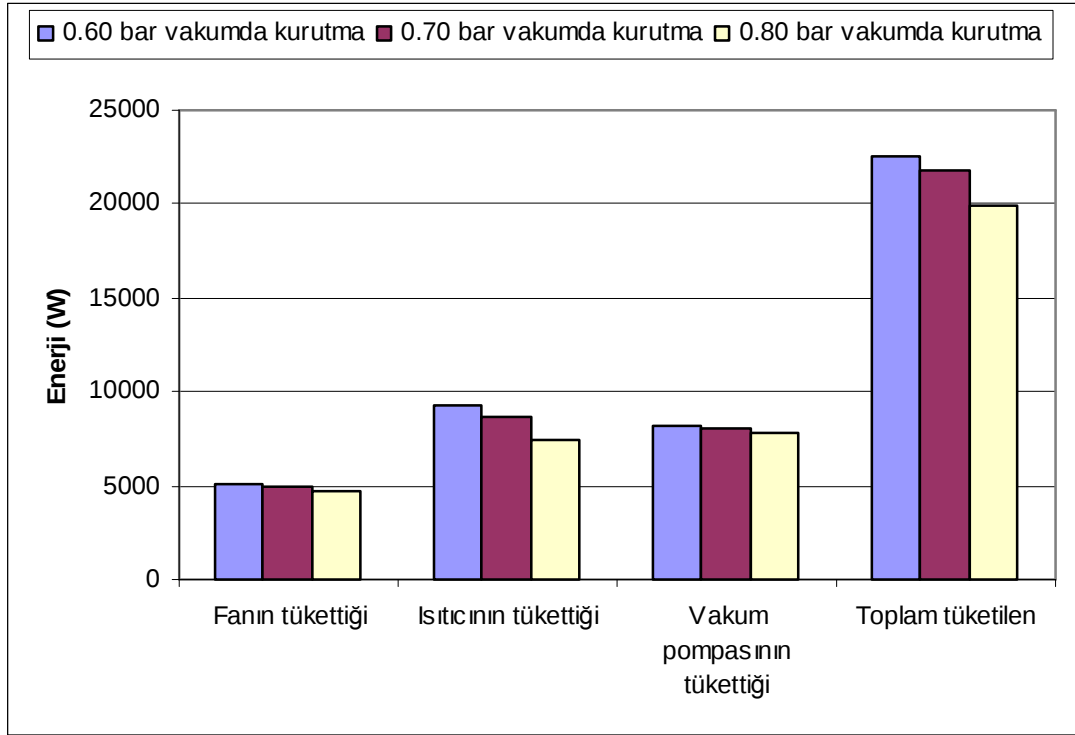
Şekil 4.13. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kurutma havasının bağıl neminin zamanla değişimi

Farklı ön vakum basınç değerlerinde kurutma süresi boyunca kerestede ki ağırlık değişimi Şekil 4.14’te verilmiştir. Bütün basınç değerlerinde kurutma süresi boyunca kerestelerin ağırlık değişimleri benzer bir özellik göstermiştir.



Şekil 4.14. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kerestenin ağırlığının kurutma süresince değişimi

Şekil 4.15’te farklı ön vakum basınçlarında kurutma fırında gözlenen enerji tüketimleri verilmiştir. En düşük ön vakum basıncı olan 0.6 barda yapılan deneyde, diğer deney şartlarına göre tüketilen enerji miktarının arttığı görülmüştür. Düşük ön vakumlamada yapılan deneyde kurutma havasının sıklıkla değişmesi sebebiyle ısıtıcıların tükettiği enerjinin arttığı tespit edilmiştir.

