

**DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI, İMALATI VE
PERFORMANS DENEYLERİNİN YAPILMASI**

Volkan KIRMACI

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2008

ANKARA

Volkan KIRMACI tarafından hazırlanan DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI, İMALATI VE PERFORMANS DENEYLERİNİN YAPILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin USTA

.....

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği Makina Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halit KARABULUT

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin USTA

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Adnan SÖZEN

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

.....

Makine Eğitimi, Karabük Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tayfun MENLİK

.....

Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Tarih: 02 / 07 / 2008

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

Prof. Dr. Nermin ERTAN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Volkan KIRMACI

DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN TASARIMI, İMALATI VE PERFORMANS DENEYLERİNİN YAPILMASI

(Doktora Tezi)

Volkan KIRMACI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2008

ÖZET

Bu çalışmada, dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneyleri yapıldı. İmalatı yapılan sistemde 5 ve 7 mm'lik dilimlenmiş çilekler kurutuldu. Deneyler sonunda, çileklerin nem oranına %91,2'den %9,1'e düştü. Su aktivite değerleri; 5 mm'lik çileklerde 9,5 saatte 0,918'den 0,340'a, 7 mm'lik çilekler 13 saatte 0,915'den 0,390'a düştü. Kurutma işlemi süresince herhangi bir t anındaki nem oranını belirlemek amacıyla deneylerden elde edilen veriler Newton, Page, Geliştirilmiş Page I, Geliştirilmiş Page II, Henderson ve Papis, logaritmik, iki terimli, iki terimli-eksponansiyel, Wang ve Sing, ve Difüzyon Yaklaşım modelleri ile karşılaştırıldı. Tahmini standart hatası (RMSE), ki-kare (χ^2) ve regresyon katsayısı (R^2) kullanılarak modellerin sonuçlarının hata analizleri yapıldı. Elde edilen sonuçlara göre Page modelinin diğer modellere göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlendi. Numuneler için bulunan istatistiksel hata değerleri; R^2 , χ^2 , RMSE değeri sırasıyla 0,998458066-0,99769943, $2,6882 \times 10^{-4}$ - $4,66903 \times 10^{-6}$ ve 0,015491-0,002076 olarak bulundu.

Bilim Kodu : 708.3.015
Anahtar Kelimeler : Kurutma, dondurarak kurutma, liyofilizasyon
Sayfa Adedi : 136
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin USTA

**DESIGNED, CONSTRUCTED AND PERFORMANCE TESTS OF THE
FREEZE DRYING SYSTEM**

(Ph.D. Thesis)

Volkan KIRMACI

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2008

ABSTRACT

In this study, freeze-drying system was designed, constructed and performance tests were carried out. In the constructed system, 5 and 7 mm slice strawberry samples were dried. At the end of the performance tests the moisture content ratio of the strawberries were decreased from 91,2% to 9,1%. The water activity values of 5 mm and 7 mm slice strawberries were decreased from 0,918 to 0,340 in 9,5 hour and 0,915 to 0,390 in 13 hour respectively. To determine the moisture ratio at any drying time during the drying process, experimentally obtained results were compared with Newton, Page, Modified Page I, Modified Page II, Henderson and Pabis, Logarithmic, Two term, Two-term exponential, Wang and Singh, and Diffusion approach model results. By using the root means square error (RMSE), reduced chi-square (χ^2) and coefficient of determination (R^2), the error of the results of the models were analyzed. According to the comparison it is determined that the page model results are in good agreement with the experimental results. The statistical error values R^2 , χ^2 and RMSE for the tested samples are found 0,998458066, $2,6882 \times 10^{-4}$, 0,015491 and 0,99769943, $4,66903 \times 10^{-6}$, 0,002076, respectively.

Science Code	: 708.3.015
Key Words	: Drying, freeze drying, lyophilization
Page Number	: 136
Adviser	: Assist. Prof. Dr. Hüseyin USTA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda son aşamaya gelinceye kadar değerli bilgi ve yardımlarından yararlandığım tez danışmanım Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin USTA'ya, tez çalışmamı gerçekleştirmem de yardımcı olan Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Tesisat Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Tayfun MENLİK'e, Gebze Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU'na, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Tesisat Anabilim Dalı Teknisyeni Ö. Köksal BOZOĞLU'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2005 – 19 kodlu proje ile desteklendi ve bu vesileyle Gazi Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi çalışanlarına teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Ayrıca akademik kariyer aşamalarımda benden her türlü maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen annem Semiha KIRMACI'ya, babam Mehmet KIRMACI'ya ve eşim Ülkü KIRMACI'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER	VII
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	X
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. GIDALARI MUHAFAZA YÖNTEMLERİ	34
3.1. Soğutma Teknikleri	34
3.1.1. Soğuk hava ile dondurma	35
3.1.2. Dolaylı temas metoduyla dondurma	38
3.1.3. Daldırarak dondurma	41
3.1.4. Kriyojenik sıvılarla dondurma	41
3.1.5. Kriyomekanik dondurma	42
3.2. Gıdaları Kurutma Teknikleri ile Muhafaza Yöntemleri	43
3.2.1. Doğal kurutma	44
3.2.2. Yapay kurutma	44

Sayfa

4. KURUMA TERİMLERİ VE MEKANİZMASI.....	54
4.1. Denge Nemi.....	54
4.2. Kurutma Hızı.....	56
4.3. Kurumanın Statiği	58
4.4. Kurumanın Kinetiği.....	59
4.5. Ürünün Su Aktivitesi.....	62
5. DONDURARAK KURUTMA	67
5.1. Dondurarak Kurutmaya Giriş.....	67
5.2. Süblimleşmenin Teorisi.....	67
5.3. Süblimleşmenin Termodinamiği	71
5.4. Kinetik Teorisi ve Süblimleşme Oranı	74
5.5. Dondurarak Kurutma İşleminin Safhaları	76
5.5.1. Dondurma safhası.....	76
5.5.2. Birinci kurutma safhası	77
5.5.3. İkinci kurutma safhası	78
5.6. Dondurarak Kurutma Sistem Elemanları	79
5.6.1. Soğutma sistemi	79
5.6.2. Kurutma hücresi	83
5.6.3. Vakum pompası.....	83
5.6.4. Isıtma ünitesi	85
5.7. Dondurarak Kurutma Sisteminin Çalışma Prensibi	85
5.8. Dondurarak Kurutmanın Uygulama Alanları.....	87
5.9. Dondurarak Kurutmanın Avantajları.....	88

Sayfa

6. MATERYAL VE METOT	89
6.1. Materyal.....	89
6.1.1. Deneysel sistem.....	89
6.1.2. Ölçüm cihazları	92
6.2. Metot	96
6.2.1. Çileğin tam kuru ağırlığının belirlenmesi	96
6.2.2. Çileklerin kurutmaya hazırlanması	97
6.2.3. Çileklerin kurutulması.....	97
6.2.4. Kurutma işleminin bitirilmesi	98
6.2.5. Kurutma nem oranı ve kurutma sabitlerinin belirlenmesi.....	98
7. DENEY SONUÇLARI.....	101
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	115
8.1. Sonuçlar.....	115
8.2. Öneriler.....	117
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Sudaki doymuş çözeltileri, bulunduğu ortamı farklı bağıl nemde tutan maddeler.....	55
Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan bazı mikroorganizmaların faaliyet için yaklaşık minimum su aktivite (aw) değerleri.....	63
Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (aw) değerleri	64
Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktiviteleri.....	65
Çizelge 5.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı	69
Çizelge 5.2. Buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi	70
Çizelge 5.3. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi	85
Çizelge 6.1. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan modeller	99
Çizelge 7.1. Çilek numuneleri için veren model ile istatistiksel değerler sonuçlarının kurutma sabitleri.....	113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu	38
Şekil 3.2. Kontinü plakalı dondurucuda dondurulacak ürün girişi ve donmuş ürün çıkışı	40
Şekil 3.3. Doğal kurutma	44
Şekil 3.4. İletim kurutma sistemi	45
Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucu	47
Şekil 3.6. Paralel akış tünel kurutucu	49
Şekil 3.7. Zıt akış tünel kurutucu	49
Şekil 3.8. Dönen tip püskürtmeli kurutucu	50
Şekil 3.9. Döner kurutucu	51
Şekil 3.10. Kabin kurutucu	52
Şekil 4.1. Nem sorpsiyon izotermi	55
Şekil 4.2. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak kurutma hızının değişimi	57
Şekil 4.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statığı açısından anlamı	58
Şekil 4.4. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri	59
Şekil 5.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta).....	71
Şekil 5.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi	72
Şekil 5.3. Dondurarak kurutma sistemi şeması	79
Şekil 5.4. Buhar sıkıştırırmalı soğutma sisteminin elemanları	80
Şekil 5.5. Buhar sıkıştırırmalı ideal soğutma çevriminin P-h diyagramı	81
Şekil 5.6. Dondurarak kurutmada gıdanın iletimle ısınması	86
Şekil 5.7. Dondurularak kurutmada gözenekli yapı oluşumu	87

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Deneysel sistemin şematik görünüşü	90
Şekil 7.1. Kurutulmuş çilek numuneleri	101
Şekil 7.2. Deney süresince 5 mm kalınlığındaki çileklerin nem miktarının değişimi	102
Şekil 7.3. Kurutma hücresinin basınç zaman değişimi	103
Şekil 7.4. Kurutma hücresi sıcaklığının zamanla değişimi	104
Şekil 7.5. Kurutma hücresinin bağıl neminin zaman değişimi	105
Şekil 7.6. Çilek sıcaklığının zamanla değişimi	105
Şekil 7.7. Buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	106
Şekil 7.8. Deney süresince 7 mm kalınlığındaki çileklerin nem miktarının değişimi	107
Şekil 7.9. Kurutma hücresinin basınç zaman değişimi	108
Şekil 7.10. Kurutma hücresi sıcaklığının zamanla değişimi	109
Şekil 7.11. Kurutma hücresinin bağıl neminin zaman değişimi	109
Şekil 7.12. Numune sıcaklığının zamanla değişimi	110
Şekil 7.13. Buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi	110
Şekil 7.14. Çilek numunelerin deneysel sonuç ve model ile elde edilen nem oranının zamana göre değişimi	111
Şekil 7.15. Deneysel ve tahmini ayrılabilir nem oranı değerleri, (a), 5 mm'lik çilekler için deneysel ve nem oranı, (b), 7 mm'lik çilekler için deneysel ve nem oranı	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Kullanılan modeldeki katsayı
a_w	Su aktivitesi değeri
b	Kullanılan modeldeki katsayı
c	Kullanılan modeldeki katsayı
G	Gibbs enerjisi (kJ)
G_{ks}	Knudsel süblimleşmesini oranı (kg/m ² s)
H	Entalpi (kJ)
h₁	Soğutkanın kompresöre giriş entalpisi (kJ/kg)
h₂	Soğutkanın kompresörden çıkış entalpisi (kJ/kg)
h₃=h₄	Soğutkanın kılcal borudan giriş-çıkış entalpisi (kJ/kg)
H_{sub}	Süblimleşme gizli ısı (kJ/kg)
KA	Kuru ağırlık (g)
k	Kullanılan modeldeki katsayı
k_b	Buharlaşma katsayısı
k₀	Kullanılan modeldeki katsayı
k₁	Kullanılan modeldeki katsayı
m	Kütleli debi (kg/s)
M	Su buharının moleküler ağırlığı (kg/kmol)
M_k	Kurutma hücresindeki havanın molekül ağırlığı (kg/mol)
MR	Nem oranı
MR_{deneyse}	Deneyse nem oranı
MR_{tahmini}	Tahmini nem oranı
N	Deneyse veri sayısı

Simgeler	Açıklama
N_0	Ürünün başlangıçtaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
N_t	Ürünün t anındaki nem içeriği (g su/g kuru madde)
N_d	Ürünün denge nem içeriği (g su/g kuru madde)
R	Gaz sabiti (J/mol)
P_{atm}	Atmosfer basıncı (Pa)
P_b	Buharlaşma basıncı (Pa)
P_b	Buzun doymuş buhar basıncı (Pa)
P'_e	Buharlaştırıcı ortam basıncı (Pa)
P_k	Kurutma hücresi basıncı (Pa)
R	Gaz sabiti ($8,31441 \times 10^3$ J/kmolK)
$RMSE$	Tahminin standart hata
R^2	Regresyon katsayısı
S	Entropi (kJ/K)
S_v	Vakum pompası hızı (m^3/s)
SO_{KA}	Üründeki kuru ağırlığa göre su oranı (g su/g kuru ağırlık)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
T_k	Kurutma hücresinin mutlak sıcaklığı (K)
t_b	Buharlaşma süresi (s)
V_k	Kurutma hücresinin hacmi (m^3)
YA	Yaş ağırlık (g)
z	Kullanılan modeldeki katsayı sayısı
Q_b	Buharlaştırıcı kapasitesi (kW)
Q_y	Yoğunlaştırıcı kapasitesi (kW)
χ^2	Ki-kare
W_k	Kompresör gücü (kW)
η	Vakum pompası verimi
ρ_k	Kurutma hücresindeki havanın yoğunluğu (kg/m^3)
φ	Bağıl nem (%)

Kısaltmalar	Açıklama
AHE	Azalan hızla kuruma evresi
BKN	Birinci kritik nokta
ÇBN	Çevre havası bağıl nemi (%)
IE	Materyalin ısınma evresi
SHE	Sabit hızla kuruma evresi

1. GİRİŞ

Gıda maddelerinin üretim miktarı mevsimsel olarak değişmektedir. Gıda maddelerini uzun süreli muhafaza etme ihtiyacı insanların sürekli uğraştığı konulardan biridir. Gıda maddelerinin uzun süreli muhafaza edilme işlemi çağlar boyunca, değişik ortam şartlarına ve yeni teknolojilere bağlı olarak sürekli değişim göstermiştir. Gıda maddeleri doğal nedenlerle mikrobiyolojik, enzimatik olarak bozulurlar. İnsanlar sürekli olarak bu bozulmayı engellemeye çalışmış, değişik yer ve kültürlerde kendilerine has yöntemlerle gıdaları muhafaza etmeye çalışmışlardır.

Gıdaların muhafazasında kullanılan yöntemler, pastörize etmek, dondurmak, kimyasal maddelerle işlemlerden geçirme, tuzla salamura yapmak, konserve yapmak ve oksijensiz ortamda depolamaktır. Gıdaların ultraviyole ve radyoaktif ışınlardan yararlanarak da uzun süre saklanması mümkün olmakla birlikte, bu uygulamalar içerisinde kendine en geniş uygulama alanı bulan ve en eski yöntem kurutma yöntemidir.

Gıdaların kurutulması, insanlığın tabiattan öğrendiği ve bu yüzden ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemidir. Bu metot tabiatta çoğu zaman kendi kendine gerçekleşmekte ve örneğin, çeşitli tahıllar ve baklagiller tarlada kendi halinde kuruyarak dayanıklı hale gelebilmektedir.

Kurutma, temel olarak madde içerisindeki suyun, kabul edilebilir bir oranın altına düşürme işlemi olarak tanımlanabilir. Kurutma işlemi başta gıda sektörü olmak üzere tıp ve eczacılık alanlarında, boya sanayinde, tarım sektöründe, mobilya sektöründe, arkeolojik kazılar sırasında çıkan materyallerde ve kâğıt sanayinde olmak üzere birçok alanda uygulanmaktadır.

Gıda kurutmasındaki amaç, yaş ürünlerdeki serbest suyu uzaklaştırarak ürünlerde meydana gelebilecek biyokimyasal reaksiyonları ve mikroorganizmaların gelişmesini durdurmak ve üreyemeyeceği bir orana indirerek gıda maddelerinin bozulmadan uzun süre dayanmalarını sağlamaktır.

Güneşte kurutma gıdaların muhafaza edilmesinde günümüzde en yaygın biçimde kullanılan ve en ucuz olan gıda muhafaza yöntemidir. Türkiye’de birçok ürünün kurutulması güneşe serilerek tabii olarak yapılmaktadır. Ancak güneşle kurutma yöntemi ile ürün daha uzun sürede ve kalitesiz olarak kurumaktadır. Yapılan kurutma işlemi ile üründe istenmeyen bakterilerin oluşmakta ve istenmeyen mikrobiyolojik bozulmalar meydana gelmektedir.

Gıdaların özel bir yöntemle kurutulmasını sağlayan yeni bir teknoloji ise dondurarak kurutma teknolojisidir. Dondurarak kurutma teknolojisinde ilk önce gıda dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırıcısı ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan gıdaya iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada gıda içindeki buz fazından olan su süblimleşerek gıda içerisindeki su uzaklaştırılarak kurutma işlemi gerçekleştirilir. Dondurarak kurutma teknolojisi özellikle hazır kahve üretiminde kullanılmakta olup, kahve aromasını en iyi koruyan gıda teknolojisi olarak bilinmektedir. Ayrıca dondurarak kurutma eczacılıkta kullanılan ürünler, serumlar, ilaç sanayi, bakteri kültürleri, meyve, meyve suları, sebze ve çay özlerinin elde edilmesinde, et ve süt kurutulması gibi bir çok alanda kullanılmaktadır.

Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş yürüyen bir işlemdir, ısıya duyarlı materyaller için uygundur. Dondurarak kurutma ile diğer kurutma yöntemlerine göre daha kaliteli kurutulmuş ürün elde edilir. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve soğutma gibi ek muhafaza işlemlerine ihtiyaç duyulmaması dondurarak kurutmanın avantajlarındandır.

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde tasarımı ve imalatı yapılmayan fakat eczacılık, tıp, gıda endüstrisi gibi geniş kullanım alanları bulunan dondurarak kurutma cihazlarının alternatif soğutucu akışkan kullanılarak ülkemizde tasarım ve imalatının yapılmasıdır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Her mevsim aynı miktarda bulamadığımız gıdaların uzun süre muhafaza edilmesini sağlayan yöntemlerden biri de kurutma yöntemidir. Gıdaların kurutulmasında çeşitli kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Kurutma yöntemleri ile ilgili çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Güneş Enerjisi ile kurutma

Kholiev ve ark. (1982), yaz aylarında ürün kurutmak, diğer mevsimlerde ise sebze ve fide yetiştirmek amacıyla 50 x 5,86 m boyutlarında bir kurutma serası inşa etmişlerdir. Serayı orta kısmından, doğu–batı doğrultusunda, bir bölmeyle ikiye ayırmışlardır. Güneye bakan bölümünün tabanını siyaha boyamışlar, buradaki kurutma işlemini radyasyon ve konveksiyonla sağlamışlardır. Kuzey bölümündeki ürünlerin kurutulması diğer bölümde ısıtılan havanın taşınmasıyla yapmışlardır [1].

Özel ve Özil (1987), doğal şartlar altında güneş enerjisiyle sergide ve sıcak hava akımlı indirekt tip dolaplı bir güneşli kurutucu kullanarak kayısı, üzüm ve biber kurutmuşlardır. Deneyler sonucunda, doğal şartlarda kayısının 7, üzümün 10-15 ve biberin 5-10 günde kurutulduğunu; kontrollü şartlarda ise güneşli kurutucuda kayısının 2, üzümün 5 ve biberin 3 günde hedeflenen nem miktarına düşürerek kuruttukları görülmüştür [2].

Bıçakçı (1989), Doğu Karadeniz Bölgesinde havalı güneş kolektörleri ile prototip fındık kurutma sistemi tasarımı yapmıştır. Yapılan kollektör modellemesi sonucunda fındık kurutma ayları için en uygun kollektör eğimini 30° (Trabzon için) olarak bulmuştur. Araştırmacı, havanın kolektöre girmeden önce bağıl neminin düşürülmesinin kurutma süresini kısalttığı ve bu sayede daha çok ürün kurutulabileceği kanaatine varmıştır. Fındık için en uygun kurutma havası sıcaklığının (40 - 50) °C olduğu belirtilmiştir. Araştırmacı, bu sıcaklığın üstünde yapılan kurutma işleminde fındığın kalitesinde düşme ve tadında kötüleşme olduğunu belirtmiştir [3].

Güner (1991), raf tipi güneşli meyve kurutucu kullanarak kayısı kurutmada 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200 ve 400 l/s hava debisi değerlerinde, kayısının kuruma zamanı, kuruma hızı ve kuruma için ihtiyaç olan hava ve sıcaklık değerlerini belirlemeye çalışmıştır. Deneyler sonucunda; kuruma zamanının hava sıcaklığı arttıkça azaldığını, hava debisi arttıkça kütle transferinin arttığını ve kuruma zamanının azaldığını, kuruma hızının arttığını, rafli kurutucularda güneş ışınlamından çok hava akımının özelliklerinin etkili olduğunu bulmuştur [4].

Yasartekin (1991), kabinet tipi, güneşi dikey ekseninde belirli aralıklarla izleyen, güneş enerjili kurutucu ile elma kurutma deneylerinde kurutucunun kullanım olanaklarını ile verimliliklerini incelemiş ve deney sonuçlarını açık havada kurutmaya karşılaştırmıştır. Kurutucuda kuruma hızının doğal kuruma hızından daha düşük olduğunu bulmuştur. Bunun nedeni olarak da kurutucu içerisinde hava dolaşımının zayıf olmasını göstermiştir [5].

Yağcıoğlu ve ark. (1999), farklı kurutma koşullarında defne yaprağının kurutma karakteristiklerini incelemişlerdir. Güneşte kurutma metodunda uygun olmayan hava koşulları ile karşılandırıldığında, kayıpların meydana geldiğini ve uzun kuruma zamanı gibi avantajsız durumların ortaya çıktığını görmüşlerdir. Kontrollü koşullarla kurutmanın geleneksel kurutmaya göre bir çok problemi ortadan kaldırdığı gözlemişlerdir. 50 °C yada 60 °C sıcaklıkta kurutma ile defne yapraklarının temel yağ bileşim miktarları ile kalitesinde bir kayıp olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca yaprakların % 10 nem içeriğine kadar kurutma zamanı, geleneksel kurutma işlemine göre 120 kez yada 40 °C sıcaklıkta kurutma şartlarına göre 8 kez daha kısaldığını ve hiçbir kayıp olmadığını ifade etmişlerdir [6].

Olgun ve Rzayev (2000), güneş enerjisi ile kabinet tipi, dolap tipi ve çadır tipi üç farklı sistemde fındığın kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan sistemlerde, açık havada fındığın 82 saat civarında kuruduğu tespit edilerek; kabinet tipli kurutucuda ek ısıtıcı kullanılması durumunda 28 saatte, ek ısıtıcı kullanılmadığı durumda 50 saatte, çadır tipli kurutucuda 73 saatte, ek ısıtıcı kullanılmayan dolap tipli kurutucuda ise 72-76 saat içerisinde fındığın kuruduğunu tespit etmişlerdir.

Kurutulmuş olan fındıklardan alınan numuneler görüntü ve tat analizine de tabi tutulduğunda ürünlerde herhangi bir bozulmaya rastlamamışlardır. Sistemde ek ısıtıcı kullanıldığı durumda ise kurutma süresinin oldukça kısaldığını görmüşlerdir [7]

Çam (1991), reflektörlü güneş serasının imalatını yapmış ve yapılan reflektörlü güneş serasını, kurutucu olarak kullanmıştır [8]. Güngör ve Yaşartekin (1991), dikey eksende güneşi izleyen kabinet tipi kurutucu imal etmişlerdir [9]. Fırat (1997), yapmış olduğu çalışmada dikey konumdaki saydam iki levha arasındaki hava akımının güneş enerjisi ile ısıtılması ve kurutma sistemlerine uygulanması incelemiştir [10]. Özbalta ve Tırıs (1992), yapılan güneşli kurutma fırınında yutucu yüzey olarak akış kanalına yerleştirilen alüminyum teli kullanmıştır. Araştırmacılar, siyaha boyanan alüminyum tel ile ısı transfer alanının arttırılmasını amaçlamışlardır [11].

Sarsılmaz (2000), kayısı kurutmanın genellikle geniş toprak zeminler üzerine serilerek gerçekleştirilmesinde kuruma süresinin uzadığını, homojen kuruma sağlanamadığını, ürün kaybına ve kalite düşümüne sebep olduğunu belirterek, çalışmada belirtilen olumsuzlukları ortadan kaldırmak için özel dizayn edilen, konveksiyon etkisi arttırılmış havalı güneş kollektörü ve döner sütunlu silindirik kurutucu geliştirmiştir. Sistem üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar; üfleme bölgesi (fan), havayı ısıtma bölgesi (kollektör), kurutma bölgesi (kurutucu odası). Böylece kurutucuda kurutulan kayısıların nem değişimleri karşılaştırılmış ve deneyler sonucunda açıkta kurutulan kayısıların yaş bazdaki nem oranının 4 gün içerisinde % 25'e düştüğünü ve buna karşılık döner sütunlu silindirik kurutucuda ise aynı nem oranına yaklaşık 2 günde düştüğünü tespit etmiştir [12].

Koyuncu ve Pınar (2001), çalışmada kırmızıbiberin kurutulmasında kullanılabilecek doğal akışlı güneşli kabine tip bir kurutucu tasarlamışlardır. Bu kurutucu, kuruma süresince çevre koşullarının ürün üzerindeki olumsuz etkilerini son derece azaltmakta ve kaliteyi yükseltmektedir. Ayrıca kurutucunun kullanılmasıyla, 1 kg ürün için gerekli kuruma süresinin 3,5 saatten 1,28 saate düşürüldüğünü, böylece kuruma süresinin 2,73 kat azaltılabileceği belirlemişlerdir [13].

El-Sebaai ve ark. (2002), güneş enerjili indirekt kurutucuda çekirdeksiz üzüm, incir, elma, domates, soğan ve bezelye kurutmuşlardır. Kurutma havasını ısıtmak için kullandıkları güneş kollektörünün alanı 1 m^2 olup, absorbe edici yüzeyi siyaha boyanmış 2 mm kalınlığından bakır levha, kollektörün örtü malzemesi de 5 mm kalınlığındaki cam'dan oluşturmuşlardır. Cam ile absorbe edici yüzey arasındaki boşluk 8 cm'dir. Kollektörün arka yüzeyinden oluşabilecek ısı kaybını önlemek için 8 cm kalınlığındaki izolasyon malzemesi olarak kullanılmıştır. Prototip kurutma kabini $1 \times 1 \times 1,5 \text{ m}$ boyutlarında imal edilmiştir. Siyaha boyanmış 5 cm uzunluğundaki baca, doğal dolaşımı hızlandırmak için kurutucunun üzerine bağlanmışlardır. $0,855 \times 0,8 \text{ m}$ boylarındaki alüminyum çerçeveye takılmış olan örgü teller kurutma tepsisini oluşturmuşlardır. Kolektörde ısıtılan hava doğrudan kurutma hücresine girmektedir. Kollektörün absorbe yüzeyi ile izolasyon malzemesinin arasında kalan 0,1 m kalınlığındaki kısmı gece koşullarında da kurutmanın devam edebilmesi amacıyla ısı depolayıcı kil, granit, kum gibi malzemelerle de doldurularak kurutma denemeleri yapılmıştır. Domateslerle yaptıkları deneylerde kesilerek kurutulan domateslerin % 7 nem içeriğine 28 saat içinde ulaştığını belirlemişlerdir. Hazırladıkları kurutucu ünitesinin $45\text{-}55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında denemelerde inceledikleri tarımsal ürünlerin kurutulması için uygun olduğunu, ısı depolama materyali kullanmanın gece boyunca da nem azalmasına yardım ettiğini sistemin tam kapasiteyle kullanılması halinde homojen bir kurutma için belli süre sonra tepsilerin yerlerinin değiştirilmesi gerektiğini, büyük materyallerin parçalara ayrılarak kurutulması gerektiğini belirtmişlerdir [14].

Toğrul ve Pehlivan (2002), zorlamalı akımlı güneş enerjili kurutucu, bir ısı pompası ve kurutma kabininden oluşturmuşlardır. Kurutucuda sıcak hava için ısı pompası kullanılmıştır. Kayıların kütlesindeki değişiklik ve kuruma parametreleri her bir test gününde sürekli olarak kayıt altında tutmuşlardır. Bu veriler ile elde edilen değerler, çeşitli matematiksel modellere uygulanmış ve hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve bağıl nemin model katsayılarına ve sabitlerine etkisi çoklu regresyon yöntemi ile araştırılarak, literatürde geçen matematiksel modeller ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, logaritmik model, 0,994 korelasyon katsayısı ile zorlamalı akımlı güneş enerjili

kurutucuda, kayısının kuruma davranışını en iyi açıklayan model olduğunubelirlemişlerdir [15].

Tarhan ve ark. (2003), Tokat yöresinde başarılı mısır kurutma işlemi için çevre havasının ortalama sıcaklığının eylül ayında 3 °C ve kasım ayında ise 6 °C artırılması gerektiğini hesaplamalarla bulmuşlardır. Bu sonuç Tokat yöresinde dış ortamda sergilerde meyve ve sebze kurutmanın çok zor olduğunu, tarımsal ürünlerin kurutulmasında kurutucuların kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Gerek kurutma masraflarının azaltılması gerekse kullanma kolaylığı açısından güneş enerjili kurutucuların kullanılmasını önermişlerdir [16].

Midilli ve Küçük (2003), kabuklu ve kabuksuz fıstık örneklerinin doğal ve zorlamalı taşınımlı güneş enerjili kurutucuda, kuruma davranışlarının matematiksel modellerini incelemişlerdir. Güneş enerjili kurutma modellerinden uygun olanını bulmak amacı ile sekiz değişik matematiksel model kullanılmıştır. Kullanılan modeller yarı teorik ve deneyseldir. Yarı teorik ve deneysel modeller Statistica yazılımı kullanılarak lineer olmayan regresyon analizi ile karşılaştırılmış, ki-kare ve korelasyon katsayılarına göre en uygun modeli seçmişlerdir [17].

Aktaş ve ark. (2004), güneş enerjili kurutma sistemlerinin fındık kurutulmasına uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Araştırmacılar, fındığın uluslararası standartlarda kurutulamaması, “pazar payının kaybına yol açmaktadır” ifadesini kullanmışlar ve yapmış oldukları çalışmada enerji maliyeti düşük, sıcaklık, ağırlık ve nem kontrollü güneş enerjili bir fındık kurutma fırını tasarımını yapmışlardır. Araştırmada, üreticilerin ilk yatırım masrafı düşük ve enerji giderleri az olan kurutma fırınlarını tercih ettiklerini belirtmişlerdir [18].

Tarhan ve ark. (2005), günümüzde ticari olarak kullanılan kurutucuların hiçbirinin en ekonomik ve en kaliteli kurutma işlemini bir arada sağlayamadığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada, güneş enerjili kurutuculardan beklenen başarı kriterleri ve kurutulmuş ürün kalitesi ile ilgili faktörleri açıklanmışlardır. Kurutucu tasarımı ile ilgili gerekli veriler ve güneş enerjili kurutucu tasarımı ile ilgili pratik kuralları vermeye

çalışılmışlardır. Güneş enerjili kurutucuların ekonomik ve uzun süreli kullanımları için üreticinin yapması gereken işleri açıklamışlardır [19].

Aktaş ve ark. (2005), fındık kurutma şartlarını göz önünde bulundurarak ısı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellemesini yapmışlardır. Yapılan modelleme ile güneşli günlerde güneş enerjisinden faydalanılarak daha az enerji sarfıyatı olurken, diğer zamanlarda kurutma işleminin devamlılığının ısı pompası yardımı ile sağlanabileceğini belirtmişlerdir [20].

Saçılık ve ark. (2006), güneş enerjili tünel tip kurutucuda Ankara koşullarında organik domatesin kurutulmasının matematiksel modellemesini yapmışlardır. Domates, % 93,35 nem düzeyinden % 11,5 (yb) nem düzeyine tünel tipi güneşli kurutucuda dört günde, kontrolü olarak açıkta güneşe sererek yapılan kurutma uygulamasında ise aynı sonuca beş günde ulaşmışlardır. Ürünler tünel tipi kurutucuda dış etkenlerden uzak olarak daha temiz kurumuşlardır. Güneş enerjili tünel tip kurutucunun yerel imkanlarla ve düşük maliyetle yapılabileceğini belirtmişlerdir [21].

Doymaz (2005a), incirin güneşe sererek kurutulmasını incelemiştir. Çalışmada 5.42 cm çapında ve yaklaşık 50,2 g ağırlığındaki numuneler kullanılmıştır. Kurutmada yaklaşık 300 g numune tek tabaka halinde tepsiye yerleştirilerek kurutma gerçekleştirilmiştir. Deneyler 35 ve 47 °C sıcaklığında yapılmıştır. İncirin kuruma davranışını açıklamak için yedi farklı model kullanılmış ve bunlardan Verma ve ark. modelinin deney verilerine uygun olduğunu bulmuştur. Model sonuçlarına göre; R^2 : 0,9945, X^2 : 0,00043 ve RMSE: 0,062857 olarak belirlenmiştir. Efektif nem difüzyon katsayısı $2,47 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır [22].

İsaeva (2007), kayısıyı hava ile konveksiyon kurutması deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde Malatya'da yetiştirilen Hacıhaliloğlu ve Kabaaşı kayısı çeşitleri kullanılmıştır. Kayıların kurutulması için deney seti düzenlenmiştir. Deneyler sonucunda kurutma havasının sıcaklığı ve havanın hızı arttıkça kuruma hızı artarak, kurutma süresinin düşmekte olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonucunda,

1,5 m/s kurutma hızında 40 °C’de, kurutma süresinin 15 saatinde Hacıhaliloğlu kayısı çeşidinde nem % 58, 50 °C ‘de nem % 46, 60 °C’de nem % 35, 70 °C’de ise nem % 27’e inmiştir [23].

Mutlu (2007), Güneş enerjisinden yararlanılarak tarımsal ürünlerin kurutulması için raflı tip bir güneşli kurutucu ile, Tokat ilinde yoğun olarak üretimi yapılan domatesin değişik dönemlerde kurutulma koşullarını araştırmıştır. Kurutulan domatesler renk açısından incelenmiş ve kuruma süresinin uzaması ile birlikte renkteki değişme daha da artmıştır. Üst raflardaki domates örneklerinin daha uzun sürede kurudukları ve daha yavaş nem kaybettikleri için havadaki oksijenle reaksiyona girerek renklerde değişmelere neden olan oksidasyon reaksiyonlarına daha fazla maruz kaldığını tespit etmiştir [24].

Isı pompalı kurutma

Ceylan ve ark. (2005), ısı pompalı bir kurutma fırınının elma kurutulmasında kullanılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ayarlı kapak (damper) ile bağıl nemi daha düşük olan dış hava sisteme alınarak, sistem havasının neminin düşürülmesini sağlamışlardır. Elmalar; 40 °C’de, ortalama % 20 bağıl nemde, 2,8 m/s hava hızında, 4,8 (g su / g kuru madde) su oranından 0,18 (g su / g kuru madde) su oranına kadar 3,5 saatte kurutmuşlardır. Araştırmacılar, bağıl nemin düşük olduğu bölgelerde yapmış oldukları ısı pompalı kurutma sisteminin verimli bir şekilde çalışabileceğini ifade etmişlerdir. Elmaların kurutma sonrası su aktivitesi değerini 0,65 olarak bulmuşlar ve böylece elmalarda düşük su aktivitesinden dolayı bazı toksijenik küflerin faaliyetlerinin ve toksin üretiminin engellenmiş olduğunu tespit etmişlerdir [25].

Vakumda kurutma

Jaya ve Das (2003), mango pulpunu vakumla kurutmuşlardır. Kurutmada 30-50 mmHg mutlak basınç, 2, 3, 4 mm pulp kalınlığı ve 65, 70, 75 °C vakum odasındaki ısıtıcı yüzey sıcaklık değerleri dikkate alınmıştır. Mango tozundan yapılan pulpun

renk değişimi, ısıtıcı yüzey sıcaklığından çok pulp kalınlığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Renk değişiminin az olması için vakumlu kurutmada, vakum odasındaki ısıtıcı yüzey sıcaklığının 72,3 °C ve pulp kalınlığının da maksimum 2,6 mm olması gerektiği belirtilmişlerdir [26].

Jaya ve Das (2004), mango pulpunun vakumla kurutulmasında; maltodekstrin, gliserol monostearin ve trikalsiyum fosfatın kurutulan mango tozu özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Sistemde istenen 710-730 mmHg vakumu (30-50 mmHg mutlak basıncı) yaratmak için 3,7 kW, 0,0236 m³/s kapasiteli sulu vakum pompası kullanılmıştır. Yapışma derecesi, akıcılık, renk gibi özellikler dikkate alınarak optimum besleme bileşimi, 1 kg katı mangoya 0,43-0,57 kg maltodekstrin karıştırılması ile elde etmişlerdir. Trikalsiyum fosfat ve gliserol monostearin için en uygun koşul ise 1 kg katı mango başına 0,015 kg olmuştur [27].

Yongsawatdigul ve Gunasekaran (1996), yaptıkları çalışmanın birinci bölümünde mikrodalgalı vakumla kurutulmuş kırmızı yabanmersinlerinin, renk, yapı ve su aktivitesini belirlemişler ve sıcak hava ile kurutulmuş olanlarla karşılaştırmışlardır. Mikrodalgalı vakumla kurutulmuş olanların renginin daha kırmızı ve daha yumuşak bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir [28].

Yongsawatdigul ve Gunasekaran (1996), çalışmalarının ikinci bölümünde kırmızı yabanmersininin mikrodalgalı vakumla kurutulmasını enerji ve verim açısından incelemişlerdir. Kurutma, laboratuvar tipi mikrodalgalı vakumlu fırında, sürekli ya da kesikli olarak yaş baza göre son nem içeriği % 15 olana kadar yapılmıştır. Sürekli kurutma iki mikrodalga gücünde (250, 500 W) ve iki mutlak basınçta (5,33, 10,67 kPa), kesikli kurutma ise 250 W gücünde 5,33 ve 10,67 kPa basınçta yapılmıştır. Kesikli kurutmanın, sürekli kurutmaya göre enerji açısından daha verimli olduğu belirtilmiştir. Her iki yöntemde de düşük basıncın, kurutma verimini arttırdığı vurgulamışlardır [29].

Cui ve ark. (2004), havuç dilimlerini mikrodalgalı vakumla kurutmuşlar ve teorik bir model geliştirmişlerdir. 3-5 mm olarak dilimlenen havuçlar; 336,5, 267,5, 162,8 W

mikrodalga güçlerinde ve 30, 51, 71 mbar vakum altında kurutulmuşlardır. Teorik ve deneysel veriler, kurutma oranının mikrodalga çıkış gücü ile doğrusal ve o andaki suyun vakum basıncının, buharlaşmanın gizli ısısı ile ters orantılı olduğunu belirlemişlerdir [30].

Madamba (2002), vakumla kurutmada ise havucu seçmiştir. Vakumla havucun kurutulmasında en uygun koşullar 1,6 mm kalınlığındaki havuç dilimlerinin 10 kPa basınçta, 68 °C’de kurutulmasıdır. Vakumla havucun kurutulmasında basınç, sıcaklık, dilim kalınlığı gibi bütün özellikler havucun son nem miktarını büyük oranda (% 90 seviyelerinde) etkilemiştir. Ortalama kurutma oranı sadece ürün kalınlığından etkilenmiştir. Nemi geri alma oranı ve renk, bağımsız hiçbir parametre ve koşuldan etkilenmemiştir [31].

Akışkan yataklı kurutma

Nitz ve Taranto (2007), taze cari oca çekirdeklerini kurutmak için titreşimli akışkan yatak kurutucu (pulsed fluidized bed dryer) tasarlanmışlardır. Bu çalışmada, Page eşitliğinin kinetik parametreleri olan hava giriş sıcaklığı, hava akımı oranı ve titreşim frekansının sürece etkileri analiz edilerek geliştirmişlerdir. Tek önemli değişken havanın giriş sıcaklığı olmuştur. Kurutma 60 °C’de geleneksel akışkanlaştırma ile yapılmıştır. Titreşimli (pulsed) ve geleneksel akışkanlaştırma arasında hiçbir fark gözlemlenmemiştir. Sıvı-dinamik değerlendirmesi göstermiştir ki en fazla basınç düşmesi iki rejimde de yaklaşık aynı olmuştur. Oysa ki titreşimli akışkanlaştırma altında en yüksek değer başlangıçtaki yatak yüksekliğinden etkilenmiştir [32].

Yüzgeç (2005), biyolojik bir ürün olan ekmek mayasının (*Saccharomyces cerevisiae*) kesikli bir akışkan yataklı kurutma süreci için iki model geliştirilmiştir. Birinci model, enerji ve kütle denklığıne dayanan homojen matematiksel modeldir. Bu model yapısında yatak sıcaklığı birinci dereceden adi bir diferansiyel denklem olarak bulunmuş ve çözümü ayrık zamanda dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ile yapılmıştır. Ekmek mayasının endüstriyel akışkan yataklı kurutma sürecinden alınan veriler ile model test edilmiştir. İkinci model, kurutma süresince granül içerisindeki

nem kesri ve sıcaklık değişimlerini hesaplayan model denklemlerinden oluşmaktadır. Granül içerisindeki nem difüzyonu ve sıcaklık değişimleri ikinci dereceden parabolik doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ayrık zamanda Crank-Nicolson yöntemi ile çözülmüştür. Kurutma süresince kurutulan granülün yapısındaki fiziksel değişimler göz önüne alınarak, model büzülen granül tabanlı kurutma modeli olarak geliştirilmiştir [33].

