



**DİLİMLENMİŞ CENNET HURMASININ
(DIOSPYROS KAKI) DONDURARAK KURUTMA
KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ**

Abdullatif ALHAMMADIY

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**DİLİMLENMIŐ CENNET HURMASININ (DIOSPYROS KAKI)
DONDURARAK KURUTMA KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ**

Abdullatif ALHAMMADIY

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Abdullatif ALHAMMADİY tarafından hazırlanan “DİLİMLENMİŞ CENNET HURMASININ (DIOSPYROS KAKI) DONDURARAK KURUTMA KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. Savunma sınavı tarihi: 21/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Kurtuluş BORAN (GÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Bahadır ACAR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİLİMLENMİŞ CENNET HURMASININ (DIOSPYROS KAKI) DONDURARAK KURUTMA KİNETİĞİNİN BELİRLENMESİ

Abdullatif ALHAMMADİY

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

Ocak, 2022, 83 sayfa

Ele aldığımız bu çalışmada cennet hurması meyvesinin besin değerlerini kaybetmeden uzunca bir süre muhafaza edilmesinde kullanılan meyvenin dilimlenerek kurutulması ile kinetiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma Türkiye’de Cennet Hurması olarak bilinen Abanozgiller ailesinden literatürdeki adı Diospyros kaki olan meyvenin dondurarak kurutulması, kinetik kurutma modelinin belirlenmesi ve efektif difüzyon katsayısı belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada 100 gr ve 5 mm et kalınlığına sahip cennet hurması kurutma cihazının içerisine yerleştirilmiş, 14 saat kurutma işlemine tabi tutularak her iki saatte bir ağırlık kayıpları gözlemlenerek veriler işlenmiştir. Elde edilen verilere Matlab programı kullanılarak 8 farklı kinetik kurutma modeli uygulanmıştır. Uygulama sonucunda tahmini standart hatalar olan (RMSE), ki-kare (X^2), regresyon katsayıları (R^2) hesaplanmış, hata analizleri yapılmış ve R^2 , X^2 , RMSE değerleri sırasıyla, 0,019483, $5,062 \times 10^{-4}$ ve 0,9558 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre en uygun modelin Page modeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca cennet

hurması için efektif difüzyon katsayılarının $1,79775 \times 10^{-10}$ m²/s olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Sözcükler : Cennet hurması, Dondurarak kurutma, Kurutma kinetiği.

Bilim Kodu : 92808

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DETERMINATION OF FREEZE-DRYING KINETICS OF SLICED DIOSPYROS KAKI

Abdullatif ALHAMMADIY

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Energy Systems Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK

January, 2022 ,83 pages

In this study, it was aimed to determine the kinetics of the fruit used to preserve the palm of paradise fruit for a long time without losing its nutritional values by slicing and drying. This study was performed to define the kinetic drying model and to define the effective diffusivity coefficient of the fruit, which is called Diospyros kaki in the literature, from the family of Ebonaceae known as the Persimmon in Turkey. In the study, persimmon by the weight of 100 g and with a thickness of 5 mm were placed in the drying device, and the data were processed by observing the weight loss every two hours after being subjected to the drying process for 14 hours. 8 different kinetic drying models were applied to the acquired data using the Matlab program. As a result of the application, the estimated standard errors (RMSE), chi-square (X^2), regression coefficients (R^2) were calculated, error analysis was performed, R^2 , X^2 , and RMSE values were found, as 0.019483, 5.062×10^{-4} and 0.9558. According to these results, it was determined that the most suitable model is the Page model. Also, the effective

diffusivity coefficients for Persimmon (*Diospyros Kaki*) were calculated as $1.79775 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Key Word : Persimmon, freeze drying, drying Kinetics.

Science Code : 92808

TEŐEKKÖR

GerçekleőtirmiŐ olduğum projede, makalede, tez çalıŐmasında ve uygulamalı deneylerinde, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, destek ve emeğini esirgemeyen tez danıŐmanım Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili aileme teŐekkörü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	12
LİTERATÜR TARAMASI.....	12
BÖLÜM 3	17
GIDALARIN MUHAFAZA YÖNTEMLERİ.....	17
3.1. GIDALARI DONDURMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ.....	17
3.1.1. Soğuk Hava ile Dondurma.....	19
3.1.2. Dolaylı Temas Metoduyla Dondurma	20
3.1.3. Daldırma Yöntemi ile Dondurma	23
3.1.4. Kriyojenik Sıvılarla Dondurma	23
3.1.5. Kriyomekanik Dondurma	24
3.2. GIDALARI KURUTMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ.....	24
3.2.1. Doğal Kurutma	25
3.2.2. Yapay Kurutma.....	25
3.3. KURUTUCU SEÇİMİ	34

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4	37
DONDURARAK KURUTMA	37
4.1. DONDURARAK KURUTMAYA GİRİŞ	37
4.2. SÜBLİMLEŞMENİN TEORİSİ	37
4.3. SÜBLİMLEŞMENİN TERMODİNAMİĞİ.....	39
4.4. KİNETİK TEORİSİ VE SÜBLİMLEŞME ORANI	42
4.5. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN KRİTİK SICAKLIKLAR	43
4.5.1. Ötektik Sıcaklık	44
4.5.2. Camsı Geçiş Sıcaklığı.....	45
4.6. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNİN EVRELERİ.....	47
4.6.1. Dondurma Evresi	47
4.6.2. Birinci Kurutma Evresi.....	48
4.6.3. İkinci Kurutma Evresi.....	49
4.7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEM ELEMANLARI	50
4.8. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	50
4.9. DONDURARAK KURUTMA YÖNTEMLERİ	52
4.9.1. Manifold Yöntemi	52
4.9.2. Grup (Batch) Yöntemi	53
4.9.3. Yığın (Bulk) Yöntemi.....	54
4.10. DONDURARAK KURUTUCULAR	54
4.10.1. Pilot Ölçekli Dondurarak Kurutucular	54
4.10.2. Endüstriyel Dondurarak Kurutucular	56
4.11. DONDURARAK KURUTMANIN UYGULAMA ALANLARI	61
4.12. DONDURARAK KURUTMANIN AVANTAJLARI	62
4.13. DONDURARAK KURUTMA İŞLEM MALİYETİ.....	62
4.14. ÜRÜNÜN PAKETLENMESİ VE DEPOLANMASI.....	63
4.15. KURUTMA NEM ORANI VE KURUTMA SABİTLERİNİN BELİRLENMESİ.....	64
 BÖLÜM 5	 67
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	67
5.1. DENEY MATERYALİ VE METODU	67
5.2. NUMUNE HAZIRLAMA VE DENEY PROSEDURU	68

	<u>Sayfa</u>
5.3. YARI TEORİK MODELİ KULLANIMI	70
5.4. DENEYSEL SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	71
BÖLÜM 6	77
SONUÇ	77
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu sistemi.	20
Şekil 3.2. Sürekli plakalı dondurucuda dondurulacak ürün girişi ve donmuş ürün çıkışı.	22
Şekil 3.3. Doğal kurutma yöntemi.....	25
Şekil 3.4. İletimle kurutma sistemi.....	26
Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucunun yapısı.....	27
Şekil 3.6. Paralel akış tüneli kurutucusu.	28
Şekil 3.7. Zıt akış tünel kurutucu.....	29
Şekil 3.8. Çapraz akış tünel kurutucusu.	29
Şekil 3.9. Dönen tip püskürtmeli kurutucu modeli.....	30
Şekil 3.10. Döner kurutucu modeli.	31
Şekil 3.11. Kabin kurutucu modeli.	31
Şekil 3.12. Silindir kurutucu modeli.	33
Şekil 3.13. Askı kurutucu modeli.....	34
Şekil 3.14. Kurutucu seçiminde işlem adımları.	35
Şekil 4.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta).....	40
Şekil 4.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi.....	40
Şekil 4.3. Tuzun sulu çözeltisinin faz denge diyagramı.....	45
Şekil 4.4. Varsayımsal çözünen/çözücü sistem faz diyagramı.....	46
Şekil 4.5. Dondurarak kurutma sistemi.	50
Şekil 4.6. Dondurarak kurutma yönteminde gıda ürününün iletim ile ısıtılması. ...	51
Şekil 4.7. Dondurarak kurutma yönteminde gözenekli yapı.	51
Şekil 4.8. Manifolt kurutma yöntemi.	53
Şekil 4.9. Grup (Batch) kurutma yöntemi.	53
Şekil 4.10. Yığın (Bulk) kurutma yöntemi.	54
Şekil 4.11. Pilot ölçekli dondurarak kurutucu (Criofarma Model C5–2).	55
Şekil 4.12. Endüstriyel dondurarak kurutucu (Criofarma Model C300–7).	57
Şekil 4.13. Sürekli dondurarak kurutucu (CONRAD) şematik görüntüsü.	58
Şekil 4.14. Vakum sprey dondurarak kurutucu.....	59
Şekil 4.15. Tipik tünel dondurarak kurutucu şematik diyagramı.....	60

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.16. Dondurarak kurutma işleminin enerji maliyeti.	63
Şekil 5.1. Cennet hurmasının meyvesi.	67
Şekil 5.2. ScanVac coolsafe dondurarak kurutma cihazının şematik görünümü.	68
Şekil 5.3. Sıcaklık ve zaman diyagramı.	69
Şekil 5.4. Cennet hurma numunelerinin zamana (time) göre nem(moisture) oranları.	71
Şekil 5.5. Cennet hurma numunelerinin kurutma süresine göre nem miktarı.	74
Şekil 5.6. Cennet hurma numunelerinin dondurarak kurutulmasında kurutma hızının değişimi.	74
Şekil 5.7. Cennet hurması için ın (mr) ve kurutma zamanı grafiği.	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Dünya’da cennet hurması üretiminin ülkelere göre dağılımı	2
Çizelge 1.2. Dünya’da cennet hurması üretimin yıllara göre dağılımı 2019 verileri...	3
Çizelge 1.3. Diospyros cinsinin taksonomideki yeri.....	4
Çizelge 1.4. Cennet hurması meyvesinin bileşenleri	7
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı	38
Çizelge 4.2. Buz-Buhar sisteminde süblimasyon ısısı ve mutlak basıncın sıcaklık değerine bağımlı olarak değişimi.	39
Çizelge 4. 3. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan modeller	65
Çizelge 5.1. Kurutma kinetiği için ampirik ve yarı deneysel denklemler.....	72
Çizelge 5.2. Kurutma kinetiği için kullanılan modellerden elde edilen sonuçlar.	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ppm	: Milyonda bir
g	: Gram
mg	: Miligram
W	: Watt
pH	: Power of Hydrogen (Hidrojenin Gücü)
G	: Gibbs enerjisi (kJ)
MR _{deneyse}	: Deneysel nem oranı
MR _{tahmini}	: Tahmini nem oranı
RMSE	: Tahminin standart hata
χ^2	: Ki-kare
P _b	: Buharlaşma basıncı (Pa)
P' _e	: Buharlaştırıcı ortam basıncı (Pa)
CO ₂	: Karbondioksit
N ₂	: Azotdioksit

KISALTMALAR

vb. : ve benzeri

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ebenales takımının Ebenaceae familyasına ait olan cennet hurması 3 farklı cinsten oluşmaktadır; Euclea, Diospyros ve Lissocarpa [1]. Diospyros cinsi içerisinde cennet hurmaları yer almaktadır ve bu cins içerisinde toplamda 400 farklı tür bulunur [2,3].

“Kutsal yiyecek” ya da “tanrıların yiyeceği” anlamına gelen Diospyros kelimesi Yunancadan gelmektedir ve “Dios” (Baştanrı, Jupiter) ile “pyros” (tane) kelimelerinin birleşmesinden oluşmuştur. Aynı zamanda bazı kaynaklarda bu meyve Zeusun meyvesi olarak geçmektedir. Meyvenin bu ismi almasının sebebi tadının mükemmelliği ve görünümünün güzelliğinde kaynaklanmıştır. Cennet hurması Türkçede, Cennet elması Trabzon hurması şeklinde de kullanılmaktadır [1,4].

Cennet hurması (Diospyros kaki) meyvesi yaprak döken ve tekli bir bitkidir. Bu meyve şekil, renk ve boyut açısından farklılıklar gösterir. Cennet hurması meyvesinin hasadı eylül sonu başlayarak aralık ayı başına kadar sürmektedir. Cennet hurması meyvesi türlerinin çoğundaki kekremsi tat tam olarak olgunlaşmanın tamamlanmasına kadar devam eder ve bu meyve türleri tatlıdır [5].

Sonbaharda yaprak dökümünden evvel cennet hurması meyvesinin yapraklarında 3 farklı renk oluşur. Bu renkler; kırmızı, yeşil ve turuncu-kırmızıdır. Bu renklerin dinlendirici ve gözü yormayan özelliğe sahip olmasının yanında romantizme katkı sağlayarak süs bitkisi olarak da kullanılmaktadır [4].

Sıcak iklim şartlarına uyum gösteren Diospyros kaki L. (Cennet hurması) subtropik bir iklim meyvesi olarak bilinir. Bu meyvenin subtropik iklim meyvesi içinde yer alan diğer türlerinden farkı kış sıcaklığı koşullarında -12°C'ye kadar dayanma göstermesi ve kış mevsiminde yapraklarını dökmesidir [1,6]. Cennet hurması (Diospyros kaki L.)

meyvesinin şekli yuvarlak biçimde, rengi sarı renkten kırmızı renge ya da turuncu renge dönüşüm gösteren, tat olarak buruk ve buruk olmayan, ağırlığı 500 gram, kabuğu ince, pürüzsüz ve parlaktır [7].

Cennet hurması meyvesinin çeşitlerinden tadı buruk olanlar yenilebilmesi için fizyolojik olgunluğa gelmesi, burukluğun CO₂ uygulaması ile giderilebilir olması, 500 Ppm'lik ethrel solüsyon içerisine meyvelerin 2 dakika daldırılması, meyvelerin etilen odalarında olgunlaştırılması, meyvelerin 21°C sıcaklıkta 2-3 hafta bekletilmesi ve %2 kireçli suda bekletilmesi ile meyveler kendiliğinden yumuşar ve yeme olgunluğuna erişir [8].

Cennet hurması meyvesinin yetiştiriciliği günümüzde gün geçtikçe önemli hale gelmektedir. Japonya ve İtalya bu türün önemli üretici ülkelerindedir ancak yetiştiricilik alanlarının azalması ile bu türün yetiştiricilik alanlarında Avustralya, Yeni Zelanda ve bazı Akdeniz ülkelerinde artma yaşanmıştır. Bu türün yetiştiriciliğinin yakın bir dönemde Türkiye'de hızla artış olacağı düşünülmektedir [14].

Cennet hurması üretimi ile üretim alanında dünyada son 10 yılda önemli bir artış yaşanmıştır [12]. Uçar tarafından yapılan çalışmada 2010 verilerine göre cennet hurmasında önde gelen ülkeler Çizelge 1.1'de yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Dünya'da cennet hurması üretiminin ülkelere göre dağılımı [12].

Ülke	Alan (Ha)	Üretim (Ton)	Üretim/ Alan
Çin	683.869	2.533.899	3,7
Kore	30.669	430.521	14,0
Japonya	23.200	244.800	10,6
Brezilya	8.650	169.000	19,5
Azerbaycan	6.917	132.179	19,1
İtalya	2.700	50.000	18,5
Özbekistan	3.000	31.000	10,3
İsrail	3.000	30.089	10,0
Yeni Zelanda	180	3.000	16,7
İran	100	1.000	10,0
Avustralya	82	715	8,7
Nepal	73	489	6,7
Meksika	45	442	9,8
Slovenya	32	441	13,8

Cennet hurmasının dünyadaki üretim ve üretim alanı 2010 yılında yapılan çalışmada son 10 yıllık verilere göre büyük artış göstermiştir. Cennet hurmasının Türkiye'ye geliş tarihi bilinmemektedir ve çok eskiden beri yetiştiriciliği yapılmaktadır [1].

2010 yılında elde edilen bu verilerden günümüze kadar (2022) gelen süreçte dünyada cennet hurması üretiminde ne kadarlık bir artış olduğunu aşağıda yer alan Çizelge 1.2'de görülmektedir.

Çizelge 1.2. Dünya'da cennet hurması üretimin yıllara göre dağılımı 2019 verileri.

Ülke	Alan (Ha)	Üretim (Ton)
Çin	919.995	3.207.516
İspanya	0	0
Kore Cumhuriyeti	26.366	316.042
Japonya	18.900	208.200
Azerbaycan	10.933	177.130
Brezilya	8.229	168.658
Özbekistan	4.600	94.065
İtalya	0	0
Türkiye*	3.101	51.317
İsrail		27.000
İran	1.684	25.272
Diğer Ülkeler	1.718	46.191
Dünya	992.425	4.321.391

Kaynak: [15].

Tablo 1.2'den anlaşıldığı üzere Çin cennet hurması yetiştiriciliğinde hala ilk sırada bulunmaktadır. Buna bağlı olarak üretiminde de artış meydana gelmiştir. Fakat İtalya'da yıllar içinde cennet hurması yetiştiriciliği bitmiştir.

Türkiye'nin değişik bölgelerinde cennet hurması uyumluluk göstermiştir. Karadeniz Bölgesi Diospyros cinsi içinde yer alan Diospyros lotus L. Türünün yayın olarak yetiştigi bölgelerdendir. D. kaki türünün ticari olarak yetiştiriciliği yapılmaktadır ve bu türün Türkiye'ye girişi Karadeniz bölgesinden olduğu için Trabzon hurması (cennet hurması) olarak adlandırılmıştır. Cennet hurmasının yetişmesi Türkiye'de turunçgiller, incir, çay ve fındık tarımının yoğun biçimde yapıldığı bölgelerde evlerin bahçelerinde bireysel ağaçlar olarak ya da küçük bahçelerde gerçekleşmektedir. Cennet hurmasının çeşit kavramı Türkiye'de daha gelişim gösterememiştir. Cennet hurması üretimi Ege,

Marmara ve Karadeniz bölgelerinde dağınık, parçalı ve bahçe içinde olmayan düzensiz bir şekilde yapılmaktadır. Türkiye’de cennet hurmasının en yaygın olan üretim bölgesi Akdeniz Bölgesidir. Özellikle doğu Akdeniz bölgesinde cennet hurması yetiştirilen bahçelerin sayısında yıl geçtikçe artış olmaktadır. Bu duruma neden olan en önemli sebep cennet hurması meyvelerinin pazarlama dönemlerinde yüksek fiyatlı alıcı bulmasından kaynaklanmaktadır. Cennet hurması meyvesinin en yoğun olduğu üretim alanı Hatay’dır. Hatay’ın arkasından Adana ile Mersin gelmektedir [11].

Sistematik olarak sınıflandırmada Cennet hurmasının 4 türü vardır:

- *Diospyros kaki* L.: Bu türün kökeni Çin’dir. Cennet hurmasının işlenerek ya da taze olarak tüketilmesi bu tür içinde yer almaktadır.
- *Diospyros lotus* L.: Bu türün yalnızca anaç olarak bir değeri vardır. Bu türün kökeni Asya’dır ve Tanen kaynağı olarak kullanılmamaktadır.
- *Diospyros virginiana* L.: Bu türün yalnızca anaç olarak bir değeri vardır ve kökeni Kuzey Amerika’dır.
- *Diospyros oleifera* Cheng.: Bu tür anaç olarak ve tanen kaynağı olarak kullanılmaktadır ve türün kökeni Çin’dir [16].

Aşağıda yer alan Çizelge 1.3’de *Diospyros* cinsinin taksonomideki yeri gösterilmiştir.

Çizelge 1.3. *Diospyros* cinsinin taksonomideki yeri [16].

Şube	Magnoliophyta
Sınıf	Magnoliopsida
Altsınıf	Dilleniidae
Takım	Ebenales
Aile	Ebenaceae
Cins	<i>Diospyros</i>

Kullanılan anaç türüne göre cennet hurması ağacının kök sistemi değişik yapıdadır. D.kaki meyvesi yenilen kültür çeşitlerinin anacıdır ve bu tür az miktarda saçakları bulunan ve kazık köklü bir yapıdadır. Cennet hurması meyvesi ağacının gövdesinin

rengi gridir. Kullanılan anaç türünün yaşına ve kuvvetine göre gövde çapı 12-35 cm, ortalama boy uzunluğu 5-6 m olmakla birlikte 12 m'ye kadar çıkmaktadır.

Cennet hurması meyvesi ağacının gelişimi dik, yarı dik ve yayvan olarak gerçekleşmekte ve türüne göre ağacın dalları orta kuvvette ya da kuvvetli bir şekilde gelişim göstermektedir. Cennet hurması ağacının dikiminin ikinci ve üçüncü yıllarında dallarında fazla miktarda oburluk olmaktadır. Bu obur olan dalların büyümesi dik ve kuvvetli olarak gerçekleşir ve dallanmazlar. Obur dalların üçüncü yıldan itibaren azalma göstermekte ve fazlaca kısa boylu meyve dalcıkları meydana gelir. Tomurcukların dinlenme devresinde rengi koyu kahverengi ve yapısı daha belirgindir. Bazı türlerin (Hachiya) dallanması seyrek olurken bazı türlerin (Fuyu) dallanması daha sık olmaktadır.