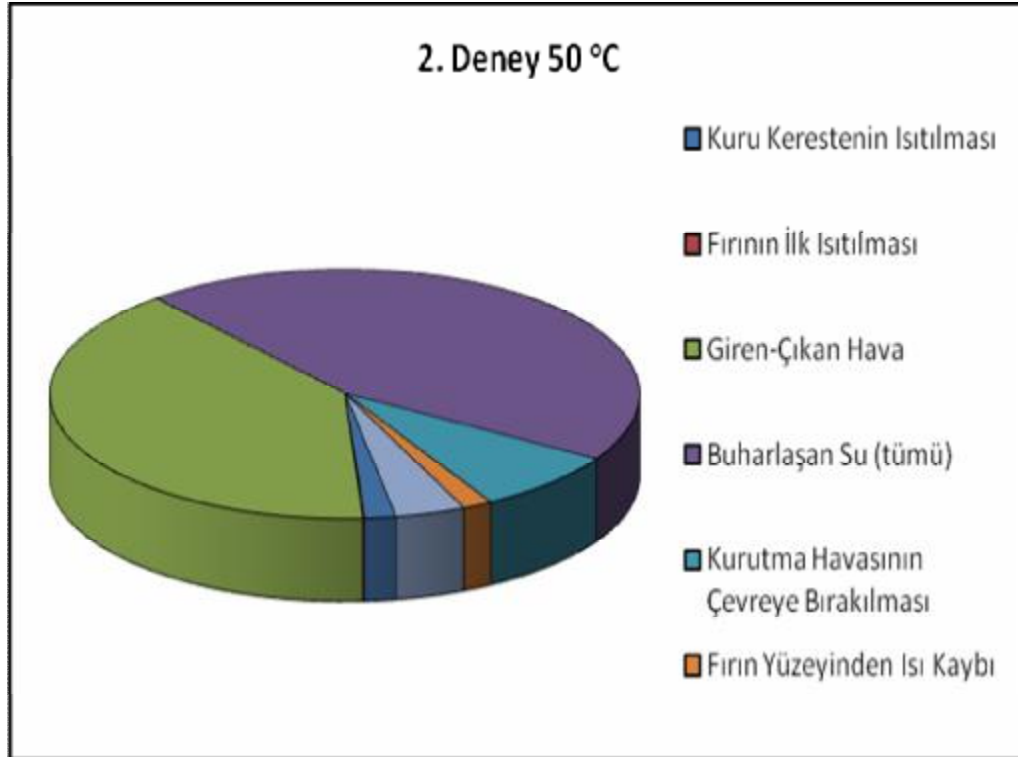


Şekil 4.15. Farklı ön basınçlarda yapılan deneylerde kurutma fırınının enerji tüketimi

4.4 Deney Sisteminin Enerji Analizi

Kurutma sisteminde deneyler üniversitemizin bünyesinde bulunan Makine Eğitimi Bölümü'nün atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Keresteler tamamen kurutulana kadar fırın sürekli olarak çalıştırılmıştır. Fırındaki basıncın korunabilmesi için tek noktadan hava giriş-çıkışı sağlanmıştır.

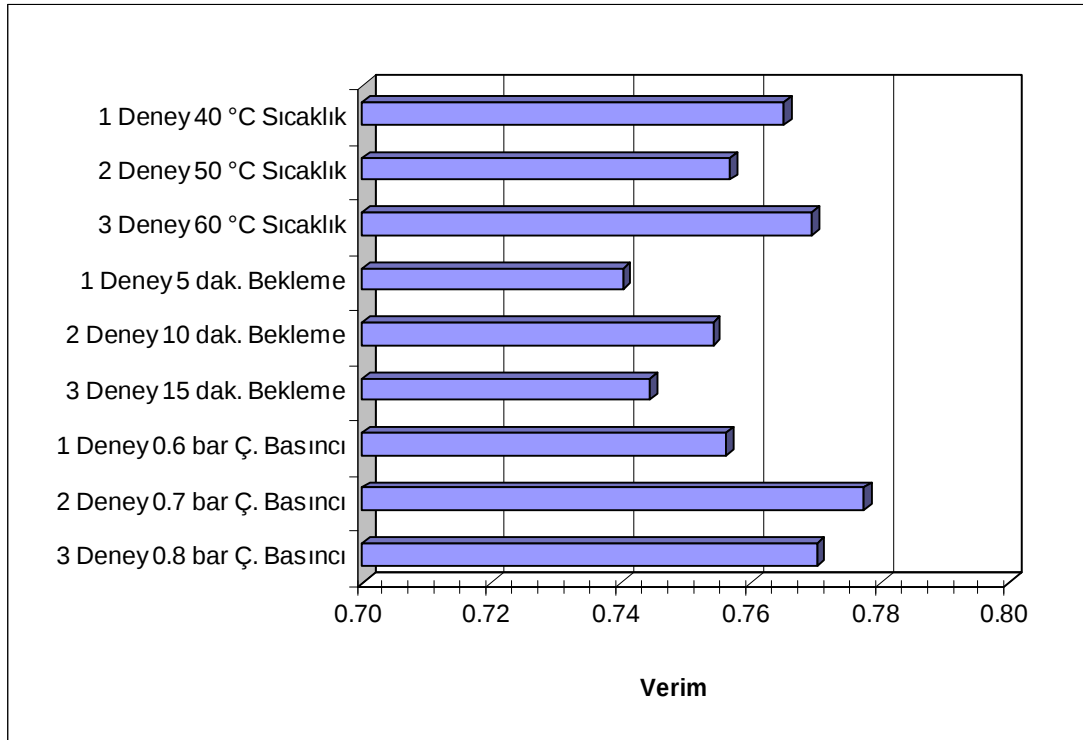
Kurutma sisteminin enerji analizinde Termodinamiğin I. Yasa eşitlikleri kullanılmıştır. Şekil 4.16'da 2. Deney 50 °C ait enerji dağılımı görülmektedir. Harcanan ısı enerjisinin büyük bir kısmını buharlaşan suyun çektiği enerji ile kurutma havasının değişimi sebebiyle çektiği enerji oluşturmaktadır. Isı kayıplarının oluşturduğu enerji ise, izolasyonun iyileştirilmesiyle azaltılabilir.