Heinrich ve ark. (2004), bir püskürtmeli akışkan yatak kurutma süreci için ısı ve kütle aktarım modelleri geliştirmişlerdir. Granül içerisindeki nem kesri eğilimi bulunmaya çalışmışlardır [34].

Vitor ve ark. (2004), “tapioca” biyolojik ürününün kesikli bir akışkan yatak kurutucusundaki kurutma sürecinin, gaz ve katı fazlarına bağlı olarak ısı ve kütle aktarma katsayılarının bulunmasını amaçlamışlardır. Bir katı, iki sıvı faz olmak üzere üç faz ele alınarak matematiksel model geliştirmişler ve sonuçları değerlendirmişlerdir [35].

Topuz ve ark. (2004), fındığın akışkan yatakta kurutulmasının sayısal ve deneysel çalışmasını yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, sayısal ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlar ve sayısal değerlerin deneysel sonuçlara yakın olduğunu belirlemişlerdir [36].

Romero ve ark. (2004), akışkan yatak ve ısı taşınımı tepsisi kurutucuda mangonun viskoelastik parametrelerini ile rehidrasyon kapasitelerini incelemişlerdir. İlk olarak, mango soyulmuş, 6 mm (± 3 mm)'lik küçük küpler şeklinde kesilerek ve kurutma sürecine verilmeden osmotik eriyiklerle işlenmiştir. Glikoz osmotik eriyikleri kullanılarak ve CaCl_2 ana yapıya eklenmiştir. 40 °C ($\pm 0,9$ °C)'deki eriyiklerin mango küplerinin işlem öncesi osmotik işlenmesi 6 saat en ideal olduğu görülmüştür. Sıkıştırma bırakma testleri iki elementli Maxwell metodu kullanılarak rehidre edilmiş mangolarda iyi işlediği görülmüştür. Tepsisi kurutucu ile kurutulmuş mangolar akışkan yatak kurutucuda kurutulmuş mangolardan sıkıştırma baskısını daha hızlı

yaydıklarını tespit etmişlerdir. Kurutma öncesi işlem ve kurutma türünün her ikisinin de mangoların çekme-büzülme verimini etkilediğini gözlemlemişlerdir. Mangoların nem içeriğinin bir fonksiyonu olarak birkaç denklemin çekme-büzülme veriminin önceden kestirebildiği sunulmuştur. Beklenildiği gibi, ön işlem görmüş mango küplerinin minimum akışkanlaştırma hızı ön işlemsiz numuneler için olan hava hızından daha yüksek çıkmıştır [37].

Topuz (2002), akışkan yatakta fındık kurutma sürecinde ısı ve kütle geçişini incelemiştir. Deneysel çalışmanın yanında konu ile ilgili matematiksel modelleri incelemiş ve yeni üç fazlı bir modeli fındığa uygulayarak deney sonuçları ile model değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, kurutma havasının sıcaklığının artmasının kurumayı hızlandırdığının bir gerçek olduğu, kurutulan ürünün gıda ve kimyasal bozulmaya uğramadan kurutulması için sıcaklığın belirli ölçülerde sabit tutulması gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca, akışkan yatakta kurutma havası hızının arttıkça azda olsa kurutma hızının bundan etkilendiği ve ters orantılı olarak düştüğü, bunda gruplaşma rejiminin etkisi olduğu, sabit oran periyodunun zamanının yatak hava hızı ile doğru orantılı olduğu sonucunun elde edildiği araştırmacı tarafından belirtilmiştir [38].

Kanarya (2002), akışkan yataklı kurutma sürecinin matematiksel modeli üzerine çalışma yapmıştır. Modelleme çalışması kütle ve enerji denkliği esasına dayanmaktadır. Akışkan yatak fırın modeli de genel model içinde değerlendirilmiştir [39].

Temple ve ark. (2000) akışkan yataklı çay kurutma için kontrolörlerin direnç çalışması yapılmışlardır. Çalışmalarda, kontrolör biçimleri tasarlamışlardır. Normal işletme koşulları altında, doğrulanmış bir benzetim modelinin sıklık (frekans) eğiliminden tahmin edilen bir transfer işlevi kullanılarak bu kontrolörlerin ayarını yapmak mümkün olmuştur. Bu çalışmada standart koşullardan sapma gösteren Cohen, Coon ya da Zeigler-Nichols metotlarıyla belirlenen kontrolör ayarına yeterli kazanç ve çevre farklarını sağlarken minimal integral kare hatası veren bir dizi kontrolör ayarları yapmak için kurutucu modellemeye dayanan farklı bir metot

geliştirmişlerdir. Bu ayarların test edilen tüm koşullar için uygun olduğu belirlemişlerdir. Sadece sonuçsal hesaplayıcılardaki tüm transfer işlevlerinden ziyade, sadece kazançları kullanarak, kontrolörlere bir basitleştirme yapılmasının doğrulandığı göstermişlerdir [40].

Soponronnarit (1999), Tayland'daki akışkan yatakta pirinç kurutulması tanımlanmıştır. Bu çalışmada akışkan yatakta pirinç kurutucusunun matematiksel bir modeli geliştirilmiştir. Akışkan yatakta pirinç kurutucusu birçok ülkede tamamen ticari olup ekonomik bir pazar oluşturmaktadır. Özellikle çok yüksek nem içeren tahıllar için pirinç kalitesi sağlanmasına karşın, enerji tüketimi nispeten düşük olduğunu belirtmiştir [41].

Hajidavalloo ve Hamdullahpur (1998), akışkan yataklı kurutma sisteminin hidrodinamik ve ısı analizini yapmışlardır. Akışkan yataklı kurutma sisteminin deney düzeneğini kurmuşlar ve geliştirdikleri üç fazlı matematiksel model ile deneysel sonuçları karşılaştırarak iyi bir uyum içinde olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmalarında üç fazlı modelin iki fazlı modellere göre gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [42].

Hajidavalloo (1998), tanecikli materyalin akışkan yatakta kurutma sürecindeki karakteristiklerini incelemiştir. Deneysel çalışma, laboratuvar boyutlarında bir akışkan yatak sisteminde gerçekleştirmiştir. Dağıtıcı eleğin havayı sirkülasyon etmesiyle ortaya çıkan değişiklikler ve taneciklerin girişteki nem oranının akışkan yatağın hidrodinamiğine etkisinin nasıl olacağını incelemiştir. Teorik kısmında, akışkan yatakta ısı ve kütle transferine benzetim sağlayacak bir matematiksel model geliştirilmiş ve düzeltme parametresi olmayan doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Çözüm sonucu, geliştirilen model ile deneysel veriler arasında oldukça iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir. Püskürtmeli ve hareketsiz yatakta da bu modelin kullanılabileceği tespit edilmiştir. Akışkan yataklı kurutma sürecinde her bir karakteristiğin, hava hızı, tanecik çapı vs. nasıl bir etkinlik gösterdiğini tespit etmiş, ayrıca, akışkan yatağın ısıl etkinliğinin nasıl artırılabilirliği üzerinde çalışmalar yapmıştır [43].

Soponronnarit ve ark. (1997), mısırın küçük bir akışkan yatakta kuruma karakteristiklerini araştırmışlardır. Yatağın ısı verimini artırmak üzere çıkan havanın bir kısmını tekrar akışkan yatağa vermişlerdir. Deneysel sonuçlar ile korelasyon yapmak için birçok deneysel ince tabaka kurutma eşitliklerini deneyerek Wang ve Singh denkleminin iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir [44].

Kiranoudis ve ark (1997), akışkan yatak ve döner kurutucuların ürün kapasitesine göre her birinin toplam maliyetini optimize edecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Her iki kurutucu için ısı taşınımı kurutma sürecini belirleyen basit bir matematiksel model kullanmışlardır. Kurutucuların tasarım yapısı incelendiğinde, döner kurutucu, akışkan yatak kurutucuya göre oldukça pahalı olduğu belirtmişlerdir [45].

Grabowski ve ark. (1997), laboratuvar boyutlarındaki akışkan yatakta ve püskürtmeli yatakta mayanın kurutulması sürecini deneysel olarak incelemişlerdir. Püskürtmeli yatağın akışkan yatağa göre % 25 daha fazla havaya ihtiyacı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, akışkanlaşma, püskürme davranışları, kurutma kinetiği ve hesaplamalar açısından püskürtmeli yatağın ve akışkan yatak ile püskürtmeli yatak kombinasyonunun yalnız akışkan yataktan daha iyi olduğunu belirlemişlerdir [46].

Dimattia ve ark. (1996), kesikli akışkan yatakta kırmızı biber taneciklerini kurutmuşlardır. Yatak yüksekliğinin, gaz hızının, giriş nemi aktivitesinin ve hava sıcaklığının kurutma sürecine olan etkilerini incelemişlerdir. Nem aktivitesinin difüzyon kontrollü olduğunu ve yapışma etkisinin az olduğunu tespit etmişlerdir. Karışma oranının yüksek olmasından dolayı, yataktaki sıcaklık dağılımının özdeş olduğunu belirlemişlerdir. Bu sistemde diğer kurutma sistemlerine göre kurutma süresinin azaldığını ortaya koymuşlardır [47].

Srinivasa ve ark. (1995), akışkan yatak kurutucuda sabit oran ve azalan oranlı kurutmayı deneysel olarak incelemişlerdir. Kesikli ve değişik tipteki sürekli akışkan yatakları karşılaştırmışlar; spiral akışkan yatağın tek aşamalı sürekli akışkan

yataktan, çok aşamalı akışkan yatağın kesikli akışkan yataktan avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır [48].

Zahed ve Zhu (1995), akışkan yatakta kurutma için bir model ortaya koymuşlardır. Bu modeli oluştururken, taneciklerin içinde nem taşınması olduğunu, gaz ile tanecik arası kütle transferinin yoğun fazda gerçekleştiğini, gaz baloncukları ile yoğun faz arasında ara faz geçiş dengesinin iyi olduğunu kabul etmişlerdir. Değişik kurutma şartlarında, akışkan yatak sıcaklığını ve tanecik nem aktivitesini tespit etmişlerdir. Fakat deneysel çalışma yapmamışlardır. Ayrıca, aldıkları sonuçları, literatürdeki mevcut deney sonuçları ile karşılaştırmamışlardır [49].

Abid ve ark. (1990), akışkan yatakta mısır kurutma sürecinde ısı ve kütle transferinin deneysel çalışmasını ve teorik analizini yapmışlardır. Modellerinde tersinmez termodinamik prensiplerini kullanmışlardır. Modellerinde nem transferinin; sıcaklık değişimi etkisi altındaki ısı yayılımı ile nem oranı değişimi etkisindeki difüzyon ile sağlandığını dikkate almışlardır. Sonuç olarak; gaz hızının ve neminin kurutma oranı üzerinde küçük bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Isıl değişim katsayısının analizi sonucunda, suyun ısı yayılımı ile transferinin, difüzyona oranla ihmal edilebileceğini belirlemişlerdir [50].

Uçkan ve Ülkü (1986), kesikli akışkan yatakta mısır kurutma işleminde, hava hızı ve hava sıcaklığının kurutmaya olan etkisini incelemişler ve difüzyon teorisine dayalı bir model ortaya koymuşlardır. Model ve deneysel verilere dayalı olarak mısırın kuruması için bir deneysel formül önermişlerdir. Kurutma işleminde, gazın hızının kurutma oranı üzerinde tek başına etkisi olmadığını ve mısırın kurumasında sürecin difüzyon kontrollü olduğunu tespit etmişlerdir [51].

Tünel tipi kurutucu ile kurutma

Yıldız ve ark. (1989), tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasında enerji tüketimi ile ilgili çalışmalarında, tane mısırın kurutulmasına ilişkin bazı özellikleri belirlemişlerdir. Mısırların % 17-25 (yaş baz) nemde hasat edilebileceğini, bu

mısırların bozulmadan depo edilebilmesi için % 11-13 (y.b.) neme kadar kurutulması gerektiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kurutma yapan kurutucularda enerji tüketiminin 4000-5000 kJ/kg-su arasında değiştiği belirtilmiştir. Bu çalışmada kurutucuda, tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasına ilişkin bazı özelliklerini belirlemişlerdir. Çalışma sonuçları, mısırdan 1 kg suyun alınması için 2112,87 - 6114,52 kJ enerji tüketildiğini, uygun bir ısıtıcının kullanımı ile bu miktarın azaltılabileceğini belirtmişlerdir [52].

Johnson ve ark. (1998), bir muz çeşidi olan Plantain (Musa AAB)'in hava kurutma karakteristikleri ile ilgili çalışmalarında, bir sıcak hava kurutucusu ile çeşitli kalınlıklardaki Plantain silindir parçalarını, farklı hava sıcaklıklarında kurutma davranışlarını, büzülme ve nem dağılımını incelemişlerdir. Sonuç olarak hava sıcaklığının görünüş metodoloji etkisi ve kuruma oranlarındaki parçaların kalınlığını bulmuşlardır. Sıcak havanın kurutma davranışında en büyük etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Plantain'in hava kurutması için hareket enerjisinin 38,81 kJ / g mol olarak hesaplamışlardır. Kurutma süresince büzülen parçaların hacim ve boyutlarındaki değişiklikleri izleyerek hacimdeki değişiklikleri bir çekirdek kurutma modeli ile çok iyi tanımlarken boyutlardaki değişiklikleri doğrusal nem içeriği ile tanımlamışlardır. Fick'in yayılım denklemini kullanarak kurutma süresince Plantain parçaları içindeki nemin yayılımını engellemek için kullanmışlardır. Bu model ile yiyecek parçalarındaki ortalama nem içeriğinden çok, yerel nem içeriklerine karar vermek için kullanarak yiyeceklerin çürümesinin hassaslığını tam olarak tahmin etmişlerdir [53].

Boudhrıoua ve ark. (2001), Muzun kurutulması süresince yapısındaki değişiklere olgunluk ve hava sıcaklığının etkisi ile ilgili çalışmalarında, sıcak hava kurutma süreci süresince muz dilimlerinin reolojik özelliklerini karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Kurutulmuş muzdaki önemli değişiklik, depolama süresince oda sıcaklığı ve havadaki nem oranında reolojik özelliklerinin olgunluk derecesine etkisi olarak gözlemlemişlerdir. Bu çalışma, muzun sert meyve kabuğundaki şeker içeriği ile meyve olgunluk derecesi arasında belirlenen kabuk (s) ve kabuk rengi (a) parametrelerine karar vermeyi mümkün kılmıştır. Depolama süresince birbirleriyle

orantılı olmayan s ve a bağlantılarıdır. Glikoz içeriği ile güvenli nem içeriği değerleri çoğu kez tüketimden kaçınmak için aralarında uygunluk sağlamıştır. Reolojik özelliklerdeki değişiklikler deneyler süresince penetrometre ile baştan sona izlenmiştir. Bu çalışma sonucunda muz dilimlerinin 80 °C de kurutulması 4, 6 ya da 8 saatten sonra muz meyvelerinde radikal bir değişiklik meydana getirdiğini, muzun bozulabilirlik ve ani kırılabilirlik özelliklerinin kaybolduğunu belirlemiştir. Muz dilimlerinin termik ve termodinamik özelliklerinin analizleri sonucunda muzun kuruduktan sonra soğuma geçiş sıcaklığında ani değişikliği gösterdiğini ortaya koymuşlardır [54].

Maskan ve ark. (2001a), üzüm pestillerinin sıcak hava ve güneşle kurutulması ile ilgili çalışmalarında, geleneksel teknikler kullanılarak kaynatılan üzüm suyu ve nişasta karışımı hazırlamışlardır. Pestillerin kurutulmasını sıcak hava ve güneş kurutması yöntemleri ile yapmışlardır. Sıcak hava kurutmasında hava sıcaklığı (55 °C, 65 °C ve 75 °C), örnek kalınlığı ($S_1=0,71$ mm, $S_2=1,53$ mm $S_3=2,20$ mm ve $S_4=2,86$ mm) ve hava hızı ($V_1= 0,86$ m/s $V_2=1,27$ m/s ve $V_3=1,82$ m/s) olarak belirlemiştir. Pestilin kurutma süresince kuruma zamanın, sıcaklık ve dilim kalınlığının, nem içeriğinin önemli ($P<0,05$) iken hava hızının önemli olmadığını tespit etmişlerdir. Sıcak hava ile kurutmada pestil (0,12 kg H₂O/kg DS)'in ticari nemi için örnekteki kalınlık ve hava sıcaklık derecesine bağlı olarak kuruma zamanını 50–140 dakika olduğunu tespit ederlerken, güneş ile kurutmada 180–1500 dakika olduğunu tespit etmişlerdir. Tüm örnekleri değişik periyot oranlarında güneş kurutmasının S_1 , S_2 , S_3 ve S_4 oranları hariç 55 °C de kurutmuşlardır. Etkin yayılma değerini Fick'in yayılım modelinden almışlardır. Bu değerler sıcak hava kurutması için $3,00-37,6 \times 10^{-11}$ m²/s güneş kurutması için $1,93-9,16 \times 10^{-11}$ m²/s arasındadır. Su yayılımının hareket enerjisi değerini bir Arrhenius tipi denklem kullanarak hesaplamışlardır. Bulunan değerler S_1 , S_2 , S_3 ve S_4 için sırasıyla 10,3, 12, 16,5 ve 21,7 kJ/mol'dür [55].

Doymaz ve Pala (2002), kırmızıbiberin sıcak hava ile kurutma karakteristikleri ile ilgili çalışmalarında, farklı işlem ve hava kurutma şartları altında kırmızıbiberlerin kurutulmasının teorik ve deneysel bir çalışmasını sunmuşlardır. Parçalanmış

biberlerin kuruyan kavisleri üstel denklem ve Page denklemi kullanılarak elde etmişlerdir. Her iki denklemin R^2 değerleri karşılaştırılarak üstel denklemden daha iyi kurutma karakteristiklerini hazırlayan denklemin Page denklemi olduğu sonucuna varmışlardır [56].

Doymaz (2004a), bamyanın kurutma karakteristikleri ve hareketleri ile ilgili çalışmasında, bamyanın hava kurutma karakteristiklerini, 50-70 °C sıcaklık oranı için bir laboratuvar ölçeği ile sıcak hava kurutmasını araştırmış ve havadaki nem oranını % 8-25 olarak belirlemiştir. Bamyadan nem transferini Fick'in yayılım modelini kullanarak tanımlamış ve etkili yayılım hesaplamıştır. İki matematiksel modeli (Page ve numune üst modelleri) literatürdeki mevcut bilgileri deneysel bilgi için uygulamıştır. Bu iki modelin performansını incelemiş ve karşılaştırmıştır. Page modelinin bamyanın tek kuru tabakasını tarif etmek için en iyi sonuçları verdiğini belirlemiştir [57].

Doymaz (2004b), yeşil fasulyelerin kuruma davranışları ile ilgili çalışmasında, Türkiye İskenderun'da yetişen yeşil fasulyenin matematiksel modelini ve ince tabaka kuruma deneylerini sunmuştur. Yeşil fasulyenin kurutma karakteristikleri 50–70 °C sıcaklık oranında sıcak hava kullanılarak % 90,53 $\pm$ 0,5'den % 14 $\pm$ 0,3'e ortalama nem içeriği için incelemiştir. Artan hava sıcaklığının daha kısa kuruma zamanına sebep olduğu sonucuna varmıştır. Deneysel kurutma eğrilerini yarı teorik modeller ile oluşturmuştur (Handerson, Pabis, Lewis ve Page modelleri). Page modelinin diğerlerinden daha iyi kurutma karakteristiklerini gösterdiği sonucuna varmıştır. Nem transferinin etkin yayılım katsayısı sıcaklık oranı üzerinde $2,641 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ den $5,711 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 'ye değiştiğini, nem yayılım için hareket enerjisinin 35,43 kJ/mol olduğunu bulmuştur [58].

Arıcı (2006), mantarın (*Agaricus bisporus*) farklı kurutma havası sıcaklığı ve hava hızı şartlarında kurutma karakteristikleri belirlemiştir. Deneylerde hava sıcaklığı olarak 50 °C, 60 °C ve 70 °C, hava hızı olarak 1, 2 ve 3 m/s alınmıştır. Mantarın (*Agaricus bisporus*) kuruma süresinin belirli bir anındaki nem içeriğini belirlemek amacıyla Newton, Page, Geliştirilmi Page, Henderson ve Papis, Logaritmik, iki

terimli, iki terimli ve eksponansiyel, Wang ve Sign, Thompson, difüzyon yaklaşım, Geliştirilmiş Henderson ve Papis, Verma ve ark. ve Midilli ve ark. modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Midilli ve ark. modelinin mantarın (*Agaricus bisporus*) kuruma davranışını diğerlerinden daha iyi açıkladığı belirlenmiştir [59].

İzli, (2007), mısırın sıcak hava akımıyla kurutulmasında kurutma parametreleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda karıştırıcılı ve karıştırıcısız kurutmada kurutma süresi, enerji tüketimi ve maliyet açısından 75 °C sıcaklıktaki kurutmada en iyi sonuçlar elde edilirken çimlenme hızı ve çimlenme gücü açısından en iyi sonuçlar karıştırıcılı kurutmada 55 °C’de, karıştırıcısız kurutmada 45 °C’deki sıcaklık değerlerinde elde edilmiştir [60].

Akosman ve Kalender (2004), soya fasulyesinin kuruma karakteristiğini tepsili kurutucuda incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında laboratuvar tipi bir tepsili kurutucu kullanılarak soya fasulyesini 30 - 50 °C aralığındaki değişik sıcaklıklarda ve değişik hava akış hızlarında (0,5, 1,0 ve 1,5 m/s) kurutmuşlardır. Tüm katı örnekleri için kuruma hızının sıcaklık ve hava akış hızı ile arttığını belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda katı neminin denge nemine çok kısa sürede ulaştığını gözlemişlerdir. Deneysel verileri kararsız hal difüzyon eşitliğinin çözümlenmesi ile analiz etmişlerdir [61].

Durak (2000), Tokat şartlarında tünel tipi kurutma serasında ve dış ortamda biber, domates ve mısır kurutmuştur. İki eşit parçaya ayrıldıktan sonra kurutulan domates örneklerinin sera içinde ve dışında 6 ve 7. günde, ¼ parça halinde kurutulan domateslerin ise 5 ve 6. günde kuruduklarını belirtmiştir [62].

Kabinli kurutucu ile kurutma

Yılmaz ve ark. (1999), kabin tipi bir kurutma sistemi kullanmışlardır. Bu kurutma sistemi bir hava kolektörü, kurutma odası ve hava dolaşım sisteminden oluşmaktadır. Kurutma havasının dolaşması için fotovoltaiik panellerden üretilen 45 W’lık güç, fanı

çalıştırmak için kullanılmıştır. Hava kollektörü 27,50 m²'lik alana sahiptir ve kabin içerisinde 8 tane 2,8 m²'lik raf bulunmaktadır. Soğurucu değişik tip siyaha boyanmış alüminyum telefon telinden yapılmıştır. Kurutucunun kapasitesi 25 kg taze domates alacak şekildedir. Buna göre yük oranı 9 kg/m² dir. Bu kurutucuda materyalin nem içeriğinin kurutma mevsimi sırasında 5 günde % 95 ten % 17 ye düşürüldüğünü ifade etmişlerdir [63].

Mikrodalga ile kurutma

Tuncer (1990), araştırmasında sebzelerin yüksek frekanslı mikrodalga manyetik alanının etkisine konulunca, ürünün gösterdiği davranış ve uğradığı değişikliklerin belirlenmesini ve en uygun kurutma yönteminin deneysel olarak bulunmasını amaçlamıştır. Araştırma sonuçlarına göre; mikrodalga alanına konulan pırasa, kırmızı ve yeşil biber, patlıcan, soğan ve patatesin uygun mikrodalga güç kademesi seçilerek, mikrodalga ile sebzelerin reaksiyona girmesini önleyen düzenlemelerle hiç bir kalite kaybı olmaksızın, konveksiyonlu kurutmaya kıyasla, 1/5 -1/12 arasında değişen daha kısa sürede kurutmanın mümkün olabileceğini belirlemiştir [64].

Funebo ve Ohlsson (1998), mantar ve elmanın mikrodalga ile ısıtılmış hava kombinasyonu ile kuruma parametrelerini belirlemiştir. Kuruma parametreleri olarak hacim ağırlığı, yeniden su alma kapasitesi, kuruma hızı ve renk değerlendirmiştir. Çalışmada, Agaricus Bisporus mantar çeşidi ve Golden Delicious elma çeşidi kullanılmıştır. Kurutma işlemi laboratuvar kurutucusunda gerçekleştirilmiştir. Kurutma işleminden önce elma ve mantar 5 mm'lik kalınlıklarda dilimlenmiştir. Yeniden su alma işlemi elma için 50 °C, mantar için 95 °C sıcaklıktaki damıtılmış suda 1, 2, 5, 10, 20 ve 40 dakikalık sürelerde bekletilerek belirlenmiştir. Yeniden su alma işleminde mantarın 5 dakika, elma dilimlerinin 20 dakikada denge durumuna geldiği saptanmıştır. Kuruma işleminin uzun sürmesi durumunda, üründe büzülmenin artmasıyla hacim ağırlığının yükseldiğini bulmuşlardır. Ortalama büzülme mantarda % 87, elmada % 72 olarak belirlemiştir. Isıtılmış havayla kurutulan ürün ile mikrodalga ile kurutulmuş ürün karşılaştırıldığında ise, ısıtılma havayla kurutulan ürünlerde esmerlemenin daha

fazla olduğu belirlenmiştir. Elma ve mantar dilimlerinin kurutulmasında ısıtılma hava-mikrodalga kombinasyonu ile kuruma hızının azaldığını belirlemişlerdir [65].

Pappas ve ark. (1999), mikrodalga kurutma yöntemi ile kurutulan mantarlarda ürün büyüklüğünün kurutma süresine ve farklı kurutma yöntemlerinin ürünün yeniden su alma kapasitesine etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde 25, 36 ve 54 mm çapındaki mantarları kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre, kurutmada 425 W güç seviyesinde kurutmada örnek büyüklüğünün küçülmesi ile kurutma süresinde azalma meydana geldiği bildirmişlerdir. Yeniden su alma kapasitesi ise mikrodalga kurutma yönteminde geleneksel kurutmaya göre daha yüksek olduğunu bulmuşlar ve sürenin artmasıyla ürünün su alma oranını belirli seviyeye kadar arttırmış ve daha sonra değişmemiştir [66].

Özkan ve Işık (2001), mikrodalga ve sıcak hava ile kurutmanın kombinasyonunu kullanarak kayısıyı ve kirazı kurutmuşlardır. % 82,8 neme sahip kayısılar % 12,7 nem değerine kadar 32 dakika 6 mikrodalga kademesinde, sonraki 13 dakika ise 100 °C'ye ısıtılmış fanlı fırında kurutmuşlardır. % 86,5 neme sahip kayısılar % 13,2 nem değerine kadar 40 dakika mikrodalga ile, sonraki 10 dakika ise fanlı fırında kurutmuşlardır. Kurutma süreçleri sonunda materyallerin renk, koku, tat gibi özelliklerini kaybetmedikleri gözlemişlerdir [67].

Özkan ve Işık (2001), çalışmada % 88,12 nem değerine sahip domatesi maksimum ayarda 30 dakika fanlı fırında, sonra sırasıyla 90 W mikrodalga kademesinde 6 dakika, 160 W mikrodalga kademesinde 10 dakika, 350 W mikrodalga kademesinde 5 dakika, 500 W mikrodalga kademesinde 5 dakika, 650 W mikrodalga kademesinde 9 dakika olmak üzere toplam 65 dakikalık kurutma periyodu ile sıcak havayla kurutmuşlardır. Fanlı fırında kurutmada materyal merkez sıcaklığı 1. dakikada 24 °C, 30 dakikada 160 °C'dir. Mikrodalga kurutma periyodunun başladığı 31 dakikada 166 °C, 65 dakikanın sonunda ise 393 °C'dir. Kurutma sonunda domateslerin renk, koku, tat gibi özelliklerini kaybetmedikleri belirlemişlerdir [68].

Koç (2001), Kabaaşı kayısı çeşidi kullanarak mikrodalga ve endüstriyel kurutma metotları uygulamıştır. Püre ve bütün haldeki kayısının iki farklı metotla kurutarak fiziksel ve kimyasal incelemeler yaparak kurutma yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Endüstriyel kurutma metodu ile kurutulmuş püre halindeki kayısındaki nem miktarının mikrodalga ile kurutulmuş püre halindeki kayısındaki nem miktarına göre daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Bu çalışmada kayısı çekirdeği çıkartılmış ve kükürtlenmiş olup fabrikasyon (endüstriyel) kurutma ve ev tipi (20 lt iç hacimli) mikrodalga fırında kurutma tekniklerine uygun olarak kurutmuştur. Metotlarında mikrodalga kurutma ile SO₂ ve nem miktarlarında endüstriyel kurutmaya göre daha fazla azalma olduğunu tespit etmiştir. Sonuç olarak mikrodalga ve endüstriyel yöntemlerle kurutulan kayısının fiziksel ve kimyasal olarak genelde benzer sonuçlar aldığı ve mikrodalga uygulamasının kayısılar üzerinde olumsuz etkisinin olmadığını bulmuştur [69].

Infrared ile kurutma

Toğrul ve ark. (2005a), çalışmalarında, 0,5, 1,0 ve 1,5 cm kalınlığında küp şeklinde dilimlenmiş mantarların kuruma davranışlarını infrared kurutucuda 50, 60, ve 80 °C kurutma havası sıcaklığı değerlerinde incelemişlerdir. Sıcaklığın 50 °C den 80 °C'ye çıkarılmasıyla 0,5, 1,0 ve 1,5 cm dilim kalınlıklarının kuruma süresinde sırasıyla 170, 140, 104 dakikalık azalma olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca mantar kalınlığının difüzyon katsayısına etkisini incelemişler ve sonuçta sıcaklık ve dilim kalınlıktaki artışın difüzyon katsayısı artışına sebep olduğunu belirlemişlerdir [70].

Toğrul ve ark. (2005b), dört farklı kalınlıkta kestikleri muz dilimlerini infrared kurutucuda 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklık değerlerinde kurutarak muz dilimlerinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Araştırmacılar sonuçta, artan kurutma havası sıcaklığı ile hem kuruma hızının hem de difüzyon katsayısının arttığını, muz dilim kalınlığının artmasıyla da kuruma hızının azaldığını tespit etmişlerdir [71].

Yaldız (2001), çalışmasında havuç ve pırasanın kuruma karakteristiklerinin belirlenmesini ve kuruma süresinin belirli bir anında ürünün nem içeriğinin

saptanması için mevcut kuruma modellerinin uygulanabilirliğini amaçlamıştır. Bu ürünler 30, 40, 50, 60 ve 70 °C kurutma havası sıcaklıklarında ve 0,5, 1,0 ve 1,5 m/s kurutma havası hızlarında kurutularak kurutma süreleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler Newton, Page, Geliştirilmiş Page, Henderson ve Pabis, Logaritmik, iki terimli, iki terimli eksponansiyal, Wang ve Singh, Thompson, Difüzyon Yaklaşım, Verma ve ark., Geliştirilmiş Henderson ve Pabis matematiksel modellerine uygulayarak en uygun modeli belirlemiştir [72].

Siklon tipi kurutucu ile kurutma

Akpınar ve Biçer (2003), kabağın kuruma davranışını siklon tipi bir kurutucuda deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde, 60, 70 ve 80 °C 'lik üç değişik hava giriş sıcaklıkları kullanılırken, seçilen kurutma havası hızları 1 ve 1,5 m/s'dir. Araştırmacılar deneysel sonuçlardan elde edilen kuruma hızı-nem içeriği değişimi eğrilerini lineer olmayan regresyon analiz kullanılarak matematiksel olarak modellemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, siklon tipi kurutucuda dönel akış ortamında kurutulan kabak örneklerinin kuruma hızının yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek kuruma hızı 80 °C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1,5 m/s kurutma havası hızında, en düşük kuruma hızı ise 60 °C kurutma havası giriş sıcaklığında ve 1,0 m/s kurutma havası hızında elde edilmiştir. Farklı giriş sıcaklıklarında ve hızlarında kurutulan örneklerde kuruma hızında, hava hızından ziyade hava sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca araştırmacılar, kurutma havası sıcaklığı ve hızı arttıkça, kabak örneklerinin nem içeriğinde belirgin bir şekilde hızlı bir azalmanın görüldüğünü ve kuruma hızının arttığını ifade etmişlerdir [73].

Dondurarak kurutma

Yapılan literatür araştırmasında ülkemizde dondurarak kurutma cihazının tasarımı ve imalatı ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ülkemizde gerçekleştirilen ve genellikle kurutma işlemi ile ilgili az sayıdaki çalışmada ise yurt dışından getirilen cihazlar kullanılmıştır. Dondurarak kurutma çalışmalarında genellikle kurutma hücresindeki basınç ve sıcaklığın kurutmaya olan etkisinin incelendiği görülmüştür.

Mellor (1978), dondurarak kurutma süresindeki basıncın ısı ve kütle transferine olan etkisini incelemiştir. Alçak basıncın kütle transferinin itici gücü arttırdığını ancak ısı transfer katsayılarının basınçla olan ilişkilerinden dolayı kurumuş yüzeydeki ısı akışını azalttığını kaydetmiştir. Araştırmacı, bu problemi aşmaya çalışan döngüsel basınçlı dondurarak kurutma işlemini geliştirmiştir. Bu süreçte, ısı akışını artırmak için kısa süreliğine basıncı arttırmış ve daha sonra buhar akışını artırmak için kısa süreliğine azaltmıştır [74].

Litchfield ve ark. (1981), şişenin tabanı ile ısıtılmış yüzey arasındaki ısı transferine karşı direnç içeren bir sayısal simülasyon kullanarak, tipik bir şişe içerisinde donmuş ürünün, dondurarak kurutma işlemini incelemişlerdir. Bu çalışmada, Litchfield en iyi döngüsel basınç politikalarının dahi Liapis ve Litchfield'in (1979) yaptıkları çalışmayla belirledikleri optimal sabit basınç politikası kadar iyi olmadığını bulmuştur [75, 76].

Nail (1980), kurutma hücresindeki basıncın kurutmaya olan etkisini incelemiştir. Çalışmasında, Nail, sıvı solüsyon halindeki ilacı dondurarak kurutmuştur. Cam şişeler içinde bulunan donmuş ilacı kurutma hücresi içinde bulunan ısıtıcı raf üzerindeki bir metal tepsiye yerleştirmiştir. Nail, bazı durumlarda kütle transferi hızını sınırlayan bir faktör olabileceğini belirlemiş ve ısı kaynağından süblimleşme yüzeyine olan ısı transferine karşı bir direnç olduğunu belirtmiştir. Isı transferine karşı olan bu direncin tepsi ile şişe ve tepsi ile ısıtıcı raf arasındaki hava boşluğundan olduğunu ve düşük basınç ortamında daha belirgin olduğunu bulmuştur. Bu durumu, serbest moleküllerin ısı akışının meydana geldiği basınç aralığında, gazın ısı

iletkenliğinin düşmesi ile açıklamıştır. Kurutma oranlarını 1,3, 0,25 ve 0,04 Torr basınçlarda ölçerek incelemiştir. Sonuçlar, kurutma oranının azalan basınçla birlikte azaldığını göstererek Nail'in teorisini doğrulamıştır [77].

Wolf ve Gibert (1989), cam şişe içindeki sütü dondurarak kurutulması işlemini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada dondurarak kurutma işlemini kısıtlayan faktörleri belirlemişlerdir. Kendi modellerini, ölçüm verilerine uygulayarak, modellerinde üç transfer parametresini belirlemişlerdir. Bunlar, kurutulmuş katmandaki su buharının yayılımı, üründeki kütle transfer katsayısı ve ısıtılmış raftan buza doğru olan ısı transferinin karşılaştığı dirençtir. Cam şişe ve raf arasındaki temas direnci ısı transferine karşı önemli bir engel olduğu için bu direncin tam bir kontrol parametresi olduğu ve bu yüzden kuruma kinetiklerini kontrol ettiğini belirlemişlerdir [78].

Pikal ve ark. (1983), dondurarak kurutma işlemi sürecinde kurutulmuş yüzey katmanının oluşturduğu direnci incelemişlerdir. Çalışmada kurutulmuş yüzey katman direncinin azalan basınçla birlikte azaldığını belirlemişlerdir. Kurutulmuş katmanın direncini doğrudan süblimleşme oranının verilerine göre belirlemişlerdir. Bu yüzden Pikal ve arkadaşları düşük basıncın süblimleşme oranını arttırdığını belirtmişlerdir. Deneyleri özel olarak dizayn edilmiş basit bir kap ve ısıyı iletimle değil, ışıma yoluyla gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, süblimleşme oranlarını deneysel olarak ölçerek model geliştirmişlerdir. Verilerden buhar akışına normalleştirilmiş kuru ürün direncini tahmin yoluyla belirlemişlerdir. Kuru ürün direncini daha sonra kurutma oranlarını sayısal olarak tahmin etmede önemli veri olarak kullandılar [79].

Pikal ve ark. (1984), dondurarak kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Isıtıcı raf üzerine içinde donmuş ürün bulunan birkaç şişe yerleştirilerek kurutma oranlarını ölçmüşler ve ısı akısını tahmin etmişlerdir. Çalışmaya göre kurutma hücreindeki basınç azatlıkça süblimleşme oranı düşmektedir. Ayrıca, farklı kısmen kapatılmış şişe tipleri ile ilişkili direnci analiz edilmiştir. Kütle transfer katsayıları daha önce bahsedilen çalışmada belirlenen kuru ürün dirençleri ile birleşik basit ölçümleri üzerinden belirlenmiştir. Isı transferini

iletim ve radyasyon ile değerlendirmişlerdir. Denklemlerde ölçülmüş sıcaklık farklarına dayalı etkin ısı transferi katsayılarını kullandılar [80].

Zamzow ve Marshall (1952), dondurarak kurutmanın ilk matematiksel modelini geliştirdiler. Yaptıkları model için gerçek olmayan bir sabit durum varsayımı yaparak, radyasyon ve iletim sınır koşulların durumlarını incelemiştir. Gerçek olmayan sabit durum varsayımı, sabit durum koşulları altında ürüne doğru olan ısı iletiminin belli bir zaman dilimi içerisinde hesaplanmasına izin vermektedir. Bu modelin geçerliliği belli bir zaman aralığı boyunca ürünlerdeki gerçek sıcaklık profillerinin varsayılan sabit durum koşullarıyla ne kadar örtüştüğüne bağlıdır. Geleneksel dondurarak kurutma işleminin çok yavaş olduğu için ürünlerdeki sıcaklık profili neredeyse hep aynı seviyededir ki buda sabit durum varsayımını doğrulamaktadır [81].

Hill ve Sunderland (1970), sahte sabit durumu modelini kullandılar. Ancak serbest moleküller, devam ve geçiş akış rejimlerinden momentum denklemlerinden değerlendirdiler. Sahte sabit durumu varsayımı nedeniyle akış oranını kurutulmuş katman boyunca sabit olarak düşünmüşlerdir. Modelin teorik tahmin verilerinin ve özelliklerinin mevcut olması nedeniyle, sığır eti için yayınlanan verilerle karşılaştırıldılar. Tahminler ve deneysel veriler arasındaki küçük farkları deneysel hatalar olarak kabul ettiler [82].

Liapis (1980), kurutulmuş bölgede hem buzun süblimleşmesini hem de suyun desorpsiyonunu içeren bir model geliştirdi. Daha önce açıklanmış modellerden farklı olarak bu modelde hem süblimleşme hem de desorpsiyonun aynı anda oluşmasına olanak tanıyan geçici bir analiz kullanıldı. Bu model, sorpsiyon-süblimleşme modeli olarak adlandırılır [83].

Liapis ve Bruttini'nin (1994) geçici süblimleşme modeli nem atımının ilk % 60-90'lık kısmını tahmin eden hassas bir modeldir. Ancak, ikincil kurutmayı tahmin etmediği sonucuna varmışlardır [84].

Dyer ve Sunderland (1968), sorpsiyon-süblimleşme modelinde kurutulmuş bölgedeki buhar akışı ve kurutulmakta olan materyal arasındaki nem transferini dikkate almışlardır. Kurutma sürecinin bu yönü önceki dondurarak kurutma modellerinde göz ardı edilmiştir ve bu nedenle tahmin edilen verilerde hatalara neden olmuştur [85].

Copson (1958), klasik dondurarak gıda kurutmanın modellenmesinde kullanılmış olan yaygın gerçek olmayan sabit durum varsayımı ile mikrodalga dondurarak kurutma işlemini modellemiştir [86]. Ancak Ma ve Peltre (1973) yaptıkları çalışmayla, bu varsayımın daha hızlı mikrodalga dondurarak kurutma durumu için geçerli olmadığına karar vermişlerdir. Copson çalışmasında kurutulmuş katmanda hidrodinamik akış olduğunu varsaymışlardır. Buhar akısının hesaplamaları, hareketli süblimleşme arayüzü ve kurutulmuş katmanın dış yüzeyi arasındaki basınç farklılığına dayalıydı. Tahmin edilen veriler ve deneysel veriler arasındaki önemli farklar oluşmuştur. Bu oluşan farklar sahte sabit durum varsayımının ve bilinmeyen taşıma özelliklerinin olduğunu ortaya koymuştur [87].