Cennet hurması ağaçlarında 3 tip çiçek bulunur:

- Erdişi çiçek: Bu çiçek tipinde erkek ve dişi organlar yer alır.
- Dişi çiçek: Bu çiçek tipinde sadece dişi organlar vardır.
- Erkek çiçek: Bu çiçek tipinde sadece erkek organlar bulunmaktadır.

Erdişi çiçek tipi az miktarda bulunmaktadır. Erdişi çiçek tiplerinin meyve verimine önemli bir etkisi yoktur. Bir yıl önce oluşmuş olan dalların gözlerinden süren yan dallarda dişi çiçekler oluşmaktadır. Dişi çiçekler ilk açtıklarında taç yaprakların rengi sarımsı krem bir tondadır ve rengi sonradan kahverengiye dönüşmektedir. Çiçeğin taç yaprakları dört parçalıdır ve çiçeklerin gösterişli, iri olan çanak yapraklarının yapısı serttir ve rengi yeşildir. Yaprak koltuklarında bir evvelki yılda erkek çiçekler belirlemektedir. Erkek çiçeklerin boyutu dişi çiçeklere göre daha küçük yapıdadır ve tek iki ya da üç salkım halinde yeni sürgünlerin yaprak koltuklarında bulunmaktadır. Erkek çiçeğin çanak ve taç yaprakları dört parçalıdır. Taç yapraklarının rengi açık sarıdır, boyu 1 cm ve tüp biçimindedir [1].

Cennet hurmasının meyve etinde burukluk olmayan türünden olan Fuyu'nun meyveleri basık, iri ve yuvarlak biçimde, meyve kabuğunu rengi turuncu- kırmızı ve meyve eti sarı – turuncu renktedir. Tozlanma ile değişmeyen meyve eti buruk

olmadığından dolayı sertken de yenilebilmektedir ve yüksek kaliteli, muhafaza edilmeye uygun olan orta- erkenci bir türdür. Bu türün ağaçları çok kuvvetli bir şekilde gelişim göstermektedir. Fuyudan göz mutasyonu ile Matsumoto Wase Fuyu elde edilen bu çeşit Fuyu'ya göre adaptasyon kabiliyeti daha yüksek olan erkenci, verimli, tozlanma ile değişim yaşamayan ve meyve eti buruk olmayan bir çeşit olmuştur [9,11].

Cennet hurması meyvesinde pazar değerini belirlerken kullanılan en önemli kalite faktörü görünümüdür. Büyüklük, renk, şekil, bozulma miktarı ve meyvenin durumuna göre kalite değerlendirmesi yapılmakta ve pazarlamada en önemli parametreler olgunlaşan meyvedeki şeker içeriği ile renk değişimi ve burukluk olarak değerlendirmeye alınmaktadır. Cennet hurması meyvesinde meyve kabuğu rengi hasat zamanında genel olarak turuncu sarı, yeşilimsi sarı ve turuncu kırmızı biçiminde değişiklik göstermektedir. Cennet hurmasının fizyolojik olgunluk zamanında türleri kabuklarının rengi turuncu, koyu turuncu, kırmızı turuncu, kırmızı halini almaktadır [17].

Cennet hurması meyvesi başlıca buruk ve buruk olmayan şeklinde iki gruba ayrılır:

- Buruk olmayan cennet hurması çeşitleri: Jiro, Suruga Fuyu ve Gosho'dur.
- Buruk olan cennet hurması çeşitleri: Aizumishirazu, Hiratanenashi, Yotsumizo, ve Yokono ve Hachiya'dır [18].

Cennet hurması meyvesinin önemli özellikleri arasında olan burukluk fenolik bileşikler içermesinden kaynaklanır. Cennet hurması meyvesinin yüksek miktarda içermiş olduğu fenolik bileşikler ile askorbik asit meyveye antioksidan özellik kazandırmaktadır. Cennet hurması E vitamini, A vitamini, tanen ve karbonhidrat yönünde oldukça zengindir [10]. Cennet hurmasını bileşimi Çizelge 1.4'de yer almaktadır.

Çizelge 1.4. Cennet hurması meyvesinin bileşenleri [10].

	Herrman 1994, (13)	Duckwort 1979, (14)
Su	79-83	78-88
Toplam Kurumadde (g/100g)	17-21	12-22
Toplam Şeker (g/100g)	13-15	-
Ham Protein (g/100g)	0,4-0,8	0,5
Ham Yağ (g/100g)	0,1-0,3	İz Miktarda
Ham Selüloz(g/100g)	-	1,2
Kül (g/100g)	0,3-0,7	-
Askorbik Asit (mg/ 100g)	20-50	9-5
Kalsiyum (mg/ 100g)	6-20	10
Magnezyum (mg/ 100g)	8-11	-
Fosfor (mg/ 100g)	20	-
Demir (mg/ 100g)	0,1-0,5	0,4
Potasyum (mg/ 100g)	130-210	-
Thiamin (mg/ 100g)	0,01-0,03	0,02
Niacin (mg/ 100g)	0,01-0,05	0,2
Riboflavin (mg/ 100g)	0,3-0,5	0,02

Cennet hurması meyvesinin kalp- damar hastalıklarında tedavi edici etkisi vardır. Son yıllarda yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre cennet hurması meyvesinin yüksek tansiyon ve kolesterolü düşürdüğü ortaya konulmuştur. Bunun yanında meyvenin sindirim sistemi hastalıklarına iyi geldiği, bağışıklık sistemini kuvvetlendirdiği ve kanser hastalıklarından korunma noktasında önemli bir yerdedir.

Cennet hurması meyvesi genel itibariyle kansızlık, zayıflığın giderilmesi, mide-bağırsak hastalıkları ve vitamin eksikliğini gidermede tedavi edici yönü vardır. Cennet hurması meyvesi ile iştah açılmakta, ishal kesilmekte, bağırsak iltihabına kesilmekte ve mide gastriti önlenmektedir.

Cennet hurması kurutulularak ve taze olarak tüketilmektedir. Buna ek olarak gıda sanayinde sos, dondurma, tatlı, krema, sakız, kek, marmelat vb. alanlarda kullanılmaktadır. Cennet hurması meyvesinin kanatılması ile şurup elde edilmektedir

ve bu şurup jelatinli tatlılar, dondurma, sakız, sos, dondurma, kokteyl ve kek dolgusunda kullanılmaktadır [10].

Meyve yumuşaması ve tanenden oluşan burukluğun giderilmesi ile cennet hurmasında üstün yeme olumu özdeşleşmiştir. Meyvede çözünen tanen miktarıyla burukluk açıklanmaktadır. Cennet hurması meyvesi içerisinde yer alan tanen molekülünde floroglusin ve gallik asit bulunmakta ve bunlar meyve içerisindeki geniş özel hücrelerde depo edilmektedir. Meyvelerin çeşitliliğine göre hücrelerin büyüklüğü ve sayısı, içindeki tanen miktarı farklılık göstermektedir. Cennet hurması meyvesinin olgunlaşmaya başlaması ile içerisinde bulunan tanen hücrelerinin sayısı ve büyüklüğünde artış olmaktadır. Olgunlaşmamış olan Cennet hurması meyvesinin aşırı derece buruk olmasının nedeni tanen hücresi içindeki suda çözünebilir tanen hücrelerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Tanen çözünebilir olması durumunda kesilen yüzeye kolay bir şekilde yayılmaktadır. Polimerize tanenin suda çözünmemesinden dolayı burukluk olmamaktadır [17]. Meyvenin buruk halde yenilmesi sırasında meyve etinde bulunan tanen hücrelerinin parçalanıp çözünmesi ile tanenler ortaya çıkar ve ağızda kuvvetli bir burukluk hissi oluşturur. Buna bağlı olarak bazı hurma çeşitleri olgunlaşmış halde bile yenemez durumdadır [19].

Cennet hurması meyvelerinden burukluğun giderilmesi için, meyvenin ağaçta olduğu zaman veya toplandıktan sonra etanol buharını uygulamak, ılık su içerisine daldırma, karbondioksit gazı ile muamele, kurutma ve dondurma gibi yöntemler kullanılır [20]. Çözünür olan tanenlerin çözünmez duruma gelmesi ile burukluk ortadan kaybolmaktadır [21]. Meyvedeki burukluk uzak doğu ülkelerinde genellikle güneşte kurutma yöntemi ile giderilmektedir. Hurmalar sert halde iken küçük olanların iki bölünmesi, büyük olanların dörde bölünmesi ile ipe dizilerek güneşte kurutulur. Bunun yanında kurutma işlemi kurutma depolarında da gerçekleşmektedir [10]. Güneşte kurutulan hurmaların yumuşamasının yanı sıra tadında ve lezzetinde değişimler yaşanmaktadır [22].

Cennet hurması meyvesi türlerini muhafaza etmede gerekli olan koşullar, soğuk olan bir depoda -1 °C ve 1 °C'de %80-90 nem oranında 2-4 ay arasında ömrü olmaktadır. Japonya'da plastik torbalarda %5-10 O₂ ve %100 nisbi nem ile oluşturulan atmosferik

ortamda paketlenmiş olan Fuyu türünün meyveleri 0 °C'de 5 aylık bir süre saklanmıştır [8].

Gıdaların saklanması farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en çok kurutma yöntemi tercih edilmektedir.

Ürün içerisindeki suyun giderilmesi kurutma işlemi ile gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak farklı yöntemler kullanılır. Katı olan maddelerden su ya da diğer uçucu maddelerin çıkartılması işlemi kurutma işleminin en kapsamlı olan tanımıdır. Kurutma işlemi ve kurutucunun seçilmesinde kullanılan önemli etkenler; mümkün miktarda yüksek kuruma hızına ulaşılması ve uzun süre saklanacak olan ürünü elde etmede en az seviyede enerji tüketiminin olması.

Gıdaları kurutmadaki amaç;

- Nemli olan maddelerde serbest suların uzaklaştırılması ile maddelerde oluşan mikroorganizmaların gelişmesi ve biyokimyasal reaksiyonları engellenmesi ile çoğalmayacağı bir düzeye düşürülmesi ile uzun zaman maddelerin dayanmasının sağlanması,
- Maddelerin kullanımı, taşınması ve uygulama yapılacak diğer işlemler için ağırlığın ve hacmin azaltılması ile ekonomik olması,
- Pazarlama ve kullanım açısından talep edilen koşullarda üretim yapmak,
- Ürünlerin korunması ve sterilize edilmesi,
- Atık sulu karışımlardan ya da çözeltilerden tekrardan yan ürünlerin kazanılması,
- Ürünün kokusunun, tadının ve besin değerinin nem miktarında olan azaltılma ile kalite özelliklerinin korunması,

Çok sayıda gıda ürününün kurutulma yöntemi Türkiye'de geleneksel şekilde güneşe serilerek yapılmaktadır. Güneşe serilerek yapılan kurutulma işlemi uzun sürmektedir. Bu işlem türünde istenmeyen mikrobiyolojik bozulmalar ve istenmeyen bakterilerin oluşumuna ortam sağlanmaktadır.

Geleneksel yöntemlerle yapılan kurutma işleminde istenilen özellikteki ürünlerin çıktısı her zaman sağlanmamaktadır. Buna bağlı olarak da kurutma işlemi alternatif yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu alternatif yöntemlerden arasında dondurarak kurutma yöntemi yer almaktadır. Bu çalışma da dondurarak kurutma yönteminin incelemesi ele alınmıştır.

Dondurarak kurutma işleminde öncelikle gıdanın dondurulması gerçekleşmektedir. Bundan sonra düşük sıcaklık yoğunlaştırıcısına bağlı vakum uygulaması ile hacme konulmaktadır. Dondurulmuş olan gıdaya farklı yollardan ısı geçişi sağlanmaktadır. Bu işlemlerin yapıldığı sırada gıdanın yapısında bulunan buz fazındaki suyun süblimleştirilmesi ile gıdanın içinden uzaklaştırılarak kurutma işlemi gerçekleşir. Hazır kahve üretiminde dondurarak kurutma uygulaması sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemin kahvenin yapısını en iyi şekilde muhafaza ettiği bilinmektedir. Ayrıca dondurarak kurutma uygulaması liyofilizasyon meyve ve sebze, et ve süt ürünlerinin kurutulması, çay özlerinin üretimi, bakteri kültürleri ve eczacılık ve ilaç sanayi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Dondurularak kurutulmuş ürüne su eklenmesi ile birlikte büzülme olmaz ve yapısının gözenekli olmasından dolayı bünyesine hızlıca su alması (rehidrasyon), ile kurutulmadan önceki halinin yakın bir durumuna gelir. Gıdaların dondurularak kurutulmasında tat ve aroma kaybı az miktardadır.

Gıdaların dondurularak kurutulması yöntemi kısmen pahalı olan bir uygulamadır. Bunun sebebi ise, kurutma hızının düşük olması ile birlikte yüksek miktarda enerji kullanımına neden olan vakumdur. Ürünün dondurularak kurutulması ile soğukta saklamaya ve soğutmaya gerek duyulmaması, pahalılık bedeli ile bir denge kurmuştur.

Ürünlerin dondurularak kurutulması ile başka kimyasal, fiziksel, biyolojik ve organik özelliklerini korumakta ve yeniden kullanılacak zamana kadar uzun bir sürede depoda saklanmaktadır. Ürünlerin kurutulmadan önceki yapısında görünmesi için ürünlerin yapısında bulunan su ya da çözücü içerisinde çözünmesi sağlanır. Böyle durumlarda daha derişik çözeltiler ya da seyreltik çözeltiler hazırlanması gerekmektedir. Çözücünün miktarı ile bu durumun kontrolü sağlanır. Maddelerin fizyolojik

yapılarında bozulma meydana gelmeden kurutulması dondurarak kurutma işlemi ile sağlanmaktadır.

Ele alınan bu çalışmada dondurularak kurutma yöntemi ile Türkiye’de yetiştirilen cennet hurmasının dilimlenmiş şeklinin dondurarak kurutma yöntemi ile kinetiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak Türkiye’de cennet hurmasının kurutulması daha kısa bir zamanda ve daha fazla alanda kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Araştırmanın Konusu: Birçok alanda fayda gösteren ve son yıllarda tüketimi gitiikçe artan Cennet Hurması meyvesinin (Diospyros Kaki) dondurarak kurutulması tekniği ile meyvenin yılın her dönemde yenilebilir olması için içinde bulunan vitaminleri koruyarak raf ömrünü uzatmaktır.

Araştırmanın Amacı: Cennet Hurması meyvesinin sadece hasat edildikten sonra tüketilmesi değil daha sonra da tüketilebilir olması için dondurarak kurutma yönteminin kullanılması.

Araştırmanın Önemi: Bu araştırmada kullanılan meyvelerin dondurularak kurutulması tekniği ile birçok meyvenin yalnızca hasat zamanında değil daha sonra da içinde bulunan besin değerlerinin kaybolmadan tüketilmesinde fayda sağlamaktadır. Bu sayede nu Teknik farklı birçok besin üzerinde denenebilir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Cennet hurması meyvesine yönelik yapılan çalışmalar genellikle meyvenin üretilmesi ile depolanması şartları ile alakalıdır ve meyvenin işlenmesine ya da kurutulmasına yönelik olan çalışmaların sayısı oldukça azdır [19].

Park ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; taze cennet hurmalarını güneşte 1 ay boyunca ve 12 saat 60 °C kurutucuda kurutma işlemi yapmışlardır. Kurutma işlemleri sonrasında meyvelerin mineral, diyet lifi, toplam fenolik madde içerikleri ve antioksidan aktiviteleri üzerine olan etkiler araştırılmıştır. Taze ve kurutulmuş halde olan cennet hurmalarının mineral madde içerikleri ve diyet lifi arasında önemli derecede bir farka rastlanılmamıştır. Taze olan cennet hurmalarının antioksidan aktiviteleri ve polifenol içerikleri kuru meyvelere oranla daha yüksek çıkmasına karşın kuru halde olan cennet hurmalarının antioksidan aktivitesinin oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir [23].

Jung ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; kurutulmuş olan hurmaların taze olan hurmaların yerini tutup tutmayacağı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada cennet hurması meyvesinin mineral madde, çözünür ve çözünmez diyet lifi, antioksidan potansiyeli ve toplam fonel ve fenolik asit içeriklerini belirlemiştir. Taze olan cennet hurması meyvesinin kuru olan meyvelere göre benzer miktarlarda mineral madde ve diyet lifi içerdikleri, bunun yanında toplamda antioksidan potansiyeli ile fenolik madde içeriğinin yüksek olmasına rağmen değerler arasında istatistiksel bir fark bulunamamıştır [24].

Pesis ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre, cennet hurması meyvesinde olan burukluğun giderilmesi için polietilen torbalara konulan hurmalar vakum altında ya da N₂ ya da CO₂ ortamında tutulmaktadır.

Bu şartlar asetaldehit birikimi farklı oranlarda gerçekleşmiştir. Asetaldehit birikiminin düzeyine bağlı olarak da burukluğun giderilme hızında değişiklik olduğu belirtilmiştir [25].

Akyıldız ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; buruk “Türkay” çeşidi cennet hurmalarının dilimlenerek %8’lik sodyummetabisülfid çözeltisi ve suya daldırdıktan sonra sıcaklıkları 60 °C, 75 C° ve 90 °C’de olan kabin kurutucularda kurutulmuştur. Kurutma işlemi sırasında hurmaların toplam fenolik madde içeriğinde, kükürt seviyesinde ve renginde oluşan değişimleri incelemeye almışlardır. Sodyummetabisülfid çözeltisine daldırılan örneklerin toplam fenolik madde içeriği en yüksek olarak tespit edilmiştir [26].

Ben-Arie ve Sonogo’nun yapmış olduğu çalışmaya göre; “Triumph” çeşidi cennet hurmalarının 1 saatlik sürede 60 °C’de, 5 saatlik sürede 40 °C’de su içine daldırılması ile burukluğu giderilmiştir. Benzer şekilde 20°C ve 80°C’de yapılan uygulamada burukluğun azalmasında bir etkinin olmadığı görülmüştür [27].

Woolf ve arkadaşlarının tarafından yapılan çalışmaya göre; cennet hurması meyvesinin tatlı bir çeşidi olan “Fuyu” nun 0.5 ile 10 saat arasında bir sürede 34-50 °C’lerde kuru hava ve ısıtma işlemi tabii tutulduktan sonra soğutulması ile 6,5 hafta 0 °C altında depolarda saklanmıştır. Meyveler depolanma sonrasında 3 gün 20 °C’de bekletilmiştir. Isıtma işlemi görmeyen cennet hurması meyvelerinde çok miktarda soğuk hasarının olduğu görülmüştür. Meyvelerin depodan çıkarıldıktan bir gün sonra etilen üretimlerinde artış olduğu görülmüş ve bunun soğuk hasarından kaynaklandığı düşünülmüştür. Isıtma uygulaması sırasında sıcaklık artışı ile birlikte hurmanın etinde jelleşmenin oluşumu ve soğuk hasarının azaltıldığı görülmüştür. Bunun yanında cennet hurması meyvesinin iç ve dış yüzeylerinde ısıtma işlem sıcaklığı ve süresinin artmasına bağlı olarak esmerleşmenin arttığı belirtilmiştir [28].

Wright ve Kader tarafından yapılan çalışmada; Dilimlenmiş Fuyu çeşidi hurmaların 8 gün 5 °C’de hava ve kontrollü atmosferde depolanması ile kalite değişimleri incelenmiş ve karotenoid kompozisyonunu belirlenmiştir. Dilimlenmiş meyvelerde

hava ile birlikte %12'lik CO₂'in bazı hasarlara neden olmuştur. Ayrıca karotenlerdeki kaybın raf ömrü süresince önemli bulunmamıştır [29].

Lee ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; 4 hafta süreyle yeni hasat edilen ve zedelenen meyvelerin 0 °C ve 20 °C'de depolanması esnasında gözle görülür şekilde meyve de belirgin hasarın görülmediği fakat depolama sırasında meyvelerin hızlıca bozulduğu görülmüştür. Meyvelerin 20°C'de depolanması ile saklandığı süre boyunca renginin giderek kırmızılaştığı görülürken 0°C'de saklanan meyvelerde bu duruma benzer bir değişimin olmadığı görülmüştür. Meyvenin kabuk renginde kırmızılığın gittikçe artması depolama sıcaklık °C ile alakalıdır. Zedelenmiş ve zedelenmemiş olan meyvelerin 0 ve 20°C'de lipid peroksidasyonu arasında önemli bir fark olmadığı ifade edilmiştir [30].