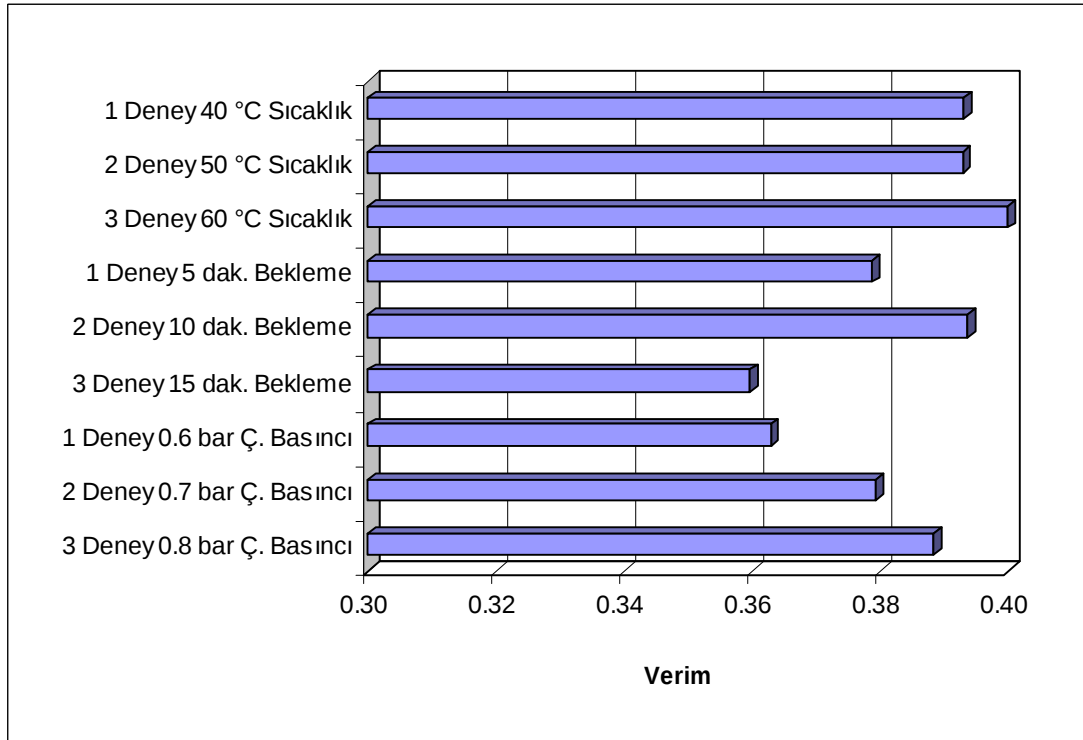
Şekil 4.16. Deneye ait ısı enerji analizi

Fırında enerji harcayan fanın motorunun fırın dışına olmasından dolayı yüksek debili radyal tipi fan kullanılmıştır. Ayarlanabilir potansiyometre (reosta) yardımıyla kerestelerin üzerinden geçen havanın hızının 3 m/s'yi aşmaması sağlanmıştır. Fanın hızının ayarlanması fanın daha fazla ısınması sağlayarak enerji tüketimini artırmıştır. Fan çıkış ağzında havanın hızı ortalama 5 m/s'dir. Şekil 4.17'de farklı deney şartlarında çalışan elektrik motorlu fanın çalışma verimi görülmektedir. Yapılan deneylerde verim, fanın çalışma süresiyle çok az bir değişim göstermiş ve ortalama verim % 76 olarak bulunmuştur.

Vakum pompasının verim değerleri Şekil 4.18'da görülmektedir. Vakum pompasının verimi ortalama olarak % 38 değerindedir. Vakum pompasının yüksek kapasiteli olması ve direkt kurutma fırınına bağlı olması harcadığı enerjiyi artırmıştır. Vakum pompaları atmosfer basıncına karşı düşük basınçta iş yaptığından, vakumlama süresinde fırın içinde basınç düştükçe pompanın verimi de düşmektedir.