Ma ve Peltre (1973), mikrodalga ısıtma ile geçici bir boyutlu dondurarak kurutma analizi sunmuşlardır. Mikrodalga ısıtmalı dondurarak kurutmanın ilk geçici analizi idi. Geçici kütle ve enerji denklemlerini kurutulmuş ve dondurulmuş bölgeler için yazmışlardır. Isının dondurulmuş bölgede iletim, kurutulmuş bölgede ise iletim ve taşınımıyla incelemişlerdir [87].

Ma ve Peltre (1975), mikrodalga ile dondurarak kurutma işlemini detaylı bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarını modellemiştir. Ayrıca modeli doğrulamak ve optimizasyondaki faydalılığını göstermek için deneysel sonuçları kullanmışlardır. Tahmin edilen veriler ve deneysel veriler birbirlerini desteklemiştir. Ancak işlemin etkin simülasyonu için daha kapsamlı özellik verilerinin gerekli olduğu belirtmişlerdir [88, 89].

MacKenzie (1985) ve Franks (1989), ilaçları sıvı solüsyonların dondurarak kurutması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaların amacı, dondurarak

kurutma ile ilgili bilgileri geliştirmek ve bu bilgilerin kullanılmasıyla en verimli kurutma işlemine bulmaktır. İşlemi en uygun duruma getirme çabalarında çoğunlukla ilk kurutma safhasındaki süreç farklılıklarına odaklanmışlardır. Bunlar; raf sıcaklığı, kurutma hücresi basıncı, cam şişe seçimi ve süreç gözlemidir [90, 91].

Jennings (1986), buzun süblimleşme oranlarını ölçmüştür. Ölçüm sonuçları, Nikal ve Pikal'in yaptığı çalışmaların elde etikleri sonuçlara tersine basınç düştükçe süblimleşme oranının arttığını bulmuştur [92].

Livesery ve Rowe (1987), kurutma hücresindeki basıncın kurutmaya olan etkisini incelemişlerdir. Başlangıçta kurutulmuş katmanın kalınlığı küçükken ısı transferi ve süblimleşme oranını arttırdığını ve kurutulmuş katmanın kalınlığı artıkça ısı transferinin ve süblimleşme oranının azaldığını belirlemişlerdir [93].

Litvin ve ark. (1998), havuç dilimlerini, dondurarak kurutmaya, kısa süreli mikrodalga uygulaması ve havalı ya da vakumlu kurutma ile birleştirilerek kurutmuşlardır. Havuçları deneylerde, 7 ila 10 mm kalınlığında dilimlenmişler, 1 dakika süreyle buharla haşlanmışlar, akan su altında soğutulmuşlar, -18 °C'de dondurulmuş ve daha sonraki işlemlere kadar -18 °C'de depolanmıştır. Kısmen dondurarak kurutulmuş numuneler 50 saniye mikrodalgayla ısıtma uygulanmış ve sonra %5'lik nem değerine kadar vakumla ve hava ile kurutulmuştur. Kısmen dondurulmuş, mikrodalga uygulanarak ve havayla kurutulmuş ürünün rengi, boyutları ve nem geri alma oranı, ulaşılan son nem değerine ve aynı kalite parametrelerine sahip dondurarak kurutulmuş ürünle aynıdır. Vakum fırınında yapılan son kurutmanın renk üzerine yararlı bazı etkileri olduğu belirlenmiş. Dondurarak kurutmanın, mikrodalga uygulanmasını takiben havayla kurutma işlemiyle birleştirilmesi, dondurarak kurutma zamanında önemli bir kazanç sağlanmıştir. 3,5 – 3,75 saatlik kısmi dondurarak kurutmayı takiben kısa bir mikrodalga uygulaması ve 3,75 saatlik havayla kurutma olmak üzere toplam 7,25 – 7,50 saat sürerken sadece dondurarak kurutmada toplam süresi 30 °C'de 9,5 saat sürmektedir [94].

Khalloufi ve ark. (2000), çilek, yaban mersini ve mantarı deneysel olarak dondurarak kurutulmuşlardır. Çalışmada, ürünler 72 saat dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulmuş ve bağıl nem oranı % 11'den % 87'ye kadar doymuş tuz çözeltileri ile yükseltilmiştir. Kurutma işlemi sırasındaki meyvelerin ağırlık değişimleri ve su aktivitesi incelemiş ve deneysel veriler için GAB modelinin daha iyi olduğu belirtilmiştir [95].

Shishegarha ve ark. (2002), 5 mm, 10 mm dilimlenmiş ve tüm haldeki çileklerin dondurarak kurutma işlemindeki kurutma kinetikleri, renk ve hacim değişiklikleri, farklı raf sıcaklıklarda (30, 40, 50, 60 ve 70 °C) deneysel olarak incelenmişlerdir. Dondurarak kurutma işlemi sonucunda çileklerin kurutma süreleri, 5 mm için 5 saat, 10 mm için 10,7 saat ve tüm halindeki çilekler için ise 50 saate olmuştur. 50 °C'den daha düşük sıcaklıklarda çileklerin iyi kaliteye sahip olduğunu ve 50 °C'den yüksek sıcaklıklarda ise çileklerin yapısında çökme olduğunu bulmuşlardır [96].

Araki ve ark. (2001), dondurarak kurutma işleminde 15 mm kalınlığında dilimlenmiş ve ezilmiş elmaları -10 ile 70 °C'lik ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve 20 ila 30 Pa basınç aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Ezilmiş elmanın kuruma oranı dilimlenmiş elmaya göre 2,5 daha yüksek gerçekleştiğini belirlemişlerdir [97].

Carapelle ve ark. (2001), donmuş ıslak kağıtların dondurularak kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çeşitli fiziki parametrelerde (basınç, ısıtıcı gücü v.b.) incelenerek çalışma için gerekli olan dondurarak kurutma sistemini kurmuşlardır. Çalışmada dondurarak kurutmanın süre ve maliyetini azaltmak için optimal parametreler belirlemiş ve bu alanda yapılan araştırmalara yardımcı olmak için basit bir örnek geliştirmişlerdir [98].

Sadıkoglu ve Özdemir (2001), dondurarak kurutma işleminin prensibini, kurutmada dondurma işleminin önemi üzerinde durarak dondurarak kurutmada dikkat edilecek önemli noktaları, klasik dondurarak kurutma yöntemine göre kurutma hızını arttıran bir metot olan mikrodalga ile kurutmanın daha hızlı olduğunu belirtmişlerdir [99].

Krokida ve ark. (2001), elma, muz, havuç ve patatesi 5 farklı yöntemle kurutmuş ve kurutmanın renk üzerine etkisini incelemişlerdir. Taze elma, muz, havuç ve patatesler, 20 mm çapında ve 10 mm kalınlığında kesilmiştir. Hava ile kurutmada, kurutma sıcaklığı $70 \pm 0,2$ °C ve havan nispi nemi % 7 ve basınç $1 \pm 0,03$ bar'dır. Vakumlu kurutmada, sıcaklık $70 \pm 0,2$ °C ve basınç $33 \pm 0,03$ mbar'dır. Mikrodalga ile kurutma atmosfer basıncında, 810 W gücünde yapılmıştır. Dondurarak kurutmada, numuneler 20 mm çapında ve 8 mm kalınlığında kesilmiştir. Numuneler 48 saat - 35 °C'de dondurulmuş ve laboratuvar tipi dondurarak kurutma hücresinde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Havayla, mikrodalgayla ve vakumla kurutulmuş ürünler önemli derecede esmerleşme oluşmuştur. Dondurarak kurutmada ise numunelerin renginde esmerleşme olmamıştır [100].

Marques ve Freire (2005), ananas, guava ve mango'nun dondurarak kurutma olayındaki kurutma kinetiğini "Chen ve Douglas", "Van Meel" ve "Page" modelleri ile modellemişlerdir. Deneysel sonuçlar için en iyi açıklayan modelin Page model olduğunu bulmuşlardır [101].

Sadıkoğlu ve Liapis (1997), birincil kurutma sırasında bağlı suyun çıkarılmasını tanımlamak için kullanılabilecek mekanizmanın işlevsel formunu belirlemek üzere parametre tahmini ve model ayrımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Birinci kurutma safhasının deneysel verileriyle teorik modelleri karşılaştırmışlar ve bağlı suyun çıkarılmasının birinci kurutma safhası sırasında toplam kütle akışını önemli ölçüde etkilemediğini göstermişlerdir [102].

Sadıkoğlu ve Liapis (1998), yaptıkları deneysel çalışmada yağsız sütün erime sıcaklığında 2 °C'lik bir artışın birinci kurutma safhasındaki kurutma süresini % 8,28 oranında azaltabileceğini göstermişlerdir [103].

Duran ve ark. (2002), taze, donmuş ve liyoilizsyon işlemine tabi tutulmuş tavuk ve sığır etlerinin su ve yağ oranları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucu tavuk ve sığır etlerindeki su ve yağ oranları liyoilizasyon uygulamasında daha düşük olduğunu bulmuşlardır [104].

Kwok ve ark. (2004), saskatoon berry meyvesini dondurarak kurutma (DK), vakumlu mikrodalga kurutma (VMK), hava ile kurutma (AK) ve AK ve VMK'nin kombinasyonu olan CD yöntemiyle kurutmuşlardır. Diğer kurutma yöntemleri, tazeyken dondurulmuş meyveler ile karşılaştırıldığında, diğer yöntemlerde toplam fenol ve antosiyanin içeriği önemli derecede azalmıştır, ayrıca antioksidant aktivitesi de azalmıştır. DK ile kurutulanlar en yüksek antosiyanin ve antioksidant aktivite seviyelerini göstermiştir, bunu VMK takip etmiştir. CD kurutma VMK ile AK'nin ortalaması şeklinde sonuç vermiştir [105].

Sham ve ark. (2001), kalsiyum ön işleminin, vakum düzeyinin ve elma cinsinin; hava ile ve vakumlu mikrodalga ile kurutulmuş elma krakerlerinin yapısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yerel marketlerden satın alınan Golden Delicious, Red Delicious ve Fuji cinsi elmalar örnek miktarı 1 kg olacak şekilde tartılmış, yıkanmış, 4 mm kalınlığında dilimlenmiş, 2 dakika buharda haşlanmıştır. Elma dilimleri nem içeriği kuru baza göre % 5 olana kadar 70 °C'de, yaklaşık 3,5 saat, hava akış hızı 1,1 m³/dk olan hava ile bantlı kurutucuda kurutulmuştur. Dondurarak kurutma, 100 µmHg vakum altında, oda sıcaklığı 20 °C'de, kondenser sıcaklığı -55 °C'de 10,5 saat kurutulmuştur. Vakumlu mikrodalga ile kurutmada yüksek vakum uygulaması yoğunluğu düşürmüş ve gevrekliği arttırmıştır. Ayrıca Fuji cinsi elmaların, Red ve Golden Delicious cinsi elmalara göre daha yüksek kalsiyum içeriğine ve gevrekliğe sahip olduğu belirtilmiştir [106].

Rahman ve ark. (2002), havayla, vakumla ve dondurarak kurutulan ton balığının gözenek karakteristiklerini incelemişlerdir. Hava ile kurutma 70 °C'de, 1 m/s hava hızında ve % 3,4 bağıl nemde, vakumla kurutma ise vakum fırınında 70 °C'de ve 2 kPa'dan küçük basınçlarda yapılmıştır. Dondurarak kurutmada balıklar en az 24 saat -40 °C'de dondurulmuştur. Kondenser yüzey sıcaklığı -65 °C, odanın levha sıcaklığı -20 °C ve vakum 108 Pa'dır. Taze ton balığının et kısmının hacim ağırlığı 1098 kg/m³, havayla, vakumla ve dondurarak kurutulmuş ton balığının hacim ağırlıkları ise sırasıyla 960, 709 ve 317 kg/m³ ölçülmüştür. Dondurarak kurutulmuş örneğin gözenekliliği hava ve vakumla kurutulmuş örneklerle göre daha yüksek bulunmuştur [107].

Tsami ve ark. (1999), pektin–şeker jellerini dondurarak, mikrodalga ile, vakumla ve sıcak hava ile kurutmuşlardır. Vakumla kurutma, bir vakum fırınında, 25 mbar ve 70 °C’de, 16 saat sürmüştür. Mikrodalga kurutma, atmosfer basıncında, 595 W gücünde, 30 dakika boyunca 10–15 saniye aralıklarla yapılmıştır. Hava ile kurutmada ise 1,5 dakikalık 595 W gücündeki mikrodalga ön işleminden sonra, örnekler 36 saat, 70 °C’de konveksiyonel kurutucuda kurutulmuşlardır. Dondurarak kurutmada, örnekler ön işlem olarak –195,8 °C’deki sıvı nitrojene 2 saat batırılmıştır. Daha sonra 0,04 mbar vakum altında, -30 °C kondenser sıcaklığında, 72 saat laboratuvar tipi dondurarak kurutucuda kurutulmuştur. Dondurarak kurutulmuş örnekler ve vakumla kurutulmuş örnekler daha düşük hacim ağırlığına ve daha yüksek gözenekliliğe sahiptir. Vakumla kurutulmuş ürünlerin parlaklığı daha iyidir. Nemi geri alma kapasitesindeki farklılıklar ise kurutulmuş ürünün hacim ağırlığı ve gözenek büyüklüklerindeki farklılıkla açıklanabilir. Dondurarak kurutmada gözenek büyüklüğü küçük fakat gözeneklilik fazladır. Bu da diğer kurutma yöntemlerine göre daha çok su tutmasını sağlamaktadır. Vakumla kurutulmuş ürünler yüksek gözenekliliğe sahipse de dondurarak kurutulmuş ürünlere göre daha az suyu bünyesine almaktadır. Bunun nedenini dondurarak kurutulanlara göre daha az, ancak daha büyük boyutta gözeneklere sahip olması şeklinde açıklamışlardır [108].

3. GIDALARIN MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

Gıdaların muhafazasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları soğutma ve kurutma uygulamalarıdır.

3.1. Soğutma Teknikleri

Soğutma, bir maddenin veya bir ortamın sıcaklığını onu çevreleyen hacim sıcaklığının altına indirmek ve o sıcaklıkta muhafaza etmek üzere ısının alınması işlemidir [109-111] . Soğuk muhafaza işlemi ile gıdalar 5 ile 50 kat arasında daha uzun dayanma süresi elde edilebilmektedir. Gıdaların dondurulması işlemi gıdanın içerdiği suyun buz kristali oluşturabileceği sıcaklığa düşürülmesi temeline dayanan bir koruma tekniği olarak tanımlanmaktadır. Dondurulmuş gıdalarda mikrobiyolojik gelişme durdurulmaktadır.

Gıdanın sıcaklığı $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklığa indirilerek ürünün oda sıcaklığında uğrayabileceği olası zararlar bu yolla önlenmekte veya asgari düzeye indirilmektedir. Bu sıcaklık seviyeleri mikrobiyolojik bozulmayı engellemekte ve ürünün dayanma süresini uzatmaktadır. Genel olarak dondurma işlemi dört aşamadan oluşur:

1. Ön soğutma olarak adlandırılan ürünü başlangıç sıcaklığından donma noktasına kadar yapılan soğutma,
2. Üründeki ilk buz kristallerinin oluşmaya başlaması ve donma sıcaklığının üründeki suyun önemli bir bölümünün donmasına kadar sabit kalması,
3. Ürün sıcaklığının düşmesi sonucu geri kala suyun donması,
4. Son aşamada serbest suyun tamamen donmasından sonra faz değişimi meydana gelmeden ürün sıcaklığının düşmesidir.

Dondurma işleminin temel amacı gıdaların doğal yapısının mümkün olduğu oranda korunmasıdır. Gıdaların içerdiği su oranıyla bağlantılı olarak sıcaklığın düşürülmesi ile gıdanın yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir.

Ürünün donma sıcaklığı ve donma sıcaklığının 5 °C den az olan sıcaklık arasındaki donma işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirildiğinde, üründe oluşan kristal yapı küçük olmaktadır. Eğer bu süreçte donma işlemi yavaş gerçekleştirilirse, üründe oluşan kristalin boyutu büyümektedir. Bu durum özellikle meyve ve sebzelerin hücre duvarını bozmakta ve ürün tekrar çözülduğünde yapısında değişiklik meydana geldiği için ürün taze halindeki kalitesini koruyamamaktadır.

Aynı zamanda uzun süren donma işlemi sırasında meyve ve sebzenin hücreleri içinde bulunan su, konsantrasyona da bağlı olarak, hücre dışına yayılma ve bu durum hücrenin dehidrasyonuna yol açmaktadır. Bu yüzden hızlı bir şekilde gerçekleştirilen donma işlemi ürün yüzeyinin pürüzsüz kalmasını sağlamakta ve hücre yapısını bozmamaktadır [112]. Aşağıda maddeler halinde gıda endüstrisinde kullanılan dondurma metodları verilmiştir.

3.1.1. Soğuk hava ile dondurma

Soğuk hava ile dondurma, durgun (tabii konveksiyon) havada dondurma ve hızlandırılmış havada (cebri konveksiyon) dondurma olarak başlıca iki farklı uygulaması vardır [113, 114].

Durgun havada dondurma

Metodun isminden de anlaşıldığı gibi, dondurma işleminde kullanılan soğuk hava hareketsizdir. Böyle bir dondurucunun esası, tam olarak izole edilmiş bir soğuk odadır. Soğutma ekipmanının buharlaştırıcısı tavanda, duvarda veya odanın ortasında yukarıdan aşağı doğru uzanan boru demeti şeklinde bulunabildiği gibi, dikine raflar şeklinde de olabilir. Dondurulacak ürünler bu raflar arasına istif edilir [114].

Bu tip dondurucular kullanılan ekipman açısından basit ve ucuzdur. Durgun havalı dondurma odalarında hava hareketini sağlayan bir düzenek yoktur. Hava sadece doğal konveksiyonla hareketlidir. Ancak bunu bir hava hareketi olarak görmek olanaksız olduğundan havanın durgun olduğu kabul edilmektedir. Hatta bazı durgun havalı dondurucularda bir fan yardımıyla, sınırlı bir hava hareketi sağlanmaktadır. Ancak bu düşük hava hızı nedeniyle böyle bir düzenlemeyi “hava akımında dondurma” yöntemiyle karıştırmamak gerekir. Çünkü hava akımında dondurmada hava, cebri bir sirkülasyonla yüksek bir hızla dolaştırılarak yüksek bir donma hızı sağlanabilmektedir.

Durgun havada dondurma yönteminde soğuk odanın sıcaklık derecesi -15°C ile -30°C arasındadır. Hareketsiz veya çok yavaş hareketli havanın ısı iletkenliği çok düşük olduğundan, gıda maddesinin donması uzun süre alır. Donma süresi, dondurulan materyalin büyüklüğüne, ambalaj şekline, dondurulan birimler arasındaki boşluğa ve bunlar gibi değişik faktörlere bağlı olarak birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişebilir. Bu metot esas olarak balık dondurma amacıyla uygulanmış olup halen aynı amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır [114].

Hızlandırmış havayla dondurma

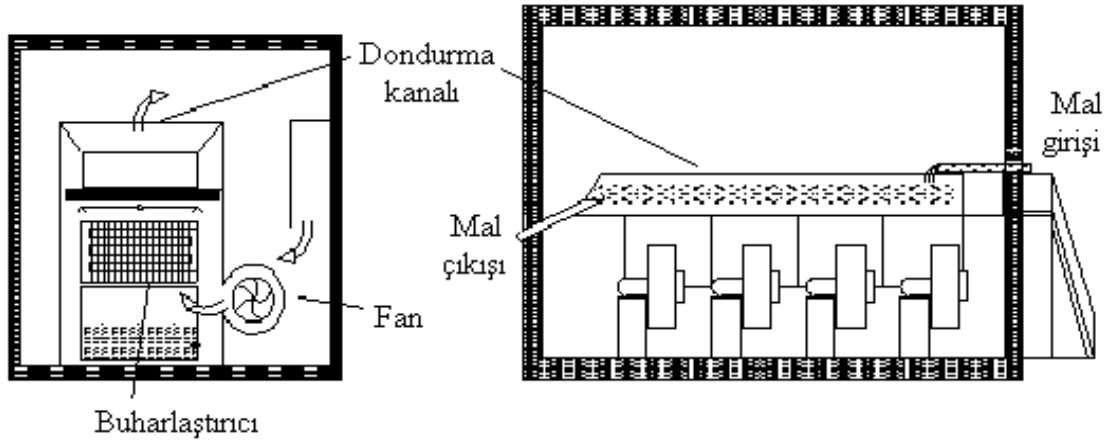
Bu tip dondurucuların genel ilkesi havanın, dondurulan gıda maddesi ile buharlaştırıcı arasında hızlı hareket etmesidir. Güçlü fanlar yardımıyla hareket ettirilen hava, soğutma spiralleri (buharlaştırıcı) üzerinden geçerken soğur ve sonra dondurulan ürün üzerinden 10 - 15 m/s hızla geçer. Isı transfer katsayısı hava hızına bağlı olarak arttığından, gıda maddesinin hızla dondurulması sağlanır. Hava dolaşımli dondurmada hava sıcaklığı -30°C , -45°C arasında değişmektedir. Hava akımı ile gıda dondurma işlemi tünelli veya bantlı olarak tasarlanabilmektedir. Buna göre tünel dondurucular bantlı veya vagonlu olabilmektedir. Bant veya vagonların tüneldeki hızı, donma süresine göre ayarlanır. Diğer taraftan dondurulan ürün ile soğuk havanın tünel içindeki hareketleri paralel akımlı veya zıt akımlı olabilir. Zıt akımlı tünellerde, dondurulacak ürün tünelin bir tarafından, soğuk hava ise diğer taraftan verilir. Buna göre en soğuk hava, tünel çıkışında, donmuş ve sıcaklık derecesi çok

düşmüş ürünle karşılaşır. Sonra tünel girişine doğru yoluna devam eder. Bu sistemde ürünü soğutan havanın nem miktarı artar. Bu durumda da tekrar buharlaştırıcıya geldiğinde, buharlaştırıcı yüzeyinde karlanma meydana gelir.

Özellikle uzun tünellerde fazlaca beliren bu sakınca nedeniyle, tünellerde hava hareketi ürün hareketine çapraz olarak düzenlenir. Yani hava tünelin yanlarından verilir. Bu uygulamada soğuk havanın tüneldeki dağılımı homojendir. Soğuk hava çoğunlukla bantın altından yukarı doğru üflenir. Bu üfleme ile bant üzerindeki madde, hava hızı ve parçacık iriliğine bağlı olarak hafif bir titreşim kazandığından donma hızını artırır.

Ancak bu sınırlı titreşim, dondurulan parçacıkların birbirine yapışmasına ve böylece bir kitle haline dönüşmesine donmalarını sağlamaktan uzak bulunmaktadır. Halbuki günümüzde, birçok ürünün bir blok haline gelmeden tek tek parçalar halinde dondurulması istenmektedir. Bu nedenle bantlı donduruculardan, bantın altından verilen çok yüksek hızlı havanın, bant üzerindeki parçacıkları adeta havada yüzer halde tutmasına dayanan akışkan yatak dondurucu denen yeni bir sistem geliştirilmiştir.

Akışkan yatak dondurucularda, hava içinde yükselen ve geri düşen adeta kaynamaya benzer bir hareket yapan parçacıkların her biri, tüm yüzeylerinden soğuk hava ile tam olarak temas sağlayarak süratle donar. Akışkan yatak dondurucular gerçekte bir bant dondurucudurlar. Bununla birlikte çok değişik akışkan yatak dondurucular vardır. Şekil 3.1’de bir akışkan yatak dondurucu görülmektedir [113].



Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu

3.1.2. Dolaylı temas metoduyla dondurma

Bu metodun çalışma prensibi, içten soğutulan iki plaka arasına yerleştirilmiş ambalajlı ürünlerin, plaka ile teması sonucu dondurulmasıdır. Dondurulan ürün ile soğutmayı gerçekleştiren soğutucu akışkan arasında plaka bulunduğundan bu yönetime dolaylı temas metoduyla dondurma denir. Evlerde buzdolaplarının buzluk bölümünde bazı gıdaların dondurulması, tek taraftan etki eden bir plakalı dondurma yöntemi olarak görülebilir.

Gıdaların dolaylı temas metoduyla dondurulmasında tek koşul, dondurulacak ürünün dikdörtgen prizması şeklinde bir ambalajda bulunmasıdır. Ambalajlı ve yüzey teması sağlanmayan bir kitlenin bu sistemde dondurulma hızı düşer. Çünkü ambalajın düzgün bir yüzeyle, plakaya tam olarak değmesi, donma süresi açısından çok önemlidir. Buna göre düzgün şekilli ve aynı kalınlıktaki ambalajlar plaka üzerine yan yana yerleştirilip, diğer plaka da üstten oturunca, iki yönden hızlı bir dondurma sağlanabilmektedir. Plakalar dört köşe, içi boş alüminyum raflardan ibaret olup, içinde soğutma kanalları yani soğutucu akışkan buharlaştırıcı üniteler bulunur.

En yaygın plakalı dondurucular, “birdseye çoklu plakalı” (Birdseye multiplate) dondurucu tipinde olanlardır. Bunlarda, iyi izole edilmiş bir kabin içinde, raf şeklinde birçok plaka üst üste yer almaktadır. Her plakanın bir ucu kauçuk bir boru

ile soğutucu akışkan ana besleme hattına, diğer ucu ise yine kauçuk bir boru ile soğutucu akışkan ana dönüş hattına bağlanmıştır.

Böylece kauçuk boru bağlantılar ile plakaların aşağı yukarı hareketi gerçekleşmektedir. Nitekim hidrolik bir düzenle en alttaki iki plaka arası açılır. Paketlenmiş gıda maddesi buraya tek sıra olarak dizilir. Sonra yukarı doğru diğer plakaların araları aynı şekilde dondurulur. Nihayet raf dizisi hidrolik bir düzenle az bir basınçla (0,05 – 0,1 bar) yavaş bir şekilde sıkıştırılır.

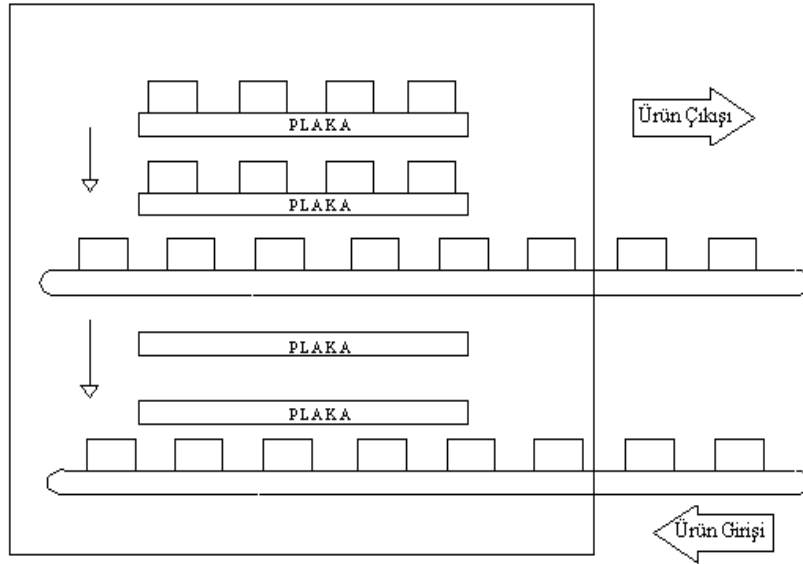
Plaka dondurucularının etkinliği plaka ile gıda arasındaki temas derecesine bağlı olduğundan, bu sıkıştırmanın büyük önemi vardır. Yine aynı nedenle, ambalajların, içinde boşluk kalmaması için ambalajlar biraz daha fazla doldurulur ve sıkıştırma sonucu içeriği iyice yerleşip ısı iletimi hızlanır [114].

Et ve balık gibi ambalaj içinde bütün bir kitle oluşturan ürünlerin aralarında boşluk kalan parçacık halindeki sebze ve meyvelerden daha çabuk donmasının nedeni de budur. Ancak plakaların sıkıştırılmasında ambalajın patlamaması gerekir. Bunu sağlamak için plakalar arasına iki taraflı boydan boya ağaç engeller konur. Bunların kalınlığı ambalaj kalınlığından biraz az olduğundan sıkıştırma ancak ağaç parçaların kalınlığına kadar gerçekleşir [115]. Ağaç parçacıkları sıkıştırması sınırlıdır.

Plakalar dondurulduktan sonra kabin kapılar kapatılır ve soğutucu istenen derecede çalıştırılır. Ürün, sıcaklığı -18 °C' ye erişene kadar burada bırakılır. Donma süresi, başta ambalajla plakanın temas derecesine bağlı olmak üzere, ambalaj materyalinin cins ve kalınlığına, dondurulan ürünün çeşidine sıcaklık derecesine ve tüm ambalajlı gıdanın kalınlığına göre değişir. Bu yöntemle göre 5 cm kalınlıktaki ambalajlı kitleler 90 - 120 dakikada donmaktadır.

Kontinü çalışan plakalı dondurucular da vardır. Bu düzenlerin birinde, bir seri çift “raf-plaka” bulunur. Raf çiftinin, dondurucunun önünde yanı açığta bulunduğu sırada, bantla taşınan ambalajlı ürünler otomatik olarak buraya doldurulur. Bu istiflenmiş raf dondurucuya girip yukarı doğru hareket ederken, biraz önce boşa rafa,

yeni bir yerleştirme başlar. Her raf (veya buna istasyon da denebilir) dondurucuda bir devir yapıp donma tamamlanır ve donması tamamlanmış her istasyon sıra ile boşalır. Şekil 3.2’de kontinü plakalı dondurucu verilmiştir.



Şekil 3.2. Kontinü plakalı dondurucuda dondurulacak ürün girişi ve donmuş ürün çıkışı

Kontinü çalışan başka bir plakalı dondurma sisteminde ise dondurma, biri sabit diğeri hareketli iki plaka arasında bulunan ambalajların, sabit plaka üzerinde hareketli plaka yardımıyla kaydırılmasıyla tamamlanır.

Dolaylı temas metodu sadece düzgün yüzeyli, ambalajlanmış ürünlere uygun olmakla birlikte, sıvı halindeki gıdaların süratle dondurulmasında da yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak bu amaçla kullanılan cihazların ilkesi farklıdır. Bu amaçla kullanılan plakalar silindir şeklinde olup, dış kısmı yalıtılmıştır. Tubular kazıyıcılı soğutucu denen bu cihazların eksen konumundaki mil (Mutator) ile soğutma silindirinin iç yüzeyi arasında çok az bir boşluk bulunur.

Mil üzerinde, silindir iç yüzeyini adeta kazıyan kazıyıcılar bulunmaktadır. Soğutucuya verilen sıvı veya yarı sıvı haldeki ürün, silindirin iç yüzeyi ile mil arasındaki boşlukta çok ince bir film oluşturur. Bu sırada donma gerçekleşirken milin

dönüşüyle mil üzerindeki kazıyıcılar silindir yüzeyini kazıyarak temizler. Bu suretle donma yüzeyi, ısı iletimini engelleyen buz tabakasından temizlendiği gibi, bu sırada dondurulan ürünün hızla karıştırılması donmayı çabuklaştırmaktadır. Donma sadece birkaç saniye sürer.

Dondurucuya sıvı veya püre halinde verilen ürün burayı terk ederken sıvı-kar karışımı halindedir. Esasen böyle bir sistemde daha ileri düzeyde bir dondurma ne doğrudur ne de olanaklıdır. Aksi halde soğutucu tıkanıp blok halde kalır, işte bu sıvı-kar karışımı halindeki bu kitle ambalajlandıktan sonra ikinci aşama olarak soğuk hava dondurucularında istenen dereceye kadar dondurularak depolanır [114].

3.1.3. Daldırarak dondurma

Ürünlerin su bazlı olmayan soğutucu akışkan içerisine daldırılması ile hızlı dondurma işlemine tabi tutulmasıdır. İlk uygulanan daldırarak dondurma işleminde soğutucu akışkan olarak R-12 ve diğer halokarbonlar kullanılmaktaydı ve bu durum da bu maddelerin atmosfer emisyonlarını arttırmaktaydı. Günümüzde ise bu tip soğutucu akışkanların yerini tamamen sıvı azot almıştır. Sıvı azot sahip olduğu korkunç kaynama özelliği türbülansa neden olur, dolayısıyla ürünlerin ayrılmasını ve çok büyük yüzey ısı transfer katsayısı elde edilmesini sağlar.

Bu yöntemle uygulanan hızlı dondurma ile minimum düzeyde nem kaybı, kokunun iyi şekilde saklanması, aşırı donmanın engellenmesi ve sıvı azot yaklaşık oda sıcaklığında gaz halinde çıkmasıyla sıvı azot tüketimini minimuma indirmesi sağlanır [116].

3.1.4. Kriyojenik sıvılarla dondurma

Ürünlerin direkt olarak sıvı azota daldırılmaları ürünlere zarar verebilmektedir. Sıvı azotun ürünlerin üzerine püskürtülmesi ile ürünlerin zarar görme riski azaltılır. Bundan dolayı 1960'dan sonra taşıyıcı bantlardan geçmekte olan ürünlere sıvı azot püskürtülmesi ilkesi ile çalışan dondurucuların tasarımları yapılmıştır [117].

Gıdaların dondurulmasında en fazla kullanılan kriyojenik sıvıların başında sıvı azot ve sıvı karbondioksit gelmektedir.

Çilek ve bazı üzümsü meyvelerle, dilimlenmiş domates ve mantar gibi bazı hassas gıdalar çok hızlı bir dondurma ile kusursuz ürün elde edilebilmektedir. Kriyojenik dondurma yöntemi de esas olarak bu tip için geliştirilmiş olup uygulaması da halen bu ürünlerle sınırlıdır [114].

Spiral püskürtmeli kriyojenik dondurucular ve püskürtmeli kriyojenik dondurma tüneli dondurucuları bu yöntemle çalışmaktadır. Küçük sıvı azot damlacıkları ürünlerin üzerinde buharlaşırken, ürünü hızla soğutup dondurur. Bu tip dondurucularda kullanılan küçük sıvı azot damlacıkları buharlaşma yüzey ısı transfer katsayısını yüksek düzeyde olmaktadır. Bunun nedeni de sıvı-katı temasının çok iyi gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak kriyojenik dondurma tüneli dondurucularında üç kısım bulunmaktadır. İlk kısımda giren ürünlere buharlaşmayla oluşan azot gazını fanlar yardımıyla tünelde hareketi sağlanarak ön soğutma uygulanır. İkinci kısımda bant üzerindeki ürünlere sıvı azot püskürtülerek donma işlemi gerçekleştirilir. Son kısımda ise ürünün sıcaklığı dengelenerek tünelin sonundan dışarı alınır [118].

3.1.5. Kriyomekanik dondurma

Kriyomekanik dondurma sistemlerinde spiral, akışkan yataklı gibi mekanik donduruculardan önce ürünün kriyojenik daldırmalı dondurucularda ön soğutma yapılır. Üzümsü meyvelerin dondurulmasında akışkan yataklı mekanik dondurucular en uygun gibi görülmektedir. Kriyojenik daldırmalı dondurucu kullanıldığında, sıvı azot yardımıyla ürünün dış kısmında birkaç saniye içerisinde kabuk oluşur.

Kriyojenik dondurucudan çıkan ürününde oluşan kabuk bu dondurucuya kıyasla daha sıcak olan mekanik dondurucunun ortamına dayanacak kalınlıkta olmaktadır. Bu tabaka ürünün mekanik dondurucuda donması esnasında oluşan hareketten dolayı ürünün zarar görmesini engelleyerek, ürünlerin şekillerini korumalarını sağlar [119].

3.2. Gıdaları Kurutma Teknikleri İle Muhafaza Yöntemleri

Gıda maddelerinin muhafazasında bilinen en eski metotlardan birisi de kurutmadır [120]. Kurutma, temel olarak su ve kuru maddeden oluşan bir ürünün içindeki suyun çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılma işlemi olarak tanımlanabilir [33]. Sebze ve meyvelerin kurutulması için uygulanan yöntemler, ısı ve kütle transferini aynı anda uygulayarak, kurutulacak ürünün içerdiği suyun buharlaştırılmak suretiyle ortamdan uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır [121]. Teknik kurutmada, kuruma işlemine dış müdahale yapılarak madde içinde bulunan nem değişik metotlarla alınır. Bu nedenle kurutma, kuruyacak ürün neminin istenilen kuruluk değerlerine getirilmesi olarak tanımlanır. Belli bir süreçte ürünün kuruma değerlerine gelmesini sağlayan ve değişik birimlerden oluşan (ısıtma, nem alma, nem verme vb.) ünitelerin bütününe de “kurutma sistemi” denir. Kurutma işlemi sanayinin bir çok dalında (gıda, kağıt, çimento, kereste ve kimya sanayi gibi endüstri dallarında) yaygın olarak uygulanmaktadır [122].

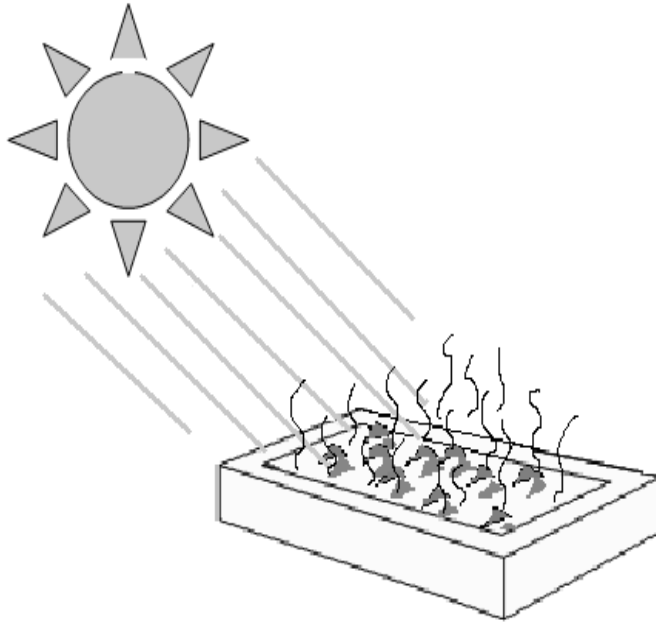
Gıda maddelerine uygulanan kurutmanın bir çok amacı vardır ve bunların belki de en belirgin olanı, uzun süreli depolamalarda ürünün bozulmasını önlemektir. Kurutma işlemi sonunda ürünün bozulmadan uzun süreli depolanabilmesi, ürünün nemini mikrobiyal gelişme veya diğer reaksiyonları sınırlamaya yeterli seviyeye düşürülerek sağlanır. Buna ek olarak ürünün nem miktarının düşürülmesi ile aroma ve besin değeri gibi kalite özelliklerinin muhafazası da sağlanmaktadır. Aynı zamanda kurutma işlemi sonunda ürün hacmi azaltılarak, gıda maddesinin taşınmasında ve depolanmasında verimliliğini artırır [123]. Gıdaların kurutulmasında uygulanan birçok yöntem vardır. Bu yöntemleri iki grupta toplanmaktadır.

Bunlar sırasıyla;

1. Doğal kurutma (güneşle kurutma),
2. Yapay kurutma.

3.2.1. Doğal kurutma

Hiçbir teknik müdahale yapılmadan ürünün güneş altında kurutulmasıdır. Eskiden beri kullanılan yöntemdir. En önemli husus sıcaklıktır. Çünkü ürün içinde bulunan nem, ürün deforme olmadan sıcaklık etkisiyle havaya atılır. Ürün, toprak veya beton zemine branda, naylon ve bez üzerine serilerek kurutulur.



Şekil 3.3. Doğal kurutma

3.2.2. Yapay kurutma

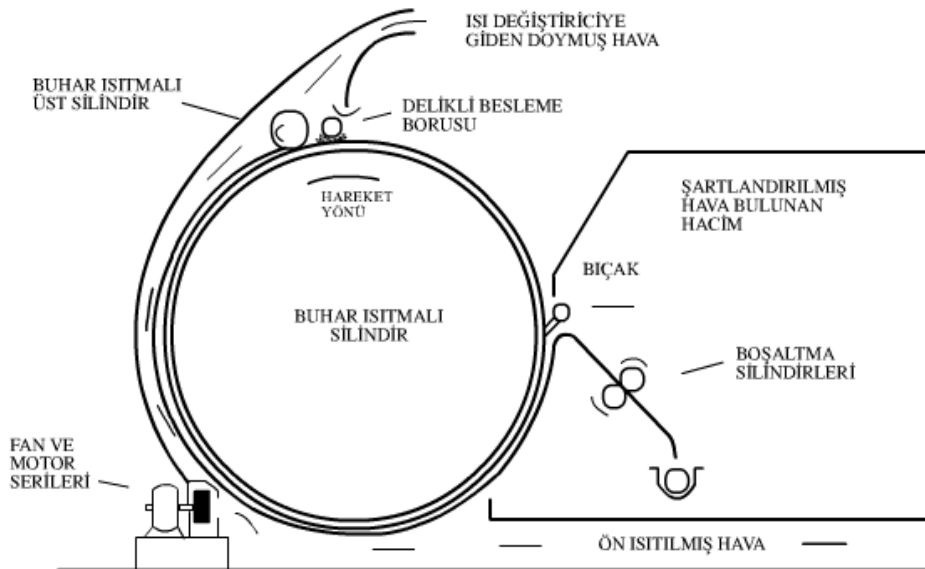
Kurutma süresini kısaltmak, kalitesini yükseltmek, ürünü güneşin radyasyon etkilerinden korumak için yapay kurutma metotları geliştirilmiştir. Doğal kurutmaya göre en büyük üstünlüğü kontrollü bir kurutma ortamı sağlanmasıyla görünüş bakımından doğal kurutmadan daha iyi ürün elde edilmesidir [124]. Aşağıda bazı yapay kurutma teknikleri sıralanmıştır.