Bibi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; cennet hurması meyvesinin N₂ ve CO₂ atmosferine 48 saat süre ile maruz bırakılmasından sonra 3 hafta 20-25°C'de depolanması ile kalitenin geliştirilmesi, raf ömrünün uzatılması ve meyvelerde burukluğun giderilmesine olan katkısı araştırılmıştır. N₂ ve CO₂ ile muamele edilen hurmaların dokularının üç hafta depolama süreci sonunda duyu kalitelerinin ve besin içeriklerinin iyi durum olduğu belirtilmiştir. Yapılan duyu analiz neticesinde en yüksek puan görünüş açısından N₂ ile muamele edilen cennet hurmaları almıştır ve CO₂'e maruz bırakılan hurmalar ise lezzet bakımından en yüksek puanı almışlardır [31].

Yamada ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; 188 Japonya kökenli olan Cennet hurması meyvesinin çeşidinde araştırma yapmışlardır ve hurma çeşitlerinin meyvelerinde meyvelerin ağırlıkları, olgunlaşma zamanları, suda çözünebilir olan madde miktarları incelenmiştir. Kasım ayı ortası ve sonraki 15 günlük süreçte meyvelerin olgunlaştığı, suda çözünebilir kuru madde miktarlarının %1,7-%17 arasında olduğu ve meyve ağırlıklarının 72-200 g arasında değiştiği görülmüştür. Bunun yanında suda çözünebilir kuru madde miktarları ve meyve ağırlığı arasında negatif korelasyon bulunmuştur ve elde edilen bu verilerin Japonya'da kuzeyden güneye doğru inildikçe azaldığı tespit edilmiştir [32].

Suzuki ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; 5. eşit Japon hurmasının 3'ü buruk olmak üzere kateşin kompozisyonunu ve toplam fenolik madde içeriğinin belirlenmesi için araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonunda elde edilen verilere göre, meyvelerin gallik asit, epigallokateşin, kateşin ve epikateşin içerdiğini bildirmişlerdir. Bunun yanında buruk olan hurma çeşitlerinin fenolik maddelere göre daha zengin olduğu ve buna bağlı olarak da daha iyi bir doğal antioksidan kaynağı oldukları ortaya konulmuştur [33].

Karakasova ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; güneş kurutma yöntemi ile kurutulan cennet hurmalarının antioksidan özelliklerinde potasyum, sitrik asit ve C vitaminlerinde oluşan değişimler incelenmiş ve yapılan çalışma sonucunda potasyum, sitrik asit ve C vitaminlerinde azalma olduğu saptanmıştır [7].

Bölek ve Obuz kara tarafından yapılan çalışmaya göre; Cennet hurmasının inci dilimler haline getirilmesi ile kurutulması ile hurmanın kuruma kalitesini ölçmek amacıyla hurma 50°C'de 6 saat, 65°C'de 4 saat, 80°C'de 3 saat kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi yapılan ürüne uygulanan farklı ozmotik işlemler ile yapılan kurutma yönteminde ürünün besin maddesi ve renginde olan değişimler incelenmiştir [34].

Kaya ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya göre; cennet hurması meyvesinin kurutulması sırasında hava sıcaklığı derecesinin artması ile ürünün renginde değişiklik olduğu görülmüş ve ürünün a* parametresinin kırmızılıktan (13,31) yeşillığe (8,95) doğru dönüşümü yaşadığı, b* parametresinin sarılığın 10,84'ten 20,42'ye doğru yükselme olduğu ve L* parametresinin parlaklıktan (16,35) koyuluğa doğru geçmiş olduğu (55,37) görülmüştür [35].

Doymaz tarafından yapılan çalışmaya göre; cennet hurması meyvesinin doğal ve kimyasal çözeltiye daldırılarak kuruma davranışına tabi tutularak işlem görmüşlerdir ve kuruma katsayıları farklı sıcaklıklar için belirlenmiştir [36].

Karaaslan tarafından yapılan çalışmaya göre; Cennet hurması meyvesinin beş farklı mikrodalga ile kurutulması konusu araştırılarak kurumaya olan etkisinin

karşılaştırılması yapılmıştır. Mikrodalga ile kurutmada süresi ve güçleri 104 dakikada 180 W, 41 dakikada 360 W, 31 dakikada 540 W, 25 dakikada 720 W ve 18 dakikada 900 W şeklinde olmuştur ve mikrodalga'nın gücünde artma oldukça kuruma süresinde azalma olduğu görülmüştür [37].

Ramin ve Tabatabaei tarafından yapılan çalışmaya göre; meyveleri dört farklı şekilde olan olgunluk seviyeleri incelenmiştir. Çalışmada meyveler 20 hafta süreyle %95 bağıl nemli ortamda $2\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta depolanmıştır. Meyvenin olgunluğunun artmasına bağlı olarak titre edilebilir asitlik, meyvenin sertliği, C vitamini içeriği ve çözünebilir tanenin belirgin biçimde azaldığı görülürken suda çözünebilir kuru madde konsantrasyonları ve pH seviyesinde artış meydana gelmiştir. 20 haftalık depolama sürecinde erken toplanan meyvelerde (birinci hasat) diğer hasatlara göre ağırlık kaybının en az olduğu görülmüştür. Birinci hasatta C vitamini içeriği ve meyve sertliğinin en iyi düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında 20 haftalık depolama süreci sonunda erken olgunluk döneminde toplanan meyvelerde toplam çözünebilir tanenlerin kayda değer bir oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Hurma meyvesinin ticari kalitesini korumak ve kısa vadeli depolamada hasat sonrası kayıpları asgari düzeye çekmek amacıyla meyveyi olgunluğun erken seviyelerinde toplamanın en iyi yöntem olduğuna saptanmıştır [38].

BÖLÜM 3

GIDALARIN MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

Geçmişten günümüze gıda maddelerini saklamada değişik yöntemler kullanılmıştır.

Bu yöntemlerden en sık kullanılanları;

- Tuzlayarak muhafaza yöntemi,
- Şekerleyerek (Şeker ekleyerek) muhafaza yöntemi,
- Baharat ile karıştırarak muhafaza yöntemi,
- İşleyerek muhafaza yöntemi,
- Soğukta muhafaza yöntemi,
- Konserve yaparak muhafaza yöntemi,
- Kurutarak muhafaza yöntemi,
- Dondurarak muhafaza yöntemi,

Aşağıda yer alan başlıklar altında günümüz teknolojisinde saklama yönteminde en sık uygulananlar açıklanmaktadır.

3.1. GIDALARI DONDURMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

Bir maddenin kendisini kapsayan ortam sıcaklığının veya bir ortamın sıcaklığını altına düşürmek ve o sıcaklıkta korunma için ısının alınması soğutma işlemidir. Soğuk saklama işlemi ile gıda maddeleri daha uzun süre depolanabilmektedirler. Gıdanın yapısında bulunan suyun buz kristali haline gelmesi ile gıdaların dondurulması işlemi gerçekleşmektedir.

Gıda maddelerin sıcaklıkları indirilmektedir. Buna bağlı olarak bu yöntem ile böylece gıdanın oda sıcaklığında başına gelebilecek olası hasarlar engellenmekte ya da en az

düzeve indirilmektedir. Mikrobiyolojik çürümeyi -18 °C ile -30 °C arası sıcaklık düzeyleri engellemekte ve gıda maddelerinin saklama sürelerini arttırmaktadır. Dondurma işlemleri genel itibari ile 4 aşamadan meydana gelmektedir:

- Ön soğutma olarak adlandırılan bu aşamada gıda maddesinin başlangıçta olan sıcaklığını donma sıcaklığına indirmek,
- Bu aşamada, gıda maddesinde ilk buz kristalleri oluşmaya başlar ve gıda içinde bulunan su miktarının büyük bölümünün donmasına kadar donma sıcaklığı durağandır,
- Gıda maddesindeki sıcaklığın azalması ile geri kalan suyun buz aşamasına geçer,
- Bu son aşamada ise madde içindeki serbest olan suyun tamamının buz aşamasına geçmesi ile hal değişikliği yaşanmadan gıda sıcaklığında azalma meydana gelir.

Maddelerin tabii yapısının olabildiğince muhafaza edilmesi dondurma işleminin asıl hedefidir. Gıda maddelerinin yapısındaki su miktarına bağlı olarak sıcaklığın azalması ile maddelerin yapısında değişiklik meydana gelmektedir.

Kristal yapı boyutu gıdanın dondurma işlemleri hızlı bir biçimde gerçekleştirildiğinde küçük, üründe oluşan kristal yapı boyutu donma işlemleri yavaş gerçekleştirildiğinde büyüktür. Buna bağlı olarak sebze ve meyvelerin hücre duvarlarında bozulmalar oluşmaktadır ve gıda maddeleri çözüldüğünde yapısında değişimler olduğundan dolayı gıda maddesinin taze haldeki kalitesi korunamamaktadır.

Meyve ve sebzelerin hücrelerinde bulunan su uzun süre devam eden donma işlemleri sırasında hücre dışına yayılmakta ve bu da hücrenin dehidrasyonuna neden olmaktadır. Bu sebeple ürün yüzeyinin pürüzsüz kalması ve hücre yapısını bozulmaması için donma işleminin hızlı bir biçimde gerçekleşmesi gerekir. Gıda sanayisinde kullanılan dondurma işlemleri aşağıda yer alan başlıklar altında açıklanmıştır.

3.1.1. Soğuk Hava ile Dondurma

Soğuk hava ile dondurma yönteminde iki farklı uygulama bulunmaktadır:

- Durgun (tabii konveksiyon) havada dondurma yöntemi,
- Hızlandırılmış (cebri konveksiyon) havada dondurma yöntemi [39, 40].

Durgun Havada Dondurma

Bu yöntemdeki dondurma işleminde kullanılan soğuk hava durağan haldedir. Durgun havada dondurma yönteminde yalıtılmış bir soğuk oda yöntemin temelidir. Bu yöntemde soğutma donanımının buharlaştırıcısı yukarıdan aşağı doğru odanın herhangi bir yerinde olan bir boru demeti biçiminde veya dikine raflar biçiminde de olmaktadır. Bu raflar arasında gıdaların dizilimi yapılmaktadır [40].

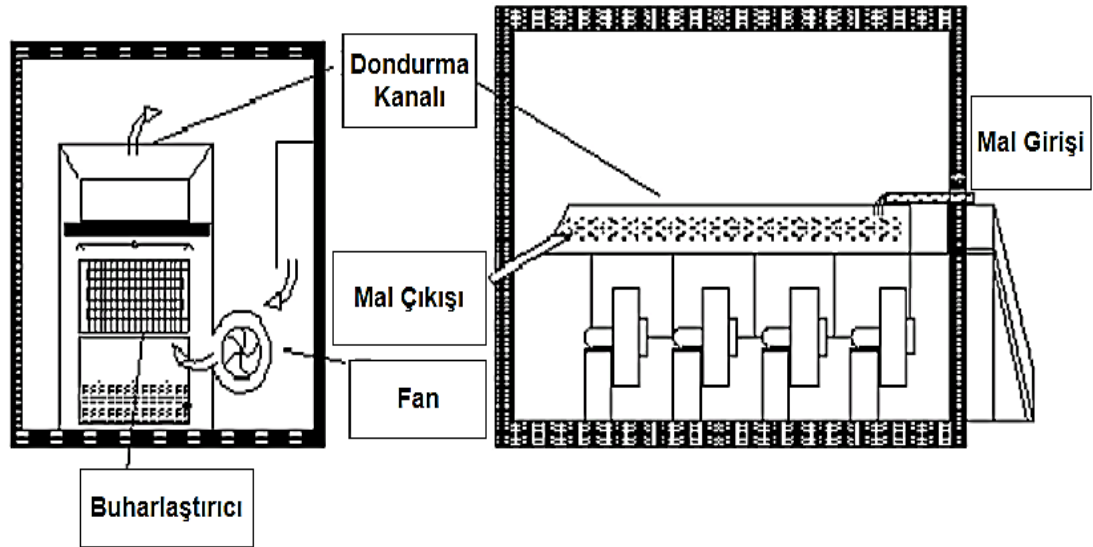
Isı iletkenliği durağan hava da az olmasından dolayı gıda maddelerinin donması süresi uzun sürmektedir. Dondurulan birimler arasındaki boşluk, ambalaj şekli, dondurulan materyalin büyüklüğü donma süresine etki etmektedir ve sürede değişiklikler oluşmaktadır. Bu yöntemin temel uygulama amacı balık dondurmak içindir ve bu kapsamda uygulamasını gerçekleştirir [40].

Hızlandırılmış Havayla Dondurma

Hızlandırılmış havayla dondurma yönteminde dondurucuların genel çalışması havanın dondurulan malzeme ve buharlaştırıcı arasında hareket ediyor olmasıdır. Havanın fanlar aracılığı ile hareket ettirilmesi ile hava buharlaştırıcı üzerinden geçerken soğumaktadır. Soğuyan bu hava daha sonra dondurulan gıda maddesi üzerinden geçer. Hava hızı arttıkça ısı transfer katsayısının yükselmesinden dolayı gıda maddesinin hızlı bir şekilde donması gerçekleşir. Hava sıcaklığı hava dolaşımı dondurma yönteminde -30 °C ile -45 °C arasında değişim göstermektedir. Tüneli olacak şekilde hızlandırılmış havayla dondurma işlemi tasarlanmaktadır.

Soğuk hava Tüneli dondurucularda genel olarak bandın alt kısmından üst kısmına doğru gönderilmektedir. Bu sayede bant üzerinde bulunan ürünün hava hızına ve parçacık iriliğine bağlı olarak hafif bir titreşim kazanarak ürünün donma hızında artış olur. Bu kısıtlı titreşim, dondurulan ürünün parçacıklarının birbirleri ile yapışması ve ürünlerin kitle haline gelmesine neden olmaktadır. Oysaki artık günümüzde bir maddenin kitle haline gelmeden parçalar şeklinde dondurulması amaçlanmıştır. Bu nedenle de bandın altından hızlı havanın verilmesi ilkesine dayanan yeni yatak dondurucu sistemi geliştirilmiştir. Bu yeni geliştirilen sistem ile bant üzerinde duran parçacıklar havada yüzer durumdadır.

Hava içinde yükselen ve geri düşen parçacıkların tümü akışkan yatak dondurucuların tüm yüzeylerinde soğuk hava ile temas ederek hızlıca donmaktadır. Şekil 3.1'de akışkan yatak dondurucu sisteminin şeması yer almaktadır [39].



Şekil 3.1. Akışkan yatak dondurucu sistemi.

3.1.2. Dolaylı Temas Metoduyla Dondurma

Bu yöntemde iki levha arasına yerleştirilmiş içten soğutulan paketlenmiş malzemelerin levha ile teması sonucunda dondurma işlemi gerçekleşmektedir. Dondurulan ürün ile soğutmayı gerçekleştiren soğutucu akışkan arasında levha bulunduğundan dolayı bu yöntemde dolaylı temas yoluyla yöntemi ile dondurma denir. İçi boş alüminyum

raflardan plakalar oluşmaktadır ve bu rafların içinde soğutma kanalları yani soğutucu akışkan buharlaştırıcı bölüm vardır. Buzdolaplarının buzluk kısmında gıda maddelerinin dondurulması bir nevi dolaylı dondurma yöntemi ile gerçekleşir.

Dolaylı temas metoduyla gıdaların dondurulmasının tek şartı dondurulacak gıdanın dikdörtgen prizması şeklindeki bir ambalajda bulunmasıdır. Ambalajlı olan gıdalarda yüzey teması az olduğunda dondurma hızı düşmektedir. Bunun nedeni ise ambalajlı olan gıdaların plakaya tam olarak temas etmemesinden kaynaklanır. Plakanın üst kısmına düzgün şekilde ve aynı yükseklikte olan ambalajlı gıdaların yerleşmesi ile diğer plaka üstten sıkışmaktadır. Bu sıkıştırma işlemi 0,05 – 0,1 bar değerlerindeki hidrolik bir düzenekle basınç sağlayarak yavaş bir şekilde gerçekleşir.

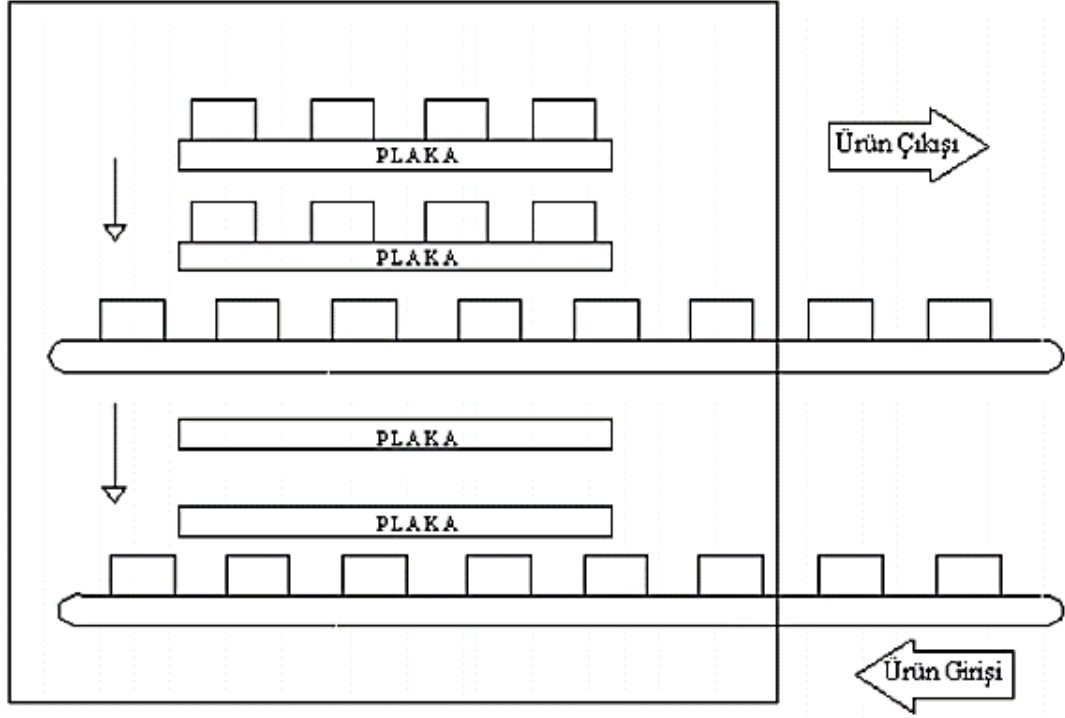
Plaka dondurucularının verimli olması gıda temas yüzeyi ve plakanın fazla olmasına bağlı olduğundan dolayı sıkıştırma işlemi büyük bir önem arz etmektedir. Bunun yanında paketler içinde boşluk kalmaması için paketlerin fazla doldurulur ve ürünler sıkıştırma işleminin sonunda daha sık hale gelir ve ısı iletiminde artış olur. Ancak ambalajın plakaların sıkıştırılma sırasında açılmaması gerekmektedir. Bu durumun yaşanmaması için plakalar arasına ağaç engeller konulur. Plaklar arasına konulan ağaç engellerin yüksekliği ambalajların yüksekliğinden az olduğundan dolayı sıkıştırma işlemi sadece ağaç parçaların yüksekliğine kadar olur [40].

Sebze ve meyvelere kıyasla et ve balık ürünleri daha hızlı donmaktadır. Bunun nedeni ambalaj içerisinde sebze ve meyveler arasında boşluk kalırken et ve balık ürünleri ambalaj içinde tüm kitle oluşturmaktadır.

Kabinin kapıları plakaların dondurulma işleminin ardından kapatılır. Sıcaklık -18 °C'ye gelinceye kadar malzemeler burada bekletilmektedir. Donmanın gerçekleşme zamanı plaka ile ambalajın temas alanına bağlı olarak dondurulan ürünün çeşidine, ambalaj materyalinin cinsine ve kalınlığına, tüm ambalajlı gıdanın kalınlığına göre değişmektedir.

Devamlı çalışan plakalı dondurucularda bulunmaktadır. Bu tarz dondurucularda bir çift seri “rafplaka” vardır. Bantlı sistem sayesinde her bir raf çiftine dondurulacak olan

ürünler yerleştirilir ve sonrasında raf çifti yukarıya doğru hareket eder. Aşağıda bulunan boş raf çiftlerine yeni ürünler yerleştirildikten sonra aynı şekilde bu raf çifti de yukarıya harekete eder. Dondurucuda her rafın devir yapması ile donma işlemi tamamlanır ve raflardan donması tamamlananlar boşaltılmaktadır. Şekil 3.2’de sürekli plakalı dondurucu modeli yer almaktadır.