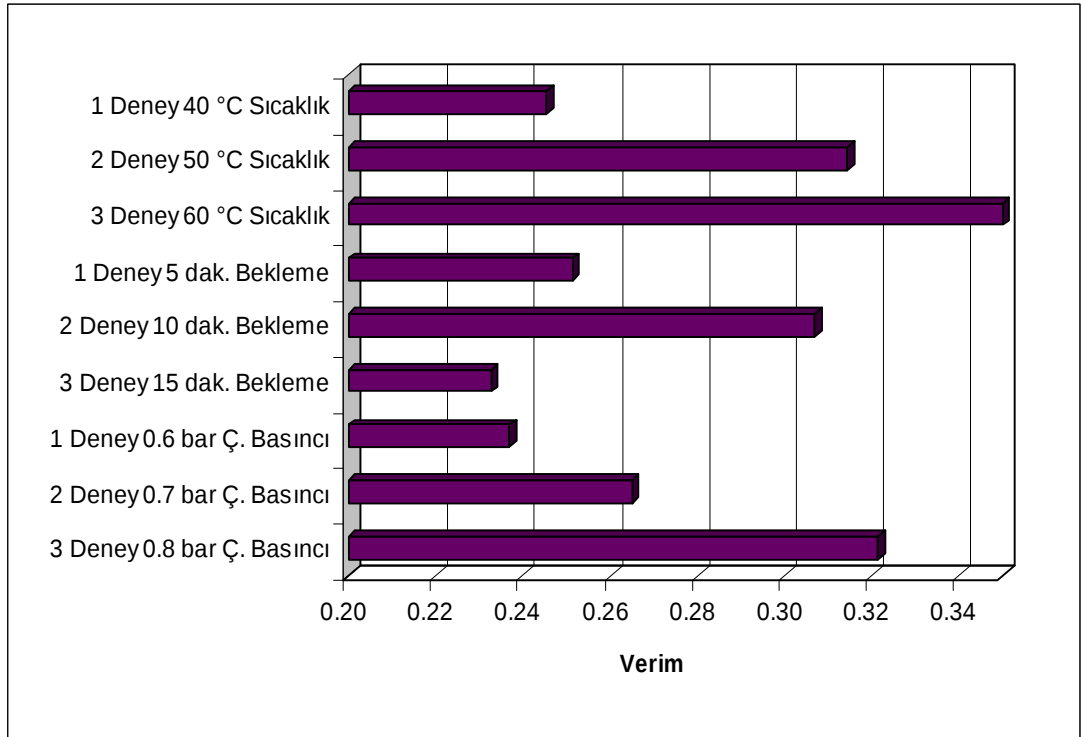


Şekil 4.17. Farklı deney şartlarında kullanılan fanın verimleri



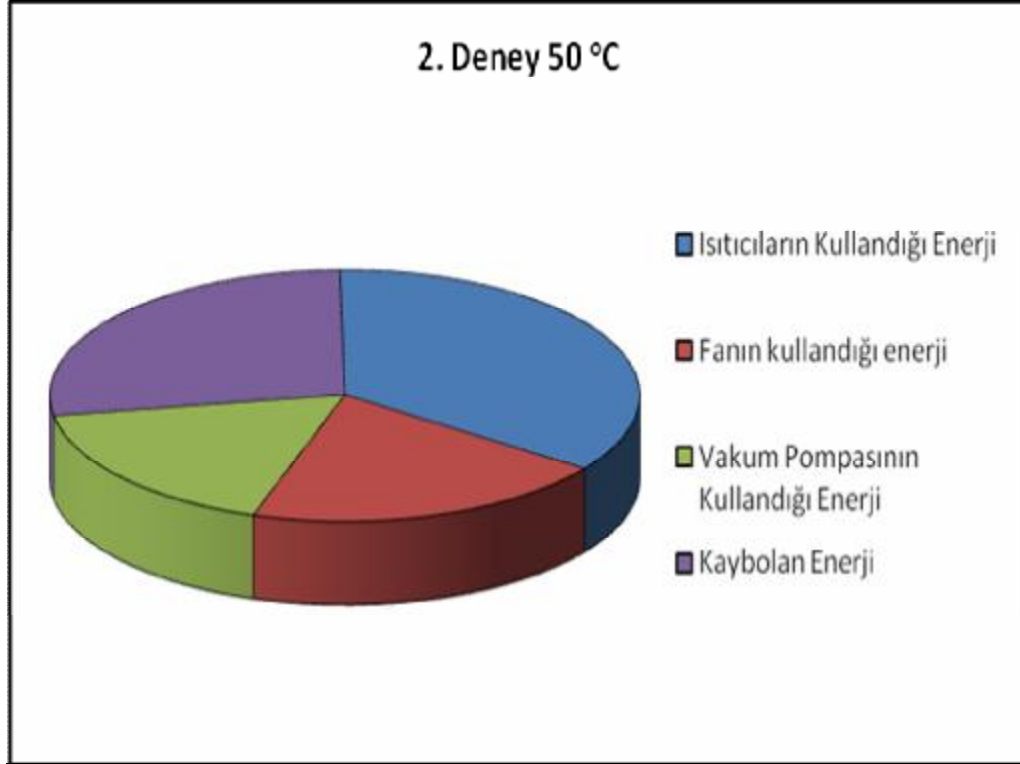
Şekil 4.18. Farklı deney şartlarında kullanılan vakum pompasının verimleri

Kurutma fırınının genel verimi Şekil 4.19’de verilmiştir. Kurutma sisteminde farklı çalışma şartlarında verim değerleri çok fazla bir değişim göstermemiştir. Kurutma sisteminin ortalama verimi % 28 civarındadır. Verim değeri düşük deneylerin kurutma süreleri fazla, verim değerleri yüksek olan deneylerin ise kurutma süreleri azdır.



Şekil 4.19. Kurutma fırınının enerji verimi

Şekil 4.20’de optimum kurutma şartlarının elde edildiği 2. deneyin enerji bilançosunun detayları verilmiştir. Genel olarak bakıldığında kullanılan enerjiler birbirine yakındır. Isıtıcıların kullandığı enerji biraz daha yüksektir. Düşük verimli vakum pompasından dolayı kaybolan enerji miktarı fazla olmuştur.