Morötesi radyasyon kurutma

Morötesi kurutmada elektromagnetik radyasyon kullanılır. Monomer yapılı kaplamalar ve boyar maddeler UV radyasyon etkisinde kurutularak işlenirler. Morötesi kurutmanın uygulanmasında en büyük sorun yüksek yatırım maliyetidir [125].

İletimle kurutma

Kurutma silindirleri veya topları (Şekil 3.4), düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar ile iletimle kurutmaya örnek verilebilir. Kurutulacak malzeme ısıtma yüzeyi ile temas halinde olmalıdır. Bu sistemlerde nem miktarı aşırı ısınmayı önlemektedir. İletim ile kurutma sistemleri genel olarak kağıt ürünlerinin kurutulmasında kullanılmaktadır. İletim ile kurutmada; yüksek kurutma hızı, sabit ısı ve kütle transferi koşulları sağlanamaz, sistem istenildiği gibi kontrol edilemez, işletilmesi genelde pahalıdır, makine etrafında istenmeyen çalışma koşulları oluşur [126].



Şekil 3.4. İletim kurutma sistemi

Kızılötesi ışınlı kurutma

Kurutma, ısı ışınlı, kızılötesi lambalar, buhar ısıtmalı kaynaklar, gaz ısıtmalı akkor yansıtıcılar ve elektrikle ısıtılmış yüzeyler ile sağlanır. Kızılötesi sadece malzemenin yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelerinde etkilidir. Bu sebeple ince tabakaların kurutulması için uygundur. Kızılötesi ısıtma, kâğıt, tekstil gibi materyalin kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzemenin yanabilir olması durumunda ürün ısı kaynağına yakın tutulmamalıdır [125, 126].

Vakumda kurutma

Bu kurutucularda kurutma vakum altında, düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu yöntemle ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmalarında veya nem miktarının düşük seviyelere düşürülmesi gereken ürünlerde uygulanmaktadır [127].

Karıştırmalı yatakta kurutma

Titreşimli raf veya konveyör kullanılarak malzemenin sürekli ve belli aralıklarla titreştirilmesi sonucu homojen bir kuruma elde edilir. Aynı sonuç delikli raf veya konveyör üzerindeki yatağın bir miktarı akışkanlaştırılması ile de elde edilir. Tahıl kurutulması için uygundur [125].

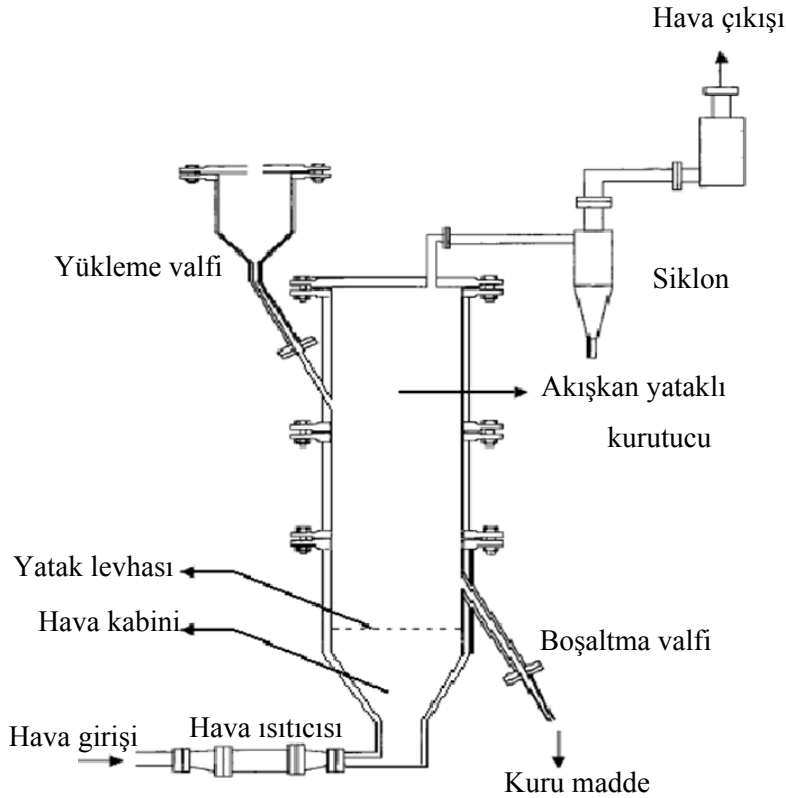
Akışkan yataklı kurutma

Bu tip kurutucuların çalışma prensibi sıcak kurutma havasının kurutulacak olan katı parçacıklara alttan belli bir hızda verilmesine dayanır [38]. Bu hız katı parçacıkların havada asılı kalacağı şekilde seçilmiştir. Isıtılmış havanın görevi hem kurutma hem de akışkanlaşma için gerekli olan yerçekimine karşı etkiyi oluşturmaktır.

Bu tip kurutucular ürünü yığın halinde kurutacak şekilde tasarlanabilirler. Akışkan yataklı kurutucularda sıcaklık 100 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Bazı tiplerde kurutulacak maddenin hareketini sağlamak için vibrasyon üniteleri de mevcuttur.

Akışkanlaştırılmış yatakta tane yapılı maddeler arasından kurutma havası geçirilir. Hava hızı çok dikkatli ayarlanmalıdır. Toz veya taneli yapıdaki kurutucular malzeme ile akışkanlaştırma gazı arasında temas çok iyi olduğundan, kurutma havası ve tanecikler arasında ısı transferi de etkin şekilde gerçekleşir. Bu mekanizma ile büyük sıcaklık farkları sakıncası olmaksızın malzemelerin kurutulması mümkündür.

Otomatik yükleme ve boşaltmanın mümkün olduğu bu sistemin en önemli avantajı kurutma işleminin kısa sürede tamamlanmasıdır. Bu tip kurutucularda kömür, kireçtaşı, fosfat, plastik ve ilaç tabletleri kurutulması için uygundur [114, 125, 126]. Şekil 3.5'te akışkan yataklı kurutucunun yapısı görülmektedir [33].



Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucu

Kızgın buharla atmosferinde kurutma

Kızgın buharla ortamında kurutma işleminde, katı maddelerin hava veya bir başka gaz ile kurutulması işlemi sırasında buharlaştırılan çözücü (su veya organik sıvı)

yığın gaz akımına ulaşmak için durgun gaz filmine yayılmalıdır. Gaz filmi, kütle transferine karşı direnç ve kurutma miktarı, çözücü buharın yayılım oranına bağlı olarak değişir.

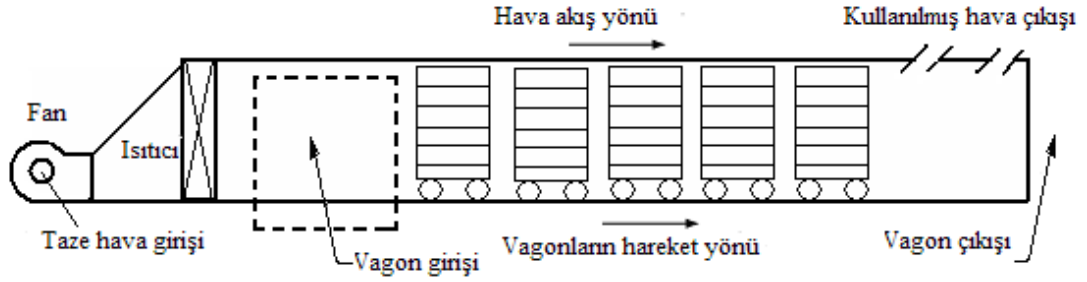
Bu yöntemin ısı verim yüksektir, çözücünün sisteme geri kazanımı da kolaydır. Ayrıca aşırı kurutma ve havanın oluşturduğu oksitlenme ve diğer kimyasal reaksiyonlar gözlenmez [126].

Flaş kurutma

Flaş kurutma sistemlerinde düzgün bir şekilde bölünmüş katı parçacıklar, sıcak gaz akımı içerisinde yayılarak hızlı ve düzgün bir şekilde kurutulabilir [126]. Pigment, sentetik, reçine, gıda ürünleri, kağıt üretiminde uygulama örnekler vardır [125].

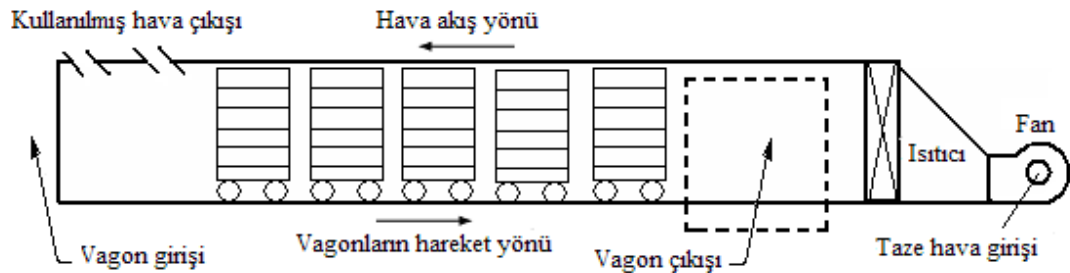
Tünel kurutucu

Kurutulacak ürün miktarının çok olması ve ürünün genel özellikleri ile kuruluk derecesi yönüyle özdeş ise, sürekli tip kurutucuların kullanılması daha uygun olur. Kurutulacak madde vagonlar üzerindeki tepsilere yerleştirilerek uzun olan tünelin içerisinden geçirilir. Bu işlem ya devamlı vagonlar şeklinde veya bir vagon tüneli terk ederken yüklenmiş diğer bir vagon tünele girecek şekilde düzenlenir. Çeşitli tipteki tünel kurutucularda hava ve ürünün birbirlerine göre hareket yönleri farklıdır. Eğer vagonlar ile sıcak hava aynı yönde hareket ederse bu tip tünellere “paralel akış tüneli” denir. Bu tip tünel kurutucularda kurutma havası, önce yeni ürünle karşılaşır. Kurutma havasının süreç içinde soğuyup nemi artarken daha ileri düzeyde kurumuş olan ürünle temas eder. Bu durum kurutulan ürünün az da olsa tekrar nem almasına neden olur. Bir paralel akış tünel kurutucunun şeması Şekil 3.6’da verilmektedir.



Şekil 3.6. Paralel akış tünel kurutucu

Kurutma havası ile vagonların hareketi birbirine zıt yönde ise, bu tip tünellere “zıt akış tüneli” denir. Bu tip tünellerde sıcak ve kuru hava ilk önce en fazla kurumuş olan ürünle temas eder. Bu tiplerde de sıcak ve kuru hava önce en kuru olan ürünle, daha sonra da gittikçe soğuyarak nemi artarken, en sonunda nem oranı yüksek ürünle temas eder. Şekil 3.7’de zıt akış tünel kurutucunun şeması görülmektedir.



Şekil 3.7. Zıt akış tünel kurutucu

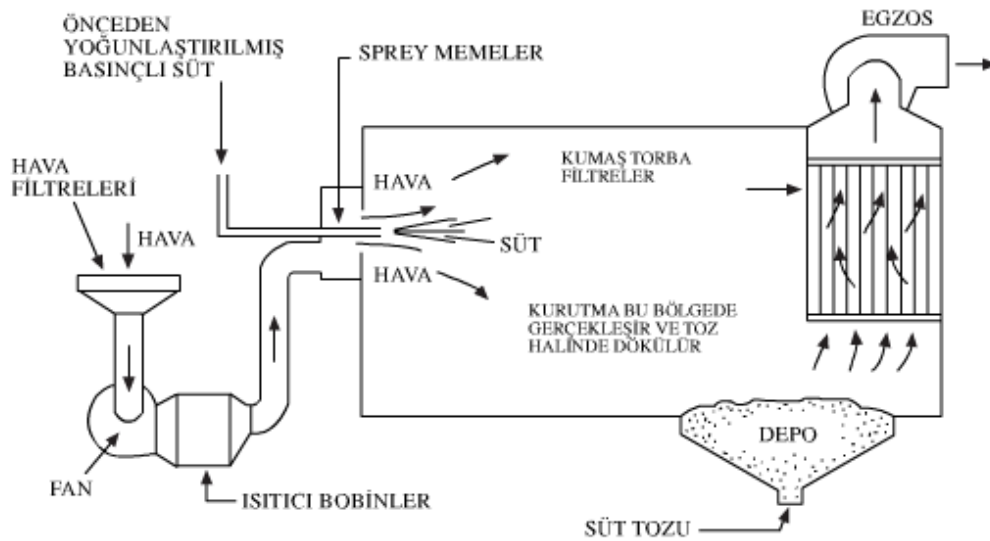
Meyve ve sebzelerin kurutulmasında en yaygın olan sistemler paralel veya zıt akış tünelleridir. Zıt akış tüneli ile paralel akış tünelinin kurutma karakteristikleri farklıdır. Paralel akış tünellerinde başlangıçta kuruma hızı çok fazladır. Ürünün yüzeyi çok hızlı kuruduğu için, üründe çok az bir büzülme-buruşma meydana gelir. Fakat tanecikli ürünler içinde, boşluk ve çatlaklar oluşur. Kurutma tünelinin sonunda kurutma havası nispeten soğuk ve fazla nemli olduğu için, kurutmanın son aşaması çok yavaş gerçekleşir. Zıt akış tünellerinde ise madde, kurudukça daha uygun kurutma şartları ile karşılaşır. Kurumanın ilk aşaması daha soğuk ve daha nemli kurutma havası ile gerçekleşir ve kurutulan ürün içinde nem dağılımındaki farklılık fazla olmadığından, tam ve engelsiz bir buruşma olur. Zıt akış tüneli özellikle erik

gibi yumuşak meyvelere çok uygundur. Aksi halde kurumanın ilk aşamasında bunlarda öz suyu dışarı akar. Bunların yanında çapraz akışlı tünellerde kullanılmaktadır [128].

Püskürtmeli kurutucular

Püskürtmeli kurutucular süttozu, kahve, sabun ve deterjan üretiminde kullanılmaktadır. Çünkü kurutulmuş malzeme damlacık veya tanecik yapısı olarak aynı yapıdadır ve kurutma süresi oldukça kısadır. Sıvı malzemeler, püskürtmeli kurutucularda kurutulduğunda yüksek miktarlarda kurutulabilir. Püskürtmeli kurutucular iki akışkanlı meme, yüksek basınçlı meme veya dönen disk şeklinde olabilir.

Hava sıcaklığı 93 - 760 °C arasında değişirken yüksek sıcaklıklar için özel yapı malzemeleri kullanılır. Hava sıcaklığı yükseldikçe ısı verim artar, bu nedenle yüksek sıcaklıklar tercih edilir. Sıcaklığa duyarlı ürünler bile düşük kuruma zamanı sayesinde kurutulabilir. Dönen tip püskürtmeli kurutucu Şekil 3.8’de verilmiştir [126].

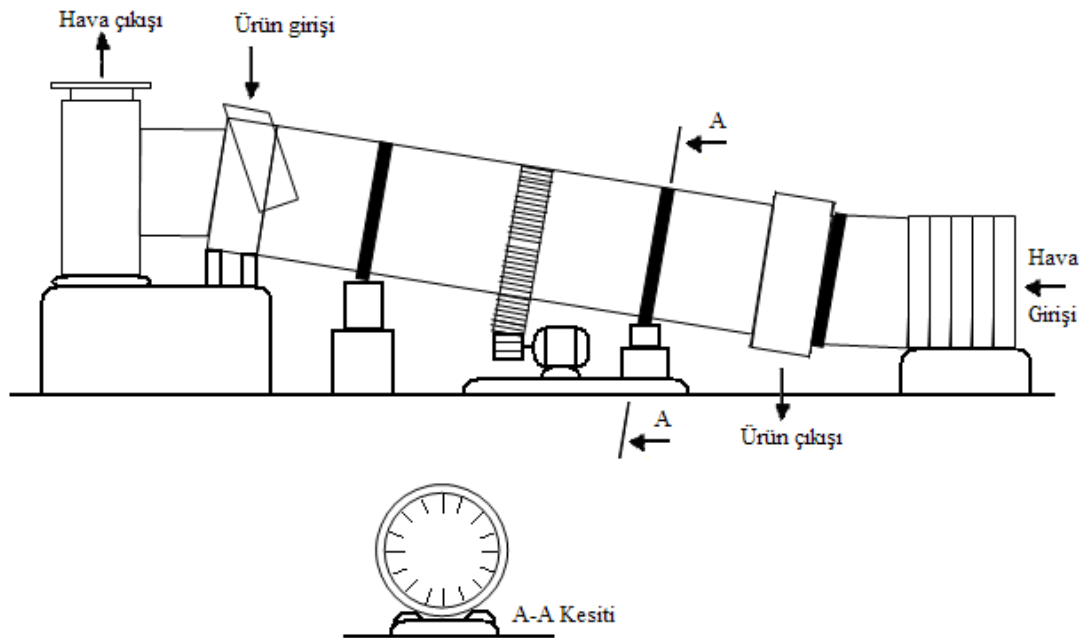


Şekil 3.8. Dönen tip püskürtmeli kurutucu

Döner kurutucular

Döner kurutucularda kurutulacak olan ürünler tanecik halinde veya kristal yapıda, kurutma öncesinde genellikle uygulanan taşıma metotlarından birisi ile taşınabilecek kadar kuru olmalıdır. Ayrıca ürün, kurutucunun duvarlarında birikmeye sebep olmayacak kadar az yapışkan olmalıdır. Bütün döner kurutucular, eksenleri yatayla küçük bir açı yapacak şekilde kurulmuş ve kendilerini eksenleri etrafında döndürecek tekerlekler üzerine yerleştirilmiş, silindirik bir gövdeye sahiptirler.

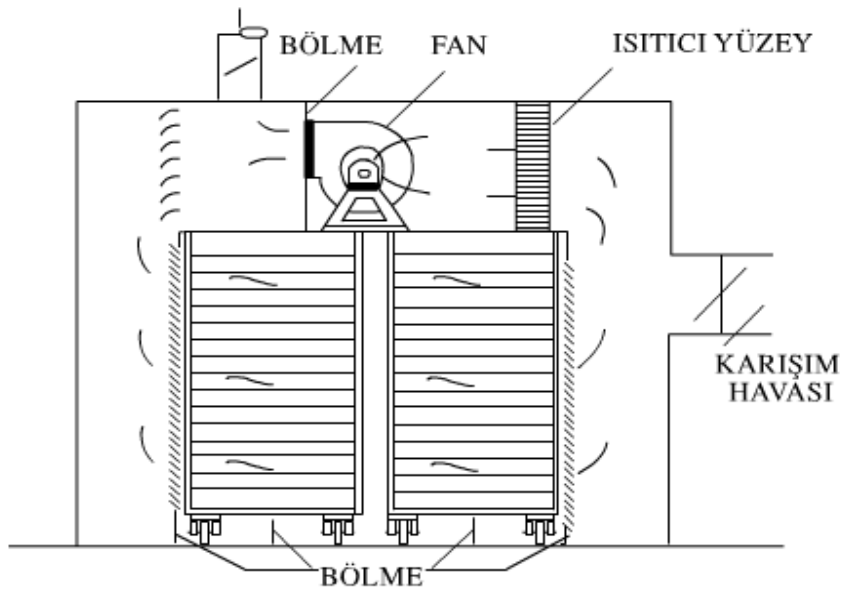
Kurutulacak ürün kurutucunun yüksekte olan ucundan kurutucuya verilir, kurutucunun dönme hareketi yardımı ile yavaş yavaş kurutucunun alçakta olan ucuna doğru ilerler ve buradan boşaltılır. Kurutulacak ürünün kurutucu içerisinde ilerlemesi, karışması ve kurutma havası ile daha iyi bir şekilde temas etmesi, kurutucu içerisinde yer alan raf ve kanatlarca sağlanır [128]. Döner kurutucunun şeması Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Döner kurutucu

Kabinli ve bölmeli kurutucular

Kabinli kurutucular, ısıtılan tavanlı sistemler (bu sistemlerde sadece doğal taşınım ve genelde zayıf ve düzensiz bir kurutma sağlanır), zorlanmış taşınımlı ve özel olarak tasarlanmış bölmeli daha karmaşık sistemler gibi birçok modeli vardır. Bu tip kurutucularda kurutma işlemi, kurutulacak malzemenin yüzey alanını arttırmak için tepsilere serilerek yapılır. Şekil 3.10'da, ürünlerin kurutulması işleminde kullanılan kabin kurutucusu verilmiştir [126].



Şekil 3.10. Kabin kurutucu

Dielektrik kurutma

Bu tip kurutmada, radyo frekansı veya mikrodalga bölgesinde çok yüksek frekansa sahip bir elektromanyetik alana yerleştirilen malzemenin içerisinde termal enerji üretilir. Elektromanyetik alan yönündeki hızlı değişimler yüzünden moleküler sürtünmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan ısı kutup akışını değiştirir. Sıvı haldeki suyun dielektrik sabitinin birçok katı malzemeninkinden çok yüksek olmasından dolayı ısı malzemenin su içeren kısmında üretilir. Bu olayla malzemeden suyu buharlaştırarak uzaklaştırılır [129].

Mikrodalga kurutma

Mikrodalga kurutmada çok yüksek frekanslı (900 ile 5000 Mhz) güç kaynağı kullanılır. İletken olmayan maddelerin ısıtılmasına uygulandığından bir dielektrik ısıtma formu olarak nitelenebilir. Mikrodalga kurutma şerit şeklindeki ince malzemelere uygulanır. Sistem giriş ve çıkışında alınması gerekli koruyucu önlemler sürekli çalışmayı zorlaştırır. Sistemi çalıştırmak için gerekli emniyet önlemleri mikro dalga kurutmayı, dielektrik kurutmaya göre daha pahalı hale getirir [125].

Apphertizasyon

Gıda maddeleri hermetik kaplar içinde 110 °C ile 115 °C arasında 10 ila 15 dakika sterilizasyonuna tabi tutularak saklanmaları sağlanır. Bilhassa çocuk mamaları, diyet gıdaları ve meyve nektarlarını işlemek için bu yöntem kullanılmaktadır [124].

Dondurarak kurutma

Dondurarak kurutma ısıya duyarlı çok hassas malzemelerin kurutulmasında kullanılır. Dondurarak kurutma öncelikle serum, bakteri ve virüs kültürlerin kurutulmasında olmak üzere ecza endüstrisinde ve gıdaların (kahve, süttozu v,b.) kurutulmasında kullanılır. Kurutulacak malzeme ilk önce özelliğine göre -20 ile -40 °C arasında dondurulur. Bu dondurma işlemi, herhangi geleneksel bir dondurma düzeninde gerçekleştirilebilir. Daha sonra hızlı bir şekilde kurutma hücreğine alınır. Kurutma hücresi vakum pompası yardımıyla vakumlanır ve donmuş malzemede bulunan buzun süblümleşmesi sağlanarak malzemenin kurutma işlemi gerçekleşir. Dondurarak kurutmanın avantajları, kurutulmuş malzemeye tekrar su ilave edildiğinde kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşması, kurutulan malzemenin raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve oda sıcaklığında muhafaza edilmesidir.

4. KURUTMA TERİMLERİ VE MEKANİZMASI

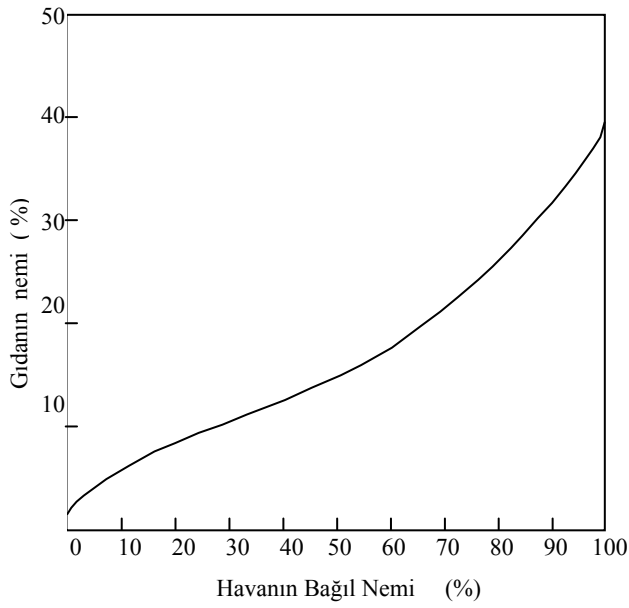
Kurutma, nemli materyal ile çevresi arasında gerçekleşen karmaşık bir nem alıp verme işlemidir [130]. Bu işlem sırasında materyalin nemi, çevresindeki katı veya akışkan (sıvı veya gaz) fazdaki ortama geçer. Kurutma işlemlerinde çevre ortamı olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Bu nedenle kurutma nemli materyal ile hava arasındaki bir ilişki olarak ele alınmaktadır [131].

4.1. Denge Nemi

Bir kap içindeki su buharlaşarak kendisini çevreleyen atmosferle dengeye eriştiği gibi, herhangi ıslak bir madde de aynı davranışı göstererek bulunduğu sıcaklıkta kendisini çevreleyen atmosferle nem açısından bir dengeye ulaşır. Şekil 4.1’de belli bir sıcaklık derecesinde farklı bağıl nem içeren şartlarda tutularak dengeye ulaşmış bir gıdada, gıdanın nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu ilişkiye “sorpsiyon izotermi” denir.

Şekil 4.1’den de görüldüğü gibi % 80 bağıl neme sahip olan bir gıdanın, atmosfer altında belli bir sıcaklıkta daima % 20 su içerdiği, yani bu şartlarda denge neminin % 20 olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla her gıdanın belli şartlarda ulaştığı denge nemi farklıdır ve kendine özgüdür. Ürünün sorpsiyon izotermi belirlenmesi için uygulanan en basit yöntemde, sorpsiyon izotermi saptanacak gıda maddesi, bağıl nemi sabit kalabilen kavanozlarda belli sıcaklıkta, dengeye erişilene kadar tutulur.

Kavanozda istenen düzeyde nem içeren bir atmosfer oluşturmak için, kavanozun içine konan değişik tuzların çözeltilerinden yararlanılır (Çizelge 4.1). Böylece, içindeki atmosfer havasının bağıl neminin sabit kaldığı kavanozlara gıda maddesi uygun bir şekilde yerleştirilip, 20 °C’deki sorpsiyon izotermi bulunmuş olur (Şekil 4.1) [132].



Şekil 4.1. Nem sorpsiyon izotermi

Çizelge 4.1. Sudaki doymuş çözeltileri, bulunduğu ortamı farklı bağıl nemde tutan maddeler [56]

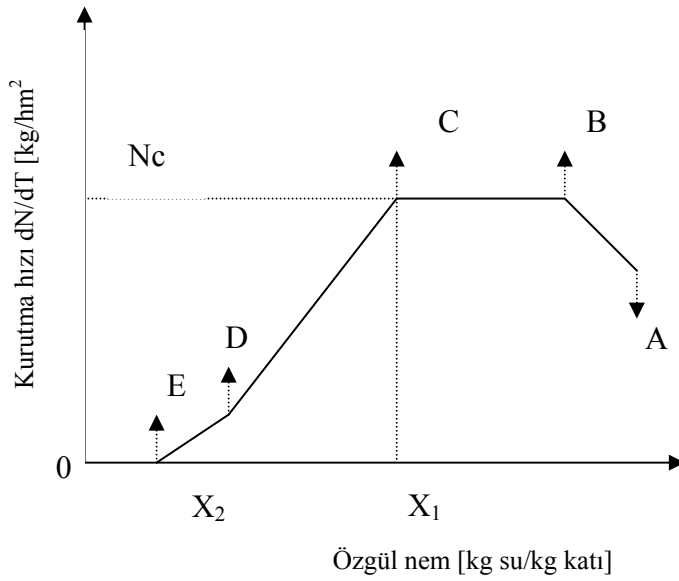
Tuz Adı	Kimyasal formülü	Bağıl nem (%)	Madde miktarı (gr)	Su miktarı (ml)
Potasyum asetat	CHCOOK	22	200	65
Magnezyum klorür	MgCl ₂	32	200	25
Potasyum karbonat	K ₂ CO ₃	41	200	30
Magnezyum nitrat	Mg(NO ₃) ₂	53	200	80
Sodyum bromit	NaBr	57	200	50
Sodyum nitrat	NaNO ₃	66	200	50
Stronsyum klorür	SrCl ₂	70	200	60
Sodyum klorür	NaCl	75	200	60
Amonyum sülfat	(NH ₄) ₂ (SO) ₄	90	200	60
Potasyum klorür	KCl	67	200	90
Baryum klorür	BaCl ₂	90	250	70
Lidyum klorür	LiCl	11	200	70

Gerçekte gıdaların sorpsiyon izoterm eğrilerinin belirlenmesinde gıdanın yaş veya kuru olmasının etkisi vardır. Yaş gıdanın nemini vermesi (desorpsiyon) ile kuru gıdanın nem alması (adsorpsiyon) olgusu tam olarak aynı yolu izleyen bir dönüşüm değildir. Buna göre, ıslak maddenin farklı bağıl nemli atmosferde tutulup, dengeye erişmesi beklendikten sonra tartılarak, ağırlık kaybının saptanmasıyla elde edilen eğriye “desorpsiyon izotermi” denir.

Başlangıçta tam anlamıyla kuru olan bir materyalin, yine değişik bağıl nemli ortamlarda tutularak elde edilen eğriye “adsorpsiyon izotermi” denir. Sorpsiyon izotermilerinden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır. Nitekim desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde yararlı bilgiler vermektedir. Adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma koşullarını ortaya koymaktadır [132].

4.2. Kurutma Hızı

Kurutmacılıkta esas, kurutulacak ürünlerdeki suyu buharlaştırmak ve oluşan buharı ortamdan uzaklaştırmaktır. Bu durumda buharlaşma ısısını sağlamak gereklidir. Bu ısı normal sıcaklıklarda buharlaştırılacak 1 kg su için 2470 kJ’dür. Kurutma işlemi Şekil 4.2’de verilmiştir [132]. Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi kurutma hızını belirler. Kaliteli ürün elde edilmesi ve ısı ekonomisi açısından kurutma hızı büyük önem taşımaktadır. Bir ürünü kuruturken en elverişli kurutma hızını elde etmek için, örnek kurutma çalışmaları yaparak kurutma eğrilerini belirlemek gerekmektedir.



Şekil 4.2. Özgül nemin bir fonksiyonu olarak kurutma hızının değişimi

Şekil 4.2'deki C değeri, kurutulacak ürünün özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlı olan kritik nem miktarını göstermektedir. Yüzeyde ilk kuru noktanın olduğu duruma “kritik nokta” adı verilir. Kritik nokta, sabit kuruma periyodunun sonunu ve azalan hızda kuruma periyodunun başlangıcını simgeler. Şekil 4.2'de AB bölgesi kurutucu ve ürünün ısınma süresini göstermektedir. BC bölgesinde buharlaşma ürünün yüzeyinde oluşan sıvı film tabakasıyla gerçekleşmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen kurutma hızı eğrisi kurumadaki çeşitli periyotları içermektedir.

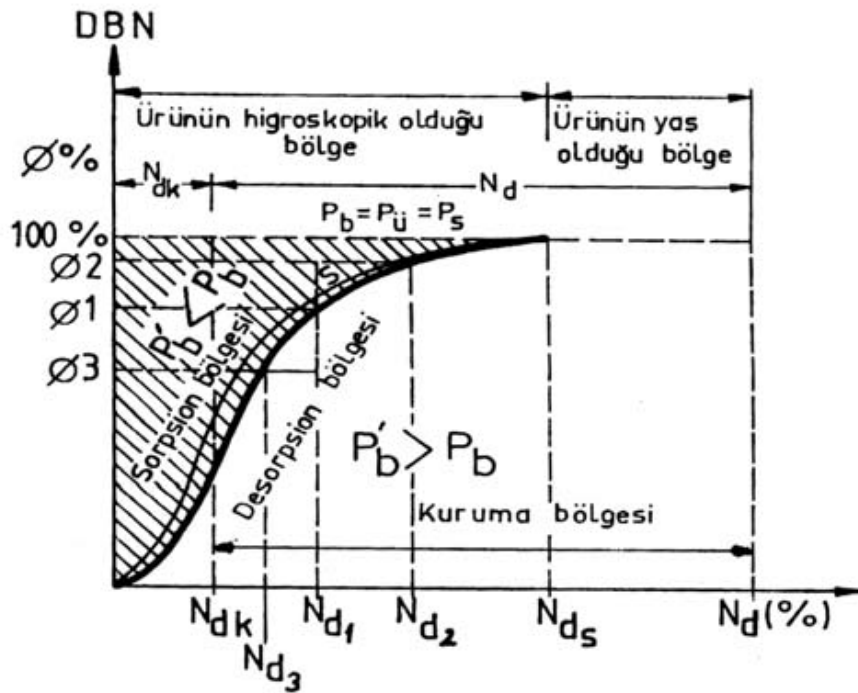
Başlangıçta nem, doymuş halde bulunan yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Kurutma ilerledikçe doymuş halde bulunan yüzey alanı kademeli olarak azalır. Bunu maddenin iç kısmındaki suyun buharlaşması izler. CD bölgesinde ise ürün yüzeyine difüze edilebilen su buharlaşmaktadır. Bu nedenle BC bölgesinde kurutma hızı sabit kalmakta ve CD bölgesinde ise doğrusal olmaktadır. DE bölgesi, ürün içindeki suyun yüzeye çok yavaş difüze edildiği bölgedir. Şekil 4.2'deki AB kararsız durumu, BC ise sabit hız periyodunu göstermektedir [123].

4.3. Kurumanın Statiği

Hava ile materyal arasındaki nem dengesi, zaman dikkate alınmadan irdelenmektedir. Nem dengesi iki olayla gerçekleşebilir;

- a- Desorpsiyon (materyalin çevre havasına nem vermesi),
- b- Sorpsiyon (materyalin çevreden nem alması).

Denge durumunda; havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ($P_{\bar{u}}$) birbirine eşittir. Materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık çevre havası yaşı termometre havası sıcaklığına eşit olduğundan ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile ($P_{\bar{u}}$), havanın yaşı termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi buhar basıncı (P'_b) eşit alınabilmektedir. Bu nedenle denge durumunda materyalin ulaştığı nem (N_d), havanın kısmi buhar basıncına yani bağıl nemine (ϕ) bağlıdır [133].

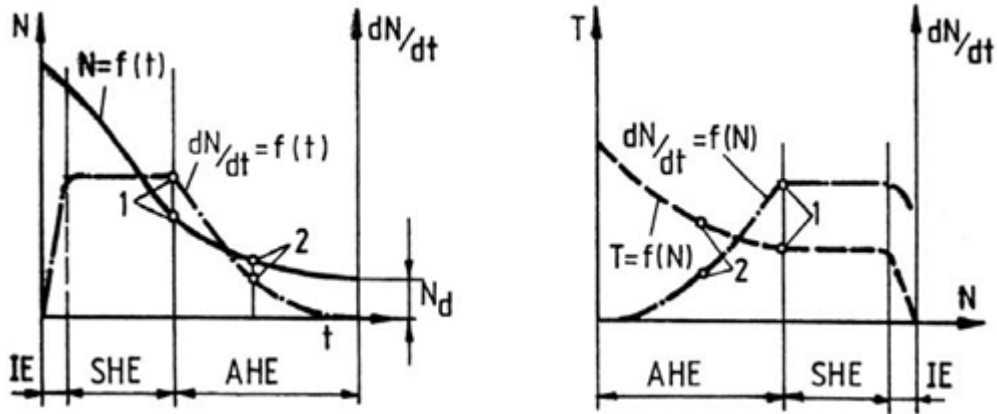


Şekil 4.3. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statiği açısından anlamı

Herhangi bir materyalin sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelendiğinde sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 4.3'te gösterildiği gibidir. Şekilde görüldüğü gibi, izotermin denge bağıl nemi (DBN) eksenini ile arasında kalan bölge içindeki her noktada ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı havada bulunan suyun buhar basıncından daha küçük olduğundan bu bölge, materyalin bünyesine nem aldığı şartları belirtmektedir. İzotermin denge nemi eksenini ile arasında kalan bölge içinde ise durum tam ters olduğundan bu bölge materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir. Kuruma bölgesi ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi N_{dk} değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmektedir.

4.4. Kurumanın Kinetiği

Kurumanın kinetiğinde, materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman dikkate alınarak incelenir. Şekil 4.4'te tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri görülmektedir [131].



Şekil 4.4. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri

Yukarıdaki şekilden de anlaşılacağı üzere kuruma olayının kinetik olarak incelenmesi sırasında aşağıdaki ilişkiler dikkate alınmaktadır;

- Materyalin nemi ile kuruma süresi: $N=f(t)$
- Kuruma hızı ile materyal nemi: $dN/dt=f(N)$
- Kuruma hızı ile kuruma süresi: $dN/dt=f(t)$
- Materyal sıcaklığı ile nemi: $T=f(N)$

Kuruma olayının gerçekleşmesi sırasında üç evre ile karşılaşmaktadır. Bu evreler;

- Materyalin ısınma evresi (IE),
- Sabit hızla kuruma evresi (SHE),
- Azalan hızla kuruma evresi (AHE)'dir.

Kuruma işleminin başlangıcında görülen ısınma evresi (IE), kurutulacak ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengeye gelinceye kadar devam etmektedir. Bu evrede kuruma hızı giderek artar ve bu evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır. IE süresi, toplam kurutma süresine göre çok kısa olduğundan kuruma eğrilerinde gösterilmemektedir [134, 135].

Sabit hızla kuruma evresinde (SHE), kurutulacak materyalin yüzeyi başlangıçta ince bir su tabakası ile kaplıdır. Öncelikle bu su tabakası buharlaşmaya başlar. Ürünün özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma tamamen dış hava koşullarınca belirlenmekte ve nem materyalin yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan su ile aynı davranışı göstererek buharlaşmaktadır.

Yüzeydeki serbest su tabakası sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken devamlı olarak hücre aralarındaki hava boşluklarının meydana getirdiği kılcal borularla beslenmektedir. Diğer bir ifadeyle, sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, suyun materyal yüzeyine iletim hızı ile yüzeyden buharlaşan suyun hızı birbirine eşit olmaktadır [136].

Sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, materyalden yüzeye doğru bir nem taşınması söz konusu olduğundan, materyalin iç katmanlarındaki nem miktarı giderek azalmaktadır. Bu durum nedeniyle, kurumakta olan materyalin yüzeyinden birim zamanda buharlaşarak ayrılan suya eşit miktarda su, artık iç kısımlardan yüzeye taşınmamaktadır. Bunun sonucunda, materyalin yüzeyinin tamamen serbest su ile kaplı olması durumu sona ermektedir. Bu anda materyalin sahip olduğu nem düzeyine birinci kritik nem ve kuruma eğrilerinde bu durumu belirleyen noktaya ise birinci kritik nokta (BKN) adı verilmektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere, sabit hızla kuruma evresi (SHE), ısınma evresinin (IE) sona erdiği nokta ile birinci kritik nokta (BKN) arasında yer almaktadır. Tarım ürünlerinin, özellikle tahılların, hasat sırasında sahip oldukları nem genellikle BKN değerinden daha az olmaktadır. Bu nedenle, sebze ve meyvelerin dışında kalan çoğu tarım ürününün kurutulmasında sabit hızla kuruma evresine (SHE) rastlanmamaktadır.

Birinci Kritik Nokta (BKN) değerinden sonra, kuruma eğrisinin eğimi azalan yönde hızla değişim göstermektedir. Bu noktadan itibaren, kuruma hızının zaman içinde giderek azaldığı başka bir evre başlamaktadır. Bu evre, birim zaman aralıklarında buharlaşan nem miktarının bir önceki zaman dilimine göre azalma göstermesi nedeniyle, azalan hızla kuruma evresi (AHE) olarak tarif edilmektedir.

Materyalin yüzeyindeki su filmi kaybolmaya başlayınca, kuruma hızı da ıslak alan miktarı ile orantılı olarak azalma göstermektedir. Bu evreye “1. azalan hızla kuruma evresi” denilmektedir. Bu evre sonunda, suyun materyalin iç kısımlarından yüzeye iletim hızı, yüzeyden meydana gelen buharlaşma hızında daha küçük olduğundan, materyalin yüzeyinin tamamen ince su tabakası ile kaplanması durumu ortadan kalkmaktadır. Bu andan itibaren kuruma hızı daha da yavaşlamakta ve bu noktadan itibaren “2. azalan hızla kuruma evresi” başlamaktadır.

Bu evre sonunda, materyal ile çevrenin sıcaklığı eşit duruma gelerek, $N=f(t)$ eğrisi N_d değerine, $dN/dt=f(N)$ eğrisi ise sıfır değerine ulaşarak birbirlerine asimptot

olmaktadırlar. Azalan hızla kuruma evresi (AHE) sırasında, kuruma hızı değişiminin doğrusallıktan sapmaya başladığı noktaya, ikinci kritik nokta (İKN) ve materyalin bu andaki nem değerine ise “ikinci kritik nem” adı verilmektedir.