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

Sadece düzgün yüzeyli ve ambalajlanmış ürünler için dolaylı temas yöntemi kullanılmamaktadır. Dolaylı temas yöntemi aynı zamanda sıvı halde olan gıda ürünlerinin hızlı bir şekilde dondurulmasında kullanılmaktadır. Ancak dondurucuların bu hedefle kullanılmasında çalışma prensiplerinde ayrılmalar vardır. Bu tipte olan dondurucuların dış kısmı yalıtılmış ve plakaları silindir biçimindedir. Bu dondurucular ‘Tubular kazıyıcı soğutucu’ adlandırılmaktadır ve bunların soğutma silindirin iç yüzeyi ve eksenindeki mil arasında küçük bir boşluk vardır. Bu boşlukta yer alan gıdaların donma hızı birkaç saniyede gerçekleşmektedir [40].

3.1.3. Daldırma Yöntemi ile Dondurma

Donma işlemi dondurulacak ürünlerin soğutucu akışkan içine daldırılması ile gerçekleşmektedir. Soğutucu akışkan olarak bu işlemin ilk uygulamasında R-12 (CHCL₂F₂) ve diğer halokarbonlar kullanılmaktadır ancak günümüzde bu tür soğutucu akışkanlar yerine artık sıvı azot kullanılmaktadır. Sıvı azotun kaynama özelliği ile turbülans oluşmaktadır. Buna bağlı olarak da ürünler birbirinden ayrılarak ısı transferi yüzeyinin artışı sağlanmaktadır.

Daldırarak dondurma yöntemindeki hızlı dondurma uygulaması ile koku iyi bir şekilde muhafaza edilir, nem kaybı en az seviyededir ve aşırı donma engellenir.

3.1.4. Kriyojenik Sıvılarla Dondurma

Gıda ürünlerinin direk olarak azota daldırılmaları ürünlere zarar verebilmektedir. Ürünlerde zararın oluşma riski sıvı azotun ürünlerin üzerine püskürtülmesi ile azalmaktadır. Bu nedenle ürünlere sıvı azot püskürtülmesi prensibi ile 1960'lı yıllardan sonra dondurucular tasarlanmıştır.

Kriyojenik sıvılar ile dondurma işleminde azot ile sıvı karbondioksit kullanılan başlıca sıvılardır.

Dilimlenmiş halde olan mantar, domates, bazı üzüksü meyveler ve çilek gibi hassas ürünler hızlı bir şekilde donma işlemi ile kalitesini korumaktadır. Temel olarak kriyojenik sıvılarla dondurma yöntemi bu tarz ürünler için geliştirilmiştir ancak kullanımını bazı ürünler ile sınırlıdır [40].

Bu yöntem ile spiral püskürtmeli kriyojenik dondurucular ve püskürtmeli kriyojenik dondurma tüneli dondurucuları çalışmaktadır. Ürünlerin üzerinden aldığı ısı ile sıvı azot damlacıkları buharlaşmakta ve ürünleri soğutarak hızlı bir şekilde dondurma işlemini gerçekleştirmektedir. Sıvı azot damlacıklarının bu tür dondurucularda kullanılması ile ısı transferinin yüzey alanında artış olmaktadır. Kriyojenik dondurma tüneli dondurucularında genellikle 3 bölüm vardır. Birinci bölümde, fanlar vasıtası ile

ürünler üzerinde havanın hareketi sağlanarak ön soğutma işlemi gerçekleşir. İkinci bölümde sıvı azot gazının ürünlere püskürtülmesi ile donma ile yaşanır. Üçüncü bölümde ise ürünlerin sıcaklık derecesi dengeye getirilerek tünelden çıkartılır.

3.1.5. Kriyomekanik Dondurma

Bu sistemde ürünler kriyojenik dondurucularda ön soğutması yapıldıktan sonra akışkan ve spiral yataklı mekanik dondurucularda donam işlemi gerçekleşmektedir. Sıvı azot yardımı ile kriyojenik dondurucudan yararlanıldığında ürünlerin dış kısmında birkaç saniye içerisinde kabuk oluşumu olmaktadır. Bu kabuk oluşumu mekanik dondurucuda donan ürünün donma esnasında oluşan hareketten dolayı ürünün zarar görmesini engelleyerek ürünlerin şeklini korumaktadır.

3.2. GIDALARI KURUTMA TEKNİKLERİ İLE MUHAFAZA YÖNTEMLERİ

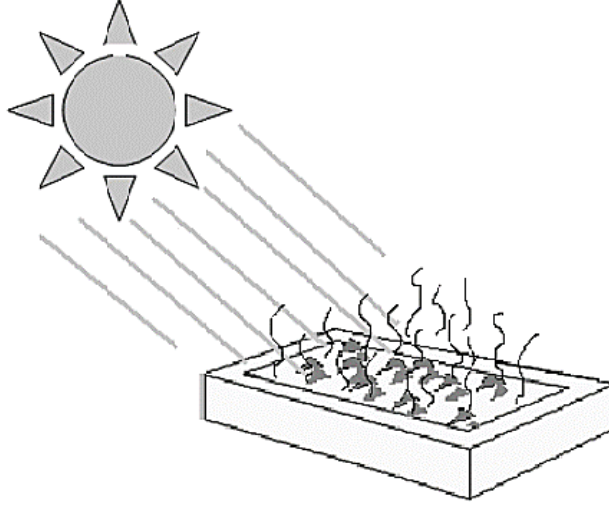
Gıda ürünlerinin saklanması için kullanılan yöntemlerden kurutma yöntemi en eski yöntemlerdendir. Ürünün içinde olan su miktarının çeşitli yöntemler ile uzaklaştırılması kurutma işlemi olarak ifade edilir. Gıda ürünlerinin kurutulmasında kullanılan yöntemlerin temelinde kurutulma işlemi yapılacak olan ürünün yapısında bulunan su miktarının buharlaştırılması ile ortamdaki uzaklaşması vardır. Gıda ürünlerinin kurutulması için kurumayı sağlayan ve farklı elemandan meydana gelen ünitelerin hepsi “kurutma sistemi” olarak tanımlanmaktadır. Gıda sanayinin geniş bir alanında kurutma işlemi kullanılmaktadır.

Uzun süreli muhafazalarda ürünün bozulmasının engellenmesi gıda ürünlerinin kurutma yöntemlerinin en önemli hedefidir. Gıda ürünlerinin kurutma işleminin sonunda bozulmadan uzun bir zaman muhafaza edilmesi için ürünün mikrobiyal gelişiminin en az olacağı şekliyle düşünülmesi gerekir. Ayrıca aroma ve besin değeri kalite parametrelerinin korunması da gıdanın nem miktarının düşürülmesi ile sağlanmaktadır. Gıda ürünlerinin kurutma işlemi sonrasında hacminde azalma olacağından dolayı depolanması ve taşınması kolay olacaktır [41]. Gıda ürünlerinin kurutulmasında farklı yöntemler bulunsada bu yöntemleri iki grup altında toplanmıştır:

- Doğal kurutma (güneşle kurutma) yöntemi,
- Yapay kurutma yöntemi.

3.2.1. Doğal Kurutma

Bu yöntemde ürünler güneş altına serilerek kurutulmaktadır. Güneşte kurutma yöntemi bilinen ve uygulanan en eski kurutma yöntemidir. Bu yöntemde en önemli nokta sıcaklık durumudur. Sıcaklığın önemli olmasının nedeni ise ürünlerin içerisinde bulunan nem miktarının ürün bozulmadan sıcaklığın etkisi ile uzaklaştırılmasıdır. Gıda ürünü toprak zemin ya da beton zeminde bir bez üzerine serilerek kurutma işlemi gerçekleşir.



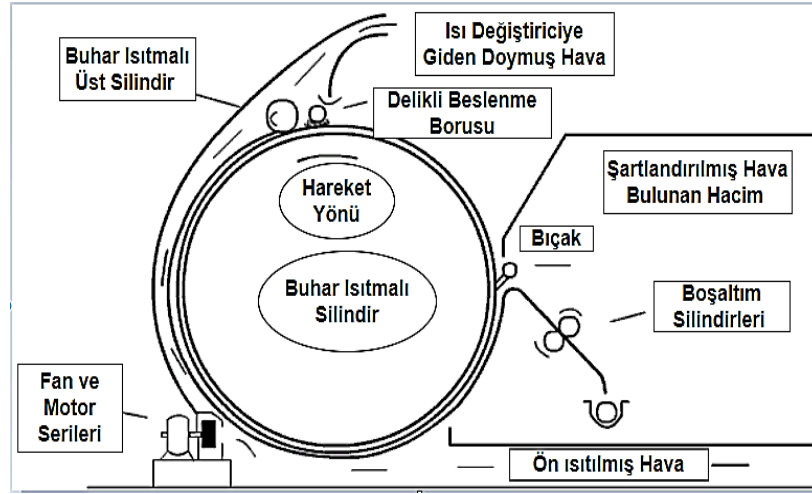
Şekil 3.3. Doğal kurutma yöntemi.

3.2.2. Yapay Kurutma

Gıda ürünlerinin kuruma sürelerini kısaltmak, ürünün güneşin zararlı radyasyon etkilerinden sakınmak ve ürünün niteliğini arttırmak amacıyla doğal olmayan yapay kurutma yöntemi geliştirilmiştir. Yapay kurutma yönteminde kontrollü bir kurutma ortamı sağlandığından dolayı ürünlerin görünüşleri bakımından doğal kurutma yöntemine göre daha iyi ürünler oluşmaktadır. Bazı yapay kurutma yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

İletimle Kurutma

Kurutma silindirleri ya da topları ile düz yüzeyler Şekil 3.4’de gösterildiği gibi iletim ile kurutma yöntemine örnek gösterilebilir. Kurutma silindirleri ürünler ile temas halindedir. Genellikle kâğıt ürünlerin kurutulmasında iletim ile kurutma yöntemi kullanılmaktadır. İletim ile kurutma sisteminde sabit ısı, kütle aktarımı ve hızlı kurutma şartları oluşturulmamakta, sistemin isteğine göre kontrol sağlanmamaktadır ve sistemin işletimi maliyetlidir ve sistem etrafından istenmeyen çalışma koşulları vardır [42, 43].



Şekil 3.4. İletimle kurutma sistemi.

Kızılötesi Işınımlı Kurutma

Kızılötesi Işınımlı Kurutma Sisteminde kurutma işlemi buhar ısıtmalı kaynaklar, gaz ısıtmalı akkor yansıtıcılar, elektrikle ısıtılmış yüzeyler, ısı ışınım ve kızılötesi lambalar ile gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde çabuk ısıtma verimliliği, gıda ürünün kalitesine en az seviyede zarar verme gibi çok sayıda avantaj bulunmaktadır. Kızılötesi kurutma sisteminde çok sayıda avantaj olmasına rağmen bu sistemde her kurutma işlemi yapılmamaktadır. Bu sistemin kullanım alanının kısıtlanmasında ürünün türü, kalınlığı, ısıtma kaynağı ve etki derinliği faktörleri etki etmektedir [42, 43].

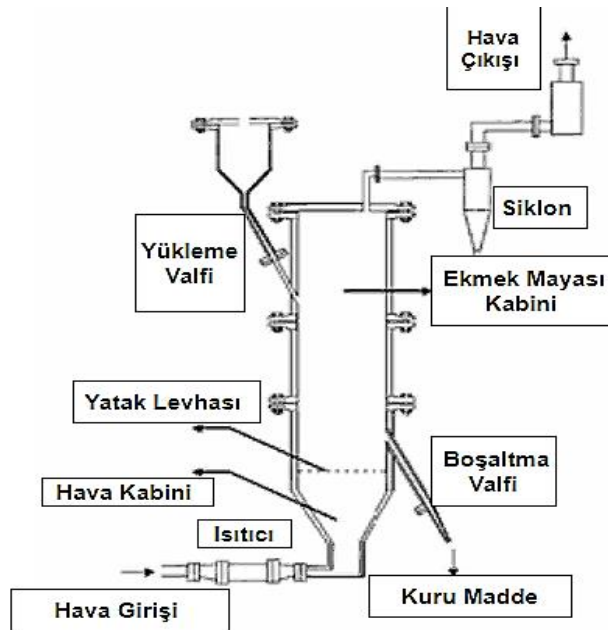
Vakumda Kurutma

Vakum altında düşük sıcaklık seviyesinde gerçekleşmektedir. Isıya hassas ürünlerin kurutulması ya da nem miktarının en az seviyeye indirilmesi gereken gıda ürünleri bu yöntemde kullanılmaktadır.

Akışkan Yataklı Kurutma

Bu yöntemde çalışma prensibi, kurutulacak olan ürünlere sistemin alt kısmından sıcak havanın belirli bir hızda üflemesidir. Ürünlerin havada asılı kalacağı biçimde hız seviyesi seçilmektedir. Kurutma ve akışkanlaşma için gerekli olan yerçekimine karşı tesiri ısıtılmış hava fonksiyonu ile oluşmaktadır. Kurutma havası ve tanecikler arasındaki temas akışkan yataklı kurutucularda çok iyi olduğundan dolayı ısı transferi etkin bir şekilde gerçekleşmektedir.

Kurutma işleminin kısa bir sürede sonlanması akışkan yataklı kurutmanın en büyük üstünlüğüdür. Kireçtaşı, kömür, ilaç, plastik ve fosfatın kurutulmasında bu tür kurutucular kullanılmaktadır [42, 43]. Aşağıda yer alan Şekil 3.5'te akışkan yataklı kurutucunun yapısı gösterilmektedir.



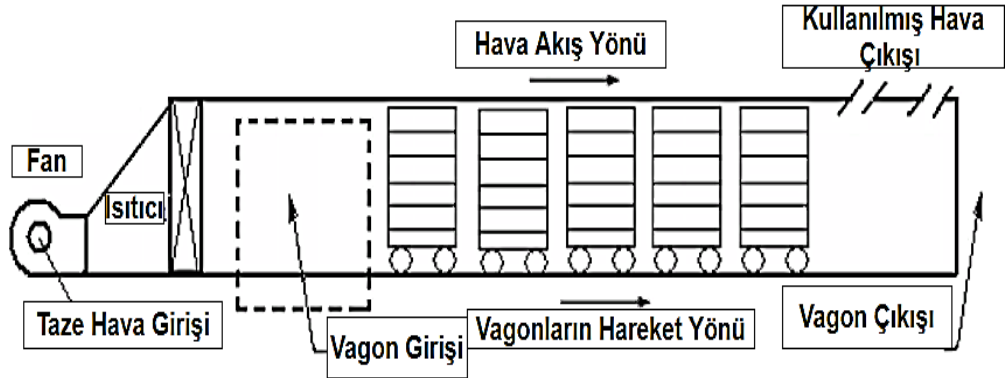
Şekil 3.5. Akışkan yataklı kurutucunun yapısı.

Flaş Kurutma

Bu sistemde kurutucu silikon ayırıcı ve toz öğütücünden meydana gelmektedir. Yüksek hızda temaslı olarak kurutucuya giren ve kurutulacak olan tozu içinde taşıyan hava kısa bir zaman içinde ürünü kurutmaktadır. Kurutucuda merkezkaç etkisi ile kuruyan toz ayrılması ile sıcak hava dışarı çıkmaktadır. Sistemde kurutma süresinin çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesinden dolayı kurutucu havanın sıcaklık seviyesi 650°C'ye kadar çıkmaktadır ancak ürünün yüzey sıcaklık seviyesi 50°C'yi geçmemektedir. Bu kurutma sistemi genellikle kâğıt üretimi ve gıda ürünlerinde kullanılmaktadır [42, 43].

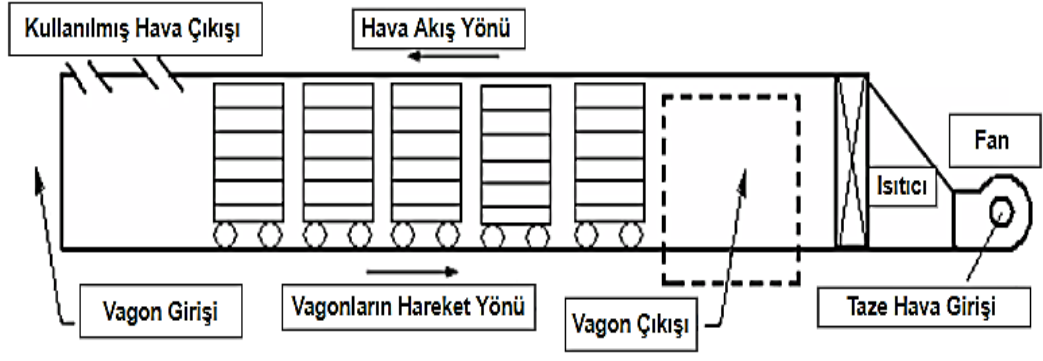
Tünel Kurutucu

Sürekli tip kurutucuların kullanımı, kurutulacak ürün miktarının çok olduğu durumlarda elverişli olmaktadır. Vagonlardaki tepsilere yerleştirilen kurutulacak ürünler tünelin içinden geçmektedir. Bu yöntem "Paralel akış tüneli" olarak adlandırılır ve bu yöntemde sıcak hava ve vagonlar aynı yönde hareket eder. Aşağıdaki Şekil 3.6'da paralel akış tüneli kurutucusunun şeması yer almaktadır.



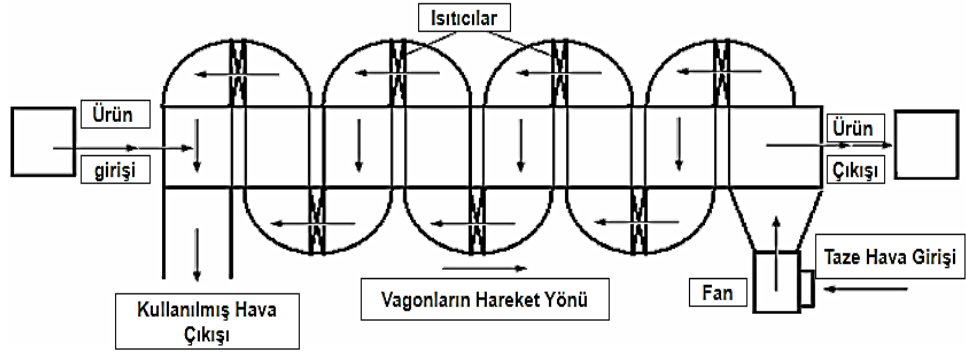
Şekil 3.6. Paralel akış tüneli kurutucusu.

Kurutma havası ve vagonların birbiri ile zıt yönde hareket etmesi "Zıt akış tüneli" olarak adlandırılır. Şekil 3.7'de zıt akış tüneli kurutucusunun şeması görülmektedir.



Şekil 3.7. Zıt akış tünel kurutucu.

Paralel akış tünel kurutucuları ve zıt akış tünel kurutucularına ek olarak çapraz akışlı tünel kurutucuları da kullanılır. Çapraz akışlı tünel kurutucuları zıt akış tüneli ve kompartıman kurutucuların birleşmesi ile meydana gelmektedir. Kurutma havası bu tip kurutucularda tünel boyunca tünele çapraz bir şekilde üflenir. Bu şekilde daha özdeş bir kurutma olmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.8’de çapraz akış tüneli kurutucusu yer almaktadır.

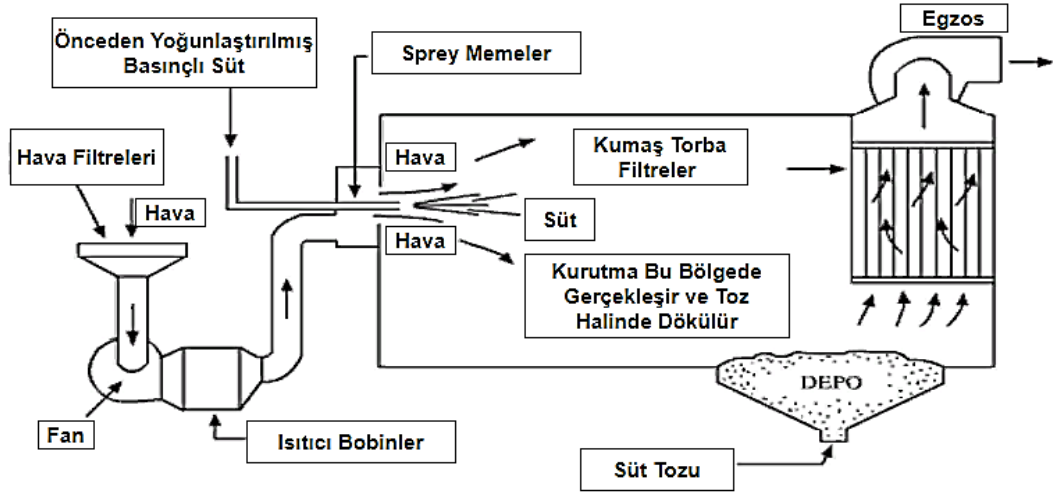


Şekil 3.8. Çapraz akış tünel kurutucusu.