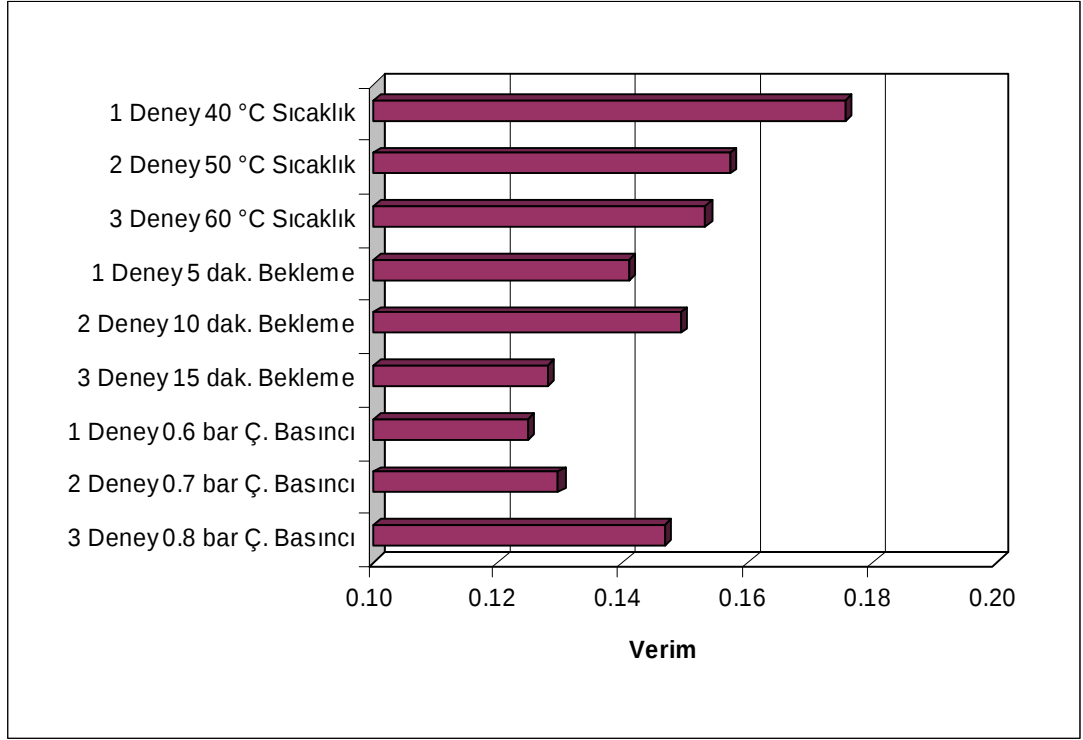


Şekil 4.20. Deneye ait kullanılan enerjiler

4.5. Deney Sisteminin Ekserji Analizi:

Yapılan çalışmada kurutma esnasında ısıtıcıların yaptığı işte, ısı ve kütle transferi olduğundan entropi değişimi vardır. Bunlar giren-çıkan havanın ve fırın içindeki havanın ısıtılmasının, buharlaşan suyun ve ısı kaybının ekserjileridir.

Kurutma sisteminin genel olarak ekserji verimi Şekil 4.21’de görülmektedir. Düşük sıcaklıkta yapılan deneysel çalışma doğal olarak ekserji verimi en yüksektir. Çevre sıcaklığına göre yüksek olan 60 °C deneyin, ısı kaybı fazla olduğu 15 dakika beklemeli deneyin ile vakum pompasının fazla iş yaptığı 0,6 bar çalışma basınçlı deneyin ekserji verimleri ise kendi grupları içinde en düşüktür. Kurutma sisteminin ortalama ekserji verimi % 15 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.21. Sistemin genel ekserji verimleri

4.6. Deneysel Çalışmanın Hata Analizi:

Deneysel çalışmada ölçümlerin doğruluğunu ortaya net şekilde sunulması için hata analizi yapılmıştır. Deney sistemimizde otomasyon sisteminin sensörleri hemde veri kaydetme ünitesinin sensörleri mevcuttur. Kalibrasyonu onaylanmış veri kaydetme sistemi ve sensörlerin elde ettiğimiz değerlerle bu çalışmanın enerji-ekserji analizleri yapılmıştır. Ahlborn marka data-logger ve sensörlerin hakkında ayrıntılı bilgi Çizelge 3.2 de, sensörlerin deney setinde yerleştirildikleri yer hakkında bilgi Şekil 3.9 da verilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan sensörlerin hata oranları Çizelge 4.4 de verilmiştir.