Bu evre sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla;

- Teorik
- Yarı teorik,
- Deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden, yararlanmak mümkündür [135].

4.5. Ürünün Su Aktivitesi

Bir gıdanın su aktivitesi (a_w), onun mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür [137]. Gıdaların su aktiviteleri saf suyun su aktivitesi olan $a_w = 1.0$ değerine çok yakındır. Gerçekte meyve ve sebzelerin su aktiviteleri çoğunlukla $a_w = 0.970-0.996$ arasında bulunmaktadır. Meyvelerin su aktiviteleri sebzelerinkinden biraz daha düşüktür.

Mikroorganizmalar su aktivitesine duyarlılıkları açısından farklılıklar göstermektedir. Genellikle su aktivitesi 0,6'nın altında tüm mikrobiyolojik faaliyetlerinin sona erdiği kabul edilmektedir. Gıdalarda bozulmaya neden olan bakterilerin çoğu $a_w = 0.90$ altında faaliyette bulunmazken, küflerlerin faaliyetlerinin sona erdiği su aktivitesi alt sınırının $a_w = 0.70-0.75$ arasında olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte $a_w = 0.65$ düzeyinde iken dahi faaliyette bulunan bazı kserofilik küfler vardır. Mayaların faaliyetleri ise minimum su aktivitesi $a_w = 0.85$ düzeyinde olması gerektiği bildirilmektedir.

Çeşitli kaynaklarda mikroorganizmaların faaliyeti ile ilgili olarak belirtilmiş bulunan minimum su aktivite değerlerinin birbirinden farklı değerler vardır. Bu durum su aktivitesinin mikroorganizmalar üzerindeki inhibishon etkisinin ortalamın diğer koşulları ile çok ilişkili olmasındandır. Bazı mikroorganizmalar zamanla düşük su

aktivitesine adapte olabilmekte ve bu nedenle faaliyetlerini engelleyen minimum su aktivite değeri beklenen düzeyden sapmaktadır.

Mikroorganizmaların faaliyetleri için öngörülen minimum su aktivite değerleri çeşitli araştırmacılarca farklı değerler bulunmaktadır. Çizelge 4.2’de bazı mikroorganizma gruplarının üreyebileceği en düşük su aktivite değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan bazı mikroorganizmaların faaliyet için yaklaşık minimum su aktivite (aw) değerleri

Mikroorganizmalar	aw	Mikroorganizmalar	aw
Gruplar		Gruplar	
Bozulma yapan bakterin çoğu	0.90	Halofilik bakteriler	0.75
Bozulma yapan mayaların çoğu	0.88	Kserofilik küfler	0.61
Bozulma yapan küflerin çoğu	0.80	Ozmofilik mayalar	0.61
Önemli mikroorganizmalar		Önemli mikroorganizmalar	
Clostridium, E tipi	0.97	Candida zeylanodites	0.90
Pseudomonas spp.	0.97	Geotrichum candidum ca.	0.90
Acinetobacter spp.	0.96	Trichothecium spp. ca.	0.90
Escherichia coli	0.96	Byssoschlamys nivea ca.	0.87
Enterobacter aerogenes	0.95	Staphylococcus aureus	0.86
Bacillus subtilis	0.95	Alternaria citri	0.84
Clostridium botulinum, A ve B tipi	0.94	Penicillium patulum	0.81
Candida utilis	0.94	Eurotium repens	0.72
Vibrio parahaemolyticus	0.94	Aspergillus glaucus	0.70
Botrytis cinerea	0.93	Aspergillus conicus	0.70
Rhizopus stolonifer	0.93	Aspergillus echinulatus	0.64
Mucor spinosus	0.93	Zygosaccharomyces rouxii	0.62
Candida scottii	0.92	Xeromyces bisporus	0.61
Trichosporon pullulans	0.91		

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi su aktivitesinin 0.6’nın altında bulunması durumunda bile gıdalarda bozulmaya neden olan bazı reaksiyonların gerçekleşebilmektedir. Ancak su aktivitesinin daha aşağı düzeye inmesi durumunda bu reaksiyonların bir kısmının hızı yavaşlamaktadır.

Su aktivitesi mikroorganizmaların sadece çoğalma ve faaliyetleri üzerine değil; metabolit üretme yetenekleri üzerinde de etkilidir. Örneğin herhangi bir küfün belli bir su aktivitesinde bir gıdada çeşitli değişmelere ve bozulmalara neden olabilmesine rağmen, mikotoksin oluşturabilmesi için bundan daha yüksek düzeyde bir su aktivitesine gereksinim duymakta oluşu bilinen bir gerçektir. Bu durum Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Mikroorganizmaların düşük su aktivite değerlerinde üremelerine ve faaliyet göstermelerine karşın toksin oluşturabilmeleri için daha yüksek su aktivitelerine gereksinim duymaları “orta nemli gıdaların” bu açıdan güvenli olmalarının başlıca nedenidir.

Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (aw) değerleri [37]

Oluşturulan mikotoksinler	Küfler	Minimum su aktivitesi değerleri	
		Faaliyet için	Toksin üretimi için
Aflatoksin	<i>Aspergillus flavus</i>	0,82	0,83-0,87
	<i>A. parasiticus</i>	0,82	0,87
Ochratoksin	<i>A. ochraceus</i>	0,77	0,85
	<i>Penicillium cyclopium</i>	0,82-0,85	0,87-0,90
Patulin	<i>P.expansum</i>	0,81	0,99
	<i>P.patulum</i>	0,81	0,95
Stachybotryn	<i>Stachybotrys altra</i>	0,94	0,94

Çizelge 4.4’de bazı dıda gruplarının su aktivite değerleri gösterilmiştir. Su aktivite değerlerindeki değişim sınırları, söz konusu gıdaların farklı bileşimlerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktiviteleri

Gıdalar	Su aktivitesi (a_w)
Kuru meyveler	0.60 – 0.75
Kuru sebzeler	0.30 – 0.40
Reçel-marmelat	0.80 – 0.91
Meyve suyu konsantreleri	0.79 – 0.84
Tahıllar ve baklagiller	0.65 – 0.75
Bal	0.75
Kek ve kuru pasta	0.60 – 0.90
Şekerlemeler	0.60 – 0.65
Meyveli kekler	0.73 – 0.83
Ekmek	0.96
Dondurulmuş gıdalar	0.60 – 0.90

Su aktivitesi sadece mikroorganizma faaliyeti üzerinde etkili olmamakta, ayrıca çeşitli reaksiyonların hızları üzerinde de etkilidir. Su aktivitesinin gıdalarda oluşan reaksiyonlar üzerine etkisi, mikroorganizmalar üzerine olan etkisinden çok daha karmaşıktır. Bunun nedeni suyun çeşitli reaksiyonlarda çok farklı rollere sahip olmasıdır. Su, reaksiyona giren bileşikler ve reaksiyon sonucu oluşan ürünler için bir çözücü olarak, hidroliz reaksiyonlarında olduğu gibi bizzat reaktan olarak, enzimatik esmerleşme reaksiyonlarında olduğu gibi bir reaksiyon ürünü olarak ve bazı bileşiklerin katalitik etkisini engelleyici bir unsur olarak çeşitli fonksiyonlara sahip önemli bir maddedir.

Su aktivitesinin düşük olduğu kurutulmuş gıdalarda gerçekleşen en önemli reaksiyon “enzimatik olmayan esmerleşme”, yani Maillard reaksiyondur. Maillard reaksiyonu suya bağımlı bir reaksiyondur. Reaktanların mobilitelerinin kısıtlanmasına neden olan çok düşük su aktivitelerinde bu reaksiyon yavaşlarken su aktivitesinin yükselmesiyle hızlanmaktadır. Bu nedenle orta nemli gıdalarda hızlı bir esmerleşme gerçekleşmektedir. Nitekim kurutulmuş üzümelerde esmerleşme reaksiyonunun, $a_w=0.8$ düzeyinde iken en hızlı şekilde gerçekleştiği bulunmuştur. Buna karşın su

aktivitesinin çok düşük olduğu aşırı kurutulmuş ürünlerde bu reaksiyon çok yavaşlamaktadır.

Gıdanın içerisindeki su oranının bulunduğu çevre havası bağıl nemi (ÇBN) ile dengeye ulaştığında, çevre havası bağıl neminin 100'e bölünmesi ile o gıdaya ait mevcut su oranındaki su aktivitesi (a_w) bulunur [114].

$$a_w = \frac{\text{ÇBN}}{100} \quad (4.5)$$

5. DONDURARAK KURUTMA

5.1. Dondurarak Kurutmaya Giriş

Liyofilizasyon olarak da bilinen dondurarak kurutma biyoteknolojik ürünler, bazı hassas kimyasallar ve ecza endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ayırıştırma işlemidir [138-143]. Dondurarak kurutma yöntemi çok düşük basınç altında donmuş materyalden ya da donmuş çözeltilerden çözücünün (serbest su) süblimasyonla, bağlı suyun uzaklaştırılması (desorpsiyon) işlemidir [144, 145]. Dondurarak kurutma işlemi yavaş ve pahalıdır [146-148]. Ancak kurutma sonunda diğer kurutma teknikleriyle karşılaştırıldığında en kaliteli ürün elde edilmektedir [149, 150]. Dondurarak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde, büzülmüş ve gözenekli yapısı sayesinde su alarak (rehidrasyon), kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşır [99, 151]. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve soğukta saklamaya gerek kalmadan oda sıcaklığında muhafaza gibi avantajları vardır [104, 152].

5.2. Süblimleşmenin Teorisi

Dondurarak kurutma işleminin temeli süblimleşmedir. Dondurarak kurutmadaki süblimleşme işlemi, bir maddedeki donmuş suyun erime olmaksızın doğrudan buhar fazına geçmesi işlemidir [153]. Bazı durumlarda maddenin üç fazı (katı-sıvı-gaz) bir arada bulunabilir. Bu denge halleri birlikte üçlü noktayı oluşturur [154].

Saf madde bu durumda aynı sıcaklık ve basınçta, fakat farklı özgül hacimlere sahip olur. Su için üçlü noktanın koşulları 0,01 °C ve 0,6113 kPa'dır. Su ancak bu koşullar altında üçlü noktada bulunabilir. Hiçbir madde üçlü nokta basıncının altında bir basınçta sıvı fazında denge halinde kalamaz. Aynı sıvı donduğunda hacimleri küçülen maddeler kapsamında sıcaklık içinde geçerlidir. Fakat yüksek basınçta maddeler üçlü faz sıcaklığının altında da sıvı fazda bulunabilirler. Su atmosfer basıncı altında sıvı olarak bulunamaz, fakat 200 Mpa basınçta -20 °C sıcaklıkta sıvı olarak bulunabilir.

Bir madde katı fazından buhar fazına iki yolla geçebilir. Birinci yolda önce sıvı faza sonra buhar fazına geçer. İkinci yolda ise katı madde doğrudan buhar fazına geçer. Doğrudan geçiş ancak üçlü nokta altındaki basınçlarda olabilir. Çünkü maddenin bu basınç noktasının altında sıvı halde bulunması söz konusu değildir. Katı fazdan doğrudan buhar fazına geçiş süblimasyon olarak adlandırılır. Üçlü nokta basıncı atmosfer basıncından büyük olan maddeler, örneğin kuru buz (katı karbondioksit) süblimasyon atmosfer basıncı altında buhar fazına geçişin tek yoludur. Süblime olabilen her maddenin süblimasyon koşulları farklıdır [155].

Örneğin donmuş suyun normal basınçta, oda sıcaklığında süblimasyona uğrarken, buzun süblimasyonunun minimum koşullarında, sıcaklık 0 °C basınç 4,579 mm Hg (0,610 kPa)'dır. Buz 0 °C veya altında, basınç 4,579 mm Hg veya altında olunca süblime olabilmektedir. Daha kapsamlı bir tanımlamayla buzun süblimasyonu, su buharı basıncının onu çevreleyen ortamın su buharı basıncından daha yüksek olmasıyla olanaklıdır. Buzun buhar basıncı, sıcaklığına bağlıdır. Örneğin 0 °C'deki buzun buhar basıncı 4,579 mm Hg düzeyinde olduğu halde, -15 °C'deki buzun buhar basıncı 1,241 mmHg'dir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı

Sıcaklık (°C)	Basınç Değerleri (mmHg)				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
-29	0,317	0,311	0,304	0,298	0,292
-28	0,351	0,344	0,337	0,330	0,324
-27	0,389	0,381	0,374	0,366	0,359
-26	0,430	0,422	0,414	0,405	0,397
-25	0,476	0,467	0,457	0,448	0,439
-24	0,526	0,515	0,505	0,495	0,486
-23	0,580	0,569	0,558	0,547	0,536
-22	0,640	0,627	0,615	0,603	0,592
-21	0,705	0,691	0,678	0,665	0,652
-20	0,776	0,761	0,747	0,733	0,719
-19	0,854	0,838	0,822	0,806	0,791
-18	0,939	0,921	0,904	0,887	0,870
-17	1,031	1,012	0,993	0,975	0,956
-16	1,132	1,111	1,091	1,070	1,051
-15	1,241	1,219	1,196	1,175	1,153
-14	1,361	1,336	1,312	1,288	1,264
-13	1,490	1,464	1,437	1,411	1,386
-12	1,632	1,602	1,574	1,546	1,518
-11	1,785	1,753	1,722	1,691	1,661
-10	1,950	1,916	1,883	1,849	1,817
-9	2,131	2,093	2,057	2,021	1,985
-8	2,326	2,285	2,246	2,207	2,168
-7	2,537	2,493	2,450	2,408	2,367
-6	2,765	2,718	2,672	2,626	2,581
-5	3,013	2,962	2,912	2,862	2,813
-4	3,280	3,225	3,171	3,117	3,065
-3	3,568	3,509	3,451	3,393	3,336
-2	3,880	3,816	3,753	3,691	3,630
-1	4,217	4,147	4,079	4,012	3,946
0	4,579	4,504	4,431	4,359	4,287

Bilindiği gibi 0 °C'deki suyun 0 °C'deki buz haline dönüşmesinde 335 kJ/kg düzeyinde "donma gizli ısı" serbest kalır. 0 °C'deki su, 0 °C'deki buhar haline dönüşürken 2500 kJ/kg'lık buharlaşma gizli ısı absorbe eder. 0 °C'deki buz, 0 °C'deki buhar haline dönüşürken 2835 kJ/kg ($335 + 2500 = 2835$ kJ/kg) ısı absorbe eder. Donma ve buharlaşma gizli ısılarının toplamı olan bu ısıya "süblimasyon gizli ısı" denir. Buzun süblimasyonu için gerekli ısı eğer buzdan alınırsa, buzun sıcaklığı düşer. Bu olay evaporatif yolla soğuma olgusundan başka bir şey değildir. Bu nedenle dondurarak kurutmada, ürünlerdeki buz süblime oldukça, ürün sıcaklığı gittikçe düşer [114]. Çizelge 5.2'de buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı, buhar basıncı ve sıcaklık dereceleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Buz buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi

Sıcaklık (°C)	Mutlak basınç (mm Hg)	Süblimasyon ısı (kJ/kg)
0	4,576	2835,0
-1	4,178	2836,0
-4	3,309	2837,0
-7	2,621	2837,5
-10	2,047	2838,0
-12	1,597	2838,7
-15	1,241	2839,0
-18	0,956	2839,6
-21	0,734	2840,0
-23	0,558	2840,1
-26	0,424	2840,4
-29	0,320	2840,4
-32	0,237	2840,4
-34	1,811	2840,4
-37	0,129	2840,4
-40	0,098	2840,4

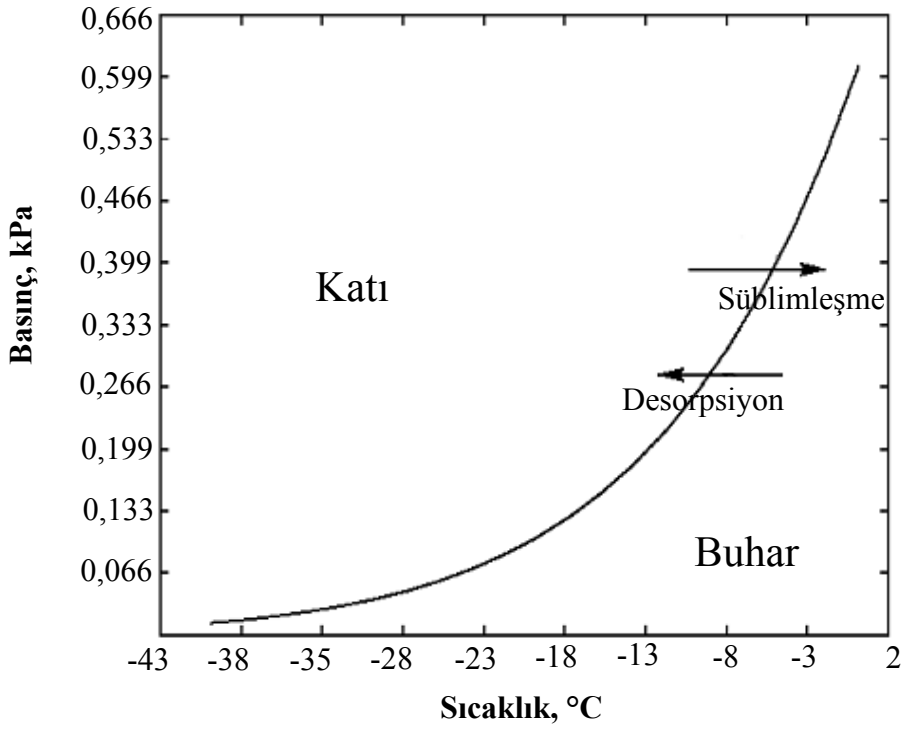
5.3. Süblimleşmenin Termodinamiği

Süblimleşme için şartları belirlemede, suyun denge faz diyagramına bakmak kullanışlıdır. Denge faz diyagramı (üçlü nokta), suyun tek bir bileşen sisteminde farklı fazların dengede olduğu basınç ve sıcaklığı gösterir. Bu diyagram, suyun süblimleşme olayında gerekli sıcaklık ve basınç aralıklarının belirlenmesi için kullanılabilir. Şekil 5.1’de su gibi donma ile genişleyen bir maddenin basınç – sıcaklık faz denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta)

Şekil 5.2’de, su için katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi buzun süblimleşmesi için, buz sıcaklığının üçlü nokta sıcaklığının 0 °C ve buhar basıncı üçlü nokta basıncının altında 0,61 kPa olması gerekliliği görülmektedir.



Şekil 5.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi [80]

Süblimleşme işleminin sürdürülebilir olması için, süblimleşme aralığındaki buz ve gaz denge durumunda olmamalı. İki fazdan oluşan bir sistemde, bir fazın Gibbs enerjisi diğer fazın Gibbs enerjisine eşit olduğunda, verilen sıcaklık ve basınç için fazlar dengededir. Gibbs enerjisi, G , aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$G = H - T.S \quad (5.1)$$

Burada;

H: Entalpi, (kJ)

T: Sıcaklık, (K)

S: Entropi, (kJ/K)

dir [153, 156].

Süblimleşme durumunda, buzun G'si, gazın G'sine eşit olduğunda faz değişimi durur. Bu denge durumu Şekil 5.2'de doyumluk eğrisiyle gösterilmiştir. İki fazın gibbs enerjileri arasındaki farkı (ΔG), sıfır değilse fazlarda biri görünmez. Süblimleşmenin gerçekleşmesi için, buzun G'si buharın G'sinden yüksek olmalıdır. Bu durum buzun sıcaklığının atırılması veya gazın basıncının düşürülmesiyle denge durumundan uzaklaştırılarak elde edilebilir [153]. Süblimleşme işlemi denge şartlarında veya denge şartlarına çok yakın gerçekleştiğinde, sıcaklık ve basınç arasındaki ilişki Clausius-Claperyon eşitliğiyle açıklanabilir.

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{sub}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (5.2)$$

Burada; P (basınç), T (mutlak sıcaklık) sıcaklığına bağlı olarak doymuş buhar basıncı, ΔH_{sub} süblimleşme gizli ısıdır [153, 157]. Clausius-Claperyon eşitliği aynı zamanda süblimleşme gizli ısının birinci durumdan, ikinci duruma kadar ki aralığın üzerinde sabit olduğunu varsayar.

Bu eşitlik ara yüzeyde buzun sıcaklığı verildiğinde süblimleşme ara yüzeydeki buhar basıncının belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak gizli ısı, sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu için, Şekil 5.2'deki eğri üzerindeki sıcaklık fonksiyonunun belirlenmesi ve Clausius-Clapey eşitliğinde yerine kullanmak daha uygundur [153].

5.4. Kinetik Teorisi ve Süblimleşme Oranı

Termodinamik, süblimleşme için gerekli koşullar hakkında bilgi sağlar, ancak denge koşullarında olmayan süblimleşmenin gerçek oranının belirlenmesi için bir yol göstermez. Bu bilgiyi elde etmek için kinetik teoriye bakılmalıdır.

Kinetik teoride, bir maddenin durumu moleküler seviye üzerinde tarif edilir. İç moleküler kuvvetler ve moleküllerin kinetik enerjisiyle belirlenir. Bir sistemdeki moleküllerin tümü farklı kinetik enerjilere sahiptir ve bir kinetik enerji dağılımı vardır. Bir sistem, kinetik enerji dağılımı ve moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin sonucunda tarif edilebilir.

Katı maddede moleküllerin ortalama kinetik enerjisi (molekülleri birbirine bağlayan iç moleküler kuvvetlerle ilgili enerjisi) daha azdır. Ancak süblimleşen katının yüzeyinde kinetik enerji dağılımı bu iç moleküler kuvvetlerin üstesinden geçerek yüzeyden ayrılacak yeterli enerjiye sahiptir. Yüzeyden ayrılacak enerjiye sahip moleküllerin yüzdesi, katı maddenin sıcaklığı ile artar.

Süblimleşen katının, yüzeyinde gaz molekülerine dönen moleküllerin miktarı gaz basıncı ile belirlenir. Gaz basıncı, gazdaki moleküllerin sayısı, gazın kapladığı hacim ve gazın sıcaklığı ile belirlenir. Daha yüksek basınçta, katıya dönüşen moleküllerin oranı artar.

Buzun süblimleşme oranını en üst seviyeye çıkarmak için kontrol edilebilecek iki uygun değişken vardır. Bunlar buzun süblimleşme yüzeyinin üst su buharının basıncı ve buzun sıcaklığıdır. Basıncın düşürülmesi, süblimleşme yüzeyinden daha fazla sayıda gaz moleküllerin ayrılmasını sağlarken, sıcaklığın arttırılması sonucu daha fazla molekül yüzeyden ayrılır. Bu durumda, süblimleşme ara yüzünden sürekli molekül akışına neden olur.

Yüksek buz sıcaklığı alçak basınçla birleştiğinde süblimleşme oranı artışı kinetik teoriden görülebilir. Knudesel, kinetik teoriden buzun süblimleşme oranı (G_{ks}) için bir denklem türetmiştir [153].

$$G_{ks} = k_b P_b \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 0 < k_b < 1 \quad (5.3)$$

Burada;

k_b : Buharlaşma katsayısı,

P_b : Buzun doymuş buhar basıncı, (kPa)

M : Su buharının moleküler ağırlığı, (kg/kmol)

R : Gaz sabiti, ($8,31441 \times 10^3$ J/kmolK)

T : Buzun mutlak sıcaklığı, (K).

Bir çok araştırmacı çeşitli sıcaklıklarda buzun k_b 'sını bulmaya çalışmışlar ve genellikle 0,6 ile 1 arasında değişen değerlere ulaşmışlardır [74].

Suyun P-T diyagram eğrisinde bulunan veriler kullanılarak Eşitlik 5.3'te yerine konulduğunda, yüksek buz sıcaklıklarının, yüksek süblimleşme oranlarının meydana geldiğini göstermektedir. Bu yüzden dondurarak kurutma için ideal sıcaklığın, ürün için gerekli olan maksimum müsaade edilebilir sıcaklık olması beklenir. Bu durum dondurarak kurutma uygulamaları arasında en çok bilinenidir [79].

Gerçek bir sistemde, sadece buzun yüzeyini terk eden değil aynı zamanda buza dönen moleküller de olacaktır. Bu yüzden, su buharı kısmi basıncı süblimleşme oranı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Buhar basıncını düşük tutmak için vakum sisteminde yoğunlaştırıcı kullanılabilir. Vakum sistemi içindeki yoğunlaştırıcının etkisi Eşitlik 5.4 ile ifade edilebilir ve P'_k , buharlaştırıcı ortam basıncıdır [153].

$$G_{\text{sub}} = k_b (P_b - P'_b) \left(\frac{M}{2\pi R T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

5.5. Dondurarak Kurutma İşleminin Safhaları

Dondurarak kurutma işlemi üç önemli safhadan oluşur. Bunlar sırasıyla,

1. Dondurma safhası,
2. Birinci Kurutma safhası,
3. İkinci Kurutma safhası'dır [82].

5.5.1. Dondurma safhası

Kurutulacak materyal özelliğine uygun olarak dondurulur. Gıdalardaki su saf halde bulunmaz. Suyun içinde bulunan maddenin özelliği ve konsantrasyonuna göre ötektik değeri değişir. Biyolojik dokular için bu sıcaklık genellikle NaCl'in ötektik değeri olan -21,6 °C alınmaktadır. Dokular bu değerin altındaki sıcaklıklarda dondurulur [99, 151, 152].

Ürün büyük ise ürünün dış kısmındaki çözücü donar fakat iç kısım donmamış olarak kalabilir. Bunun için ürünün içerdiği çözücünün ve katı maddenin tümünün donması gerekir. Çözücünün kristal hale geçmesi büyük önem taşır. Buz kristali oluşmadan sıvıdan camsı katı (camsı oluşum) hale dönüşüm olabilir [99, 152]. Bu yapıdan suyun ulaştırılması zordur. Eğer doku ötektik değerinin üstündeki sıcaklıklarda dondurulursa kristalizasyon sağlanamayacak ve dokunun kurutulması oldukça zorlaşacaktır.

Buz kristallerinin büyüklüğü ile materyalde oluşan gözenekli yapı arasında bir ilişki vardır. Kristaller buhar fazına geçince işgal ettikleri kadar hacimde yer boşaltırlar. Küçük kristaller yapıda az ve küçük gözenekler oluştururlar. Buz kristali küçük olduğunda az gözenekli yapı oluşur. Buz çapı büyüdükçe gözenekli yapıda büyür.

Hızlı dondurma işleminde, küçük buz kristalleri oluşur. Küçük buz kristalleri dondurarak kurutmak zordur fakat bunların süblimasyonu materyalin yapısına daha az zarar verir. Yavaş dondurma işleminde, büyük buz kristalleri oluşur. Büyük buz kristalleri dondurarak kurutmak, küçük buz kristallere göre daha kolaydır. Fakat materyalin yapısına daha fazla zarar verir [152]. Dondurma işleminin sonunda, başlangıçta sistemde bulunan suyun % 65-90'ı donmuş, geri kalan % 10-35 oranındaki su ise bağlı su (donmamış su) olarak bulunur. Materyali dondurma işlemi ya dondurarak kurutma cihaz içinde ya da başka bir dondurucuda yapılabilir.

5.5.2. Birinci kurutma safhası

Donmuş materyallerden çözücünün (genellikle su) düşük basınç altında, katı halde gaz haline geçmesi olayı süblimasyondur. Donmuş tabakadan suyun gaz halinde uzaklaşması olayı buhar konsantrasyon farkı ile oluşur. Süblimasyon ile materyalde uzaklaştırılan su buharı kurutma hücre sine yayılır [152]. Su buharının materyalden sürekli biçimde uzaklaştırılmasını sağlayacak dengesiz şartları oluşturmak için su buharı kurutma hücre sin den yoğunlaştırıcıya vakum vasıtası ile sürekli şekilde taşınır. Böylece kurutma hücre sinin buhar basıncı çözücünün süblimasyonunu sağlayacak şekilde düşük tutulur.

Su molekülleri süblime olurken çok yüksek süblimasyon ısısını (2840 kJ/kg) kurutulacak materyalden alır ve donmuş tabakanın sıcaklığı daha da düşer [99]. Eğer sisteme herhangi bir ısı kaynağından ısı sağlanmazsa ürünün içindeki su buharı kısmi basıncı ile dengeye gelir ve üründen suyun süblimasyonla ayrışması durur. Süblimasyonun devam etmesi için her hangi bir ısı kaynağından sisteme ısı verilmesi gerekir. Kurutulacak materyale ısı, kondüksiyon konveksiyon veya radyasyonla verilir. Kondüksiyon ile ürünün ısıtılması ürünün bulunduğu kabın altında bulunan plakaların ısıtılması ile sağlanır [99, 158]. Sisteme sağlanan ısı gelişi güzel artırılmaz. Dondurarak kurutulmuş tabakanın maksimum sıcaklığı biyoaktiviteyi kaybetmeyecek, rengini değiştirmeyecek, kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlara sebep olmayacak şekilde seçilmelidir [99, 152].

Süblimasyon oranı kısa zamanda hızlı bir şekilde artar. Süblimasyon sonucu kuruyan ve hala donmuş halde olan tabaka arasında bir ara yüzey meydana gelir. Kuruyan alandaki gözenekler buhar akışına karşı direnç oluşturur. Bu direnç süblimasyon oranını azaltır ve zamanla “0”a yaklaşır. Serbest suyun tamamen süblimasyonu ile birinci kurutma periyodu biter. Birinci kurutma periyodu bittiğinde nem miktarı % 7-8 dir [152].

5.5.3. İkinci kurutma safhası

Dondurarak kurutma işleminin en son safhası olan ikinci kurutma safhası donmamış (bağlı) suyun uzaklaştırılmasını içerir. İkinci kurutma safhasında, fiziksel adsorpsiyon, kimyasal adsorpsiyon ve kristalizasyon suyu olarak bulunan bağlı suyun desorpsiyonla uzaklaştırılması işlemidir [147]. İdeal bir dondurarak kurutma işleminde ikinci kurutma safhası hemen birinci kurutma safhasının sonunda başlar. İyi tasarlanmış dondurarak kurutma işleminde birinci kurutma safhası boyunca yalnız donmuş suyun süblimasyonla uzaklaştırılmasını, ikinci kurutma safhası boyunca da yalnız bağlı suyun uzaklaştırılmasını temsil eder. Fakat gerçekte dondurarak kurutma sistemlerinde, az da olsa bir miktar bağlı su, birinci kurutma safhası süresince kurutulacak maddeden uzaklaştırılır.

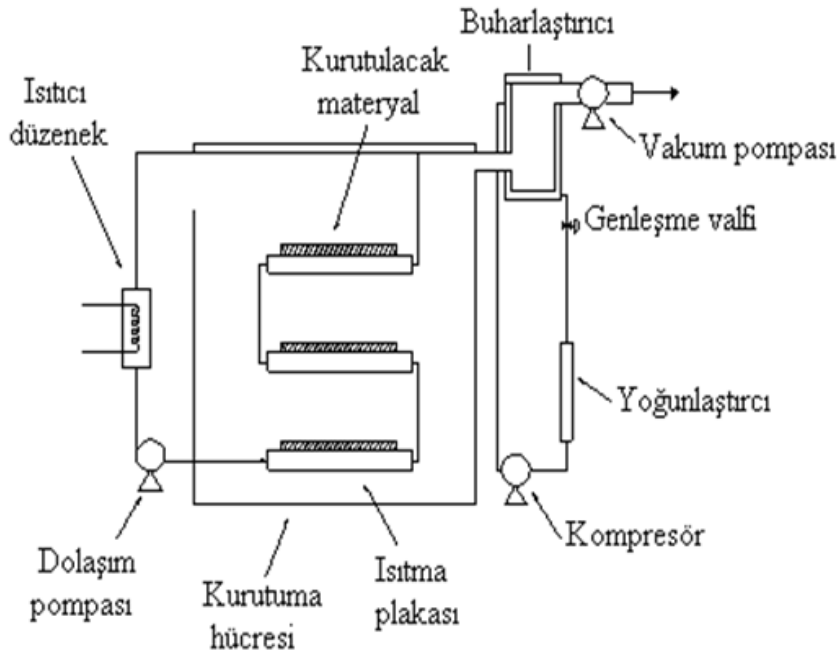
Dondurarak kurutma sistemlerinde, kurutulacak madde içerisindeki bütün donmuş çözücünün süblimasyonla uzaklaştırıldığı an (birinci kurutma safhasının sonu) ikinci safhasının başlangıcı olarak kabul edilir. Böylece ikinci kurutma safhası boyunca kurutulacak maddeden yalnızca bağlı haldeki su uzaklaştırılır.

Materyalde toplam suyun % 65-90'ı serbest haldeki su olup, birinci kurutma safhası boyunca süblimasyonla uzaklaştırılır. Toplam suyun %10-35'i bağlı sudur. Bağlı suyun uzaklaştırılması kurutma hızını ve toplam kurutma süresini etkiler. Bağlı suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zaman serbest suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zamana eşit veya daha uzun olabilir.

Kurutulacak materyalde bulunan bağı su materyale vakum altında ısı verilerek uzaklaştırılır. Birinci kurutma safhasında olduğu gibi, ikinci kurutma safhasında da kurutma süresince materyale verilen ısı gelişigüzel arttırılmaz. Bu ısı ikinci kurutma safhası boyunca ürünlerdeki nemin kontrasyonu sıcaklık ve zaman göre büyük değişiklikler gösterir. Sıcaklığa bağı ürünler için genellikle 10-35 °C arası, sıcaklığa daha az bağı ürünler için ise 50 °C ve üstündeki sıcaklıklar tercih edilir [99].

5.6. Dondurarak Kurutma Sistem Elemanları

Şekil 5.3'de bir dondurarak kurutma sisteminin başlıca üniteleri ile çalışma prensibi görülmektedir. Dondurarak kurutma sistemi; soğutma sistemi, kurutma hücresi, vakum pompası ve ısıtma ünitesi olmak üzere dört kısımdan oluşur.



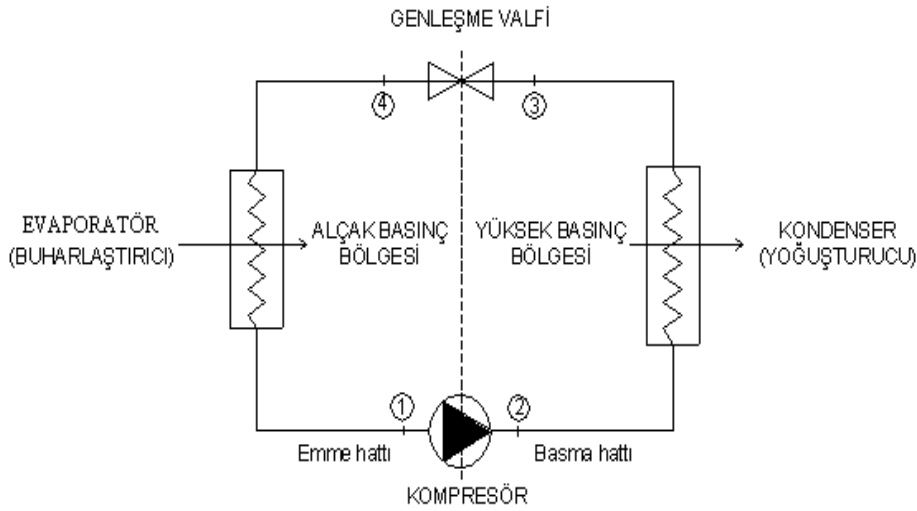
Şekil 5.3. Dondurarak kurutma sistemi şeması

5.6.1. Soğutma sistemi

Dondurarak kurutma sisteminde soğutma sistemi olarak buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi kullanılmaktadır. Buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemi, kapalı bir devre içinde

dolaştırılan soğutucu akışkanın, fiziksel durumunun değiştirilmesi ile yani sıvı halden gaz haline, gaz halinden sıvı haline geçirilmesiyle soğutma yapılan sistemlerdir [159]. Buhar sıkıştırma soğutma sistemi, soğutma sistemlerinin en çok bilinen ve en yaygın olarak kullanılan sistemdir.

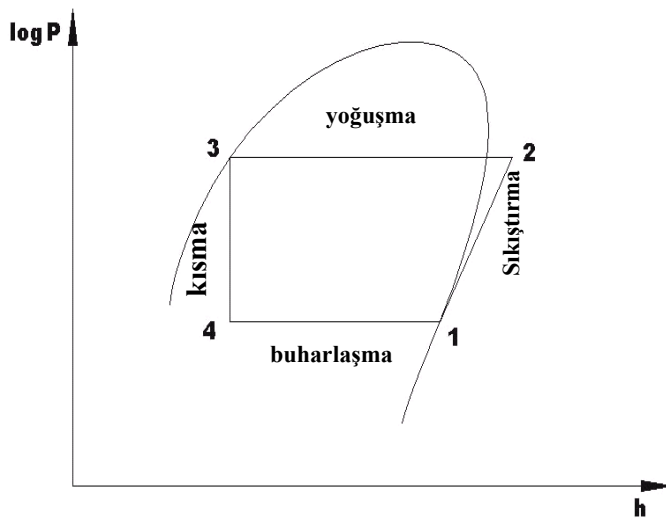
Buhar sıkıştırma soğutma sisteminde soğutucu akışkan buhar halinden sıvı hale, sıvı halden buhar haline dönüşmektedir. Bu dönüşüm, sistem çalışma süresince devam eder. Buhar sıkıştırma bir soğutma sisteminin temel bileşenleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Buhar sıkıştırma soğutma sistemin temel elemanları; kompresör, yoğunlaştırıcı (kondenser), genleşme valfi veya kılcal boru ve buharlaştırıcı (evaporatör) dir [160, 161].



Şekil 5.4. Buhar sıkıştırma soğutma sisteminin elemanları

Sistemde kompresör, buharlaştırıcıdan gelen düşük basınçtaki doymuş buhar halinde olan soğutucu akışkanı sıkıştırarak basıncını ve sıcaklığını yükseltir [162]. Kompresörden yüksek basınçta çıkan soğutucu akışkan yoğunlaştırıcıya gelir, burada çevreye ısı (yoğunlaşma gizli ısısı) atarak yoğunlaşır. Yoğunlaştırıcıdan sıvı olarak çıkan soğutucu akışkan bir genleşme vanası veya kılcal borudan geçirilerek basıncı düşürülür.

Düşük basınçta buharlaştırıcıya giren akışkan burada buharlaşır. Buharlaşma gerçekleşirken soğutulan ortamdan ısı (buharlaşma gizli ısı) çekilir ve böylece soğutma olayı gerçekleşmiş olur. Buharlaştırıcıdan çıkan buhar fazındaki soğutucu akışkan düşük basınçta tekrar kompresöre girer ve çevrim devam eder. Buhar sıkıştırılmalı ideal soğutma çevriminin Şekil 5.4 üzerindeki rakamlara göre, logP-h diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Buhar sıkıştırılmalı ideal soğutma çevriminin P-h diyagramı

Şekil 5.5'teki logP-h diyagramında buhar sıkıştırılmalı soğutma çevrimindeki soğutkanın çevrim sırasındaki safhaları diyagram üzerinde belirtilen sayılar yardımıyla aşağıda anlatılmıştır.

- 1 – 2 Doymuş buharın bir kompresör yardımıyla buharlaşma basıncından yoğunlaşma basıncına sıkıştırılması (Tersinir adyabatik sıkıştırma),
- 2 – 3 Sabit basınçta ısının dışarıya atılarak yoğunlaştırılması (doymuş sıvı haline kadar),
- 3 – 4 Isı ve iş alışverişi olmaksızın, akışa direnç gösteren bir kısma elemanından genleşme geçirilerek, sıvının basıncının yoğunlaşma basıncından buharlaşma basıncına düşürülmesi (Sabit entalpide tersinmez genişleme) (kısma),
- 4 – 1 Sabit basınçta ısının ortamdan çekilerek buharlaştırma (Tersinir ısı çekilmesi), olarak gerçekleşir [109, 163, 164].

Soğutulan ortamdan (Q_s), buharlaştırıcı tarafından çekilen ısı, soğutma yüküne eşittir.

$$Q_s = Q_b$$

Buharlaştırıcının kapasitesi;

$$Q_b = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (5.5)$$

$\dot{m}$: Soğutucu akışkanın kütleli debisi, (kg/s)

Q_b : Buharlaştırıcı kapasitesi, (kW)

h_1 : Kompresör girişindeki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

h_4 : Buharlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg).

eşitliği ile bulunur [165].

Soğutucu akışkanın kütleli debisi;

Eşitlik 5.5 kullanılarak buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisi bulunur. Bulunan soğutucu akışkan debisi Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8’de yerine konularak yoğunlaştırıcı ve kompresör kapasiteleri bulunur. Buhar sıkıştırımlı soğutma sisteminde dolaşan soğutucu akışkanın kütleli debisi;

$$\dot{m} = \frac{Q_s}{Q_b} = \frac{Q_s}{h_1 - h_4} \quad (5.6)$$

eşitliği ile bulunur [166].

Yoğunlaştırıcı kapasitesi;

$$Q_y = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (5.7)$$

Q_y : Yoğunlaştırıcı kapasitesi, (kW)

h_2 : Kompresör çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

h_3 : Yoğunlaştırıcı çıkışındaki soğutucu akışkanın özgül entalpisi, (kJ/kg)

eşitliği ile bulunur [167].