Kompartıman kurutucuları ve zıt akış tünelinin kombinasyonu ile oluşmaktadır. Hava bu tip kurutucularda tünel içine çapraz olarak verilir. Bu sayede özdeş bir kuruma gerçekleşmektedir [44].

Püskürtmeli Kurutucular

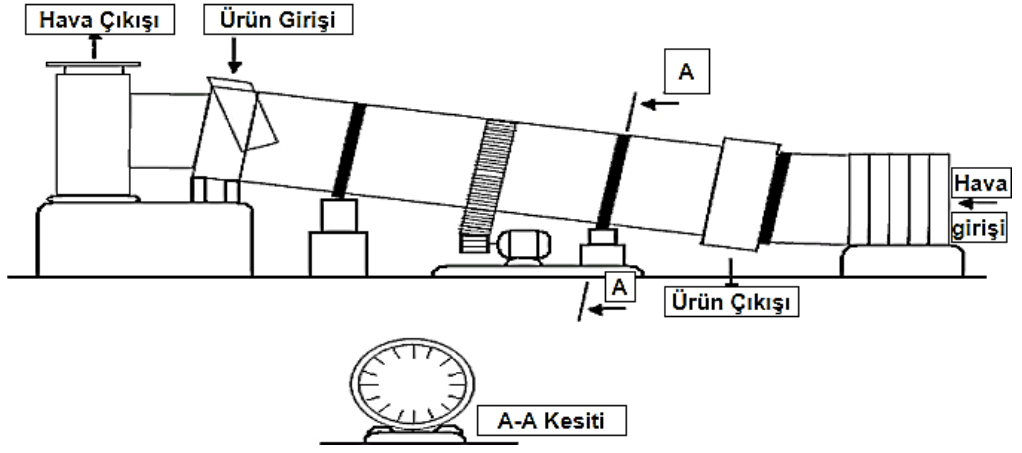
Bu sistemde kurtulacak ürün sıcak kurutma ortamına püskürtücü ile verilmektedir. Kurutma havası giriş sıcaklığı ısı verimliliği ile yükseldiğinden dolayı yüksek seviyede sıcaklık uygulanmaktadır. Kurutulan ürünler özdeşleşmektedir. Sisteme ürün ile kurutma havası zıt ya da paralel yönde verilmektedir. Çıkış havası ile hareket eden toz halde bulunan ürünler torba filtreler ya da siklon seperatörlerde yakalanmaktadır. Ürünlerin çıkış hava akımının nemi ve sıcaklığı ile son nemi denetlenmektedir. Süt, tozu, deterjan ve kahve üretiminde genellikle püskürtmeli kurutucular kullanılmaktadır. Aşağıdaki Şekil 3.9'da dönen tip püskürtmeli kurutucu görülmektedir [43].



Şekil 3.9. Döner tip püskürtmeli kurutucu modeli.

Döner Kurutucular

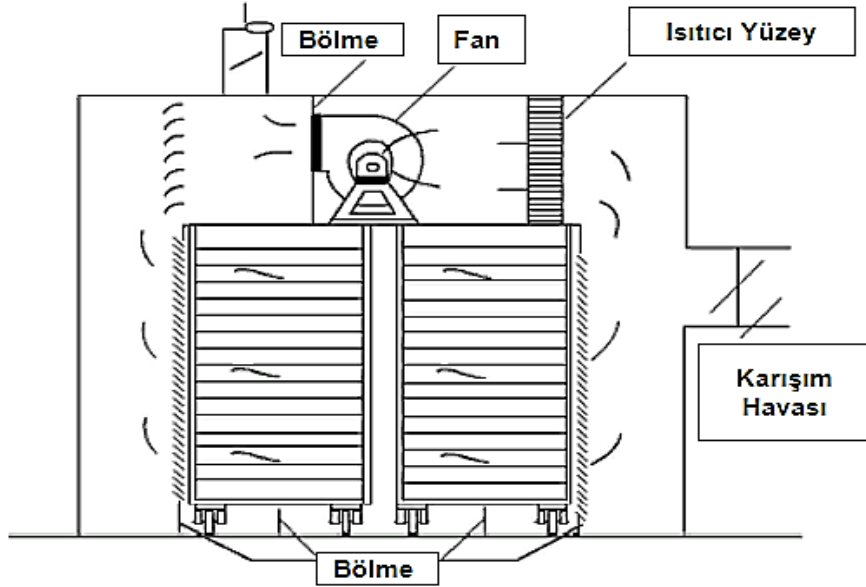
Bu kurutucu sistemlerinde belli bir eğim üzerinde yatay rulmanlar üstündeki silindirden ve silindirin iç çeperine yerleşmiş raflardan oluşur. Kurutucunun üst kısmından kurutulacak olan madde beslenmektedir ve kurutulacak olan ürünün akışına ters doğrultuda yatay biçimde üflenen sıcak hava ile kurutma işlemi gerçekleşir. Kurutulma işlemi tamamlanmış olan silindirin uç kısmından dışarı çıkar. Bu tip kurutucuların ürünlere dolaylı ısı aktarımı yapanları da bulunmaktadır [44]. Aşağıdaki Şekil 3.10'da döner kurutucunun şeması yer almaktadır.



Şekil 3.10. Döner kurutucu modeli.

Kabinli ve Bölmeli Kurutucular

Zorlanmış taşınımlı ve özel tasarımı bölmeler şeklinde kabinli kurutucuların çok sayıda modeli vardır. Kurutma işlemi bu tip kurutucularda ürünlerin tepsilere serilmesi ile gerçekleşmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.11’de kabin kurutucusunun modeli gösterilmektedir [43].



Şekil 3.11. Kabin kurutucu modeli.

Dielektrik Kurutma

Elektrostatik bölgeye kurutulacak olan ürünün yerleştirilmesi ile ürün içinde ısı üretimi olmaktadır. Kurutulacak olan ürünün nemli kısımlarında kuru kısımlarına kıyasla daha fazla ısı üretimi gerçekleşir. Ürün aşırı derecede ısıtılmadan su buharlaşmaktadır.

Mikrodalga Kurutma

Bu sistem iletken olmayan maddelerin ısıtılma işleminde kullanıldığından dolayı dielektrik bir ısıtma formu olarak tanımlanmaktadır. Şerit şeklindeki ince maddelerde bu kurutma işlemi uygulanır. Bu kurutma sisteminde giriş ve çıkışında koruyucu önlemlerin gerekli olmasından dolayı sürekli çalışmasız zordur. Gerekli emniyet önlemlerinin alınması ile sistemin çalıştırılması kurutma türünü maliyetli hale getirir [42].

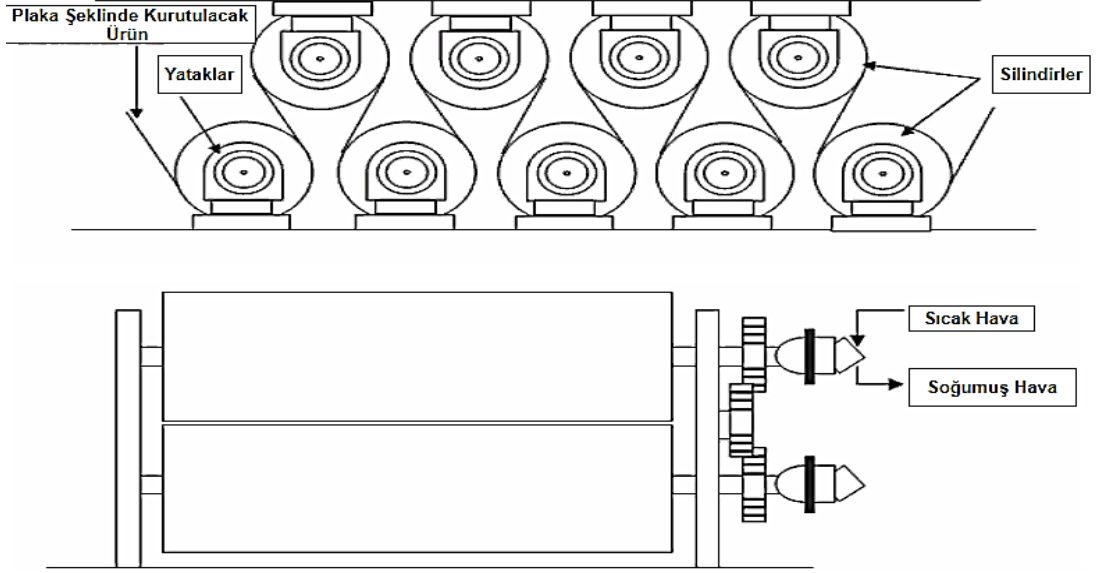
Dondurarak Kurutma

Ecza endüstrisindeki malzemelerin ve gıdaların (kahve, süttozu v, b.) kurutulmasında dondurarak kurutma yöntemi kullanılır. Kurutulacak olan ürün öncelikle -20 ile -40 °C arasındaki ısıda dondurulmaktadır. Bu dondurma işleminin ardından kurutulacak olan ürün kurutma kabinine yerleştirilmektedir. Vakum pompası aracılığı ile kurutma kabini pompalanır ve donmuş olan ürünün yapısındaki buzun süblimleşmesi ile kurutma işlemi gerçekleşmektedir. Dondurarak kurutma yöntemin avantajlı tarafları depolama alanından tasarruf, ağırlığının azalması, oda sıcaklığında saklanabilmesi, kurutulmuş malzemeye tekrar su eklendiğinde kurutma öncesi haline yakın bir hale ulaşması ve kurutulan malzemenin raf ömrünün artmasıdır [45].

Silindir Kurutucular

Kâğıt ve tekstil ürünleri gibi malzemelerin kurutulma işleminde silindir kurutucular kullanılır. Çok sayıda buharla ısıtılan silindirlerden oluşan bu kurutucularda ürünler devamlı olarak silindirlerden geçer. Bu silindirler iki yükseklikte sıralanmıştır ve

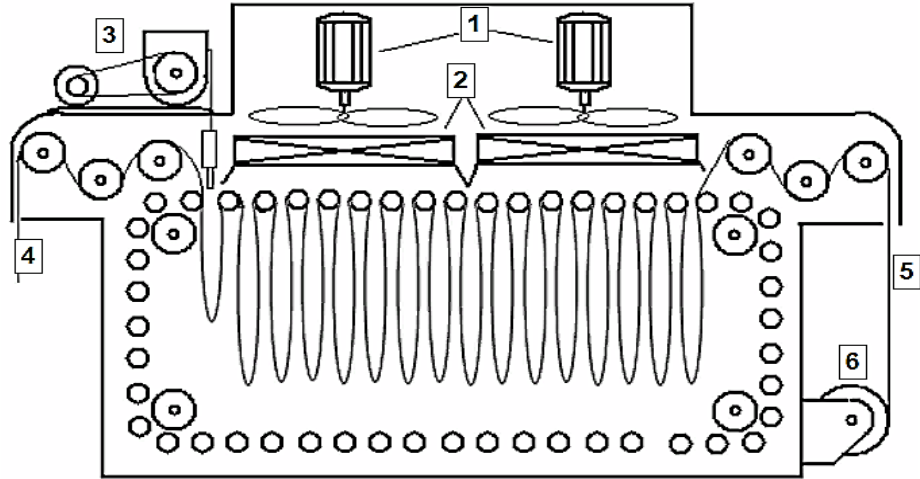
aralarında levha durumunda olan ürünler yer alır. Aşağıdaki Şekil 3.12’de silindir kurutucu verilmiştir [44].



Şekil 3.12. Silindir kurutucu modeli.

Askı Kurutucular

Kâğıt ve tekstil ürünlerinin kurutulma işleminde askı tip kurutucular kullanılır. Kurutucu içerisinde plaka durumunda olan ürünlerin verilmesi ile askılar oluşmaktadır. Kurutulacak olan ürünün kurutma işleminin tamamlanmasının ardından sistemi terk etmektedir [44]. Aşağıdaki Şekil 3.13’de askı kurutucu modeli görülmektedir.



1. Fan 2. Isıtıcı 3. Kompresör 4. Ürün girişi 5. Ürün çıkışı 6. Ürün topu

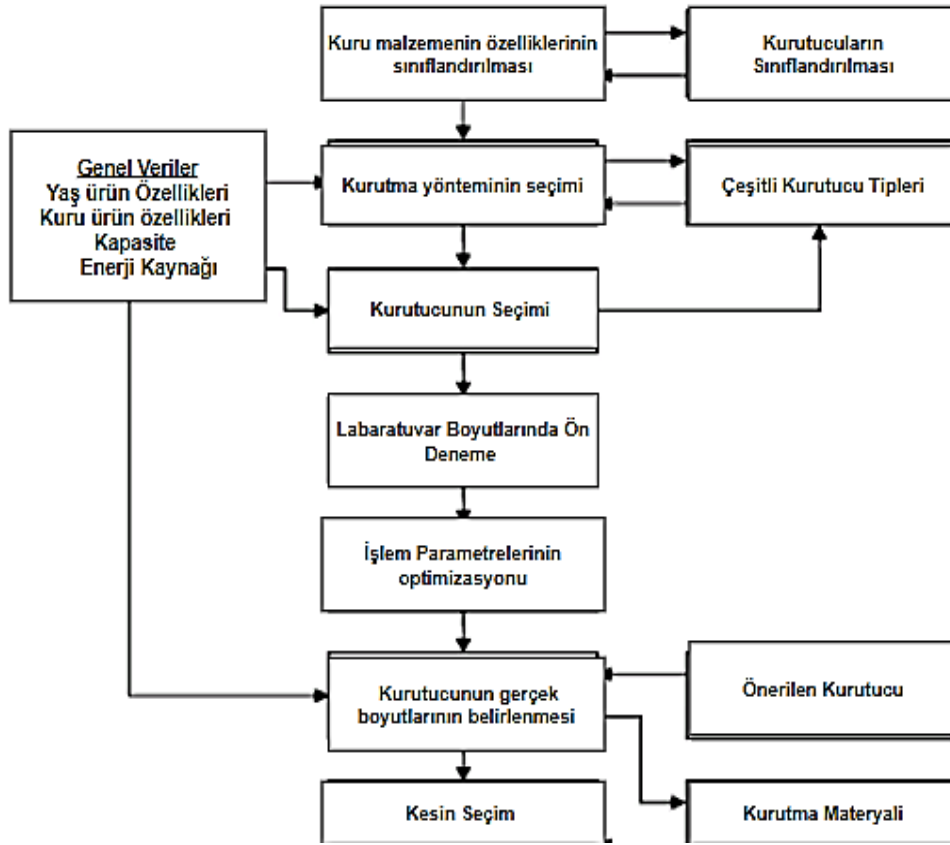
Şekil 3.13. Askı kurutucu modeli.

3.3. KURUTUCU SEÇİMİ

Kurutma işleminin başarısına ürünün kalitesi ve işletmenin kar etmesi açısından uygun bir kurutucu ve kurutma yönteminin seçilmesi ile gerçekleşir. Öncelikle kurutucu ekipmanları ve kurutma türü doğru olarak seçilmelidir.

Birçok parametreye önem verilmesi ile Kurutma işlemi için doğru kurutucu seçilmektedir. Kurutucu seçiminde kurutulacak olan gıda ürünlerinin yapısal özellikleri, ısıtıcı tipi, gıda ve kurutma havası arasındaki hidrodinamik şartların özellikle incelenmesi gerekmektedir. Bir başka önemli ölçüt ise kurutma işlemi sonucunda kurutulmuş olan gıda ürününün niteliği ile ekonomik işletmedir.

Aşağıdaki Şekil 3.14'de kurutucu seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar verilmiştir.



Şekil 3.14. Kurutucu seçiminde işlem adımları.

Kurutulacak olan ürünün özelliklerinin tespit edilmesi kurutucu seçimindeki ilk ve en önemli husustur. Kurumuş olan üründen ne gibi özellikler beklendiği tanımlanmalıdır. Kurutucular ve kurutma yöntemi belirlendikten sonra seçimi kesinleştirmek için dikkate alınması gereken hususlar vardır [44]. Bunlar;

- Kurutulacak olan ürünün yıllık olarak miktarı,
- İşletmenin kuruluş maliyeti,
- Tesisin işletme için olan giderleri,
- Kurutma işlemi sırasında malzemeden verilecek olan eksilme miktarı,
- Güvenli çalışma,
- Kurumuş olan ürünün kalitesinin uygunluğu,
- Kurumuş olan ürünün dış görünüşünün belirtilen talebe uygun olması,
- Kurutma cihazının kapasitesinin farklı şekillerde çalışabilmesi,
- Çevre kirliliğine neden olup olmaması,
- Çalışma sırasında etkin kontrol imkânı,

- Kurutma cihazının bakım ve tamirinde kolaylık olması,
- Kurutma cihazının görünümü.

BÖLÜM 4

DONDURARAK KURUTMA

4.1. DONDURARAK KURUTMAYA GİRİŞ

Meyve, meyve suları, çay özleri, sebze, kahve üretimi, eczacılık ve ilaç sanayi, et ve süt ürünlerinin kurutulması gibi pek çok alanda dondurarak kurutma işlemi uygulanmaktadır. Vakumlanmış olan ortamda üründen önce donmuş olan suyun (serbest su) uzaklaştırılması ve sonrasında donmamış olan suyun uzaklaştırılması dondurarak kurutma işlemidir. Dondurarak kurutma işlemi liyofilizasyon olarak da bilinmektedir ve bu işlem pahalı ve yavaş bir işlemdir. Liyofilizasyon yöntemi ile kurutulan ürünlerin diğer kurutma yöntemi ile kurutulan ürünlerle karşılaştırıldığında en kaliteli ürünlerin bu yöntem sonucunda elde edildiği görülmektedir. Dondurarak kurutma yöntemi ile kurumuş olan ürünün bünyesine yeniden su alması ile tekrar kurutmadan önceki haline gelir. Bu yöntem ile ürünün depolama alanından tasarruf etmesi, raf ömrünün uzun olması ve ürünün ağırlığının azalması gibi avantajları bulunmaktadır [45].

4.2. SÜBLİMLEŞMENİN TEORİSİ

Dondurarak kurutma işleminin en önemli noktası süblimleşmedir. Bir üründeki donmuş olan suyun erime işlemi olmadan direkt olarak gaz fazına geçmesi süblimleşme işlemidir. Maddenin üç fazı belirli koşullar altında beraber bulunmaktadır. Üçlü nokta fazların bir arada bulunabildiği noktadır.

Üçlü nokta şartları su için 0,01 °C ve 0,6113 kPa'dır. 0,6113 kPa basıncı altında maddeler sıvı fazında dengede kalmamaktadırlar. Maddelerin yüksek basınç altında üçlü nokta sıcaklığı altında sıvı fazda bulunurlar.

Maddeler iki farklı şekilde katı halde buhar hale geçmektedirler. İlk olarak öncelikle madde sıvı hale sonrasında da gaz hale geçmektedir. İkinci olarak ise katı madde doğrudan gaz haline geçmektedir. Direk geçişte sadece üçlü noktadan daha düşük olan basınçlarda gerçekleşmektedir. Maddenin katı olan fazından doğrudan buhar olan fazına geçmesine süblimasyon denilmektedir. Süblimasyona uğramış olan her maddenin süblime olma koşullarında farklılıklar vardır [45].

Su buharı basıncının çevre havanın su buharı basıncından daha yüksek olması buzun süblime olmasını sağlamaktadır. Buzun buhar basıncının sıcaklık ile ilişkisi vardır ve bu durum değişkenlik göstermektedir. Çizelge 4.1’de buzun farklı sıcaklıklardaki buhar basıncı değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı [45].