50 °C kurutma sıcaklığı deneyinin sonuçlarıyla yapılan enerji analizlerine hata analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5 de sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Sensörlerin hata oranları

Sensörler	Birim	Hata
Debimetre (w_{Mg})	kg	± 1.0
Terazi (w_m)	kg	± 0.01
Ağırlık Sensörü (w_{Mk})	kg	± 0.20
Elektrik güç metre (w_{es})	kj	± 12.0
Sıcaklık sensörü (w_T)	$^{\circ}\text{C}$	± 0.5

Çizelge 4.5. Hesaplanmış parametrelerin hata miktarları

Hesabı yapılan parametreler	Hesaplanmış normal değeri [kj]	Hata değeri [kj]	Hata miktarı [%]
Giren havanın enerjisi	2141	76.65	3.58
Çıkan havanın enerjisi	27566	1320,4	4.79
Giren işin enerjisi	86529	2267	2.62
Fırın içindeki havanın ısıtma	28	0.63	2.25
Kerestenin ısıtılması	1137	41.5	3.65
Nemlendiricinin harcadığı enerji	209	6.12	2.93
Isı kaybı	29318	577.6	1.97

5. SONUÇ

Üretim ve imalat endüstrilerinde kullanılan işlenmiş ve işlenmemiş hammadde, kullanılır hale gelinceye kadar çok sayıda ısıtma ve kurutma işleminden geçmektedir. Bu amaçla ısı; konveksiyon, kondüksiyon ve radyasyon yolluyla kullanılmış olur. Günümüzde ağaç kurutma işlemi, çağın gerektirdiği teknolojik düzeyde yapılarak iş, para ve zaman ekonomisi sağlanmalıdır.

Kütle aktarımı, daha çok kurutulan katı maddenin özelliklerine bağlıdır. Suyun önce yapıdan ayrılması, sonra da kılcal kanalcıklardan ilerleyerek yüzeye ulaşması gerekmektedir. Kütle aktarımını etkileyen önemli etkenler; maddenin gözenek özellikleri, gözenek dağılımı, tanecik boyutu, tanecik ve içinde oluşan basınçtır. Yüzeye ulaşan suyun buharlaşması da aynı zamanda bir kütle aktarımı olayıdır ve belirli ölçülerde tanecik içinden yüzeye olan su akışını etkileyebilmektedir. Ancak yüzeydeki suyun buharlaşması tanecik özelliklerinden çok kurutucu gazın, sıcaklığı, nem miktarı ve hızı gibi kuruma koşulları tarafından etkilenmektedir.

Hem az enerji harcayarak hemde kısa sürede kurutma yapabilmek için tasarlanıp imal edilen kurutma fırını yapılan deneylerde sıcaklık, basınç, nem değerleri PLC otomasyon sistemi tarafından takip edilmiştir. Bu sistem kurutma süresi boyunca fırının otomatik kontrolünü de sağlamıştır. PLC sistemleri günümüzde var olan otomasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında çok da pahalı olmadığı için birtakım cihazları kontrol etmek için tercih edilmektedir.

Bu çalışmada; nemli kerestelerin nemi kerestelerin elektrik iletkenliği özelliğine bağlı çalışan nem ölçüm cihazlarıyla incelenmiştir. Kurutma süresince ağacın nemini PLC'ye aktaracak elektronik kart imal edilmiştir. Denemelerde ağaç nem sensörlerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Deneylerde ise, ağaç nem sensörleri yardımıyla ağacın ortalama nemi % 8'e ulaştığında PLC'nin deneyi bitirmesi sağlanmıştır.

Kurutma sisteminde sıcak buharlı hava vakum edileceğinden sulu tip vakum pompası tercih edilmiştir. Vakum pompaları belli bir amaca hizmet etmek için

kullanıldığından, kataloglarda verimlilikleri hakkında bilgi bulunmamaktadır. Bu tip sistemlerde vakum pompası ek bir elektrik sarfiyatı yapar gözükse de, günümüzde zaman önemli bir faktör olduğu için, bu vakum pompaları yeni kereste kurutma fırınlarında kullanılmaya başlanmıştır.

Nemlendirme yapılmayan veya kurutma havasının yüksek hızlarda yapıldığı denemelerde kurutma süresi çok kısalmıştır. Fakat deney sonucunda kurutulan kerestelerde istenmeyen durumlar ortaya çıkmıştır. Bu yüzden yapılan deneylerin tümünde, kurutma esnasında nemlendirme yapılmıştır. Bununla beraber kurutulan kereste istiflerinin yüzeylerindeki kurutma havasının hızının 2~3 m/s olması sağlanmıştır.

Her bir deney yapılırken fırının, kurutma süresi boyunca durmaksızın çalışması sağlanmıştır. Deneyler genel olarak değerlendirildiğinde;

- TSE 2456 (1976)'ya göre, havayla ısıtılmalı kereste kurutucularda ideal kurutma sıcaklığı 50 °C'dir. Yapılan deneyler sonucunda tespit edilen kurutma sıcaklığı da 50 °C'dir. Düşük sıcaklıklarda kurutma süresinin arttığı; yüksek sıcaklıklarda ise kerestelerde çatlamaların olduğu, çıra özünün kerestenin yüzeyine aktığı gözlemlenmiştir.
- Literatürde vakumlu sistemlerdeki bekleme süresinin, kerestenin iç kısımlarındaki suyun dış yüzeyine çıkması için yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Fakat bu sürenin kurutulacak ağaç ürünleri için nasıl belirleneceği belirtilmemiştir. Yapılan deneylerde bekleme süresini uzatmanın, kurutma süresini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Kurutma süresini kısaltmak için yapılan vakum, kurutulan keresteden buharlaşma etkisini azaltmaktadır. Deneylerimizde bu işlem için en uygun süre 10 dakika olarak belirlenmiştir.
- Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre ön vakumlama, 0.8 bar'dır. Kereste kurutma üzerine yapılan çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda atmosfere açık sistemler kullanıldığı için ön vakumlama hakkında net bir sonuç mevcut