Kompresör için gerekli iş:

$$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (5.8)$$

$\dot{W}$: Kompresör gücü, (kW)

eşitliği ile bulunur [161].

5.6.2. Kurutma hücresi

Dondurarak kurutma işleminde, ürünün kurutma olayının gerçekleştirildiği ünedir. Kurutma hücresi kurutma işlemi süresince vakumlanmaktadır. Kurutma hücresinde kurutulacak ürünün yerleştirileceği tepsi ile süblimleşme işleminin gerçekleşmesi için gerekli olan ısıyı sağlayan ısıtma ünitesi bulunmaktadır. Kurutma hücre paslanmaz ve dış basınçtan etkilenmeyen malzemeden yapılmalıdır. Ayrıca kurutma işlemini gözlemek için bir adet gözetleme camı bulunmalıdır.

5.6.3. Vakum pompası

Donmuş materyalde bulunan buzun sıvılaşmadan buharlaşması (süblimasyon) için kurutma hücresindeki gerekli vakumu sağlayan elemandır. Vakum pompası ürünün içinde bulunduğu kurutma hücresindeki havayı vakumlayarak kurutma hücresinde düşük bir basınç meydana getirir. Bu düşük basınçta suyun üçlü faz dediğimiz durumundaki basıncından daha düşük bir basınç olmalıdır ki üründeki su sıvılaşmadan buharlaşmayı sağlamalıdır.

Vakum pompasının hacimsel hızı:

Vakum pompasının hacimsel hızı Eş. 5.9'e göre hesaplanır.

$$S = \eta \frac{V_k}{t_b} \ln \left[\frac{P_{atm}}{P_b} \right] \quad (5.9)$$

- S : Vakum pompası hızı, (m³/s)
 η : Vakum pompası verimi,
 V_k : Kurutma hücresinin hacmi, (m³)
 t_b : Buharlaştırma süresi, (s)
 P_{atm} : Atmosfer basıncı, (Pa)
 P_b : Buharlaştırma basıncı, (Pa),

Vakum pompası debisi:

$$\dot{m} = S \cdot \rho_k \quad (5.10)$$

- $\dot{m}$: Vakum pompasının kütleli debisi, (kg/s)
 ρ_k : Kurutma hücresindeki havanın yoğunluğu, (kg/m³)

eşitliği ile hesaplanır.

$$\rho_k = \frac{P_k \cdot M_k}{R \cdot T_k} \quad (5.11)$$

- P_k : Kurutma hücresi basıncı, (Pa)
 M_k : Kurutma hücresindeki havanın molekül ağırlığı, (kg/mol)
 R : Gaz sabiti, (8,314x10³ J/molK)
 T_k : Kurutma hücresinin mutlak sıcaklığı, (K) [168, 169].

5.6.4. Isıtma ünitesi

Kurutma sırasında üründen süblimasyonla alınan ısı, bir ısıtma düzeniyle devamlı olarak ürüne verilir. Gıda dıştan içeri doğru kurur. Merkezde en son kalan buz da süblimasyona uğrayınca ürün tümüyle kurumuş olur. Kurumanın bu şekilde gelişmesi nedeniyle dondurarak kurutmada derinlerde kalmış buz tabakasına ısıнын ulaştırılmasının oldukça zor olduğu görülmektedir. Isının, kurumuş bu yalıtkan tabakayı aşması oldukça zordur. Bu nedenle dondurarak kurutma yönteminde bir süre sonra kuruma hızı yavaşlamaktadır.

Daha iyi bir ısıtma için, iletimle ısıtmadan çok, derinliklere sızma özelliği olan infrared veya mikrodalga gibi, radyasyon kaynaklarından yararlanılmaktadır [114]. Basınç ve sıcaklık değerlerine göre verilmesi gereken süblümleşme ısı miktarları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine bağımlı olarak değişimi

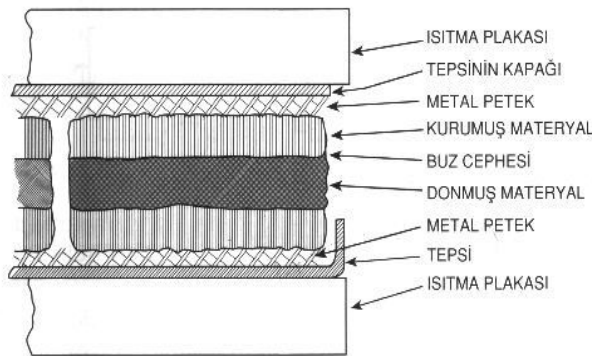
Basınç (kPa)	Buharlaşma sıcaklığı (°C)	Buharlaşma ısısı (MJ.kg ⁻¹)
101,3 (atm)	100	2,27
2,5	21,1	2,45
1,3	1,1	2,47
0,7	0,1	2,49
0,29	-10	2,51
0,13	-19,8	2,51

5.7. Dondurarak Kurutma Sisteminin Çalışma Prensibi

Bu yöntemde kurutulacak materyal önce dondurulmakta; böylece içindeki su buz olarak bağlanmakta daha sonra da bu buz uygun şartlar altında (vakum) buharlaştırılmaktadır. Dondurarak kurutma işlemi "dondurma" ve "kurutma" olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

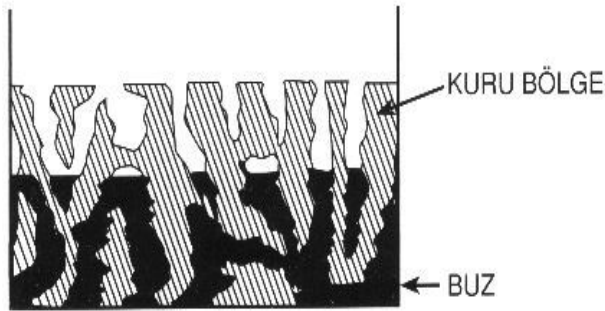
İlk aşamadaki dondurma işlemi, herhangi geleneksel bir dondurma düzeneğinde gerçekleştirilebilir. Uygulanan dondurma hızı, kurutulmuş ürünün rekonstitüsyon özellikleri son derece etkilidir. Dondurma işlemi ne kadar hızlı olursa, o kadar küçük ve fazla sayıda buz kristali oluşacağından, kurumuş üründe o kadar fazla gözenek ortaya çıkar. Böylece ürünün rehidrasyon hızı yüksektir ve rehidrasyon tamdır. Rehidrasyon, kurutulmuş ürüne tekrar su verildiğinde ürünün tekrar kurutma önceki haline dönüşebilmesidir. Bununla birlikte ön hazırlıklardan sonra kurutulacak ürünler, genellikle 0,5-3,0 cm/h hızla -20 °C ile -30 °C'ye kadar dondurulur.

Dondurarak kurutmada en önemli sorunlardan birisi kurutulacak ürüne ısı verilmesidir. Kurutulan ürünün sıcaklığı daima yoğunlaştırıcı sıcaklığından daha yüksek tutulmak zorundadır. Ancak bu koşulla kurutulan üründen yoğunlaştırıcıya doğru bir buhar akışı sağlanabilir. Dondurarak kurutmada kurutulan ürün devamlı ısıtılması gerekmektedir. Şekil 5.6'da dondurularak kurutulan bir ürünün kuruma sırasında plakalı ısıtıcılarla ısıtılması görülmektedir [114].



Şekil 5.6. Dondurarak kurutmada gıdanın iletimle ısınması

Plakalı ısıtmada olduğu gibi iletimle ısıtmada, süblimleşmiş buharın çıkışını kapatmamak için, ısıtılan gıda doğrudan plaka üzerine yapışacak şekilde yerleştirilmez. Gıda ile plaka arasında daima ısıyı ileten fakat buharın hareketini engellemeyen, metalden yapılmış bir petek bulunur. Süblimasyon önce yüzeyde oluşur. Bu şekilde yüzeyin kuruması ile buz tabakası gittikçe içlere doğru geriler (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Dondurularak kurutmada gözenekli yapı oluşumu

Bazı dondurarak kurutma cihazlarında ısıtıcı plakalar çivili olarak yapılmıştır. Böylece kurutulan maddenin derinlerine kadar ulaşan bu çivilerle daha iyi bir ısı transferi sağlanarak kuruma hızlandırılmaktadır [99, 114].

5.8. Dondurarak Kurutmanın Uygulama Alanları

Geleneksel kurutma yöntemleri ile kurutulmaları zor olan kahve, soğan, çorba, bazı deniz ürünleri ve meyve gibi bazı gıda maddeleri dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulmaktadır.

İlaç sanayinde de dondurarak kurutma yöntemi uygulanmaktadır. Bazı ilaçlar solisyon halindeyken zamanla bozulmaya uğrayabilir. Bozulmaya eğilimli ilaçlar üretimin ardından dondurarak kurutulup molekülleri kararlı hale getirilir ve böylece biyoaktiviteleri korunur.

Seramik, süper iletkenler ve tarihsel dokümanlar gibi cansız maddeler de dondurularak kurutulabilir. Diğer bir örnek nükleer atıkların dondurularak kurutulmasıdır. Bu durumda, ortak aktivite kuru toz halinde nükleer atıklara uygun kimyasallar ilave edilerek cam tuğlaların içine eritilerek dökülür ve ucuz depolama imkanı sağlanır [99, 152, 170].

Biyolojik materyallerin uzun süre saklanması bu yöntemle daha kolaydır. Kan plazması, serum, hormon çözeltileri, nakil edilecek organ yada doku, yapay deri bu yöntemle uzun süre saklanabilecek biyolojik materyallerdir. Maya, virüs, bakteri gibi canlı hücrelerin saklanması da bu yöntem kullanılır [99, 152].

Dondurarak kurutma işlemi histolojik çalışmalarda doku örneklerinin mikroskopik görüntüleme için uygun hale getirilmesinde, kimyasal ve biyokimyasal analizler için örnek hazırlanmasında kullanılır. Ayrıca Kemik greflerini oda sıcaklığında saklamak için dondurarak kurutma işlemi uygulanır [152, 171].

5.9. Dondurarak Kurutmanın Avantajları

Dondurarak kurutulmuş ürünlerin kalitesine hiçbir kurutma yöntemi ile ulaşılmamaktadır. Bu nedenle oldukça değerli ve ısıya duyarlı pekçok biyolojik ürünün kurutulmasında dondurarak kurutma ticari boyutlarda uygulanabilmektedir. Diğer taraftan dondurarak kurutulmuş ürünlerin aroma ve beslenme değerleri oldukça yüksek düzeyde korunmaktadır.

Dondurularak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde bünyesine su alarak (rehidratasyon) kurutma öncesi yapısına yeniden kavuşur. Sıcaklığın düşürülmesiyle, mikroorganizmaların ve bakterilerin oluşumunu düşürülerek, gıda maddesinin bozulması önlenir. Ürün içinde bulunan suyun kristalizasyonu, sistemde bulunan suyun miktarının azalması, mikrobiyal gelişmeyi veya bakteri oluşumunu önler.

Dondurarak kurutmanın avantajlarından biri de sıcaklığın çok düşük olması, bağıl nemin düşük olması, lokal olarak su kaybının çok hızlı olması diğer geleneksel kurutma yöntemlerine göre enzimatik reaksiyonları ve proteinlerin bozulmasını en aza indirilmesidir. Ayrıca kurutulacak materyal soğukta saklamaya gerek kalmadan oda sıcaklığında saklanabilir [99, 104, 114, 152].

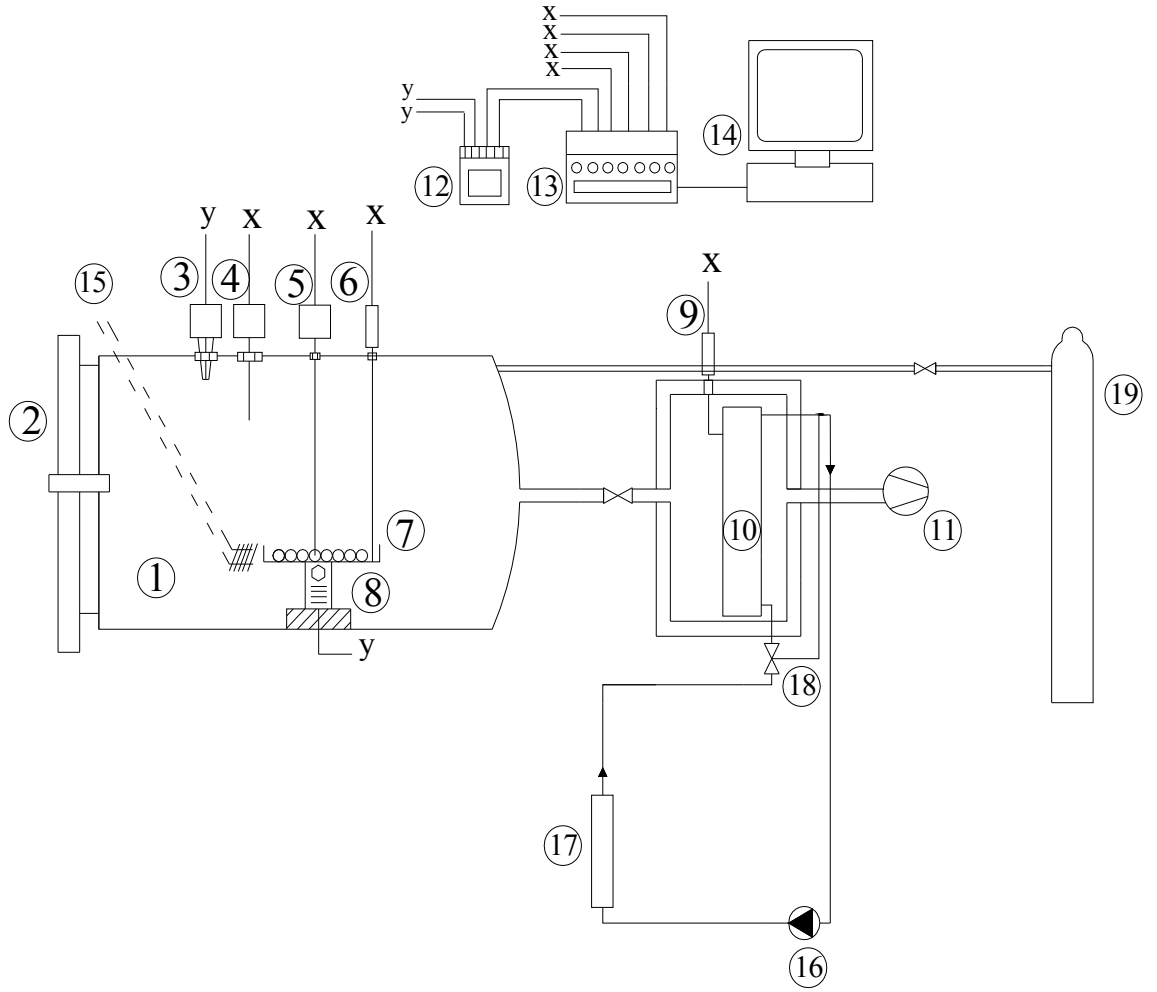
6. MATERYAL VE METOT

6.1. Materyal

6.1.1. Deneysel sistem

İmalatı yapılan dondurarak kurutma sisteminin şematik görünüşü Şekil 6.1’de verilmiştir. Sistem dört ayrı ünite olarak düşünülmüştür. Bu üniteler sırasıyla, kurutma hücresi, soğuk panel, vakum pompası ve deney ölçüm cihazlarıdır. Dondurarak kurutma sistemi, kurutma hücresi, soğuk panel, vakum pompası ve deney ölçüm cihazların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur.

Ürünü dondurmak için $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ kadar soğutulabilen ve net hacmi 283 litre olan bir adet derin dondurucu temin edilmiştir. Ayrıca dondurarak kurutma sisteminde ürünün süblümleşme ısını temin etmek için 2 kademedan oluşan 1000 W’lık bir elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Kullanılan elektrikli ısıtıcıyı kontrol etmek amacıyla 220 V ile çalışan 3,5 kW’lık bir adet dimen (akım ayarlayıcı) kullanılmıştır.



- 1 Kurutma hücresi
- 2 Plexiglas kapak
- 3 Basınç transmitter
- 4 Nem ve Sıcaklık Transmitter
- 5 Pt-100 tipi termokopule (çilek)
- 6 J tipi termokopule (tepsi)
- 7 Tepsi
- 8 Load-cell
- 9 J tipi termokopule (buharlaştırıcı)
- 10 Buharlaştırıcı

- 11 Vakum pompası
- 12 Signal çevirici/E-700
- 13 Data-logger/E-680
- 14 Bilgisayar
- 15 Elektrikli ısıtıcı
- 16 Komresör
- 17 Yoğunlaştırıcı
- 18 Termostatik genişleme valfi
- 19 Azot tüpü

Not: Y sembolü ölçüm cihazları önce sinyal çeviriciye sonra data-logera, X sembolü olanlar ise direkt olarak data-logger'a girmektedir.

Şekil 6.1. Deneysel sistemin şematik görünüşü

Kurutma hücresi

Kurutma hücresi, 37 cm çapında, 45 cm uzunluğunda ve 3 mm kalınlığında 18/10 krom nikel paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Kurutma hücresinin bir yan yüzeyi bombeli diğer yan yüzeyi ise ürünü yerleştirmek ve kurutma sırasında ürünü gözlemek için plasisglas malzemeden menteşeli kapak şeklinde yapılmıştır. Kurutma süresince ağırlık değişimini izlemek için bir load cells monte edilmiştir. Load cells üzerine 200x200x1 mm ölçüsünde bir tepsi yerleştirilmiştir. Kurutma sırasında süblümleşme için gerekli olan ısıtıcı bu tepsinin 5 cm yanına yerleştirilmiştir. Kurutma hücresi üzerinde toplam yedi adet bağlantı ucu bırakılmıştır.

Bunlar sırasıyla; ürünün sıcaklığı ile kurutma hücrenin sıcaklık değişimini gözlemek için üç adet bağlantı ucu, kurutma hücresini vakumlamak için bir adet vakum pompası bağlantı ucu, hücre içindeki basıncı ölçmek için bir adet bağlantı ucu, kurutma işlemi sırasında kurutulan ürünün ağırlık değişimini gözlemek için bir adet load cells bağlantı ucu, kurutma sonunda hücre içindeki vakumu kırmak ve üründe nemin uzaklaşması sonucu oluşan gözeneklerin tekrar nem ile dolmasını engellemek üzere bir adet azot tüpü bağlantı ucudur.

Soğuk panel

Soğuk panel vakum pompası ile kurutma hücresi arasına yerleştirilmiştir. Vakum pompasının önüne yüzey sıcaklığı yaklaşık -45 °C sıcaklığında 1/2 HP gücünde bir yoğunlaştırma hücresi (evaporatör) yerleştirilerek soğutma devresi oluşturulmuştur. Soğutma devresinde soğutucu akışkan olarak R404A kullanılmıştır. Bu soğutma sisteminin yerleştirilmesinin iki amacı vardır. Birinci amacı süblümleşme ile kurutma hücresinde oluşan buharı yoğunlaştırarak hacim azalması sonucunda kurutma hücresi basıncının yükselmesini engellemek; diğeri ise, buharı buz fazında tutarak vakum pompasında yoğuşmasını engelleyerek vakum pompasını korumaktır.

Vakum pompası

Dondurarak kurutma sisteminde kullanılan vakum pompası, vakum değerlerini karşılayacak Vacuubrand marka, RC 5 Tipi vakum pompası yerleştirilmiştir. Vakum pompasının teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

Vakum Pompası Özellikleri:

1. Kimyasal Hybrid pompa,
2. Vakum basıncı; 2×10^{-3} mbar,
3. Gaz balanslı vakum basıncı; 4×10^{-4} mbar,
4. Pompa debisi; $5,6 \text{ m}^3/\text{h}$,
5. Motor gücü; 0,37 kW,
6. Yağ kapasitesi 0,35 L,
7. Su buharına karşı dirençlidir.

6.1.2. Ölçüm cihazları

Nem ve sıcaklık transmitteri

İmalatı yapılan kurutma sisteminde nem ve sıcaklık değişimini belirlemek için, tek yongalı bağlı nem ve sıcaklık sensör modülü kullanılarak tasarlanmış mikroişlemci tabanlı 1 adet Elimko marka, E-RHT-10-2-0-2-1-2-2-Ö tipi Nem ve Sıcaklık Transmitteri kullanılmıştır.

E-RHT-10-2-0-2-1-2-2-Ö tipi Nem ve Sıcaklık Transmitterinin Özellikleri:

1. Tek yongalı bağlı nem ve sıcaklık sensör modülü kullanılarak tasarlanmış mikroişlemci tabanlı,
2. Sensör nem ve sıcaklık bilgilerinin 12/14 bit seri sayısal çıkış biçiminde okunmasını sağlar,

3. Tek yongalı sensor, bağıl nem ve sıcaklık için kalibre edilmiş iki mikrosensör içerir,
4. Transmitter su geçirmez,
5. Nem ölçümü $\pm 2\%$ doğrulukta,
6. Nem ölçüm aralığı 0-100 % RH,
7. Nem ölçme tepki süresi 4 s,
8. Sıcaklık ölçümü $\pm 1\%$ doğrulukta,
9. Sıcaklık ölçüm aralığı $-40^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$,
10. Sıcaklık ölçüm tepki süresi 30 s,
11. Ölçüm prob boyu; 20 cm olacak, istendiğinde boyu uzatılabilir yapıda,
12. Çıkış 2 adet 4-20 mA (1 adet sıcaklık, 1 adet nem için),
13. Prob filtresi sinterlenmiş bronz,
14. Besleme; 85-265 VAC/85-375 VDC,
15. Bağlantı; $\frac{1}{2}$ " NPT sıkmalı rekor.

Basınç transmitteri

İmalatı yapılan kurutma sisteminde kurutma hücreesindeki vakumu ölçmek için ABB marka, LKTNAH tipi bir adet Basınç Ölçüm Transmitteri seçilmiştir.

Basınç Ölçer Transmitter Özellikleri:

1. Ölçüm hassasiyeti: $\pm 0,075\%$
2. Uzun ömürlü zaman ve dış etkenlerle bozulmayan kalibrasyon,
3. Mikroişlemci tabanlı,
4. Basınç ölçüm aralığı -1000 mbar $\sim$ 2500mbar,
5. Kalibrasyon -1000/0 mbar,
6. Çıkış; 4 – 20 mA, 2 telli,
7. Besleme; 10,5 - 42 VDC,
8. Proses bağlantısı $\frac{1}{2}$ " NPT-erkek.

Ağırlık ölçer

Tasarlanan dondurarak kurutma sisteminde kurutma işlemi süresindeki ağırlık değişimi ölçmek için BLM marka load cell ve Elimko marka elektronik çevirici kullanılmıştır.

Load cell'in teknik özellikleri:

1. Ölçüm hassasiyeti: 0,01
2. Doğruluk sınıfı: C3,
3. Çalışma sıcaklığı: -30 °C ~ 85 °C.

Su aktivitesi ölçüm cihazı

Kurutma sonundaki çileklerin su aktivitesinin belirlenmesinde Testo 650 tip su aktivitesi ölçme cihazı kullanılmıştır.

Su aktivitesi ölçme cihazının teknik özellikleri:

1. a_w değeri 0–1,
2. Ölçüm hassasiyeti: 0,001.

Data logger

İmalatı yapılan kurutma sisteminde mikro kontrolör data logger kullanılmıştır. Bu data logger 96x192 mm boyutlarında IEC 668 standardına uygun universal giriş ve çıkışları kullanıcı tarafından programlanabilen, 32'ye kadar değişik noktadan alınan ölçümleri göstergesinde gösteren ve ölçümleri her kanal için programlanabilen iki set noktasıyla karşılaştırma sonucuna göre alarm durumlarını belirleyen, ölçüm bilgilerini RS 485 bağlantıyla merkezi bir bilgisarayda toplayıp kaydedebilen özelliktedir.

Data Logger Özellikleri:

1. 16 bit çözünürlükte yüksek okuma hassasiyeti,
2. Sonsuz ömürlü zaman ve dış etkenlerle bozulmayan kalibrasyon,
3. Standart RS485 mod bus iletişim ara yüzü,
4. Gösterme ve tarama aralıklarını programlama olanağı,
5. Birden fazla cihazı (31 adet) aynı iletişim hattı üzerinden bilgisayara bağlama olanağı,
6. Gerçek anlamda dağıtılmış sistem (distributed) yapısı,
7. Doğruluk sınıfı 0,5
8. 1/9999 gösterge ayrımı,
9. 9 dijital LED (14 mm),
10. 0,2 – 9,9 saniye / kanal giriş seçme aralığı,
11. 1-99 saniye/kanal gösterge tarama aralığı,
12. Besleme; 85-265VAC/85-385VDC,
13. Giriş kanal sayısı 16,
14. RS 485/232 dönüştürücülü.

Bilgisayar Program Özellikleri:

1. Ayarlanabilir kayıt hızı,
2. Bar grafik ve çizgisel kayıt,
3. Verileri Excel ortamına aktarabilme,
4. Verileri kayıt hızına göre otomatik olarak yedekleme,
5. Yedekleme alınan dosyalarını (geçmişe dönük kayıtlar) izleyebilme.

6.2. Metot

6.2.1. Çileğin tam kuru ağırlığının belirlenmesi

Deneylere başlamadan önce temin edilen çileklerin tam kuru ağırlığının belirlenmesi için ön hazırlık işlemleri yapılmıştır. Tam kuru ağırlığın belirlenmesindeki prensip, sıcaklığı kontrol edilebilen bir etüv fırınında 70 ± 2 °C'da, çevre basıncında 6 şar saat süre ile kurutulması sonunda meydana gelen kütle kaybına dayanarak nem oranını belirlenmek için aşağıdaki işlemler sırasıyla yapılmıştır.

- a) Temin edilen çilekler kalınlıkları 3-5 mm arasında olacak şekilde dilimlenmiştir.
- b) Dilimlenmiş çilekler 70 ± 2 °C sıcaklık değerinde, kurutma fırınında kurutulmaya alınmıştır.
- c) Kurutma periyotları süresince ağırlık değişimi her 6 saatte bir takip edilerek değerler kaydedilmiş ve en son iki ölçüm arasındaki fark % 1'den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ölçümler 0,001 g ölçme hassasiyetindeki Cass 419 marka dijital hassas terazi ile yapılmıştır. İki ölçüm arasındaki fark %1'den daha az olduğu durumda çilekler tam kuru kabul edilmiştir.
- d) Bu işlemler 4 ayrı numune için ayrı ayrı yapılarak, tam kuru ağırlık değeri olarak bu dört değerın ortalaması alınmıştır.

Çileğin kuru baza göre başlangıç nem miktarı aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir [123].

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

Burada;

S_{KA} : Üründeki kuru ağırlığa göre su oranı, (g su/g kuru ağırlık)

KA: Kuru ağırlık, (g)

YA: Yaş ağırlık, (g).

6.2.2. Çileklerin kurutmaya hazırlanması

İmalatı yapılan kurutma cihazında kurutulacak numune olarak çilek seçilmiştir. Çileğin seçilmesindeki amaç içerisinde ihtiva ettiği su miktarının yüksek ve yumuşak bir dokuya sahip olmasıdır. Çileğin sahip olduğu yumuşak doku kurutma süresinde süblimleşme işleminin kolay bir şekilde olacağı düşünülmektedir. Kurutulacak çilek marketten satın alınıp, çürük, ezik ve yapısı bozuk olanlar ayıklanmış ve suyla yıkanarak temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra çilekler 5 ve 7 mm kalınlığında dilimlenmiştir. Dilimlenen çilekler, kurutma işlemi öncesi su aktivitesi değerleri ölçülmüştür. Daha sonra -30 °C'lik derin dondurucuya konmuş ve dondurulmuştur.

6.2.3. Çileklerin kurutulması

Başlangıç nem miktarları belirlenmiş olan çilekler, dondurarak kurutma cihazının kurutma hücresinin merkezine yerleştirilmiş olan load cell üzerinde bulunan tepsi üzerine hızlı bir şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra kurutma hücresinin kapağı kapatılarak vakum pompası çalıştırılmış ve kurutma hücresinin vakumlama işlemi başlatılmıştır.

Vakum pompasının çalıştırıldığı anda, vakum pompasının önünde bulunan soğuk panelin içindeki buharlaştırıcı yüzey sıcaklığı -40 °C'dir. Kurutma işlemi sürecinde, kurutma hücresinin basıncı ortama 6 mbar olup, donmuş çilekteki buz süblime oldukça yoğunlaştırıcı yüzeyinde tekrar buz fazına gelmektedir. Kurutma işlemi süresinde, kurutma hücresinin ortam sıcaklığı 22 °C'den 31,9 °C'ye kadar kontrollü olarak elektrikli ısıtıcı yardımıyla yükseltilmiştir.

Kurutma hücresinin ortam sıcaklığının yavaş yavaş yükseltilmesindeki amaç dondurulmuş çilekte bulunan buzun erimesini ve çileğin kavrulmasını engellemektir.

Kurutma işlemi esnasında aşağıda verilen kurutma sistemine ait veriler her dakikada bilgisayara kaydedilmiştir.

- Kurutma hücresi ortam sıcaklığı (°C)
- Kurutma hücresi ortam bağıl nemi (%)
- Yoğunlaştırıcı yüzey sıcaklığı (°C)
- Ürün yüzey sıcaklığı (°C)
- Tepsi sıcaklığı (°C)
- Ürünün ağırlık ölçümü (g)
- Kurutma hücresi ortam basıncı (mbar)

6.2.4. Kurutma işleminin bitirilmesi

Kurutma süresinde ağırlık değişimi takip edilerek değerler kaydedilmiş ve en son bir saatteki ölçümler arasındaki fark % 1'den daha az olana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ağırlık değişimi % 1'den daha az olduğu görüldüğünde vakum pompası ve soğutma sistemi durdurularak kurutma işlemi bitirilmiştir. Daha sonra kurutma hücresine bağlı bulunan azot tüpünden, azot verilmiştir. Kurutma hücresinden çıkarılan kurutulmuş çileklerin su aktivitesi değerleri ölçülerek paketlenmiştir.

6.2.5. Kurutma nem oranı ve kurutma sabitlerinin belirlenmesi

Teorik modeller her türlü madde ve koşul için uygulanabilmektedir. Ancak çözümü için gereken eşitliklerin birçok parametre ve karmaşık yapı içermesi bu tür modellerin kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yarı teorik modeller daha az karmaşık olmakla birlikte içerdikleri parametrelerin yalnızca ele alınan ürünlerle ilgili olması, kullanımını kısıtlamaktadır.

Deneysel yollarla elde edilen verilere dayanarak kuruma hızının belirlenmesinde, karmaşık matematiksel eşitlikler yoktur. Ancak elde edilen eşitlikler deneme yapılan numune ve deney koşulları için geçerli olmaktadır. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulunan eşitlik “logaritmik kurutma” denklemi olarak bilinmektedir [135].

Boyutsuz bir terim olan nem oranının (MR) zamanla (t) değişimi aşağıda verilen eşitlikle belirlenebilir.

$$MR = \frac{N_t - N_d}{N_0 - N_d} \quad (6.2)$$

Eşitlikte (N_0) başlangıç nemini, (N_t) t anındaki nemi, (N_d) ise denge nemini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında yer alan kısım, kurutmanın farklı t anlarındaki nem oranı (MR) değerlerini vermektedir. Çizelge 6.1’de nem oranını (MR) açıklamak için kullanılan modellerden bazıları verilmiştir [135].

Çizelge 6.1. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan modeller

Model Adı	Model	Kaynak
Newton	$MR = \exp(-kt)$	[172, 173]
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[174, 175]
Geliştirilmiş Page I	$MR = \exp[-(kt)^n]$	[176, 177]
Geliştirilmiş Page II	$MR = \exp[(-kt)^n]$	[178]
Henderson ve Pabis	$MR = a.\exp(-kt)$	[179, 180]
Logaritmik	$MR = a.\exp(-kt) + c$	[181, 182]
İki terimli	$MR = a\exp(-k_0 t) + b\exp(-k_1 t)$	[183, 184]
İki terimli- eksponansiyel	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-k_a t)$	[185]
Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[186]
Difüzyon Yaklaşım	$MR = a\exp(kt) + (1-a)\exp(k_b t)$	[187]

Deneysel olarak bulunan ve modeller ile tahmin edilen nem oranı değerleri arasındaki uyumu istatistiksel olarak açıklamak amacıyla tahminin standart hatası (RMSE), khi-kare (χ^2) değerleri ile modelin modelleme yeterliliği (R^2) aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilir.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{tahmini}} - MR_{\text{deneysel}})^2 \right]^{1/2} \quad (6.3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{deneysel}} - MR_{\text{tahmini}})^2}{N - z} \quad (6.4)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (MR_{\text{deneysel,ort}} - MR_{\text{tahmin,ort}})^2}{\sum (MR_{\text{tahmin,ort}})^2} \right] \quad (6.5)$$

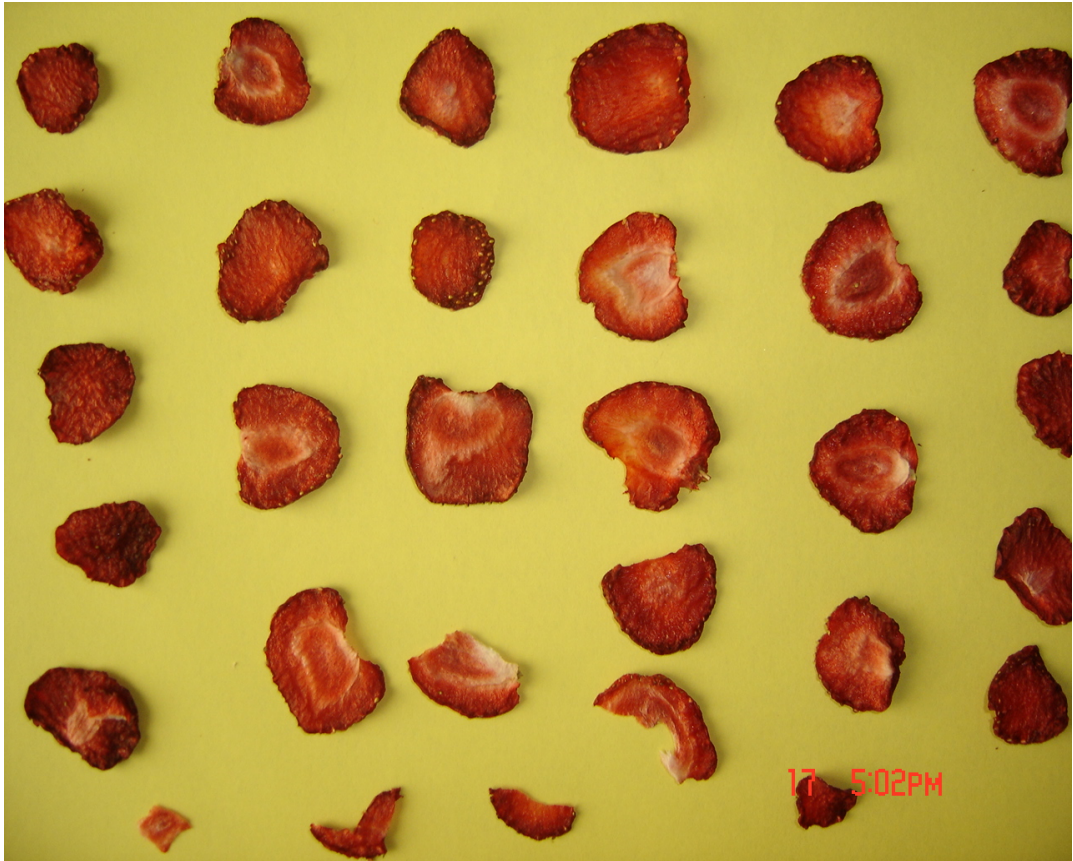
Burada;

- MR_{deneysel} : Deneysel verilerle belirlenen nem oranı,
- $MR_{\text{deneysel,ort}}$: Deneysel nem oran değerlerinin ortalaması,
- MR_{tahmini} : Tahmini nem oranı,
- $MR_{\text{tahmini,ort}}$: Tahmini nem oranı değerlerinin ortalaması,
- N : Deneysel veri sayısı,
- z : Kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

Tahmini standart hata (RMSE), model ile elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerler arasındaki sapmayı göstermektedir. Ayrıca khi-kare (χ^2) değerinin azalması ile uyumun arttığı belirtilmektedir. Bunların yanında deneysel verileri açıklayan modelin modelleme yeterliliği (R^2) değerinin bire yakın olması modelin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir [188-190]. İstatistiksel olarak yapılan değerlendirme sonuçlarına göre en uygun modelde bulunan katsayılar çoklu regresyon yöntemi ile belirlenir [191].

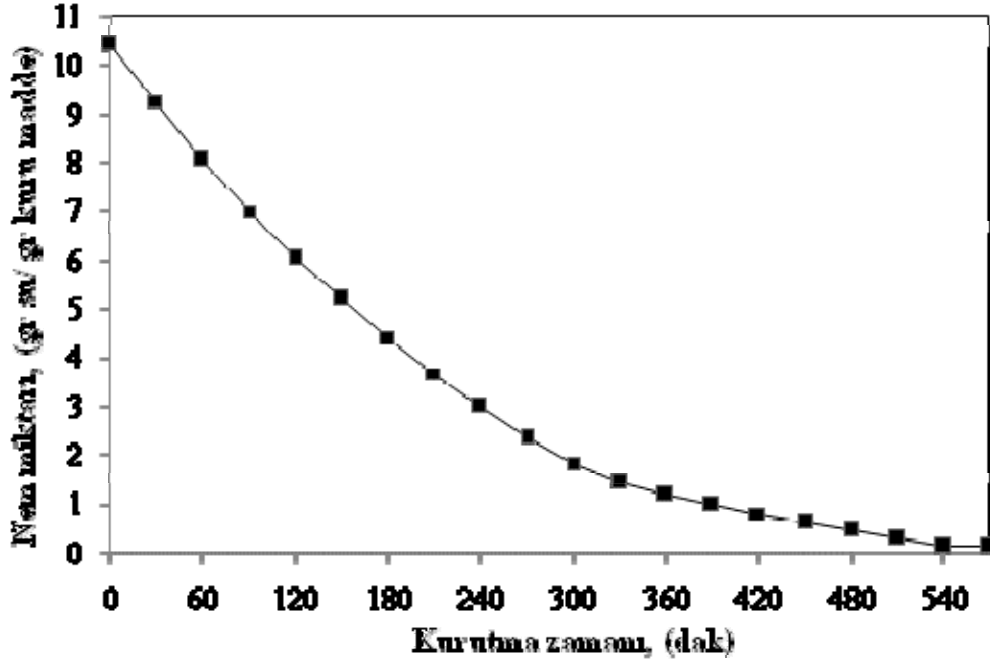
7. DENEY SONUÇLARI

Kurutma işlemi 5 ve 7 mm’lik deney numuneleri için ayrı ayrı gerçekleştirildi. Şekil 7.1’de kurutma işlemi sonrasında elde edilen çilek numunelerinin görünüşleri verilmiştir.



Şekil 7.1. Kurutulmuş çilek numuneleri

Kurutma süresi boyunca çileklerin nem miktarının değişimi her 30 dak için “Eş. 6.1” ile hesaplanmıştır. Şekil 7.2’de 5 mm’lik çileklerin nem miktarının kurutma zamanı ile değişimi verilmiştir.

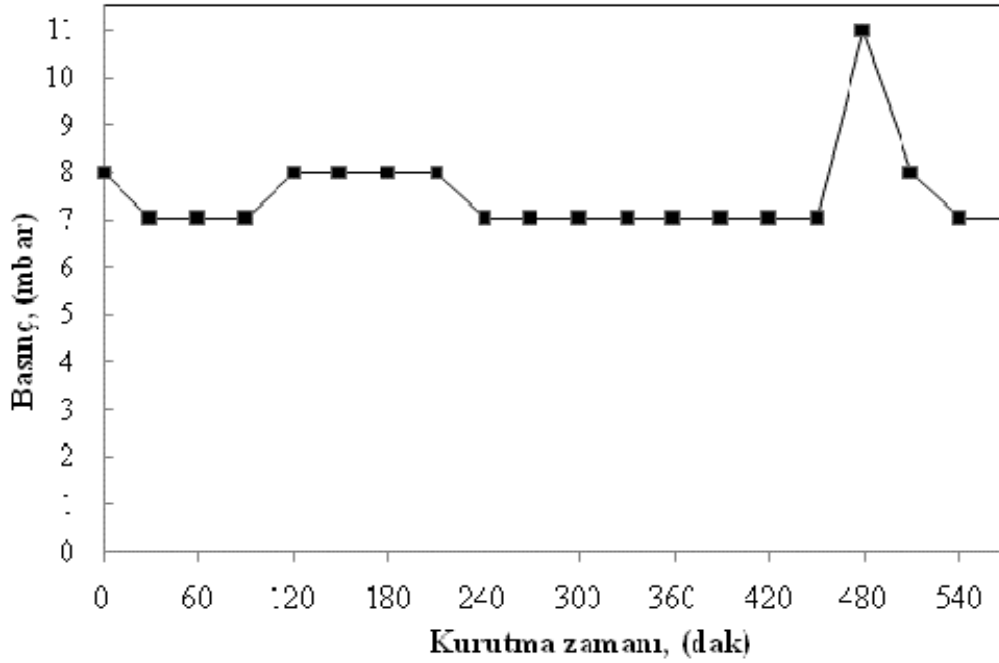


Şekil 7.2. Deney süresince 5 mm kalınlığındaki çileklerin nem miktarının değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi çileklerin başlangıç nem miktarları 10,428 g su/g kuru madde ile 570 dak kurutma zamanı sonunda 0,1 g su/g kuru madde kadar kurutulmuştur.