Sıcaklık (°C)	Basınc Değerleri (mmHg)				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
-29	0,317	0,311	0,304	0,208	0,292
-28	0,351	0,344	0,337	0,330	0,324
-27	0,389	0,381	0,374	0,366	0,259
-26	0,430	0,422	0,414	0,405	0,397
-25	0,476	0,467	0,457	0,448	0,439
-24	0,520	0,515	0,505	0,495	0,486
-23	0,580	0,569	0,558	0,57	0,536
-22	0,640	0,627	0,615	0,603	0,592
-21	0,705	0,591	0,678	0,665	0, 652
-20	0,776	0,761	0,747	0733	0,719
-19	0,854	0,838	0,822	0,806	0,791
-18	0,939	0921	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	2,763	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	3,541	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	4,331	4,359	4,287

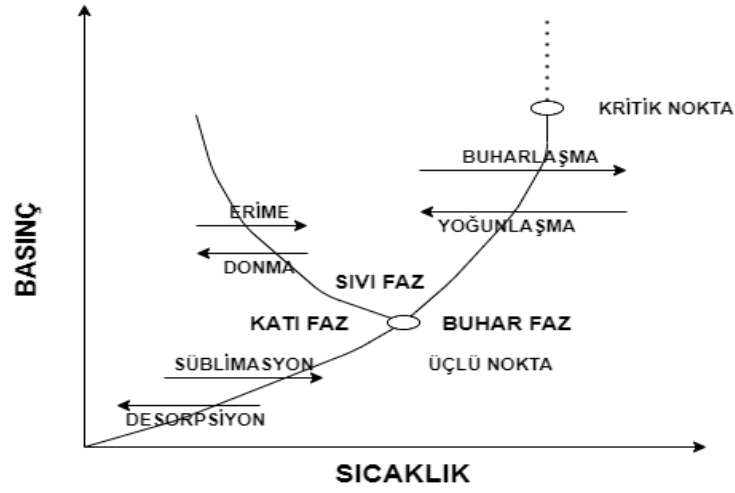
Süblimasyon gizli ısısı erime ve buharlaşma ile gizli ısıların toplamına denilmektedir. Buzun süblimleşmesi için gerekli olan ısının buzdan alınması ile buzun sıcaklığı azalmaktadır. Bu nedenle dondurarak kurutma yönteminde ürünlerdeki buz süblime olduğu müddetçe ürünün sıcaklığında azalma olmaktadır [40]. Buz-buhar sisteminde süblimasyon ısısı, mutlak basınç ve sıcaklık değerleri Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Buz-Buhar sisteminde süblimasyon ısısı ve mutlak basıncın sıcaklık değerine bağımlı olarak değişimi.

Sıcaklık (°C)	Mutlak Basınç (mm Hg)	Süblimasyon ısısı (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

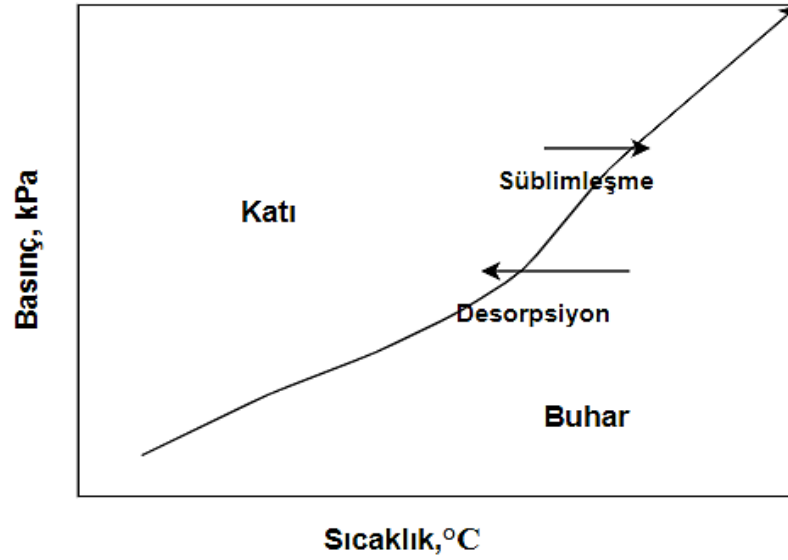
4.3. SÜBLİMLEŞMENİN TERMODİNAMİĞİ

Süblimleşme olayında gerekli olan sıcaklık ve basınç değerlerinin tespit edilmesinde suyun denge-faz diyagramı kullanılmaktadır. Suyun denge-faz diyagramı Şekil 4.1.’de yer almaktadır.



Şekil 4.1. Denge faz diyagramı (üçlü nokta).

Dondurarak Kurutma işleminde önemli olan husus katı olan fazdan gaz fazına geçiş işlemi yani süblimasyondur. Bu durumun tam aksi ise gaz fazından katı faza geçiş işlemi yani desorpsiyon (çökme) işlemidir. Su için katı hal ve gaz hali arasındaki dolgunluk eğrisi Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki dolgunluk eğrisi [45].

Süblimleşme durumunda olan buz ve gaz fazlarının denge durumunda olması ile süblimleşme işlemi devam edebilmektedir. Her iki fazın da verilen sıcaklık ve basınç değerlerinde Gibbs enerjilerinin eşit olması durumunda fazlar dengededir. Gibbs enerjisi, G, hesaplanması şu şekildedir;

$$G = H - T.S$$

Burada;

T: Sıcaklık, (K),

H: Entalpi, (kJ),

S: Entropi, (kJ/K) dir

Süblimleşme işleminde buzun G'si gazın G'sine eşit olduğunda fazlar arasında olan geçiş durmaktadır. Şekil 4.2'de yer alan doymuluk eğrisi ile bu denge durumu gösterilmektedir. Süblimleşme durumunun gerçekleşebilmesi için buzun Gibbs enerjisi buharın Gibbs enerjisinden büyük olması gerekmektedir. Bu durum buz sıcaklığının yükseltilmesi ya da gaz basıncının düşürülmesi ile denge durumundan uzaklaştırılarak gerçekleşmektedir. Denge şartları ya da denge şartlarına yakın olarak süblimleşme gerçekleştiğinde basınç ve sıcaklık arasında olan ilişki ClausiusClaperyon eşitliği ile açıklanmaktadır.

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{sub}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (4.1)$$

Burada; T (mutlak sıcaklık) sıcaklığa bağlı doymuş buhar basıncı, P (basınç), ΔH_{sub} süblimleşme gizli ısıdır.

Ara yüzdeki buzun sıcaklığının bilinmesi durumunda bu eşitlik süblimleşme ara yüzündeki buhar basıncının tespitinde kullanılır. Ancak sıcaklığın bir fonksiyonu olan gizli ısı Şekil 4.2'de eğri üzerindeki sıcaklık fonksiyonunun belirlenmesi ile ClausiusClapey eşitliğinde uygulamak faydalıdır [45].

4.4. KİNETİK TEORİSİ VE SÜBLİMLEŞME ORANI

Bir maddenin hali kinetik teoride moleküler seviyede tanımlanmaktadır. İç moleküler kuvvet ile moleküllerin kinetik enerjisi tespit edilmektedir. Bir sistem içerisindeki moleküllerin tamamının farklı kinetik enerjileri ve farklı kinetik enerji dağılımları bulunmaktadır.

Katı maddelerin moleküllerinin kinetik enerjileri ortalama olarak azdır. Ancak katı maddenin süblimleşmesi ile yüzeyinde bulunan kinetik enerji iç moleküler kuvvetleri yener ve yüzeyden ulaşacak olan yeterli enerjiyi barındırmaktadır. Katı maddenin yüzeyinden ayrılacak enerjiye sahip olan moleküllerin yüzdesi katı maddenin sıcaklığı arttıkça artış göstermektedir.

Süblimleşen katı maddelerin yüzeyindeki gaz moleküllerine dönen moleküllerin miktarı gaz basıncı ile belirlenmektedir. Gazın sıcaklığı, gazdaki moleküllerin sayısı ve gazın sıcaklığı ile gaz basıncı belirlenmektedir. Katıya dönüşen moleküllerin oranı gaz basıncının artması ile artmaktadır.

Buzun süblimleşme oranını arttırmak için iki değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler buzun süblimleşen yüzeyinin üst su buhar basıncı ve buzun sıcaklığıdır. Suyun yükseltilmesi ile yüzeyden daha fazla molekülün ayrılmasını sağlamak ve basıncın azaltılması ile fazla sayıda gaz molekülünün süblimleşme yüzeyinden ayrılmasını sağlamaktadır. Süblimleşme ara yüzeyinde bu durum sürekli olarak molekül akışına sebep olmaktadır.

Düşük basınç ile buzun yüksek su-sıcaklığı birleştiğinde kinetik teoriden süblimleşme oranı anlaşılmaktadır. Kinetik teoriden buzun süblimleşme oranı (G_{ks}) için Knudsel bir denklem türetmiştir [45].

$$G_{ks} = k_b P_b \left(\frac{M}{2\pi RT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 0 < k_b < 1 \quad (4.2)$$

Burada;

k_b : Buharlaşma katsayısı,

P_b : Suyun doymuş buhar basıncı,

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

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

T : Buzun mutlak sıcaklığı (K).

Farklı sıcaklıklarda buzun buharlaşma katsayısını birçok kişi tarafından hesaplanmaya çalışılmıştır ve genel olarak ulaşılan değerler 0,6 ile 1 arasındadır.

Eşitlik 4.2’te suyun P-T diyagramında bulunan değerlerin uygulanarak kullanılmasında yüksek buz sıcaklıklarında süblimleşme oranının yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebeple dondurarak kurutma yöntemi için uygun olan sıcaklığın kurutulacak olan ürün için gerekli olan kabul edilebilir en yüksek sıcaklık olması beklenir. Dondurarak kurutma yönteminde bu durum en fazla bilinendir.

Buzun yüzeyinden ayrılan moleküllerin yanında buza dönüşen moleküller gerçek bir sistemde vardır. Bu nedenle su buharı kısmi basıncı süblimleşme oranına tesir etmektedir. Vakum sisteminde yoğunlaştırıcı kullanılması ile buhar basıncı düşük tutulmaktadır. Eşitlik 4.3 ile vakum sistemindeki yoğunlaştırıcının tesiri tarif edilmekte ve buharlaştırıcı ortam basıncı P'_b dir [45].

$$G_{sub} = k_b(P_b - P'_b) \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

4.5. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN KRİTİK SICAKLIKLAR

Dondurarak kurutulacak olan her ürün için çöküş sıcaklığı olarak adlandırılan dondurarak kurutma yöntemi sürecinde üzerine çıkılması sorun olacak tipik sıcaklık bulunmaktadır. Bu nedenle dondurarak kurutma işleminin bitmesine kadar bu sıcaklık üzerine çıkılmaması gerekmektedir. Ancak kritik sıcaklığın çok altında ürünün

tutulması kurutma işleminin yavaşlanmasına sebep olur. Buna bağlı olarak dondurarak kurutma yöntemi işleminde sıcaklık son derece önem arz etmektedir.

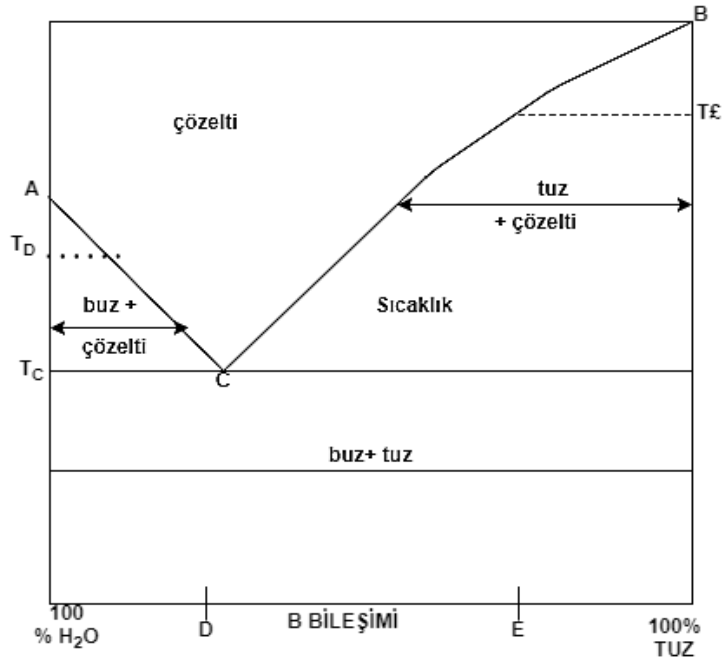
Kristal yapıdaki (ötektik) sistemlerdeki kritik sıcaklık ötektik erime sıcaklığı (T_e)dır. Dondurarak kurutma işlemindeki ürünün bu sıcaklığın üzerine çıkılması ile erimesi söz konusu olabilir.

Dondurarak kurutma için amorf yapıdaki pek çok sistemde kritik olan sıcaklık çökme sıcaklığıdır (T_c). Bu sıcaklık ürünün yapısını koruyamayarak yumuşadığı, istenmeyen ürün görüntüsü, kurutmanın bitmemesi, yeniden yapılanma ve kötü kararlılık gibi durumları ortaya çıkartan sıcaklıktır. Çökme, maddenin camlaşma sıcaklığının (T'_g) üstüne ısıtılması ile ortaya çıkmaktadır [46].

4.5.1. Ötektik Sıcaklık

Dondurarak kurutma yöntemi süresince donuş tabakada olan süblimleşme işlemi için ürünün tutulması gerekli olan sıcaklık ötektik sıcaklık olarak ifade edilmektedir. Ürünün kurutma sıcaklığı kurutmanın tamamlanabilmesi için ihtiyaçların karşılanması derecesinde yüksek ve donuş olan tabakanın erimesini engelleyecek kadar düşük olmalıdır.

Tuzun sulu çözeltisinin faz denge diyagramı Şekil 4.3'de görülmektedir. A ile saf suyun donma noktası B ile tuzun erime noktası gösterilmektedir. Suyu bir miktar tuz eklenmesi ile bileşim D noktasına denk gelmektedir ve çözeltinin donma noktası TD sıcaklığına düşmektedir. Çözeltinin daha fazla soğutulması ile buz kristalleşmeye devam etmekte ve çözelti derişik hale gelmektedir. Buz ve tuzun karışım içinde kristalleşeceği sıcaklığa C noktasında ulaşılmaktadır.



Şekil 4.3. Tuzun sulu çözeltisinin faz denge diyagramı.

Saf tuza su eklendiğinde bileşim E noktasına denk gelir, saf tuzun çözeltide kristalleşmesi için çözeltinin sıcaklığı azaltılmalıdır. Sıcaklık devamlı olarak azaltılırsa buzun ve tuzun kristal hale gelerek karışım içinde bulunduğu bir bileşim oluşuncaya kadar saf tuzun çökmesi devam eder ve çözelti seyreltik hale gelmektedir.

Şekil 4.3.'de B'nin su içindeki çözünürlük eğrisini B-C eğrisi ve tuzun değişik derişimlerdeki donma etkisini A-C eğrisi göstermektedir. Tuzun çözünürlük eğrisi ve suyun donma noktası eğrisinin kesişim noktası ötektik noktasıdır. Termal analiz, diferansiyel termal analiz ve elektriksel özdirenç yöntemleri ile ötektik sıcaklık belirlenmektedir [46].

4.5.2. Camsı Geçiş Sıcaklığı

Camsı geçiş bilgisi birinci ve ikinci kurutma safhalarının uygun şekilde tasarlanması için önemlidir. Yoğun biçimde donmuş olan yapının donma safhası süresince sıcaklığının düşürülmesiyle birlikte camsı geçiş sıcaklığında camsı amorf bir yapı meydana gelmektedir [46].

sebebiyet verir. Sınırlı sıcaklık aralığında çökme kısmen oluşur. Çökmenin ilk olarak gerçekleştiği en düşük sıcaklık çökme sıcaklığı (T_c) olarak tarif edilmektedir [46].

Camlaşma sıcaklığından çökme sıcaklığı genellikle 2 °C daha yüksektir. Donmuş olan çözeltide çözünen maddenin kristalleştiği durumda çökme sıcaklığı ötektik sıcaklığa erişmektedir. Ürünün her zaman çökme sıcaklığından düşük sıcaklık altında dondurarak kurutulması uygun ürün elde etmek için tavsiye edilmektedir [46].

Dondurarak kurutma işlemi sırasında nemin buharlaşması ile kurutulacak olan ürün gözenekli bir yapı haline gelir ve bu gözenekli yapının korunması gerekmektedir. Kurutulmuş olan ürünün sıcaklığı camlaşma sıcaklığının üzerinde olduğunda katı olan maddenin yapısının korunması için vizkozitesi yeterli olmaz ve üründe şişme ya da donmalar meydana gelir. Ürünün sıcaklığının camlaşma sıcaklığının üzerinde olmaması ile asıl hacim korunmaktadır. Camlaşma sıcaklığının (T'_g) belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemler arasında diferansiyel ısı analiz (DTA), ısı mekanik analizi ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) vardır [46].

4.6. DONDURARAK KURUTMA İŞLEMİNİN EVRELERİ

Dondurarak kurutma işlemi üç safhadan oluşmaktadır:

- Dondurma safhası,
- Birinci kurutma safhası,
- İkinci kurutma safhası'dır [45].

4.6.1. Dondurma Evresi

Ürünün yapısının uygun bir şekilde dondurma işlemi gerçekleşmektedir. Biyolojik olarak dokular genel olarak NaCl'in ötektik değeri -21,6 °C altındaki sıcaklık değerlerinde dondurma işlemi yapılır.

Çözücünün kristal duruma gelmesi önemli bir husustur. Sıvıdan camsı katı (camsı oluşum) durumuna buz kristali oluşmadan dönüşüm olmaktadır. Suyun ulaştırılması

bu yapı üzerinden zordur. Dokunun kurutulmasının kolaylaştırılması ve kristalizasyonun sağlanması için ürünün dondurulması ötektik değeri altındaki sıcaklıkta olması gerekmektedir.

Üründe meydana gelen gözenekli yapı ve buz kristallerinin büyüklüğü arasında bir ilişki vardır. Gaz fazına geçen buz kristalleri hacimde kapladıkları alan kadar yer boşaltmaktadırlar. Maddenin yapısında büyük buz kristalleri çok sayıda ve büyük gözenekler meydana getirmektedir. Gözenekli yapı buz kristallerinin çapı arttıkça artış göstermektedir.

Küçük buz kristalleri hızlı dondurma işleminde oluşmaktadır. Maddenin yapısına küçük buz kristallerinin süblimasyonu daha az oranda zarar vermektedir ancak dondurarak kurutma işlemi oldukça zor olmaktadır. Büyük buz kristalleri yavaş dondurma işleminde oluşmaktadır. Büyük buz kristallerinin dondurarak kurutulması küçük buz kristallerinin kurutulmasına göre sorunsuz bir şekilde gerçekleşir ancak ürünün yapısına daha çok zarar vermektedir [45].

4.6.2. Birinci Kurutma Evresi

Donmuş ürünlerde çözücünün alçak basınç altında katı faz halinden gaz fazına dönüşmesi süblimleşme olayıdır. Suyun gaz fazında donmuş üründen ayrılması buhar derişim farklı ile oluşmaktadır. Üründen süblimleşme ile ayrıştırılan su buharı kurutma kabininde yayılmaktadır. Üründen su buharının devamlı olarak ayrıştırılmasını sağlayan şartları oluşturmak için su buharı vakum aracılığıyla kurutma kabininden yoğunlaştırıcıya devamlı olarak taşınmaktadır. Böylece çözücünün süblimleşmesini gerçekleştirecek biçimde kurutma kabininin buhar basıncı düşük tutulmaktadır.

Ürünün içinde bulunan su buharı sisteme ısı verilmediğinde kısmi basınç ile dengelenerek kurutulmakta olan üründen suyun atılması işlemi durma noktasına gelmektedir. Sisteme ısı aktarılması ile süblimasyon işlemi devam edebilmektedir. Kurutulacak olan ürüne radyasyon ya da iletim ile ısı verilebilmektedir. Sisteme sağlanan ısı miktarı rastgele yükseltilememektedir. Dondurarak kurutulmuş olan katmanın en yüksek sıcaklık seviyesi ürünün biyokimyasal ve kimyasal tepkimelere

neden olmayacak, biyoaktiviteyi kaybetmeyecek ve rengini değiştirmeyecek şekilde seğim yapılmalıdır. Birinci kurutma safhası serbest suyun tamamının süblimleşmesi ile son bulur [45].

4.6.3. İkinci Kurutma Evresi

Dondurarak kurutma işleminin son safhası olan bu safha donmamış (bağlı) suyun uzaklaştırılmasıdır. Bağlı suyun desorpsiyonla uzaklaştırılması işleminin ikinci kurutma safhasıdır. İdeal olan kurutma işleminde birinci kurutma safhasının bitmesinin hemen ardından ikinci kurutma safhasının başlaması gerekir. Dondurarak kurutma işleminin birinci safhasında yalnızca süblimasyonla donmuş olan suyun atılması, ikinci kurutma safhasında da yalnızca bağlı olan suyun uzaklaştırılması vardır. Fakat gerçekte dondurarak kurutma yönteminde birinci kurutma safhasında çok az miktarda bağlı su üründen uzaklaştırılmaktadır.

Dondurarak kurutma işlemlerinde kurutulacak olan ürünün yapısında bulunan donmuş çözücünün süblimasyon ile tamamının uzaklaştırıldığı an da ikinci kurutma safhası başlamaktadır. Böylelikle ikinci kurutma safhası boyunca üründen yalnızca donmamış su ayrıştırılmaktadır.