değildir. Atmosfer basıncında kurutma yapılırsa fırın içindeki sıcaklığın etkisiyle kurutma havası genişerek basıncın artmasına sebep olur. Bu yüzden kurutma havası, dışarıya çıkmaya çalışır. Ön vakumlamada ise, iç ortamda bir vakum etkisi oluşturulduğundan kurutma havası çabuk ısınmaktadır. Ön vakumlama basıncı düşük tutulduğunda fırın içindeki kurutma havası yeterli olmadığı için keresteyi ısıtmada ve kurutmada istenmeyen durumlar ortaya çıkmıştır.

Her deneyde tüketilen enerji incelendiğinde; kurutma enerjisini en fazla vakum pompası ve ısıtıcıların, en az fanların tükettiği görülmektedir. Kurutma olayında gerçekleşen kütle transferinde en büyük işi ısıtıcılar yapmaktadır. Fan ve vakum pompası buharlaştırmayı hızlandırmaktadır.

Enerji verimliliği olarak deneyler incelendiğinde kuruma süresinin uzaması ve tüketilen enerjinin fazla olması sebebiyle 40 °C sıcaklıkta ve 15 dakika bekleme süresi olan deneylerde verimlilik düşük, 60 °C sıcaklıkta yapılan deneyde kurutma süresi kısa olduğundan verim yüksek çıkmıştır. Diğer deneylerde kurutma fırını ortalama % 28 verimle çalışmıştır. Yüksek verim elde edilen 60 °C sıcaklıkta yapılan deneyde kurutulan kerestelerde, istenmeyen birtakım kusurlar gözlemlenmiştir.

Çevre sıcaklığına yakın olan 40 °C sıcaklıkta yapılan deneyde ekserji verimi en yüksek, çalışma basıncı 0.6 bar'da yapılan deneylerde verim en düşük çıkmıştır. 40 °C sıcaklıkta yapılan deneyde, kurutma süresinin diğer deneylere oranla daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarda ideal değerler olarak belirlediğimiz 50°C sıcaklık, 10 dakika beklemeli ve 0.8 bar çalışma basınçlı deneylerin ekserji verimleri yüksek çıkmış olup ortalama ekserji verimleri % 15 olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma ile PLC kontrollü tam otomatik çalışan vakumlu kereste kurutma fırınlarında çam cinsi kerestelerin kurutulması için ideal çalışma şartları belirlenmiştir. Bu çalışma modüler, daha verimli ve kısa sürede kurutma yapacak fırınların tasarlanmasına ışık tutacak ve ülkemiz sanayisine oldukça önemli katkılar sağlayacaktır.

6. KAYNAKÇA

- Aker, Ö., 2006. Bilgisayar Kontrollü Güneş Enerjili Ahşap Kurutma Fırının Otomasyon Sistemi Tasarımı ve Simülasyonu, Muğla Ün., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, s.101, Muğla.
- Akpınar, E.K., Midilli, A., Bicer, Y., 2006. The First and Second Law Analyses of Thermodynamic of Pumpkin Drying Process, Journal of Food Engineering, v.72, pp.320-331.
- Awadalla, H.S.F., El-Dip, A.F., Mohamad, M.A., Reuss, M., Hussein, H.M.S., 2004. Mathematical Modelling and Experimental Verification of Wood Drying Process, Energy Conversion and Management, v.45, pp.197-207.
- Berberovic, A., 2007. Numerical Simulation of Wood Drying, Oregon State University., M.S. Thesis, s.143, Corvallis, OR, USA.
- Bozkurt, A.Y., Erdin, N., 1987. Ağaç Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 445, s. 100, İstanbul.
- Burdurlu, E., 1988. Ağaç Malzemenin Kondenzasyon ve Mikrodalga Teknikleri ile Kurutulması Üzerine Araştırmalar. Hacettepe Ü., Fen Bilimleri E., Yüksek Mühendislik Tezi, s.142, Ankara.
- Ceylan, İ., 2007. Programlanabilir (PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi, Gazi Ün., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, s.123, Ankara.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., 2007. Energy and Exergy Analysis of Timber Dryer Assisted Heat Pump, Applied Thermal Engineering, v.27, pp.216-222.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2008. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Çeviri Editörü Ali Pınarbaşı, İzmir Güven Kitabevi, 5. baskı, s.946, İzmir.
- Dinçer, İ., Şahin A., 2004. A New Model For Thermodynamic Analysis of A Drying Process, International Journal of Heat and Mass Transfer, v.47, pp.645-652.
- Erden, O., 1997. Jeotermal Enerji ile Kereste Kurutma, Gazi Ün., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, s.131, Ankara
- Garrahan, P., Kidlark, J., 2001. Northern Hardwood Initiative: Industry Resource Manual, Section 5: Drying Hardwoods, Forintek Canada Corp., pp. 114, Canada