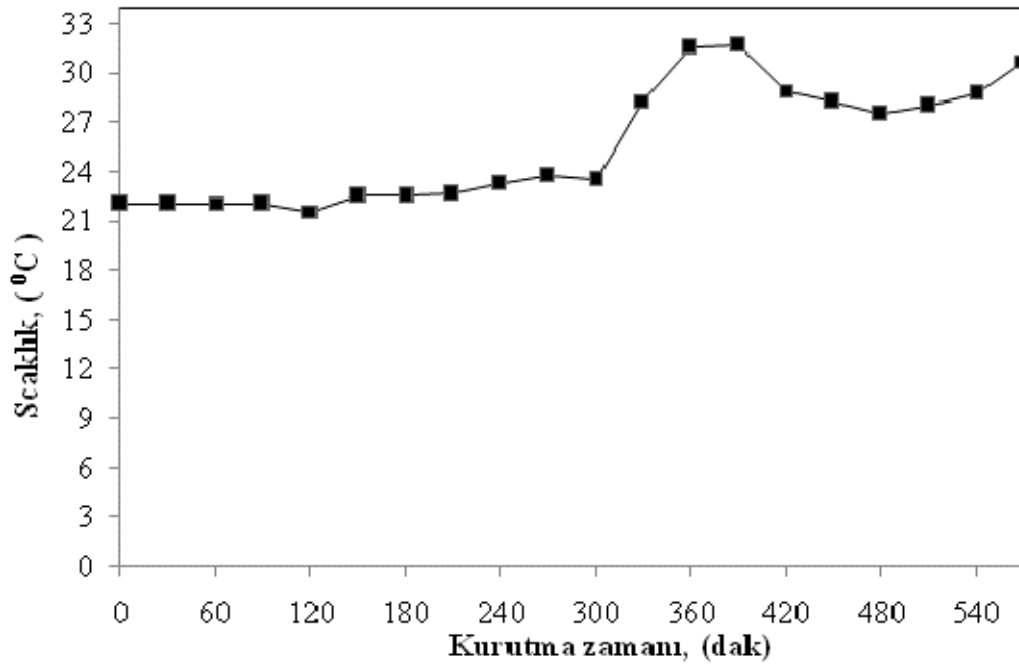
Kurutmanın ilk 300 dak çilekteki ağırlık değişiminin hızlı gerçekleştiği yani çilekteki serbest suyun uzaklaştığı birinci kurutma safhasının gerçekleştiği görülmektedir. Kurutmanın son 270 dak ise çilekte bulunan bağlı suyun uzaklaştırıldığı ikinci kurutma safhası gerçekleşmiştir.

Çileklerin 570 dak kurutma süresindeki kurutma hücresi basıncının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.3'te; kurutma hücresinin sıcaklığının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.4'de; kurutma süresince kurutma hücresinin bağıl nemin kurutma zamanı değişimi Şekil 7.5; kurutma işlemi sırasında çilek sıcaklığının kurutma zamanıyla değişimi Şekil 7.6'da ve kurutma işlemi boyunca buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.7'de verilmiştir.



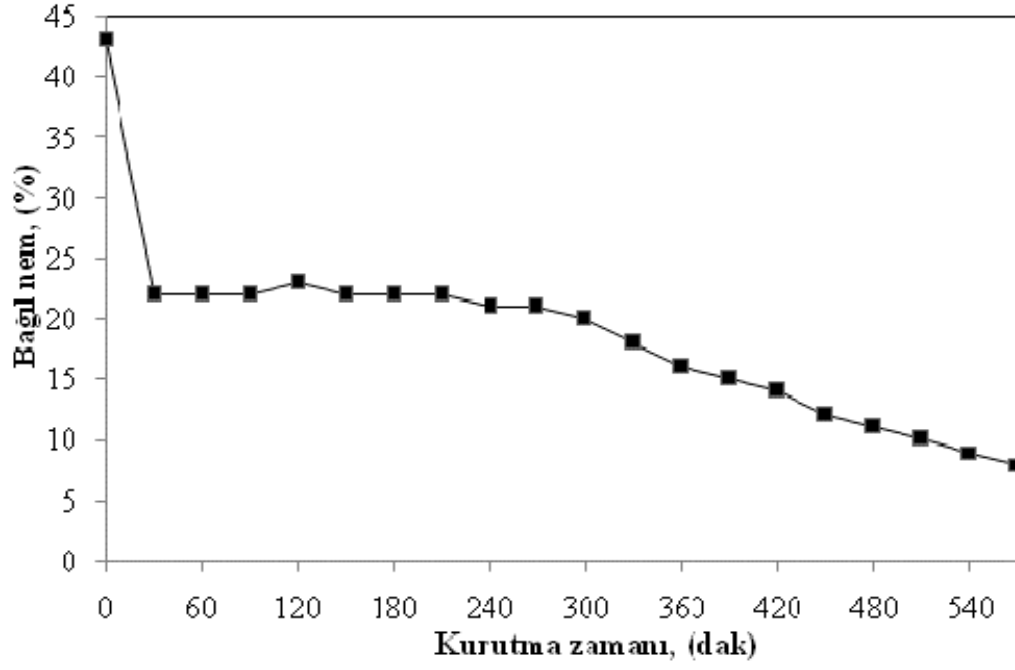
Şekil 7.3. Kurutma hücresinin basınç zaman değişimi

Şekil 7.3'te kurutma işleminin başlangıcında kurutma hücresinin basıncı 8 mbar iken, deney süresince kurutma hücresi basıncı ortalama 7 mbar'dır. Ancak kurutma işleminin ikinci kurutma safasında sırasında 5 mm'lik çileklerin ağırlık değişiminin azalmasıyla 450 dakikada kurutma hücresine azot gazı verilerek basınç 11 mbar basıncına kadar artırılmıştır. Basıncın artırılmasının nedeni; kurutma işlemi sırasında numunede oluşan kuru tabanın düşük basıncın dolayı ısı transferine karşı bir direnç oluşturması ve oluşan bu direnci azaltarak ısı kaynağından sağlanan ısınumune içinde bulan suya ulaştırmaktır.

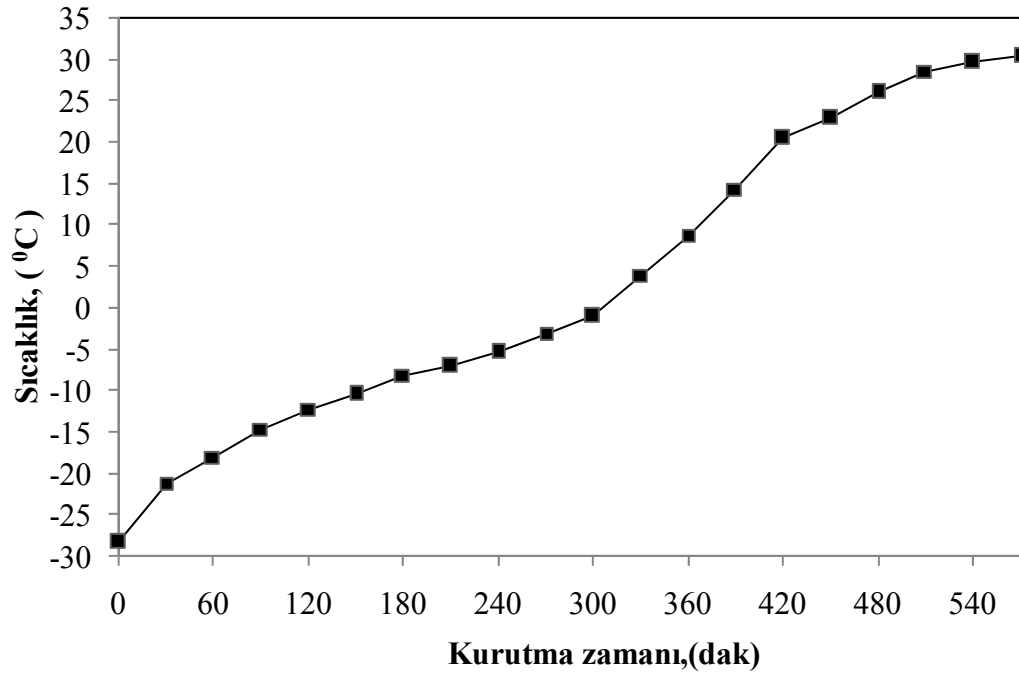


Şekil 7.4. Kurutma hücresi sıcaklığının zamanla değişimi

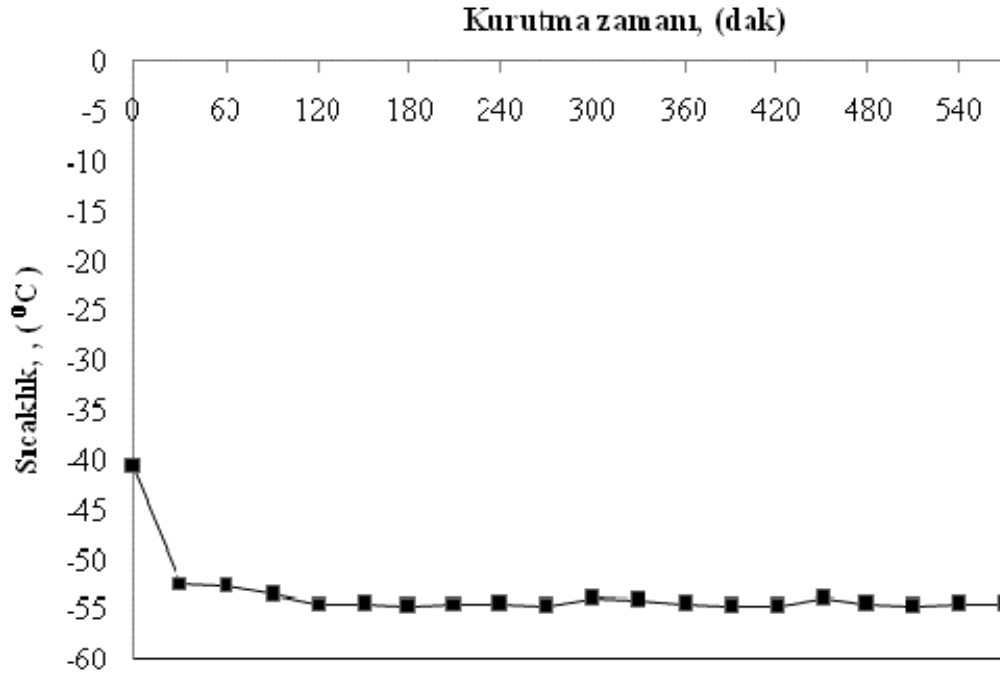
Şekil 7.4’de kurutma işleminin başlangıcında kurutma hücresinin sıcaklığı 22 °C’dir. Birinci kurutma safhasın sonunda kurutma hücresi sıcaklığı 1,5 °C arttırılarak 23,5 °C olmuştur. Sıcak değişimini az olmasının nedeni, numunede donmuş halde bulunan buzun çözünmemesini sağlayarak süblümleşme işleminin devam etmesidir. İkinci kurutma safhası ile kurutma hücresinin sıcaklığı birinci kurutma safhasındaki göre daha yüksek arttırılmıştır. İkinci kurutma safhası sonundaki kurutma hücresi sıcaklığı 30,7 °C’dir. Sıcaklığın birinci kurutma safhasına göre daha yükseltilmesinin nedeni numunede bulunan bağlı suyun uzaklaştırılmasıdır.



Şekil 7.5. Kurutma hücresinin bağıl neminin zaman değişimi



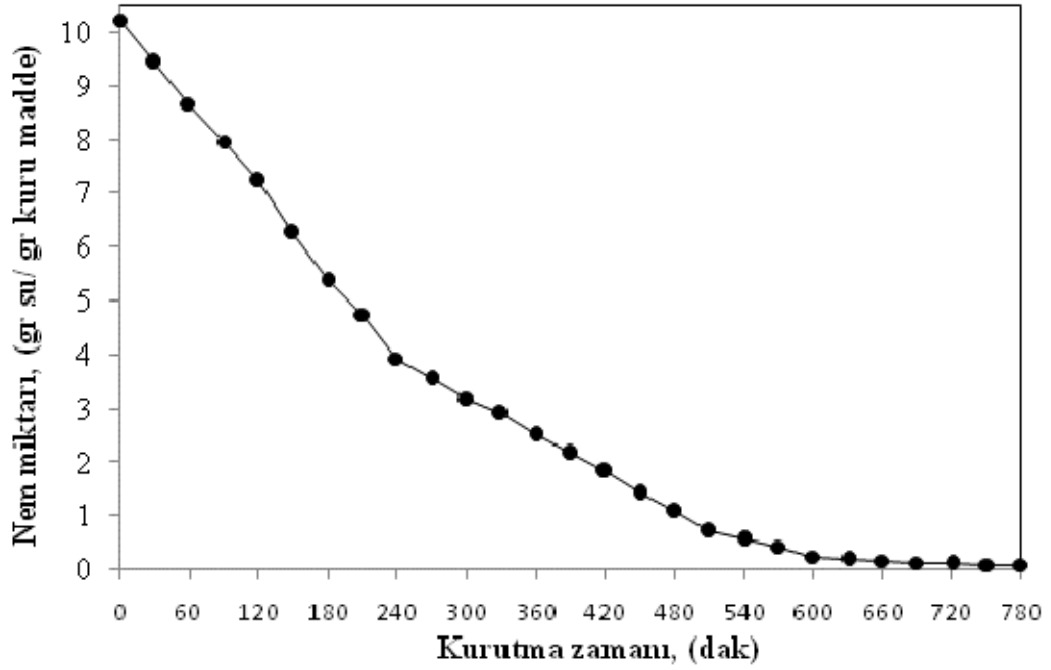
Şekil 7.6. Çilek sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.7. Buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

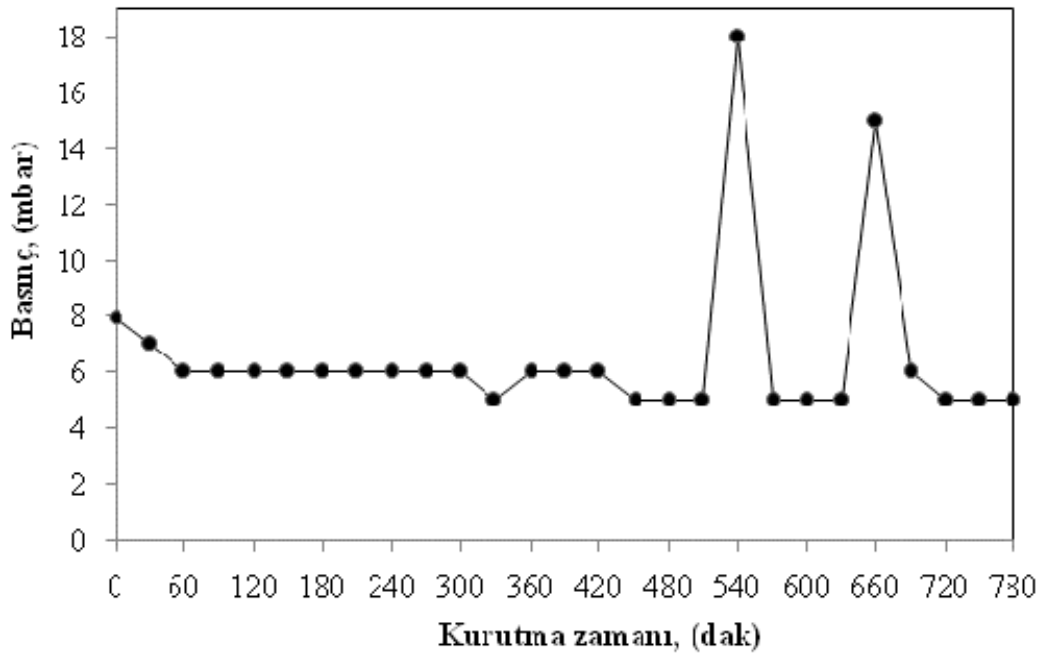
Kurutma sonunda 5 mm'lik numuneler başlangıçtaki su aktivitesi 0,918 iken kurutma sonunda su aktivitesi 0,340 olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.8'de 7 mm'lik numunelerin nem miktarının kurutma zamanı ile değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi çileklerin başlangıç nem miktarları 10,3 g su/g kuru madde ile 780 dak kurutma zamanı sonunda 0,1 g su/g kuru madde kadar kurutulmuştur. Şekil 7.8'de kurutmanın ilk 480 dak çilekteki ağırlık değişiminin hızlı gerçekleştiği başka bir değişle çilekteki serbest suyun uzaklaştığı birinci kurutma safhasının gerçekleştiği görülmektedir. Kurutmanın son 300 dak ise çilekte bulunan bağlı suyun uzaklaştırıldığı ikinci kurutma safhası gerçekleşmiştir.



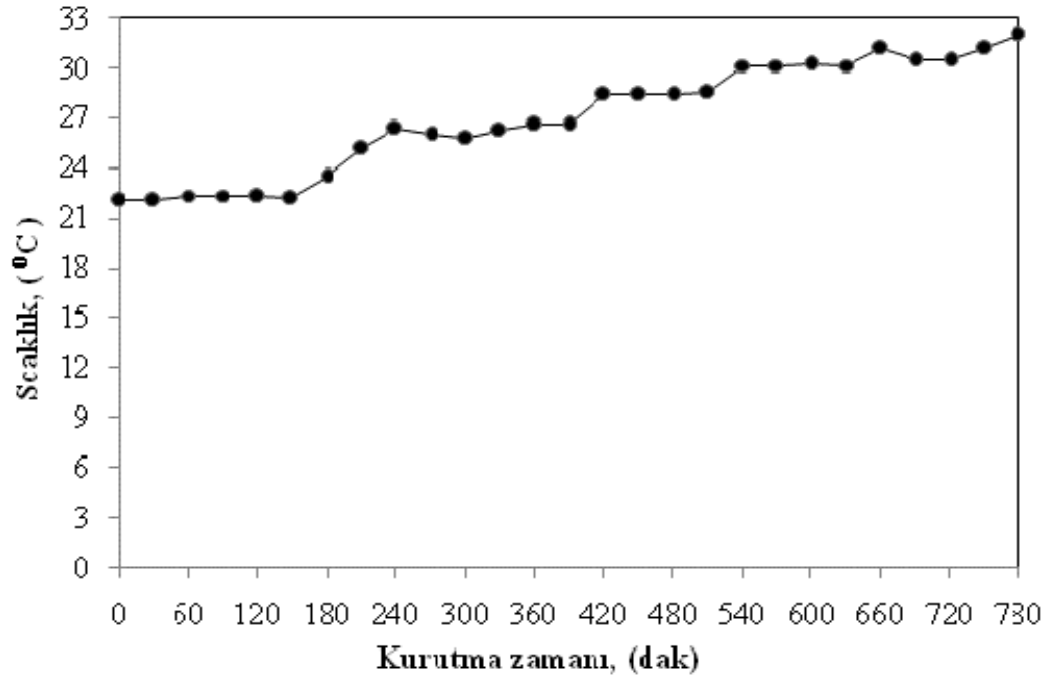
Şekil 7.8. Deney süresince 7 mm kalınlığındaki çileklerin nem miktarının değişimi

Çileklerin 780 dak kurutma süresindeki kurutma hücresi basıncının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.9'da; kurutma hücresinin sıcaklığının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.10'da; kurutma süresince kurutma hücresinin bağıl neminin kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.11'de; kurutma işlemi sırasında çilek sıcaklığının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.12'de ve kurutma işlemi boyunca buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının kurutma zamanı ile değişimi Şekil 7.13'de verilmiştir.

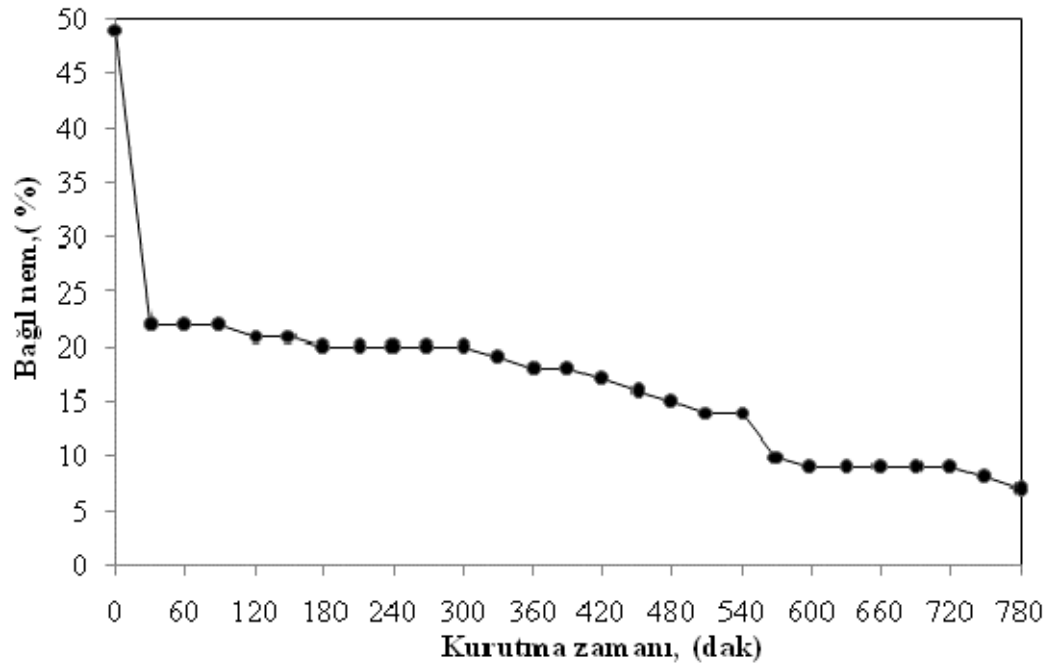


Şekil 7.9. Kurutma hücresinin basınç zaman değişimi

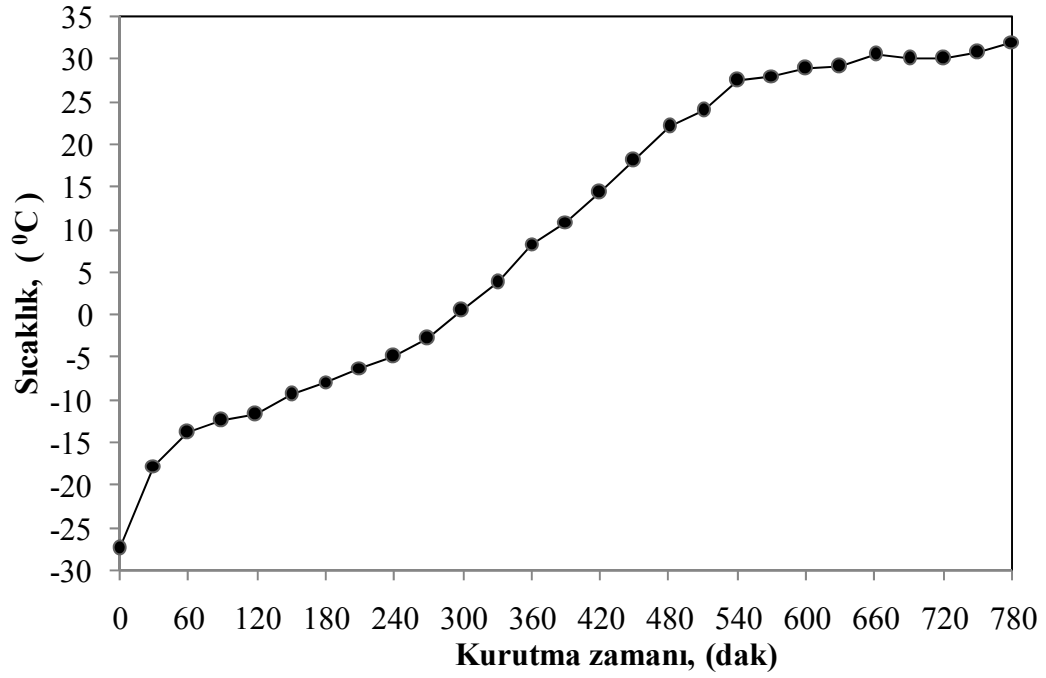
Şekil 7.9’da kurutma işleminin başlangıcında kurutma hücresinin basıncı 8 mbar iken, deney süresince kurutma hücresi basıncı ortalama 6 mbar’dır. Ancak kurutma işleminin ikinci kurutma safasında sırasında (480 dak) 7 mm’lik çileklerin ağırlık değişiminin azalmasıyla kurutma hücresindeki basınç 18 mbar basıncına (540 dak) kadar artırılmıştır. Daha sonra basınç tekrar 6 mbar’a düşürülmüş ancak numunelerin ağırlık değişimlerinin az olduğundan dolayı kurutma hücresi basıncı 15 mbar’a (660 dak) kısa süreliğine yükseltilmiştir.



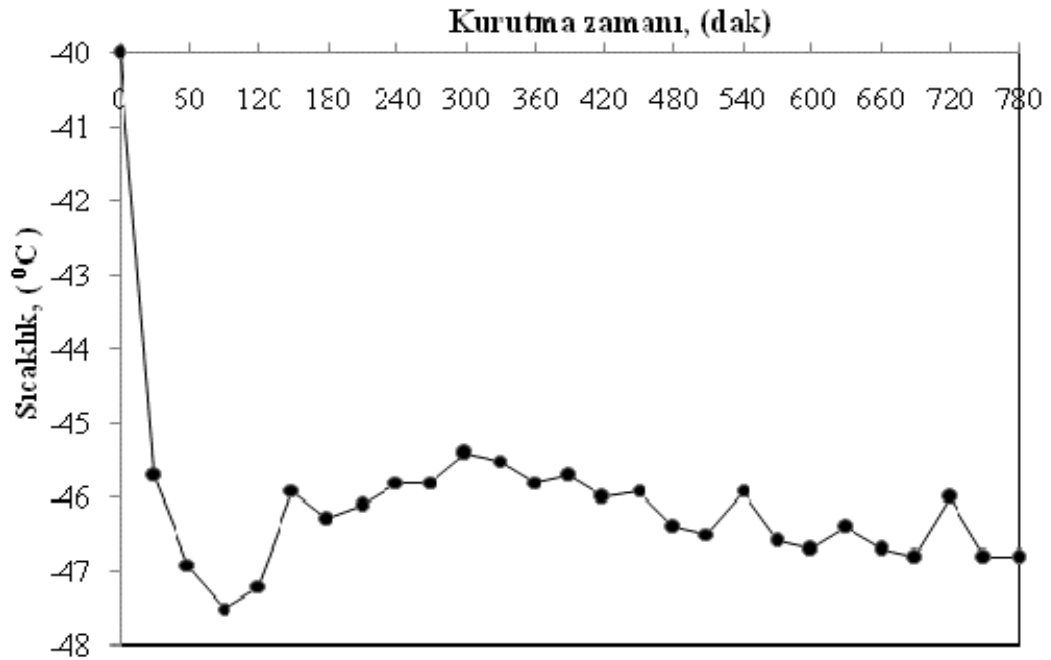
Şekil 7.10. Kurutma hücresi sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.11. Kurutma hücresinin bağıl neminin zamanla değişimi



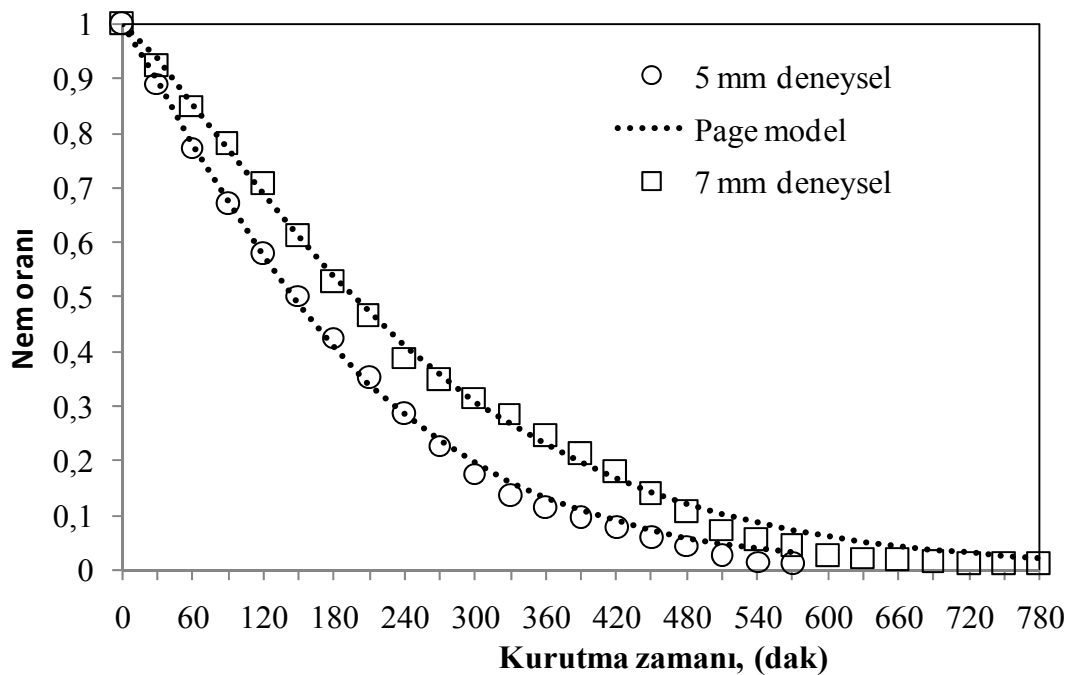
Şekil 7.12. Numune sıcaklığının zamanla değişimi



Şekil 7.13. Buharlaştırıcı yüzey sıcaklığının zamanla değişimi

Kurutma sonunda 7 mm'lik numunelerin başlangıçtaki su aktivitesi 0,918 iken kurutma sonunda su aktivitesi 0,390 olarak ölçülmüştür.

5 ve 7 mm'lik numunelerin kuruma olayını açıklamak üzere Çizelge 6.1 verilen modeller istatistiksel programı olan SigmaPlot 2000 ve MATLAB 6.5 bilgisayar programıyla regresyon analizi yapılmış ve analiz sonucunda nem oranı en düşük hata ile Page modelin verdiği görülmüştür. Şekil 7.14'te 5 ve 7 mm'lik numunelerin deneysel nem oranı ile tahmin edilen page modelin zaman grafiği verilmiştir. Çizelge 7.1'de kullanılan modellere ait sabit sayılar (a, k, n ve b) ve istatistiksel hata değerleri (R^2 , χ^2 ve RMSE) verilmiştir.



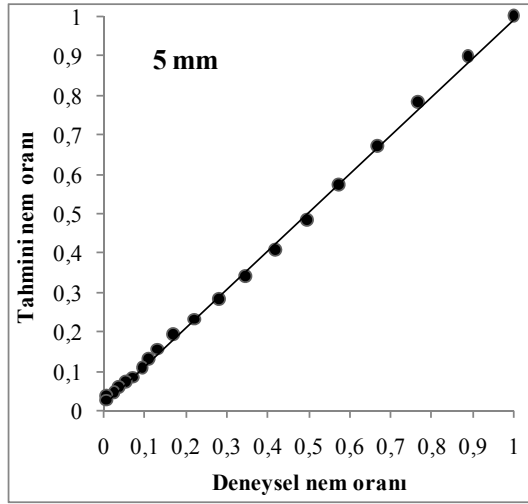
Şekil 7.14. Çilek numunelerin deneysel sonuç ve model ile elde edilen nem oranının zamana göre değişimi

Şekil 7.14'ün incelenmesinden görüleceği üzere, deneysel ve Page model'in tahmin edilen nem oranı değerleri birbirine çok yakındır. Dolayısıyla numunelerin nem oranındaki değişim page kurutma denklemi ile deneysel verilere yakın olacak şekilde tahmin edilebilir. 5 ve 7 mm'lik numunelerin kurutulmasında yapılan modelin modelleme yeterliliği (R^2) 0,9788 ile 0,9984 arasında değişmiştir. Bununla birlikte çizelgenin incelenmesinden khi-kare (χ^2) değerleri $4,6690 \cdot 10^{-6}$ ile $3,750879 \times 10^{-3}$ arasında sıfıra oldukça yakın çıkmış, tahmini standart hatası (RMSE) 0,002076 ile 0,058142 arasında değişmiştir.

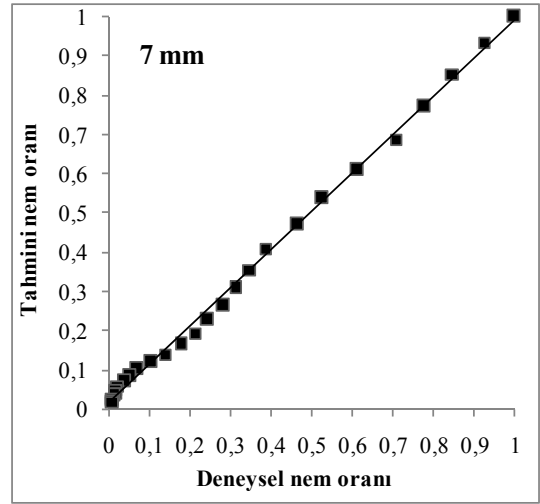
Page modelinin 5 mm ve 7 mm numuneler için en iyi kuruma olayını açıkladığı bulunmuş ve sırasıyla 5 ile 7 mm'lik numuneler için bulunan R^2 , χ^2 , RMSE değeri 0,998458066, $2,6882 \times 10^{-4}$, 0,015491 ve 0,99769943, $4,66903 \times 10^{-6}$, 0,002076 (Çizelge 7.1). Ayrıca hesaplanan deneysel ve Page modele göre tahmini değerlerin dağılımı Şekil 7.15'de verilmiştir. Bu değerlerin düz çizgi etrafında dağılımı verilmiştir. Bu da modelin deneysel verileri açıklayabildiğinin göstergesidir.

Çizelge 7.1. Çilek numuneleri için veren model ile istatistiksel değerler sonuçlarının kurutma sabitleri

Model no	Kalınlık	Model sabitleri	R^2	χ^2	RMSE
1	5 mm	k = 0,004875	0,987148178	0,00210000	0,04453
	7 mm	k = 0,003585	0,979218023	0,003450962	0,01003
2	5 mm	k = 0,002002 n = 1,176	0,998458066	2,6882x10⁻⁴	0,015491
	7 mm	k = 0,0009372 n = 1,251	0,99769943	4,66903x10⁻⁶	0,002076
3	5 mm	k = 0,01087 n = 0,4487	0,987188216	0,002208281	0,044450
	7 mm	k = 0,5755 n = 0,00623	0,979228442	0,003592551	0,057586
4	5 mm	k = 0,005067 n = 1,176	0,998130347	0,000273468	0,015642
	7 mm	k = 0,003651 n = 1,241	0,995849214	0,000757074	0,026435
5	5 mm	a = 1,11 k = 0,005863	0,995587628	0,000757581	0,026035
	7 mm	a = 1,082 k = 0,004048	0,989874983	0,001793301	0,040686
6	5 mm	a = 1,184 c = -0,1577 k = 0,004021	0,997454601	0,000467634	0,019844
	7 mm	a = 1,082 c = 1,948x10 ⁻¹¹ k = 0,004048	0,989874983	0,001871271	0,040686
7	5 mm	a = 0,5674 b = 1,062 k ₁ = 0,005335 k ₀ = 1,085	0,993327375	0,001326827	0,032365
	7 mm	a = 1,082 b = 0,9124 k ₀ = 0,004049 k ₁ = 0,9201	0,989890328	0,001952826	0,040649
8	5 mm	a = 0,002429 k = 1,999	0,986784544	0,002278324	0,045149
	7 mm	a = 0,001791 k = 1,995	0,97882866	0,003662308	0,058142
9	5 mm	a = -0,003975 b = 4,135x10 ⁻⁶	0,997206273	0,000483992	0,020809
	7 mm	a = -0,00287 b = 2,151x10 ⁻⁶	0,995628777	0,000773973	0,026728
10	5 mm	a = -0,9998 b = 0,6595 k = 0,01088 a = 4,312x10 ⁻⁷	0,998770839	0,000322322	0,016475
	7 mm	b = 0,5422 k = 0,006612	0,979218813	0,003750879	0,057602



(a)



(b)

Şekil 7.15. Deneysel ve tahmini ayrılabilir nem oranı değerleri, (a) 5 mm'lik çilekler için deneyssel ve tahmini nem oranı, (b) 7 mm'lik çilekler için deneyssel ve tahmini nem oranı

Şekil 7.15 incelendiğinde, model değerleri gösteren noktalar ile deneyssel verileri gösteren noktaların eğri üzerinde veya eğriye çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da kullanılan modelin, çileklerin kuruma olayındaki nem oranının değişimini açıklamada kullanılabileceğini göstermiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Ülkemizde dondurarak kurutma sisteminin imalatı yapılmadığından sistem yurt dışından ithal edilmekte ve ithal edilen sistemler ise genellikle küçük kapasitede olmaktadır. Büyük kurutma kapasitesine sahip sisteminin kurulması yüksek maliyetlerde olmakta, bundan dolayı da kurutulacak materyal yurt dışına gönderilip, kurutulduktan sonra geri gelmektedir.

Bu çalışmada iki temel amaç öngörülmüştür, birincisi; ülkemizde tasarımı ve imalatı yapılmayan dondurarak kurutma sisteminin imal edilebilirliğini araştırmak, ikincisi imalatı yapılan deney seti ile çilek kurutulurken deneysel sonuçlar almaktır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Dondurarak kurutma sisteminin imalatı ile ilgili ekipman ve malzemeler (çoğu yurt dışı kaynaklı) yurt içinden temin edilmiştir.
- Yapılan bu çalışmayla çilekler başlangıçtaki nem oranı % 91,2 (kuru baz) iken kurutma sonucunda % 9,1 olmuştur.
- 5 mm kalınlığındaki çilekler 9,5 saatte 0,918 su aktivitesi değerinden 0,340 su aktivitesi değerine, 7 mm kalınlığındaki çilekler 13 saatte 0,915 su aktivitesi değerinden 0,39 su aktivitesi değerine indirilmiştir.
- Donmuş çilekler içinde bulunan buzun süblimleşmesi için gerekli olan süblimleme ısısı akım kontrolü 1 kW'lık ısıtıcı ile sağlanmıştır. Süblimleşme ısısı kurutma hücresi sıcaklığının yavaş yavaş yükseltilmesi ile sağlanmıştır. 5 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulmasında elektrik ısıtıcıdan toplam kurutma süresinde 0,133 kW/h ısı verilmiştir. 7 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulmasında ise elektrikli ısıtıcıdan toplam kurutma süresinde 0,147 kW/h ısı verilmiştir. Kurutma

hücresi sıcaklığı yavaş yavaş artırılarak dondurulmuş halde bulunan çileklerde erimesi ve yapısının bozulması engellenmiştir.

- Soğutma sisteminde soğutucu akışkan olarak R 404A soğutucu akışkanı olup yoğuşturucu (buharlaştırıcı) yüzey sıcaklığı ortalama -45 °C'dir.
- Kurutma işlemi süresinde kurtma hücresinin vakumlama işlemini gerçekleştiren vakum pompası ve soğutma sistemi devamlı çalışmıştır. 5 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulmasında, vakum pompası ve soğutma sisteminin toplam 9,5 saatte tükettiği elektrik enerjisi 4,573 kW/h iken 7 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulmasında, vakum pompası ve soğutma sisteminin toplam 13 saatte 7,893 kW/h elektrik enerjisi tüketmiştir.
- Elde edilen deneysel sonuçlar dikkate alındığında 5 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulması 9,5 saatte gerçekleşmektedir. Kurutmanın ilk 5 saatinde birinci kurutma safhası, son 4,5 saatinde ikinci kurutma safhası gerçekleşmiştir.
- Kurutma işleminde çilek dilimlerinin kalınlığı arttıkça, kurutma hızı azalmış ve kurtma zamanını artmıştır.
- 7 mm kalınlığındaki çileklerin kurutulması 13 saatte gerçekleşmektedir. Kurutmanın ilk 8 saatinde birinci kurutma safhası, son 5 saatinde ikinci kurutma safhası gerçekleşmiştir.
- Dondurarak kurutma işlemi sonunda kurutma hücresinin bağıl nemi % 7'ye kadar düşürülmüştür.
- Kurutma sonunda elde edilen kuru çilekler rengini ve tadını korumuştur.
- İmalatı yapılan kurutma cihazında çileklerin kuruma süresinin belirli bir zaman anındaki nem oranı Newton, Page, Geliştirilmiş Page I, Geliştirilmiş Page II,

Henderson ve Papis, Logaritmik, İki terimli, İki terimli ve Eksponansiyel, Wang ve Sing ve Difüzyon yaklaşım modelleri ile modellenmiştir. Bu modellerde bulunan katsayılar çoklu regresyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Modellerin tahmini standart hatası (RMSE), khi-kare (χ^2) ve regresyon katsayısı (R^2) değerleri belirlenmiştir.