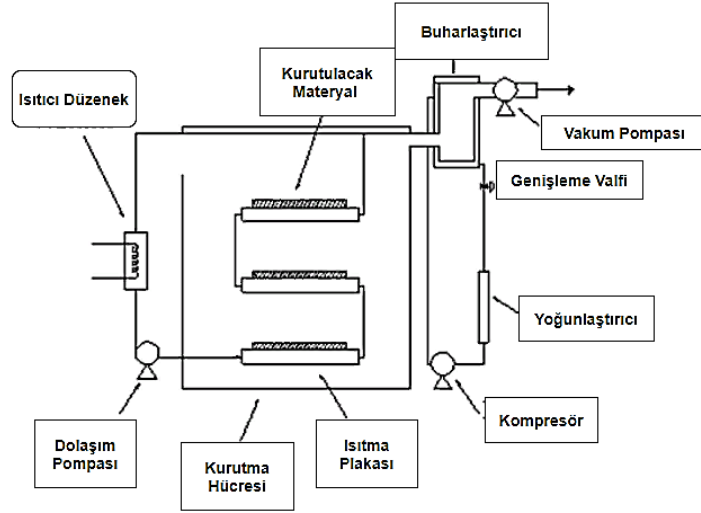
Üründeki su miktarının %65-90'ı donmuş sudan oluşmaktadır. Bu donmuş su birinci kurutma safhası boyunca süblimleşme ile uzaklaştırılmaktadır. Bunun dışında kalan su ise donmamış olan su miktarıdır. Toplam kurutma süresi ile kurutma hızına bağlı suyun uzaklaştırılması etki etmektedir. Bağlı suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zaman ile serbest suyun uzaklaştırılması için gerekli zaman birbirine eşittir ya da serbest suyun uzaklaştırılması daha kısa sürmektedir.

Ürüne vakum ortamında ısı aktarılması ile üründeki bağlı su uzaklaştırılmaktadır. İkinci kurutma safhasında kurutma sürecinde ürüne verilecek olan ısı rastgele yükseltilememektedir. İkinci kurutma safhası boyunca ısı üründeki nemin derişimi, zamanı ve sıcaklığına göre değişmektedir [45].

4.7. DONDURARAK KURUTMA SİSTEM ELEMANLARI

Dondurarak kurutma sisteminin başlıca elemanları Şekil 4.5’de görülmektedir. Dondurarak kurutma sistemi dört bölümden oluşmaktadır:

- Soğutma Sistemi,
- Kurutma Kabini,
- Vakum Pompası,
- Isıtma Ünitesi.

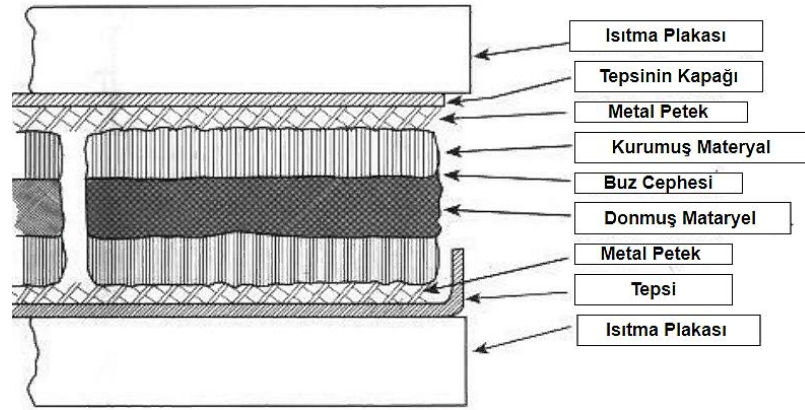


Şekil 4.5. Dondurarak kurutma sistemi.

4.8. DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

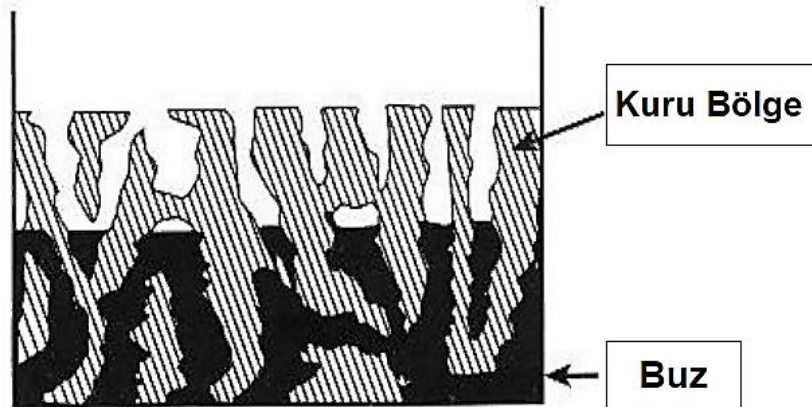
Dondurarak kurutma işlemi dondurma ve kurutma olarak iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan dondurma aşamasında maddenin dondurma işlemi geleneksel seçilmiş bir dondurma düzeneğinde gerçekleştirilir. Dondurma işlemi süresinin hızlı olmasına bağlı olarak küçük ve çok sayıda buz kristali oluşur ve böylelikle kurumuş olan üründe o kadar sayıda gözenek oluşur. Bunun neticesinde ürünün rehidrasyon hızı yükselerek rehidrasyon tam manası ile gerçekleşir. Kurutulmuş olarak ürüne su eklenmesi ile kurumadan önceki haline gelmesi rehidrasyondur.

Dondurarak kurutma işlemi sırasında en önemli sorunlardan birisi ürüne ısı verilmesi işlemidir. Kurutulan ürünün sıcaklığı yoğunlaştırıcı sıcaklığından devamlı olarak yüksek tutulması gerekmektedir. Bu koşullar kurutulan üründen yoğunlaştırıcıya buhar akışı olmaktadır. Dondurarak kurutma işleminde kurutulan ürünün devamlı olarak ısıtılması gerekir. Dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulan bir gıda ürününün kuruması sırasında plakalı ısıtıcılar ile ısıtılması Şekil 4.6’da görülmektedir [40].



Şekil 4.6. Dondurarak kurutma yönteminde gıda ürününün iletim ile ısıtılması.

İletimli ve levhalı ısıtmada, ürün ve levha arasında sürekli olarak ısının aktarımını sağlayan ancak buharın hareketini kısıtlamayan, süblimleşmiş buharın çıkışını engellemek için metalden bir petek vardır. Süblimleşme öncelikle yüzeyde oluşur. Şekil 4.7’de görüldüğü üzere buz tabakası gittikçe derinlere gerilemektedir.



Şekil 4.7. Dondurarak kurutma yönteminde gözenekli yapı.

Isıtıcı plaklar bazı kurutucularda çivili bir şekilde üretilmiştir. Bu çiviler ürünün içlerine kadar ulaşmakta ve ısı aktarımının daha iyi olmasıyla kuruma işleminin hızı artmaktadır [40].

4.9. DONDURARAK KURUTMA YÖNTEMLERİ

Dondurarak kurutma işleminde genellikle üç farklı yöntem kullanılmaktadır:

- Manifold yöntemi ile kurutma,
- Grup (batch) yöntemi ile kurutma,
- Yığın (bulk) yöntemi ile kurutma.

Bu yöntemlerin her birinin özel bir amacı bulunmaktadır. Ürüne ve ürünün istenilen son şekline göre kullanılacak yöntem belirlenir.

4.9.1. Manifold Yöntemi

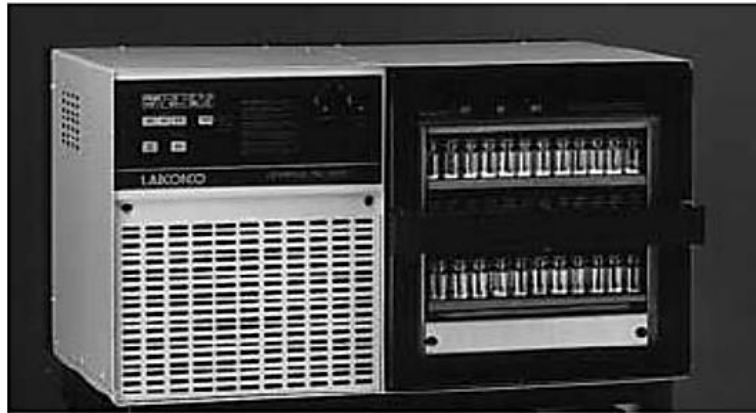
Bu yöntem ile dondurarak kurutmada küçük ilaç şişeleri, ampul veya dar boyunlu küçük şişe kurutma odasının giriş kısmına ya da manifolda takılmaktadır. Kurutulacak olan ürün dondurucuda, düşük sıcaklık banyosuna batırılması ile dondurarak ürünün yapısına ve hacmine göre dondurma işlemi yapılır. Ürünün düşük sıcaklık banyosunda ince tabaka halinde döndürülerek bir şişe içerisinde dondurulması kabuk dondurmadır. Dondurulan ürünü hızlı bir şekilde ısınmasının engellenmesi için kurutma kabinine veya manifolda yerleştirilmesi gerekir. Ürünün süblimleşmesi için düşük sıcaklık sağlanır ve şişelerin içine vakum uygulaması yapılır. Bu uygulama yalnızca çökme sıcaklığına sahip, ötektik ve küçük hacimli ürünler için kullanılmaktadır [46].



Şekil 4.8. Manifold kurutma yöntemi.

4.9.2. Grup (Batch) Yöntemi

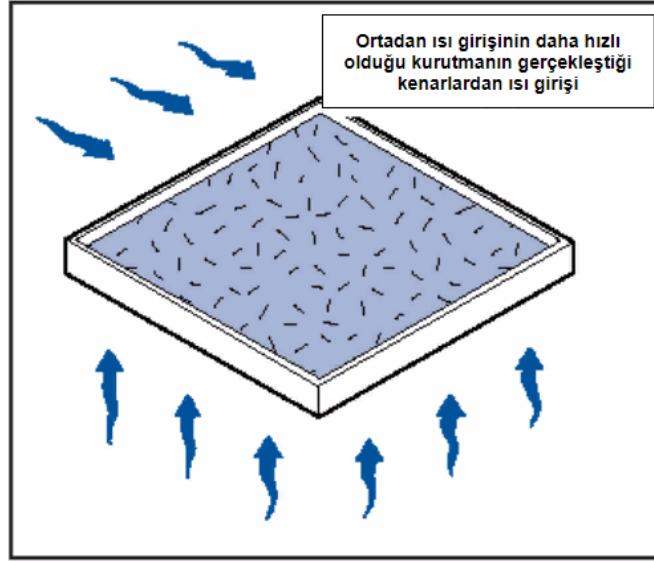
Grup (batch) yönteminde aynı boyutta olan çok sayıdaki şişeler tepsili dondurulur ve sonrasında kurutucuya konur. Genel olarak ürün tepsili dondurularak kurutucuda dondurma işlemi yapılır. Kurutma süresi boyunca ürüne verilecek ürün sıcaklığı ve ısı miktarı dikkatlice uygulanır. Grup (batch) yöntemi tek bir materyal için çok sayıda küçük ilaç şişesi, ilaç endüstrisi ya da ampul hazırlamakta kullanılmaktadır [46].



Şekil 4.9. Grup (Batch) kurutma yöntemi.

4.9.3. Yığın (Bulk) Yöntemi

Bu yöntemde grup yönteminde olduğu gibi kurutma işlemi tepsili dondurarak kurutucuda gerçekleşir. Tepsi içine yerleştirilen ürün tek bir ünite olarak kurutulmaktadır. Grup kurutma ve manifold kurutmada olduğu gibi yığın kurutma yönteminde kontrollü koşullar altında ürün kapatılmamaktadır. Ürün çoğunlukla dondurarak kurutma cihazından uzaklaştırılarak havasız olan kaplarda paketlenmesi yapılır. Yığın kurutma yöntemi genel olarak oksijene ve neme duyarlı olmayan kararlı ürünlerde uygulanmaktadır [46].



Şekil 4.10. Yığın (Bulk) kurutma yöntemi.

4.10. DONDURARAK KURUTUCULAR

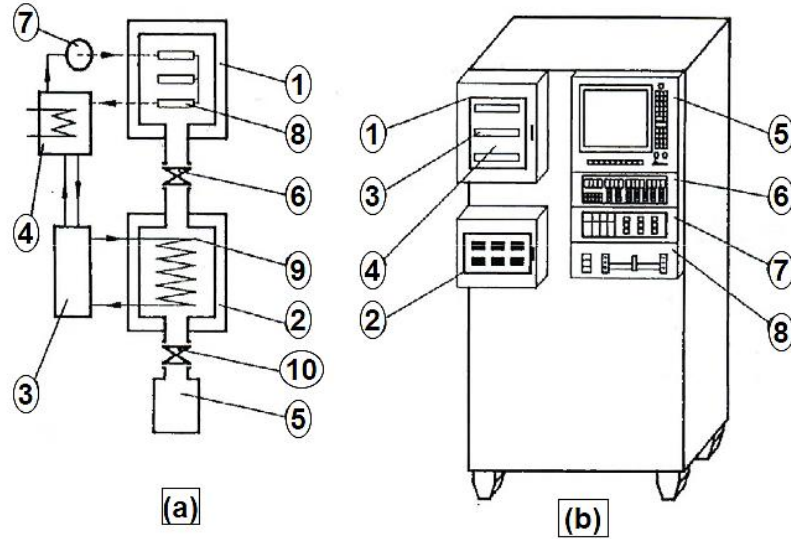
4.10.1. Pilot Ölçekli Dondurarak Kurutucular

İlaç ve gıda endüstrisinde sıkça kullanılan pilot ölçekli dondurucu kurutucular laboratuvarlarda da sıkça kullanılmaktadır. Bunun nedeni ise kurutucuların her şeyden evvel biyolojik kökenli olan dayanıksız ürünlerin saklanması ile araştırılmasında kullanılmasıdır. Pilot ölçekli dondurarak kurutucular taşınabilirlerdir ve dünyanın her tarafında laboratuvarlarda ve fabrikalarda dondurarak kurutulan ürünlerin geliştirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu kurutucuların çok sayıda cihaz tipi

bulunmaktadır. Bu cihaz tiplerinde 2 kg'dan 20 kg'a kadar donmuş ürün kurutmak mümkündür.

Şekil 4.11'de pilot ölçekli dondurarak kurutucu sisteminin (Criofarma model C5-2) şematik diyagramı görülmektedir. Sistem 3 ana birimden meydana gelmektedir:

- Soğutma Sistemi,
- Isıtma ünitesi,
- Vakum Sistemi.



(a) Criofarma model C5-2; 1: kurutma odası, 2: kondenser, 3: soğutma ünitesi, 4: plakaların soğutma-ısıtma ünitesi, 5: vakum ünitesi, 6: izolasyon kelebek valf, 7: silikon yağı pompası, 8: soğutma-ısıtma plakası, 9: soğutma bobini, 10: kondenser vakum valfi, (b) C5-2 modelinin önden görünüşü; 1: kurutma odası, 2: kondenser, 3: soğutma-ısıtma plakası, 4: kontrol penceresi, 5: bilgisayar sistemi, 6: vakum göstergesi ve regülötör, 7: sıcaklık kontrol paneli, 8: yazıcı (Model C5-2 Criofarma).

Şekil 4.11. Pilot ölçekli dondurarak kurutucu (Criofarma Model C5-2).

Bu tipte olan dondurarak kurutucularda basınç ve sıcaklık koşullarının kontrolü tam olarak sağlanmaktadır. Kondenser ve plaka sıcaklığı $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındadır ve kurutma odasında olan basınç 1 Pa veya daha altındadır. Bu kurutucunun plaka sıcaklıkları, kondenser bobin sıcaklığı, ürün sıcaklığı, kondenser kısmındaki basınç, kurutma odasındaki basınç ve vakum sisteminin basıncını gösteren ve kaydeden kontrol paneli bulunmaktadır [46].

4.10.2. Endüstriyel Dondurarak Kurutucular

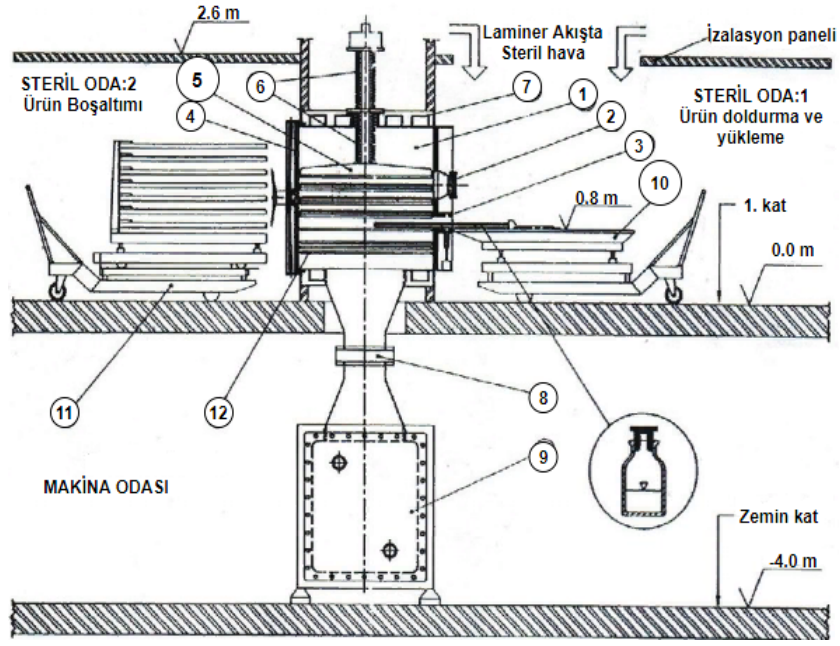
Tepsi ve İlaç Tipi Dondurarak Kurutucular

Kullanılan kondensöre göre değişiklik gösteren iki çeşidi vardır. İlkinde aynı odada bulunan tepsi ısıtıcıların yan tarafına kondensör plakalar monte edilmiştir. İkincisinde ise, ayrı bir odada geniş çaplı kelebek bir valf ile kondensör ilkinde bağlanmaktadır. Bu ikinci tip cihaz genel olarak ilaç endüstrisinde kullanılmaktadır fakat aynı zamanda bu cihaz gıda ürünlerinin dondurarak kurutulması işleminde de kullanılabilir.

Dondurarak kurutulan ilaç çözeltilerinde en önemli sorun prosedürün steril şartlar altında uygulanmasının sağlanmasıdır. Tesis tarafından kurutma işleminde önce ilacın cihaza konulması ve kurutma işleminden sonra ilacın cihazdan alınması esnasında steril koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar ilacın kurutma işleminin gerçekleşmiş olduğu mahal kapısının, steril odadaki makine veya steril olmayan odanın ayrılmasını sağlamak için duvara doğru olması ile sağlanmaktadır.

Kurutma işleminde kullanılan ürün kapları dondurarak kurutma ve doldurma cihazına yerleştirilmeden evvel genellikle farklı bir üniteye sterilize edilmektedir. Prosedürler sistemde olası kirlenmeler ve steril odadaki kapların dondurarak kurutucuya sırayla yerleştirilmesi için insan olması sonucunu gerektirir. Bu sebeplerden ötürü steril odalarda bulunacak insan sayısının birkaç kişi ile sınırlandırılması gerekmektedir.

Kurutulacak ürünlerin kirlenmesini engellemek amacıyla yeni bir dondurarak kurutucu cihazı geliştirilmiştir. Şekil 4.12'de (Crioforma model C300-7) gösterilen cihazda iki kapı vardır: kurutmadan önce ürünün yerleştirilmesi gereken yer küçük kapıdan ve küçük kapının tam karşısında bulunan büyük kapıdan ise kurutma işleminden sonra ürün cihazın içinden alınmaktadır. Kondensör kurutma odasının altında olan katta yer almaktadır. Kurutma odasının zeminine dondurarak kurutma cihazının tepsileri yerleştirilir ve yükleme aracı vasıtası ile dondurarak kurutucu cihazının içine konulmaktadır. Laminer akışlı steril hava ortamında ürünün yüklemesi gerçekleşir; her bir tepsinin yüklenmesi esnasında küçük kapı açıktır ve yerleştirme işlemi bittiği sırada kapı hemen kapatılmaktadır.



1: kurutma odası, 2: kontrol penceresi, 3: otomatik küçük kapı açma 4: bütün kapı, 5: kurutmadan sonra şişelere tıpa takılan hidrolik pres, 6: takılan tıpanın içindeki sterilizasyon için PTFE dirsekleri, 7: sterilizasyon sonrası soğutma bobini, 8: izolasyon kelebek valfi, 9: kondenser odası, 10: yükleme ekipmanı, 11: boşaltma ekipmanı, 12: yüklenmeyen raflar.

Şekil 4.12. Endüstriyel dondurarak kurutucu (Criofarma Model C300-7).

Şekil 4.12.'de görüldüğü üzere ürün kabının şişe olması durumunda genellikle şişenin üzerinde şişenin içine kısmi olarak giren silikon tıpa vardır; çözücü (genellikle su) buharı tıpa ve şişenin arasındaki serbest bölgeden şişeden ayrılmaktadır. Kurutma odasında şişenin içine tıpanın tam olarak kapatılmasından sonra şişeler boşaltılır. Kapatma işlemi şu şekillerde:

- Vakum şartlarında,
- Ürünün oksidasyonunu başarılı olarak engelleyen kurutma odasının vakumunu steril nitrojen ile keserek atmosfer basıncında gerçekleşmektedir.