- Genceli, O.F., 1998. Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, s.387, İstanbul
- Gündüz, M., 1994. Ağaç ve Kağıt Kurutmasında Isı ve Kütle Transferinin İncelenmesi, Uludağ Üniv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, s.94, Bursa.
- Günerbakan, H., 2005. Endüstriyel Kurutma Sistemleri, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi , TTMD, Sayı: 13, s.1-13, Ankara.
- Güngör, A., Özbalta, N., 1997. Endüstriyel Kurutma Sistemleri, III Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, s.735-748, İzmir.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2004. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Çeviri Editörü Taner Derbentli, Literatür Yayıncılık, 3. baskı, s.960, İstanbul.
- Kurutulan, S., 2008. Plc ile Endüstriyel Otomasyon, 5. Basm, Birsen Yayınevi, ISBN: 975-511-200-6, s.446, İstanbul
- Menon, A.S. Mujumdar, A.S., 1987. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers, A Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker Inc., pp. 3-46, New York.
- Milli Eğitim B., 2006. Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/modul_pdf/543M00036.pdf. Erişim Tarihi: 05.01.2010
- Molnar, K., 1995. Experimental Techniques in Drying, A Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker Inc., pp. 41-70, New York.
- Örs, Y., 1986. Kurutma ve Buharlama Tekniği, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, s.174, Trabzon
- Örs, Y., Keskin, H., 2001. Ağaç Malzemesi, Atlas Yayın Dağıtım, Yayın No: 2, s.180, İstanbul.
- Serbes, T., 2003. İki Farklı Teknik Kurutma Yöntemi ile Kurutulmuş Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerin Karşılaştırılması, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, s.45, Ankara.
- Simpson, W.T., (editor), 1991. Dry Kiln Operator's Manual, Agric Handbook No. 188, U.S. Dept. Of Agriculture. pp. 274, Washington.

- Strumilla, C., Jones, P., Zylla, R., 1995. Energy Aspects in Drying, Handbook of Industrial Drying, Vol. 2, A. S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, pp. 1241-1276, New York.
- TSE 2456, 1976. Kereste Kurutma Kuralları (Kurutma Odalarında), Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- TSE 4087, 1983. Kereste Partisinin Ortalama Rutubet Miktarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- Walas, S. W., 1990. Chemical Process Equipment Selection and Design, Butterworth-Heinemann Inc., ISBN 0-7506-9385-1, pp 747, United States of America.
- Yan, G. C. K., Silva, C. W. D., Wang, X. G., 2001. Experimental Modeling and Intelligent Control of a Wood-Drying Kiln, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, v.15, pp.787-814.
- Yılmaz, S., Doğan, H., 2001. Güneş Enerjili Nem Kontrollü Kereste Kurutma Sistem Tasarımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, s.29-34, Kayseri.
- Yılmaz, S., Yavuz, C., 2006. Isı Pompası Destekli Kurutma Fırınlarında Kurutma Parametrelerinin Kontrolü için Alternatif Bir Yöntem, Zonguldak Kareelmas Ünv. Teknoloji Dergisi, Cilt 9, Sayı 4, 237-244, Zonguldak.
- Zırzakıran, M., 1990. Kondenzasyonlu Kereste Kurutma, Gazi Ünv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, s.75, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Erkan DİKMEN

Doğum Yeri ve Yılı: Antalya – 1977

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) :

Lise : Antalya Endüstri Meslek Lisesi. Tesviye Böl. – 1991–1994

Lisans : Süleyman Demirel Ün. Teknik Eğitim Fak. Tesisat Öğr. – 1995–1999

Yüksek Lisans : Süleyman Demirel Ün. Fen Bil. Enst. Makina Eğt. – 1999–2002

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

- Denizli / Çivril Endüstri Meslek Lisesi – 1999–2000

- Süleyman Demirel Ün. Teknik Eğt.Fak.Makina Eğt. Böl. - 2000 – Devam Ediyor.

Yayınları (SCI ve diğer makaleler)

- 1- ŞENCAN, A., YAKUT, A.K., DİKMEN, E., 2004. LiBr-H₂O Eriyiğinin Termodinamik Özelliklerinin Belirlenmesinde Yeni Bir Model. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(1), 101-110, Ankara.
- 2- YAKUT, A.K., DİKMEN, E., KABUL, A., ŞENCAN, A., KIZILKAN, Ö., 2006. Konutlarda Optimum İzolasyon Malzemesi ve Kalınlığı Belirlenmesi. Enerji Teknolojileri ve Mekanik Tesisat Dergisi. Sayı:128, 158-162, İstanbul.
- 3- BEZİR, N.Ç., ŞENCAN, A., ÖZEK, N., YAKUT, A.K., KAYALI, R., DİKMEN, E., 2008. Deneysel Tuz Gradyentli Prototip Bir Güneş Havuzunun Isıl Performansı. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(2), 405-411, Ankara.