- Elde edilen sonuçlara göre, 5 ve 7 mm çilekler için kuruma en iyi olayını Page modelinin açıkladığı bulunmuştur. Kurutulan 5 ile 7 mm'lik numuneler için bulunan R^2 , χ^2 , RMSE değeri 0,998458066, $2,6882 \times 10^{-4}$, 0,015491 ve 0,99769943, $4,66903 \times 10^{-6}$, 0,002076. Çileklerin ait kuruma sabiti (k) ve (n) değerleri 5 mm kalınlığındaki çilek numunesinde 0,002002, 1,176: 7 mm kalınlığındaki çilek numunesinde 0,0009372, 1,251 bulunmuştur.

8.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda elde edilen deneysel veriler ve edinilen tecrübeler ışığında aşağıdaki öneriler uygun görülmüştür.

- İmalatı yapılan dondurarak kurutma sisteminde kurutulacak ürün soğutucuda dondurulduktan sonra kurutma hücreesine alınmaktadır. Ürünün dondurma işlemi kurutma hücreesinde de gerçekleştirilebilir.
- Kurutma işleminde süblimleşme işlemi için iletimle ısıtmadan daha iyi bir ısıtma sağlayarak derinliklere sızma özelliği olan infrared veya mikrodalga gibi, radyasyon kaynakları kullanılabilir.
- İmalatı yapılan dondurarak kurutma sisteminde ağırlık, basınç, sıcaklık ve nem kontrolü sağlayan iyi bir PID kontrollü yapılarak, kurutma kontrolü sağlanarak kurutma süresi düşürülebilir.

KAYNAKLAR

1. Kholliiev, B., Sadıkov, T., Khairıtıdınov, B., Sadıkov, B., “On The Investigation of a Solar Hothouse/Fruit Drye”, *Applied Solar Energy*, 8 (3): 78-81 (1982).
2. Özel, S., Özil, E., “Kurutmada Güneş Enerjisinin Kullanımı”, *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 327 (1987).
3. Bıçakçı, M., “Doğu Karadeniz Bölgesinde Havalı Güneş Kollektörleri İle Prototip Fındık Kurutma Tesisatı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 1-2 (1989).
4. Güner, B., “Raf Tipi Güneşli Bir Meyve Kurutucunun Matematiksel Modellenmesi ve Optimizasyonu”, *Tarımsal Mekanizasyon 13. Ulusal Kongresi*, Konya, 451-460 (1991).
5. Yasartekin, Y., “Kabinet Tipi, Günesi Dikey Eksende Belirli Aralıklarla İzleyen, Günes Enerjili Kurutucunun Tasarımı ve Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Denenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*, İzmir, 1-2 (1991).
6. Yagcıoglu, A., Degirmencioğlu, A., Çagatay, F., “Drying Characteristics of Laruel Leaves Under Different Drying Conditions”, *7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, Adana, 565-569 (1999).
7. Olgun, H., Rzayev, P., “Fındığın üç farklı sistemde güneş enerjisi ile kurutulması” *Tr. J. Engin. Environ. Sci.*, 24: 1-14 (2000).
8. Çam, G., “Reflektörlü güneş serasının kurutucu olarak kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*, İzmir, 1-4 (1989).
9. Yaşartekin, Y., “Kabinet tipi, güneşi dikey eksen ve belirli aralıklarla izleyen, güneş enerjili kurutucunun tasarımı ve tarımsal ürünlerin kurutulmasında denenmesi”, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*, İzmir, 1-3 (1991).
10. Fırat, Y., “Dikey konumdaki saydam iki levha arasındaki hava akımının güneş enerjisi ile ısıtılması ve kurutma sistemlerine uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 88-102 (1997).
11. Özbalta, N., Tırıs, Ç., “Güneşli kurutucuda bazı sebze ve meyvelerin kuruma karakteristikleri”, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü*, İzmir, 1-2 (1992).

12. Sarsılmaz, C., Yıldız, C., Pehlivan, D., “Drying of Apricot in a Rotary Column Cylindrical Dryer Supported With a Solar Energy”, *Renewable Energy*, 21: 117-127 (2000).
13. Koyuncu, T., Pinar, Y., “Kırmızı Biber İçin Bir Güneşli Kurutucu Tasarımı”, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi*, Şanlıurfa, 423-430 (2001).
14. El-Sebaei, A.A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M.R.I., El-Gohary H.G., “Experimental Investigation of an Indirect Type Natural Convection Solar Dryer”, *Energy Conversion and Management*, 43: 2251-2266 (2002).
15. Toğrul, İ.T., Pehlivan, D., “Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers”, *Journal of Food Engineering*, 55: 209-216 (2002).
16. Tarhan, S., Ergünes, G., Özler, S., “Tokat Yöresinde Düşük Sıcaklıkta Mısır Kurutma İçin Uygun Kurutma Şartlarının Belirlenmesi”, *Tarımsal Mekanizasyon 21. Ulusal Kongresi*, Konya, 18-24 (2003).
17. Midilli, A., Küçük, H., “Mathematical modeling of single layer drying of pistachio by using solar energy”, *Energy Conversion and Management*, 44 (7): 1111-1122 (2003).
18. Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H., “Güneş enerjili kurutma sistemlerinin fındık kurutulmasına uygulanabilirliği”, *Teknoloji Dergisi*, 7 (4): 557-564 (2004).
19. Tarhan, S., Ergünes, G., Tekelioglu, O., “Tarımsal Ürünler için Güneş Enerjili Kurutucuların Tasarım ve İşletme Esasları”, *Yeni ve Yenilebilir Enerji Kaynakları/Enerji Yönetimi Sempozyumu*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayın No: E/2005/371, Kayseri, 51-58 (2005).
20. Aktaş, M., Ceylan, İ., Doğan, H., “Isı pompalı endüstriyel fındık kurutma fırınının modellenmesi”, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, *Politeknik Dergisi*, 8 (4): 329-336, (2005).
21. Saçılık, K., Keskin, R., Eliçin, A.K., “Mathematical Modelling of Solar Tunnel Drying of Thin Layer Organic Tomato”, *Journal of Food Engineering*, 73 (3): 231-238 (2006).
22. Doymaz, İ., “Sun Drying of Figs: An Experimental Study”, *Journal of Food Engineering*, 71: 403-407 (2005a).
23. İsaeva, J., “Kayısı Kurutmasının Deneysel ve Teorik Olarak Araştırılması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-2 (2007).

24. Mutlu, A., “Tokat’ta Güneş Enerjili Raflı Kurutucu ile Domates Kurutma Kosullarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Tokat, 1-2 (2007).
25. Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., “Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması”, **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, 25 (2): 9-14 (2005).
26. Jaya, S., Das, H., “A vacuum drying model for mango pulp”, **Drying Technology**, 21 (7): 1215-1234 (2003).
27. Jaya, S., Das, H., “Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powders properties”, **Journal of Food Engineering**, 63: 125-134 (2004).
28. Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S., “Microwave-vacuum drying of cranberries: Part I. Energy use and efficiency”, **Journal of Food Processing and Preservation**, 20: 121-143 (1996).
29. Yongsawatdigul, J., Gunasekaran, S., “Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation”, **Journal of Food Processing and Preservation**, 20: 145-156 (1996).
30. Cui, Z., Xu, S., Sun, D., “Microwave-vacuum drying kinetics of carrot slices”, **Journal of Food Engineering**, 65: 157-164 (2004).
31. Madamba, P.S., “The Response Surface Methodology: An Application to Optimize Dehydration Operations of Selected Agricultural Crops”, **Lebensm.- Wiss- u. Technol.**, 35: 584-592 (2002).
32. Nitz, M., Taranto, O.P., “Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization”, **Journal of Food Engineering**, 80: 249-256 (2007).
33. Yüzgeç, U., “Kurutma sürecinin modellenmesi ve akıllı öngörülü denetimi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-35 (2005).
34. Heinrich, S., Peglow, M., Henneberg, M., Drechsler, J., Morl, L., “Fluidized bed spray granulation: analysis of dynamic particle populations and heat and mass transfers”, **Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium**, Sao Paulo, Brazil, 121-128 (2004).
35. Vitor, J.F.A., Biscaria Jr., E.C., Massarini, G., “Modeling of biomass drying in fluidized bed”, **Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium**, Sao Paulo, Brazil, 1104-1111 (2004).

36. Topuz, A., Gür, M., Gül, M.Z., “An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts”, *Applied Thermal Engineering*, 24: 1535-1547 (2004).
37. Romero, T.J., Gabas, A.L., Sobral, P.J.A., “Osmo-convective drying of mango cubes in fluidized bed and tray dryer”, *Drying 2004-Proceedings Of The 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, C: 1868-1875 (2004).
38. Topuz, A., “Akışkan yatakta fındık kurutma prosesinde ısı ve kütle geçişinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1-93 (2002).
39. Kanarya, A., “Akışkan yataklı kurutma prosesinin matematiksel modellenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Kocaeli, 2-66 (2002).
40. Temple, S.J., Van Boxtel, A.J.B., Van, S.G., “Control of fluid bed tea dryers: controller performance under varying operating conditions”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 29: 217-231 (2000).
41. Soponronnarit, S., “Fluidised-bed paddy drying”, *Science Asia*, 25: 51-56 (1999).
42. Hajidavalloo, E., Hamdullahpur, F., “Mathematical modeling of simultaneous heat and mass transfer in fluidized bed drying of large particles”, *Proceedings of CSME Form 1998*, Volume 1: Symposium on Thermal and Fluids Engineering, Toronto-Canada, 19-22 (1998).
43. Hajidavalloo, E., “Hydrodynamic and thermal analysis of a fluidized bed drying system”, *Thesis of Doctor of Philosophy Dalhousie Univ. Daltech*, Halifax, Nova Scotia, 173 (1998).
44. Soponronnarit, S., Pongtornkulpanich, A., Prachayawara-korn, S., “Drying characteristics of corn in fluidized bed dryer”, *Drying Technology*, 15 (5): 1603-1625 (1997).
45. Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., Marinou - kouris, D., “Modeling and optimization of fluidized bed and rotary dryers”, *Drying Technology*, 15 (3,4): 735-763 (1997).
46. Grabowski, S., Mujumdar, A.S., Ramaswamy, H.S., Strummillo, C., “Evaluation of fluidized versus spouted bed drying of baker’s yeast”, *Drying Tecnology*, 15 (2): 625-634 (1997).
47. Dimattia, D.G., Amyotte, P.R., Hamdullahpur, F., “Fluidized bed drying of large particles”, *Transactions of the ASAE*, 39 (5): 1745-1750 (1996).

48. Srinivasa, C.K., Thomas, P.P., Varma, Y.B.G., "Drying of solids in fluidized beds", *TIInd.Eng.Chem.Res.*, 34: 3068-3077 (1995).
49. Zahed, A.H., Zhu, J.X., "Modeling and simulation of batch and continuous fluidized bed dryers", *Drying Technology*, 13 (1,2): 1-28 (1995).
50. Abid, M., Gibert, R., Laguerie, C., "An experimental and theoritical anaysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidized bed", *International Chemical Engineering*, 30 (4): 632-641 (1990).
51. Uçkan, G., Ülkü, S., "Drying of corn grain in a batch fluidized bed dryer", *In Drying of Solids: Recent Developments*, A.S. Mujumdar Ed., Wiley, New York, 91-96 (1986).
52. Yıldız, Y., Tuncer, İ.K., Başçetinçelik, A., "Tane mısırın düşük sıcaklıkta kurutulmasında enerji tüketimi", *Tarımsal Mekanizasyon 12. Ulusal Kongresi*, Tekirdağ, 44-52 (1989).
53. Johnson, P.N.T., Brennan, J.G. Addo-Yobo, F.Y., "Air-drying Characteristics of Plantain (Musa AAB)", *Journal of Food Engineering*, 37: 233-242 (1998).
54. Boudhrıoua, N., Michon, C., Cuvelier, G., Bonazzi, C., "Influence of Ripeness and Air Temperature on Changes in Banana Texture During Drying", *Journal of Food Engineering*, 55: 115-121 (2001).
55. Maskan, A., Kaya, S., Maskan, M., "Effect of Concentration And Drying Processes on Color Change of Grape Juice and Leather (Pestil)", *Journal of Food Engineering*, 54: 75-80 (2001a).
56. Doymaz, İ., Pala, M., "Hot-air drying characteristics of red paper", *Journal of Food Engineering*, 55: 331-335 (2002).
57. Doymaz, İ., "Drying characteristics and kinetics of okra", *Journal of Food Engineering*, 62: 150-156 (2004a).
58. Doymaz, İ., "Drying behaviour of green beans", *Journal of Food Engineering*, 56: 101-107 (2004b).
59. Arıcı, R.Ç., "Mantarın (Agaricus Bisporus) Kontrollü şartlar altında Kurutma Karakteristiklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-2 (2006).
60. İzli, N., "Mısırın Sıcak Hava Akımıyla Kurutulmasında Kurutma Parametrelerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-2 (2007).

61. Akosman, C.M., “Kalender. Soya fasulyesinin kuruma karakteristiğinin tepsili kurutucuda incelenmesi”, *S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16 (2): 243– 251 (2004).
62. Durak, Ö.C., “Günes Isıticılı Kurutma Serasında Biber, Domates ve Mısırın Kurutma Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tokat, 1-2 (2000).
63. Yılmaz, H.Ö., Güngör, D., Özbalta, N., “Domates İçin Kabin Tipi Bir Güneşli Kurutucunun Performans Analizi”, *7. Uluslararası Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresi*, Adana, 32-41 (1999).
64. Tuncer, K.T., “Kurutmada Yeni Teknolojiler. Yüksek Frekanslı Mikrodalgayla Sebze Kurutma Üzerine Bir Araştırma”, *4. Tarımsal Mekanizasyon Ve Enerji Kongresi*, Adana, 472-480 (1990).
65. Funebo, T., Ohlsson, T., “Microwave-assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom”, *Journal of Food Engineering*, 63: 349-359 (1998).
66. Pappas, C., Tsami, E., Marinos-Kouris, D., “The Effect of Process Contidions on The Drying Kinetics and Rhydration Characteristics of Some Microwave-vacuum Dehydrated”, *Fruits Drying Technoloigy*, 17 (1-2): 157-174 (1999).
67. Özkan, İ.A., Işık, E., “Kayısı ve kirazın mikrodalga ışınlarla kurutulmasındaki kurutma parametrelerinin belirlenmesi”, *I. Sert Çekirdekli Meyveler Sempozyumu Bildirisi*, Yalova, 317-327 (2001).
68. Özkan, İ.A., Işık, E., “Domatesin mikrodalga ışınlarla kurutulmasındaki kurutma parametreleri”, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi Bildirisi*, Şanlıurfa, 418-422 (2001).
69. Koç, K., “Mikrodalga ve Endüstriyel Kurutma Metotlarının Kayısının Fizikokimyasal ve Duyusal Özellikleri Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 1-2 (2001).
70. Toğrul, H., Toğrul, İ., İspir, A., “Mantarların İnce Tabaka Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi”, *III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı*, Antalya, 15-22 (2005a).
71. Toğrul, H., Toğrul, İ., İspir, A., “İnfrared Kurutucuda Muzun Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi”, *III. Tarımsal Ürünleri Kurutma Çalıştayı*, Antalya, 22-29 (2005b).
72. Yıldız, O., “Havuç Ve Pırasa Kurutulmasında Kurutma Havası Özelliklerinin Kuruma Karakteristiklerine Etkisi”, *Tarımsal Mekanizasyon 20. Ulusal Kongresi*, Şanlıurfa, 412-417 (2001).

73. Akpınar, E.K., Biçer, Y., “Siklon Tipi Bir Kurutucuda Kabağın Kuruma Davranışının İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 159-169 (2003).
74. Mellor, J.D., “Fundamentals of Freeze-Drying”, *Acedemic Press*, London, 94-128 (1978)
75. Litchfield, R.J., Farhadpour, F.A., Liapis, A.I., “Cyclical Pressure Freeze Drying”, *Chemical Engineering Science*, 36 (7): 1233-1238 (1981).
76. Liapis, A.I., Litchfield, R.J., “Optimal Control of a Freeze Dryer-I”, *Chemical Engineering Science*, 34 (7): 975-981 (1979).
77. Nail, S.L., “The Effect of Pressure on Heat Transfer in the Freeze-Drying of Parenteral Solutions”, *Journal of the Parenteral Drug Association*, 34 (5): 358-368 (1980).
78. Wolf, E., Gibert, H., “Vacuum Freeze-Drying Kinetics and Modelling of a Liquid in a Vial”, *Chemical Engineering and Processing*, 25: 153-158 (1989).
79. Pikal, M.J., Shah, S., Senior, D., Lang, J.E., “Physical Chemistry of Freeze-Drying: Measurement of Sublimation Rates for Frozen Aqueous Solutions by a Microbalance Technique”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 72 (6): 635-650 (1983).
80. Pikal, M.J., Roy, M.L., Shah, S., “Heat and Mass Transfer in Vial Freeze-Drying of Phamaceuticals: Role of the Vial”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73 (9): 1224-1237 (1984).
81. Zamzow, W.H., Marshall, W.R.Jr., “Freeze drying with radiant energy”, *Chem. Eng. Prog.*, 48 (1): 21-32 (1952).
82. Hill, J.E., Sunderland, J.E., “Sublimation-Dehydration in the Continuum, Transition and Free-Molecular Flow Regimes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14: 625-638 (1970).
83. Liapis, A.I., “Rates for Freeze Drying,”, *in: Drying’80*, Vol. 2, Chap. Section IV: Drying of Foodstuffs and Grains, Hemisphere Publishing Corp, 224-228 (1980).
84. Liapis, A.I., Bruttini, R., “A Theory for the Primary and Secondary Drying Stages of the Freeze-Drying of Pharmaceutical Crystalline and Amorphous Solutes: A Comparison Between Experimental Data and Theory”, *Seperation Technology*, 4: 144-155 (1994).

85. Dyer, D.F., Sunderland, J.E., "Heat and Mass Transfer Mechanisms in Sublimation Dehydration", *Journal of Heat Transfer*, 90 (4): 379-384 (1968).
86. Copson, D.A., "Microwave Sublimation of Foods", *Food Technology*, 12 (6): 270-272 (1958).
87. Ma, Y.H., Peltre, P., "Mathematical Simulation of a Freeze Drying Process Using Microwave Energy", *in: Food Preservation*, 69: 47-54 (1973).
88. Ma, Y.H., Peltre, P., "Freeze Dehydration by Microwave Energy: Part I. Theoretical Investigation", *AIChE Journal*, 21 (2): 335-344 (1975).
89. Ma, Y.H., Peltre, P., "Freeze Dehydration by Microwave Energy: Part II. Experimental Investigation", *AIChE Journal*, 21 (2): 344-350 (1975).
90. MacKenzie, A.P., "A Current Understanding of the Freeze-Drying of Representative Aqueous Solutions", *in: Fundamentals and Applications of Freeze-Drying to Biological Materials, Drugs and Foodstuffs*, Science and Technology of Refrigeration, International Institute of Refrigeration, 21-34 (1985).
91. Franks, F., "Improved Freeze-Drying: An Analysis of the Basic Scientific Principles," *Process Biochemistry*, 24 (1): iii-vii (1989).
92. Jennings, T.A., "Effect of Pressure on the Sublimation Rate of Ice", *Journal of Parenteral Science and Technology*, 4 (3): 95-97 (1986).
93. Livesey, R.G., Rowe, T.W.G., "A Discussion of the Effect of Chamber Pressure on Heat and Mass Transfer in Freeze-Drying", *Journal of Parenteral Science and Technology*, 41 (5): 169-171 (1987).
94. Litvin, S., Mannheim, C.H., Miltz, J., "Dehydration of Carrots by a Combination of Freeze Drying, Microwave Heating and Air or Vacuum Drying", *Journal of Food Engineering*, 36: 103-111 (1998).
95. Khalloufi, S., Giasson J., Ratti C., "Water activity of freeze dried mushrooms and berries", *Canadian Agricultural Engineering*, 42 (1): 71-79 (2000).
96. Shishegarha, F., Makhlof, J., Ratti C., "Freeze-drying characteristics of strawberries", *Drying Technology*, 20 (1): 131-145 (2002).
97. Araki, T., Sagara, Y., Abdullah, K., Tambunan, A.H., "Transport properties of cellular food materials undergoing freeze-drying", *Drying Technology*, 19 (2): 297-312 (2001).

98. Carapelle, A., Henrist, M., Rabecki, F., “A Study of Vacuum Freeze Drying of Frozen Wet Papers”, *Drying Technology*, 19 (6): 1113-1124 (2001).
99. Sadıkoğlu, H., Özdemir, M., “Dondurarak Kurutma Teknolojisi”, *Termoklima*, 102: 53-61 (2001).
100. Krokida, M.K., Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., “The Effect of the Method of Drying on the Colour of Dehydrated Products”, *International Journal of Food Science and Technology*, 36: 53-59 (2001).
101. Marques, L.G., Freire, J.T., “Analysis of Freeze-Drying of Tropical Fruits”, *Drying Technology*, 23: 2169-2184 (2005).
102. Sadikoglu, H., Liapis, A.I., “Mathematical modelling of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze drying in trays: Parameter estimation and model discrimination by comparison of theoretical results with experimental data”, *Drying Technology*, 15: 791-810 (1997).
103. Sadikoglu, H., Liapis, A.I., Crosser, O.K., “Optimal control of the primary and secondary drying stage of bulk solution freeze drying in trays”, *Drying Technology*, 16: 399-431 (1998).
104. Duran, A., Karakaya, M., Sariçoban, C., “Liyofilizasyon Uygulamasının Sığır ve Tavuk Etlerinin Bazı Emülsiyon Özellikleri Üzerine Etkisi”, *Standart*, 75-80 (2002).
105. Kwok, B.H.L., Hu, C., Durance, T., Kitts, D.D., “Dehydration techniques affect phytochemical contents and free radical scavenging activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt.)”, *Journal of Food Science*, 69 (3): 122-126 (2004).
106. Sham, P.W.Y., Scaman, C.H., Durance, T.D., “Texture of Vacuum Microwave Dehydrated Apple Chips as Affected by Calcium Pretreatment, Vacuum Level, and Apple Variety”, *Journal of Food Science*, 66 (9): 1341-1347 (2001).
107. Rahman, M.S., Al-Amri, O.S., Al-Bulushi, I.M., “Pores and physicochemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying”, *Journal of Food Engineering*, 53: 301-313 (2002).
108. Tsami, E., Krokida, M.K., Drouzas, A.E., “Effect of Drying Method on The Sorption Characteristics of Model Fruit Powders”, *Journal of Food Engineering*, 38: 381-392 (1999).
109. Menlik, T., “Alternatif Akışkanlı İki Kademeli Soğutma Sisteminin Tasarımı”, İmali ve Performans Deneyler, Doktora Tezi, *Gazi Ünv. Fen Bil. Enst.*, Ankara, 5 (2005).

110. Kırmacı, V., Özdemir, M.B., “Soğuk Depolar İçin R-404a Alternatif Soğutucu Akışkanlı Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *Balıkesir Ünv. Fen Bil. Enst. Dergisi*, 7 (2): 66-76 (2005).
111. Özdemir, M.B., Kırmacı, V., “Soğuk Depo Soğutma Sisteminde Kullanılan R-134a Alternatif Soğutucu Akışkanına Göre Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *Teknoloji Dergisi*, 9 (2): 91-100 (2006).
112. “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Gıda Sanayii ÖİK Raporu”, Dondurulmuş Gıda Sanayii Alt Komisyon Raporu, *DPT*, Ankara, 1-84 (2001).
113. Özkul, N., “Uygulamalı Soğutma Tekniği”, 5. Baskı, *Makine Mühendisleri Odası Yayın*, Ankara, 115:709 (1999).
114. Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., “3 Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi”, *Gıda Teknolojisi Derneği*, Ankara, 77-570 (2003).
115. Heldmam, D.R., Singh, R.P., Evranuz, Ö., Çataltaş, İ., “Gıda İşleme Mühendisliği”, *İnkılap Kitabevi*, İstanbul, 200 (1989).
116. Kırmacı, B., Batu, A., “Üzümsü Meyvelerin IQF Yöntemi İle Dondurularak Muhafası”, *II. Ulusal Üzümsü Meyveler Sempozyumu*, Tokat, 354-358 (2006).
117. Khadatkar, R.M., Kumar, S., Pattanayak, S.C., “Cryofreezing and cryofreezer”, *Cryogenics*, 44: 661-678 (2004).
118. Cemeroğlu, B., Soyer, A., “Gıda Mühendisliğinde Temel İşlemler”, 29, *Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları*, Ankara, 78-85 (2005).
119. Acharya, A., Marchese, M.A., Bredenkamp, B., “Cryomechanical Freezing of Strawberries”, *Proceeding of the Int. Conference on Technical Innovations in Freezing and Refrigeration of Fruits and Vegetables*, Davis, 277-280 (1989).
120. Yapar, A., Erdöl, M., “Farklı Scaklık ve Tuz Uygulanarak Kurutulan Alabalık (*Oncorhynchus mykiss* W., 1792) larda Kurumanın Fonksiyonel İfadesi”, *Tr. J. of Veterinary and Animal Sciences*, 23 (3): 479-483 (1999).
121. Çalışkan, M.K., “Mikrodalga Enerjisi ile Kurutma”, Yüksek Lisans Tezi *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5 (2002).

122. Ceylan, İ., Doğan, H., “Nem kontrollü kondenzasyonlu kereste kurutma fırını”, **II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi**, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 155-166 (2004).
123. Aktaş, M., “Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalat ve Deneyisel İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 41-81 (2007).
124. Bulduk, S., “Gıda Teknolojisi”, **Detay Yayıncılık**, Ankara, 40-44 (2002).
125. Güngör, A., Özbalta, N., “Endüstriyel Kurutma Sistemleri”, **III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi**, İzmir, 737-747 (1997).
126. Günerkan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, **Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi**, 36 (13): 1-10 (2005).
127. Sham, P.W.Y., Scaman, C.H., Durance, T.D., “Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety”, **Journal of Food Science**, 66 (9): 1341-1347 (2001).
128. Biçer, Y., Kavak, E., Yıldız, C., “Teknik kurutmada kurutucu seçimi”, **TMMOB Makina Mühendisleri Odası Bilim Günleri**, Denizli, 221: 606-612 (1999).
129. Strumillo, C., Kudra, T., “Drying: Principles, Applications and Design”, **Gordon and Breach Science Publishers**, 369-405 (1986).
130. Ertekin, C., “Bazı Sebze ve Meyvelerin Kurutulması”, **Tarım Ürünleri kurutma Tekniği Çalıştayı**, İzmir, 33-57 (2002).
131. Demir, V., Günhan, T., “Tarım Ürünlerinin Kuruma Karakteristik Değerlerinin Belirlenmesi”, **Tarım Ürünleri kurutma Tekniği Çalıştayı**, İzmir, 17-31 (2002).
132. Demirtaş, C., “Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 58 (1996).
133. Yağcıoğlu, A., “Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği”, **Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları**, İzmir, 536-540 (1999).
134. Güner, M., “Kurutmanın Bilimsel Temelleri, Kurutma Modelleri ve Güneşli Kurutucular”, **Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınlar**, Ankara, 1205: 48 (1991).

135. Mengeş, G., “Patatesin farklı kurutma şartlarındaki kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 4-8 (2005).
136. Akyurt, M., Sevilir, E., Söylemez, E., Selçuk, K., “Güneş Enerjisi ve Bazı Yakıtlarla Meyve ve Sebze Kurutulması”, **TUBİTAK**, Proje No:TOAG-97, Yayın No:299, Ankara (1971).
137. Anthony, J., Fontana, Jr., “Water activity’s role in food safety and quality”, **Presented at the second NSF International conference on food safety**, Savannah, GA, USA, 1 (2000).
138. Liapis, A.I., Bruttini, R., “A theory for the primary and secondary drying stages of the freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes: Comparison between experimental data and theory”, **Separations Technology**, 4: 144-155 (1994).
139. Liapis, A.I., Bruttini, R., “Freeze Drying”, In Handbook of Industrial Drying 2nd Ed; Mujumdar, A. S. Ed. **Marcel Dekker Inc.**, New York and Basel, 309-343 (1995).
140. Liapis, A.I., Bruttini, R., “Freeze-drying of pharmaceutical crystalline and amorphous solutes in vials: Dynamic multi-dimensional models of the primary and secondary drying stages and qualitative features of the moving interface”, **Drying Technology**, 13: 43-72 (1995).
141. Liapis, A.I., Pikal, M.J., Bruttini, R., “Research and development needs and opportunities in freeze drying”, **Drying Technology**, 14: 1265-1300 (1996).
142. Sadikoglu, H., Liapis, A.I., “Mathematical modelling of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze drying in trays: Parameter estimation and model discrimination by comparison of theoretical results with experimental data”, **Drying Technology**, 15: 791-810 (1997).
143. Sheehan, P., Liapis, A.I., “Modeling of the primary and secondary drying stages of the freeze drying of pharmaceutical products in vials: Numerical results obtained from the solution of a dynamic and spatially multi-dimensional lyophilization model for different operational policies”, **Biotechnology and Bioengineering**, 60 (6): 712-728 (1998).
144. Meryman, H.T., “Principles of freeze-drying”, **Annals of the New Academy of Sciences**, 85: 630-640 (1960).
145. Perry, V.P., “Freeze-drying for the preservation of human tissues”, **Transplant P.**, 2: 189-193 (1976).

146. Sadikoglu, H., Ozdemir, M., Seker, M., “Optimal Control of the Primary Drying Stage of Freeze Drying of Solutions in Vials Using Variational Calculus”, *Drying Technology*, 21 (7): 1307-1331 (2003).
147. Sadikoglu, H., Ozdemir, M., Seker, M., “Freeze-Drying of Pharmaceutical Products: Research and Development Needs”, *Drying Technology*, 24: 849-861 (2006).
148. Sadikoglu, H., “Optimal Control of the Secondary Drying Stage of Freeze Drying of Solutions in Vials Using Variational Calculus”, *Drying Technology*, 23: 33-57 (2005).
149. Irzyniec, Z., Klimczak, J., Michalowski, S., “Freeze-drying of de black currant juice”, *Drying Technology*, 13 (1,2): 417-424 (1995).
150. Shishegarha, F., Makhlouf, J., Ratti, C., “Freeze-drying characteristics of strawberries”, *Drying Technology*, 20 (1): 131-145 (2002).
151. Krokida, M.K., Karathanos, V.T., Maroulis, Z.B., “Effect of Freeze-drying Conditions on Shrinkage and Porosity of Dehydrated”, *International Journal of Food Science and Technology*, 35: 369-380 (1998).
152. Özkara, T., “Dondurarak Kurutma Yöntemi İle Saklanan Greftlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Radyasyonla Sterilizasyonun Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 16 (2003).
153. Dolan, J.P., “Use of Volumetric Heating to Improve Heat Transfer During Vial Freeze-Drying”, Ph.D. Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 22 (1998).
154. Güler, Ç., Koçak, Ö., “Fizikokimya Gazlar ve Termodinamik”, *Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları*, İzmir, 236 (2003).
155. Çengel, Y.A., Boles, M.A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul, 25-26 (2002).
156. Cebe, M., “Fizikokimya-I”, *Vipaş*, Bursa, 386 (2003).
157. Mortimer, G.R., “Fizikokimya”, *Palme Yayıncılık*, çeviri ed: Şanlı, O., Ünal, H., İ., Ankara, 135 (2004).
158. Pikal, M.J., Shah, S., Roy, M.L., Putman, R., “The Secondary Drying Stage of Freeze Drying: Drying Kinetics as a Function of Temperature and Chamber Pressure”, *International Journal of Pharmaceutical*, 60: 203-217 (1990).

159. Kırmacı, V., Özdemir, M.B., “Soğuk Depolar İçin R-404a Alternatif Soğutucu Akışkanlı Buhar Sıkıştırılmalı Soğutma Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 7 (2): 66-76 (2005).
160. Odabaşıoğlu, T., “Ticari Soğutucularda Alternatif Soğutucu Akışkan R134a İçin Kılcal Boru Uzunluğunun Deneysel Olarak Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bil. Enst.*, Ankara, 33 (2001).
161. Kırmacı, V., Özdemir, M.B., “Soğuk Depoların Soğutma Sisteminde Kullanılan R407c Alternatif Soğutucu Akışkanına Göre Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *Cumhuriyet Üniv. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 27 (2): 24-38 (2006).
162. Althouse, A.D., Turnquist, C.H., Bracciano, A.F., “Modern Refrigeration and Air conditioning”, *The Goodheart-Willcox Company Inc.*, South Holland, 246 (1979).
163. Ataer, Ö.E., Türkoğlu, H., Usta, H., “Ticari soğutucularda alternatif soğutucu akışkanlarının kullanımı”, *Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı*, Ankara, 20 (1999).
164. Özdemir, M.B., Kırmacı, V., “Soğuk Depo Soğutma Sisteminde Kullanılan R-134a Alternatif Soğutucu Akışkanına Göre Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *Teknoloji*, 9 (2): 91-100 (2006).
165. Odabaşıoğlu, T., Usta, H., “Ticari Soğutucularda Alternatif Soğutucu Akışkan R134a İçin Kılcal Boru Uzunluğunun Deneysel Olarak Belirlenmesi”, *ULIBTK’0113.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Konya, 128-1321 (2001).
166. Türkoğlu, H., Ataer, Ö.E., Ataman, Ş., “Alternatif Soğutucu Akışkanlarının Karşılaştırılması”, *12.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sakarya, 516-521 (2000).
167. Ercan, E., “Düşük Buharlaştırıcı Sıcaklıklarında Ticari Soğutucular İçin Alternatif Soğutucu Akışkanların Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaz. Üniversitesi Fen Bil. Enst.*, Ankara, 27 (1999).
168. Wang, L., Sun, D.W., “Modelling vacuum cooling process of cooked meat-part 1: analysis of vacuum cooling system”, *International Journal of Refrigeration*, 25: 854-861 (2001).
169. Houska, M., Podlucky, S., Zitny, R., Gree, R., Sestak, J., Dostal, M., Burfoot, D., “Mathematical model of the vacuum cooling of liquids”, *Journal of Food Engineering*, 29: 339-348 (1996).

170. Watson, J., "The freeze-drying of wet and waterlogged materials from archaeological excavations", *Physics Education*, 39 (2): 171-176 (2004).
171. Truumees, E., Herkowitz, H.N., "Alternatives to autologous bone harvest in spine surgery", *Orthopaedic Journal*, 12: 77-88 (1999).
172. Doymaz, İ., "Convective drying kinetics of strawberry", *Chemical Engineering and Processing*, 47: 914-919 (2008).
173. Lui, Q., Bakker Arkema, F.W., "Stochastic modelling of grain drying. Part 2: Model development", *J Agricult Eng Res.*, 66: 275-80 (1997).
174. Agrawal, Y.C., Singh, R.P., "Thin layer drying studies on short grain rough rice", *ASAE*, Paper No. 3531 (1997).
175. Zhang, Q., Litchfield J.B., "An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer", *Drying Technology*, 9: 383-95 (1991).
176. Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., Hepbasli, A., "Mathematical modelling of drying of bay leaves", *Energy Conversion and Management*, 46: 1667-1679 (2005).
177. White, G.M., Ross, I.J., Ponekert, R., "Fully exposed drying of popcorn", *Trans ASAE*, 24: 466-468 (1981).
178. Yaldız, O., Ertekin, C., "Thin Layer solar Drying of Some Different Vegetables", *Drying Technology*, 19 (3): 583-56 (2001).
179. Chhinnman, M.S., "Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans", *Transactions of the ASAE*, 27: 610-615 (1984).
180. Ghodake, H.M., Goswami, T.K., Chakraverty, A., "Mathematical modelling of withering characteristics of tea leaves", *Drying Technology*, 24: 159-164 (2006).
181. Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F., "Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions", *Proceedings of the Seventh International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, Adana, 565-69 (1999).
182. Togrul, İ.T., Pehlivan, D., "Modelling of drying kinetics of single apricot", *Journal Food Engineering*, 58: 23-32 (2003).
183. Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A., "Thin Layer Drying Characteristics of Garlic Slices", *Journal Food Engineering*, 29: 75-97 (1996).

184. Henderson, S.M., “Progress in developing the thin layer drying equation”, *Transactions of the ASAE*, 17: 1167-1168 (1974).
185. Sharaf-Elden, Y.I., Blaisdell, J.L., Hamdy, M.Y., “A model for ear corn drying”, *Transactions of the ASAE*, 5: 1261-1265 (1980).
186. Wang, C.Y., Singh, R.P., “Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying”, *ASAE*, St. Joseph, MI, Paper No: 78-3001 (1978).
187. Kassem, A.S., “Comparative studies on thin layer drying models for wheat”, *In 13th international congress on agricultural engineering*, Morocco, 6: 2-6 (1998).
188. Pangavhane, D.R., Sawhney, P.N., Sarsavadia, P.N., “Effect of Various Dipping Pretreatments on Drying Kinetics of Thompson Seedless Grapes”, *Journal Food Engineering*, 39: 211-216 (1999).
189. Mengeş, H.O., Ertekin, C., “Vişne kurutmada kurumanın çeşitli modellerle açıklanması”, *S.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 21 (42): 4-10 (2007).
190. McMinn, W.A.M., McLoughlin, C.M., Magee, T.R.A., “Thin-layer modeling of microwave, microwave-convective, and microwave-vacuum drying of pharmaceutical powders”, *Drying Technology*, 23: 513-532 (2005).
191. Loague, K., Green, R.E., “Statistical and Graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models”, *Overview and Application J. Contam, Hydrol.*, 7: 51-73 (1991).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KIRMACI, Volkan
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.08.1978 İzmir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0312 202 87 05
 Faks : 0312 212 00 59
 e-mail : vkirmaci@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü	2002
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü	1999
Lise	İzmir Çınarlı End. Meslek Lis.	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2000-	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fak. Makine Eğitimi Bölümü	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınları

Uluslararası Dergilerdeki (SCI) Yayınlar

1. Kırmacı, V., Usta, H., Menlik, T., “An Experimental Study On Freeze Drying Behavior Of Strawberries”, *Drying Technology*, Vol. 26, No. 12 (2008) (baskıda).

Ulusal Hakemli Dergilerdeki Yayınlar

1. Usta, H., Kırmacı, V., “Termoelektrik Etkiler Ve Soğutma Etkinliğinin Uygulanması”, *Teknoloji*, 5 (3-4): 65-71, 2002.
2. Usta, H., Dincer, K., Kırmacı, V., Variyenli, H. İ., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava İle Karbondioksitin Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel İncelenmesi”, *C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 24 (2): 28-39, 2003.
3. Usta, H., Dincer, K., Kırmacı, V., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava İle Oksijenin Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel İncelenmesi”, *Teknoloji*, 7 (3): 415-425, 2004.
4. Usta, H., Kırmacı, V., Dincer, K., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava İle Azot Gazının Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneysel İncelenmesi”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 6 (2): 67-76, 2004.
5. Kırmacı, V., Özdemir, M., B., “Soğuk Depolar İçin R-404a Alternatif Soğutucu Akışkanlı Buhar Sıkıştırıcı Soğutma Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 7 (2): 66-76, 2005.
6. Usta, H., Kırmacı, V., Dincer, K., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava, Oksijen Ve Karbondioksitin Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, *Teknoloji*, 8 (4): 311-319, 2005.
7. Usta, H., Menlik, T., Kırmacı, V., “R-404a/R-508b Soğutucu Akışkan Çiftinin Kademeli Soğutma Sistemindeki Performansının Deneysel İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 9 (1): 13-19, 2006.
8. Özdemir, M., B., Kırmacı, V., “Soğuk Depo Soğutma Sisteminde Kullanılan R-134a Alternatif Soğutucu Akışkanına Göre Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *Teknoloji*, 9 (2): 91-100, 2006.

9. Usta, H., Kırmacı, V., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Ve Azot Kullanılarak Isıtma–Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneyisel Olarak İncelenmesi”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 7 (2): 13-22, 2006.
10. Kırmacı, V., Usta, H., Tenlik, T., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Hava Oksijen Karbondioksit Azot Ve Argon Kullanılarak Isıtma–Soğutma Sıcaklık Performanslarının Deneyisel Olarak Karşılaştırılması”, *Sakarya Fen Bil. Enst. Dergisi*, 10 (2): 39-44, 2006.
11. Kırmacı, V., Özdemir M., “Soğuk Depoların Soğutma Sisteminde Kullanılan R407c Alternatif Soğutucu Akışkanına Göre Sistem Eleman Kapasitelerinin Bilgisayar Programıyla Belirlenmesi”, *C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 27 (2): 24-38, 2006.
12. Kırmacı, V., “Vorteks Tüpünde Akışkan Olarak Kullanılan Hava ve Argonun Soğutma-Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneyisel Olarak İncelenmesi”, *Celal Bayar Ünv. Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (2): 191-199, 2007.
13. Kırmacı, V., “Altı Nozullu Vorteks Tüpünün Soğutma–Isıtma Sıcaklık Performanslarının Deneyisel Olarak İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 9 (4): 219-227, 2007.

Ulusal Bildiri

1. Usta, H., Menlik, T., Kırmacı, V., “Alternatif Akışkanlı Kaskat Soğutma Sisteminin Deneyisel İncelenmesi”, *ULIBTK’05 15. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği kongresi*, 900-905, 2005.

Hobiler

Masa tenisi, Futbol.