B örneği uygulamalarda daha sıklıkla kullanılmaktadır. Böylelikle ürünün kirlenmesine şişelerdeki kapatılmış olan silikon tıpa engel olmaktadır [46].

Dondurarak kurutucular ilaç endüstrisinde cloxacillin, cefazolin (genellikle sodyum tuzu olarak), collagen ve ampicillin gibi hammadde ve özel maddelerin üretiminde

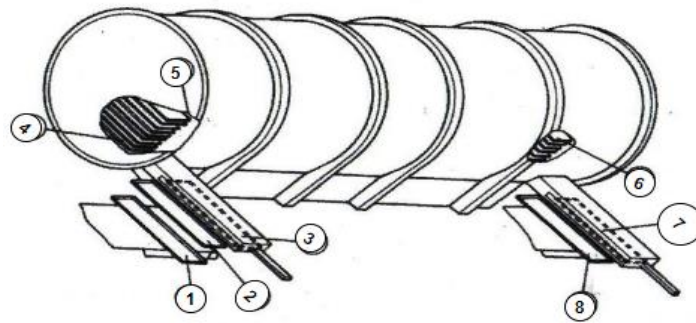
sıklıkla kullanılır. Bu şekildeki kurutma sistemlerinde ürünler polietilen film tepilerine veya paslanmaz çelik tepilerine konulmaktadır ve tesisin yükleme alanları 15m² den 60m² ye kadar değişmektedir [46].

Sürekli Dondurarak Kurutucular

Ürünlerin işlem süresi boyunca sürekli akışını sağlayan dondurarak kurutma tesislerine son yıllarda olan ilgi ve alakanın arttığı görülmektedir. Bu dondurarak kurutma tesisleri devamlılık, denetim ve prosesin her yerinde kolay olarak kontrol edilebilen sabit işlem koşulları sağlamaktadır. Bunun yanında granüllü formda olan gıda ürünlerine olan ilgi artışı ile farklı iki tesis türü gelişim göstermiştir. İlk tür tesislerde kurutulacak olan ürünlerin tepilerde ve karıştırılmış olan yığın ürünlerin dondurarak kurutulma işleminde kullanılmaktadır.

Ürünlerin tepilerde sürekli olarak kurutulmasını sağlayan dondurarak kurutucu CONRAD'dır. Bu tepiler katmanlı, derin olmayan ve paraleldir bu sayede ürün kaybı olmadan dondurarak kurutma işlemi gerçekleşmektedir [46]. Radyasyon ile tepilere ve ürüne ısı transferi sağlanır. Tüm tepiler sabit bir zaman aralığında her bir sıcaklık bölgesinde tutulmaktadır. Böylece kurutma süresi en aza indirilir.

Tepsilerin kabinlere bir düzenek ile taşınması Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Tepsilerin taşıma sistemi içten ve dıştan kontrolü sağlanacak biçimde tasarlanmıştır. Bir sorun ya da hata olması durumunda devreye alarm girerek hızlıca önlem alınabilmektedir.



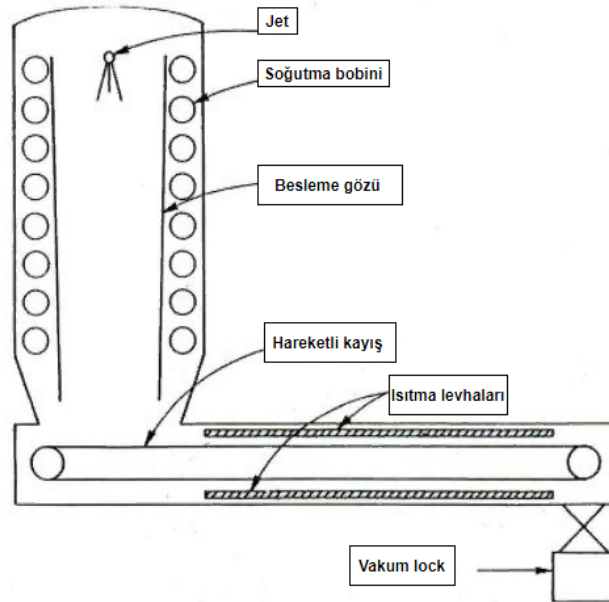
CONRAD: 1: Tepsi, 2: Giriş kilidi, 3: Tepsi asansörü, 4: Isıtma Bölgesi, 5: Tünel duvarı, 6: Tepsi asansörü, 7: Çıkış kilidi.

Şekil 4.13. Sürekli dondurarak kurutucu (CONRAD) şematik görüntüsü.

İkinci tür olan devamlı dondurarak kurutucu tesisi tepsiler olmadan granüllü ürünler için kullanılır [46].

Vakum Sprey Dondurarak Kurutucu

Şekil 4.14.' de yer alan vakum sprej dondurarak kurutucu süt, kahve ekstraktı veya çay infüzyonu için kullanılır. Yukarı veya aşağıda giden tek jet silindir kule içerisine ürün püskürtülmektedir. Sıvı olan ürünler buharlaştırılmalı dondurma tekniği ile küçük tanecikler şeklinde katılaşmaktadır.

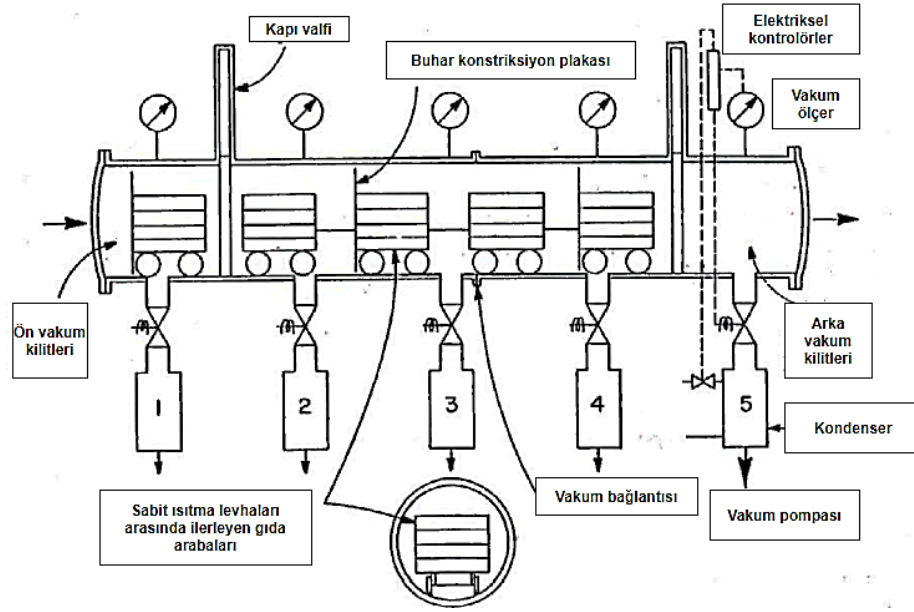


Şekil 4.14. Vakum sprej dondurarak kurutucu.

Kulenin içinde iç duvar ve besleme gözü arasında sarmal kondenser sarılmış durumdadır. Kurumuş olan tozu, besleme gözü kulenin aşağısına serbest bir halde inerken bir araya getirmektedir. Kurutma işleminin sona erdiği tünelde hareketli paslanmaz çelik kayış bulunur ve radyant ısıtıcıların arasından geçmektedir. Daha sonra aralıklar ile paketleme için ürün vakum lock bölümünde beslenmektedir. Tesis yaklaşık olarak 67 Pa vakum altında çalışır.

Tünel Tipi Dondurarak Kurutucular

Tünel tipi dondurarak kurutucunun şematik diyagramı Şekil 4.15’ de yer almaktadır. Bu kurutucularda kurutma işlemi, belli zaman dilimlerinde tepsi taşımakta olan gıda arabaları tünelin bir ucunda bulunan geniş vakum kilitlerinde doldurulur ve tünelin diğer ucundaki boşalan geniş vakum kabininde gerçekleşir.



Şekil 4.15. Tipik tünel dondurarak kurutucu şematik diyagramı.

Yukarıdaki şekilde yer alan tünel tipi dondurarak kurutucu, iki ucunda da vakum kilitlerinin olduğu tünelden meydana gelmektedir. Donmuş ürünlerin içinde bulunduğu alüminyum tepsilerin tünele yüklenmesi için vakum kilitlerinden birisi kullanılır. Dondurarak kurumuş olan ürünün paketlenmesi yapılmadan önce otomatik alındığı havalandırılmalı odadan boşaltılmasında diğer vakum kullanılmaktadır. Tünelin çoğu bölgesinde bulunan sıcaklık–basınç sensörleri ile kurutma koşulları dikkatlice kontrol edilir. Tünelin ana bölümünde iki yerde Yük arabalarının geçmesine müsaade eden tünelin duvarlarına konulan buhar konstrksiyon vardır ve ana bölümdeki kilitleri kapı valfleri kapatmaktadır. Tünel işlem bölgesi olarak birbirinden bağımsız beş bölgeye bölünmüştür.

Yük arabası periyod süresi boyunca hareketsiz kalır ve tepsi kaldırma arabası alt kısmında olan ısıtıcıların üst kısmında bütün tepsilerin kalmasını sağlamaktadır. Buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemi yerine soğutma sistemini geniş sulu amonyak absorpsiyon soğutma sistemi oluşturmaktadır. Kurutulacak ürünün hacmine bağlı olarak tünel tipi dondurarak kurutucunun kapasitesi atırılabilir [46].

4.11. DONDURARAK KURUTMANIN UYGULAMA ALANLARI

Dondurarak kurutma yöntemine göre kurutulan bazı deniz ürünleri, meyve, kahve, çorba ve daha pek çok gıda ürünü diğer kurutma yöntemlerine kıyasla daha uygundur. Bu yöntem ilaç sanayinde de sıkça kullanılmaktadır. Solüsyon durumunda olan bazı ilaçlar zamanla bozularak yapısını kaybetmektedir. İlaçlardan bozulmaya meyilli olanların yapısı dondurarak kurutma işlemi ile kararlı hale gelir ve böylece ilaçların biyoaktiviteleri korunmuş olur.

Seramik, süper iletkenler ve tarihsel dokümanlar gibi cansız olan maddeler dondurarak kurutma yöntemiyle kurutulabilmektedir. Başka bir örnek de nükleer atıkların dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulmasıdır. Nükleer atıklara uygun kimyasalların eklenmesi ile cam tuğlaların içine aktararak ucuz saklama sağlanmış olur [47].

Bu yöntem ile biyolojik ürünlerin uzun süre depolanabilmektedir. Dondurarak kurutma ile kurtularak uzun süre depolanacak biyolojik ürünler arasında kan plazması, nakledilecek organ veya doku, hormon çözeltileri ve yapay deri yer almaktadır. Dondurarak kurutma yöntemi maya, bakteri ve virüs gibi canlı hücre kurtulmasında da kullanılır [47].

Histolojik çalışmalarda doku örneklerinin mikroskopik görüntülemeye hazır duruma getirilmesi, kimyasal ve biyokimyasal çözümler ve örnek oluşturmasında dondurarak kurutma yöntemi kullanılmaktadır.

4.12. DONDURARAK KURUTMANIN AVANTAJLARI

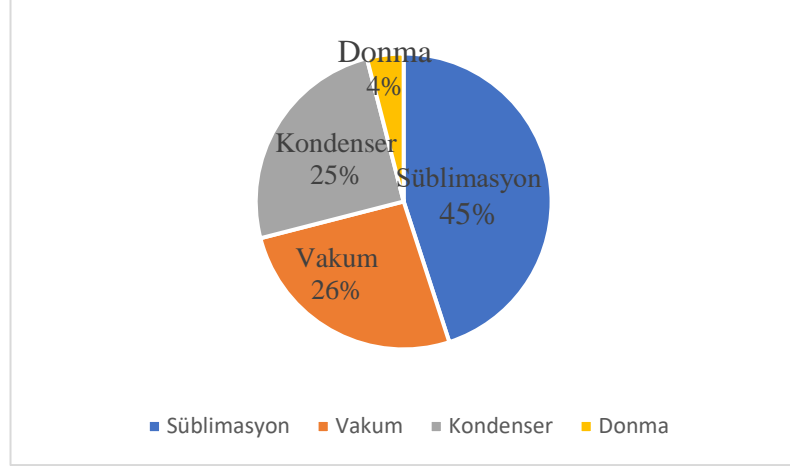
Dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulan ürünlerin kalitesine diğer kurutma yöntemleri kullanarak ulaşılması zordur. Buna bağlı olarak dondurarak kurutma yöntemi ile ısıya duyarlı ve kıymetli pek çok biyolojik malzeme ticari olarak kullanılır. Dondurarak kurutulmuş olan gıda ürünlerinin aroma ve besin değerleri yüksek seviyede korunmaktadır. Dondurarak kurutulmuş olan ürüne su eklenmesi ile kurumadan önceki haline gelir. Mikroorganizmaların ve bakterilerin oluşumu sıcaklığın azalması ile düşürülür ve ürünlerin bozulmasının önüne geçilir.

Dondurarak kurutma yönteminde sıcaklık çok düşük olması ve su kaybının bölgesel olarak hızlı olması avantaj yaratmaktadır. Diğer kurutma yöntemlerine göre bu durum enzimatik reaksiyonları ve proteinlerin bozulmasını en az seviyededir [40,47,48].

4.13. DONDURARAK KURUTMA İŞLEM MALİYETİ

Bu yöntem çoğunlukla pahalı bir yöntem olarak bilinir. Tesisin kapasitesi, hammadde malzemesi, ürün ve paketleme türü, işlem süresine göre işlem maliyeti değişiklik gösterir. Donma, vakum, süblimasyon ve kondenser, yoğunlaştırma dondurarak kurutma yöntemini oluşturan dört temel işlemdir. Bu işlemlerin her birinin toplam enerji tüketiminde olan payları Şekil 4.16' da görülmektedir. Toplam enerji tüketiminin neredeyse yarısı süblimasyon tarafından oluşmakta ancak donla işlemi esnasında fazla enerji tüketimi olmamaktadır. Vakum ve kondenser de aynı enerji tüketimindedir. Dondurarak kurutmada enerjinin düşürülmesi için yapılacak olan çalışmalarda göz önüne alınması gerekenler:

- Süblimasyona yardımcı olmak için ısı transferinin artırılması,
- Vakumun azaltılması için işlem süresinin azaltılması,
- Kondenser kullanımından kaçınmak [46].



Şekil 4.16. Dondurarak kurutma işlemi enerji maliyeti.

4.14. ÜRÜNÜN PAKETLENMESİ VE DEPOLANMASI

Dondurarak kurutma yöntemi ile kurutulmuş olan ürün son aşama olarak kontrollü koşullar altında (genellikle hava sızdırmayan, su buharından ve oksijenden muaf olan, ışık geçirmeyen paketlerde) saklanmaktadır. Ürün uzun bir zaman oda sıcaklığında depolanmaktadır. Ancak yüksek hassasiyet içeren bazı ürünlerin bu şekilde önlem alınmadan saklanması mümkün değildir.

Bozulma riski bazı uygulamalarda ürün içinde istenmeyen kimyasal ve fiziksel reaksiyonların olması eğilimi ile su buharı etkileşiminden kaynaklanır. Bu sebeple paketler su buharı geçirmeyen malzemenin ve yalıtımlı olarak yapılmalıdır.

Sudan daha aktif olan oksidasyon prosesi aynı zamanda son nem içeriğini etkileyen prosesdir. Oksijen kuru bölgeye kolaylıkla nüfuz ederek peroksi radikallerinin oluşmasına neden olur ve böylelikle ürünün raf ömrünü etkiler. Bu radikaller aktivite kaybına yol açar, garip ve ekşimiş tat oluşumu ile yavaş bozunma prosesini başlatılmasına sebep olurlar. Bazı ürünler çok dirençlidir, bütün ürünler aynı hassasiyeti göstermezler. Normal kuru hava altında sınırlı zaman aralığında paketlenme yapılır.

Gün ışığı altında hızlıca beyazlaşan pigmentli ürünlerin ışıktan uzak tutulması gerekmektedir. Klorofiller, karotenoidler ve diğer pigmentler renksiz türevlerine

dönüşerek ürünün kalitesinde ciddi bir düşme meydana gelir. İlaçlarda ve özellikle de canlı aşılarla ışık karmaşık davranışlara neden olmaktadır. Işık kısmi olarak bozulmalar neden olur bu yüzden bu ürünler için daha fazla dikkat gerekmektedir [46].

4.15. KURUTMA NEM ORANI VE KURUTMA SABİTLERİNİN BELİRLENMESİ

Bütün ürün ve koşullar için teorik modeller kullanabilmektedir. Ancak bu tip modellerin kullanılabilirliğini teorik modellerin çözülmesi için gereken eşitliklerin pek çok değişken ve karmaşık yapıda olması düşürmektedir. Yarı teorik modellerin karmaşıklığı daha azdır ancak barındırmış oldukları değişkenler sadece incelemiş oldukları ürünler ile alakalı olduğundan dolayı uygulanması sınırlı olmaktadır.

Kuruma hızının deney yapılarak ile elde edilen verilerin kullanılmasıyla tespit edilmesinde karmaşık matematiksel eşitlikler yoktur. Deney yapılan ürün ve deney koşulları için bulunan eşitlikler geçerlidir. Yarı teorik modeller içerisinde “logaritmik kurutma” denklemi en geniş kullanım alanı olan eşitliktir [46].

Nem oranının (MR) zaman (t) içindeki değişimi aşağıda yer alan eşitlik ile belirlenmektedir.

$$MR = \frac{M_t - M_d}{M_o - M_d} \quad (4.4)$$

Eşitlikte başlangıç nemini (M_o), t anındaki nemi (M_t), denge nemini ise (M_d) gösterir. Nem oranını (MR) ifade etmek amacıyla kullanılan modellerden bir kısmı Çizelge 4.3’de gösterilmektedir [45].

Çizelge 4. 3. Kuruma eğrilerini açıklamak için kullanılan modeller [45].

Model İsmi	Model
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Geliştirilmiş Page 1	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Geliştirilmiş Page 2	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$
Logaritmik	$MR = a \cdot \exp(-kt) + e$
İki Terimli	$MR = a \cdot \exp(-k_0t) + b \cdot \exp(-k_1t)$
İki Terimli-eksponansiyel	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(k a t)$
Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Difüzyon Yaklaşım	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \cdot \exp(-k b t)$

Deneyssel hesaplanan ve modellerle tahmin yürütülen nem oranı değerleri arasındaki uyumun istatistiksel olarak açıklanması hedefi ile tahminin standart hatası (RMSE), khi-kare (X^2) değerleriyle modelleme yeterliliği (R^2) aşağıda yer alan eşitlikler ile bulunabilmektedir.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{tahmini} - MR_{deneyssel})^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{tahmini} - MR_{deneyssel})^2}{N - z} \quad (4.6)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum (MR_{deneyssel,ort} - MR_{tahmini,ort})^2}{\sum (MR_{tahmini,ort})^2} \right] \quad (4.7)$$

Burada:

$MR_{deneyssel}$: Deneyssel veriler ile tespit edilen nem oranıdır,

$MR_{deneyssel,ort}$: Deneyssel nem oranı değerlerinin ortalamasıdır,

$MR_{tahmini}$: Tahmini nem oranıdır,

$MR_{tahmini,ort}$: Tahmini nem oranı değerlerinin ortalamasıdır,

N : Deneyssel veri sayısıdır,

z : Kullanılan modeldeki katsayı sayısıdır.

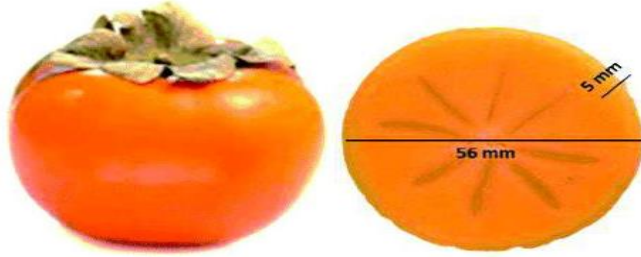
Model ile belirlenen tahmini ve deneysel değerler arasında olan fark tahmini standart hata (RMSE) olarak ifade edilmektedir. Bunun yanında khi-kare (X^2) değerinin dūşmesine bağlı olarak uyumun yükseldiği görülür. Ayrıca modelin uygulanabilirliğinin bir ifadesi de deneysel verileri ifade eden modelin modelleme yeterliliği (R^2) değerinin bire yakın olmasıdır. En uygun modelde bulunan katsayılar istatistiksel olarak yapılan değerlendirme sonuçlarına göre çoklu regresyon metodu ile tespit edilmektedir [45].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. DENEY MATERYALİ VE METODU

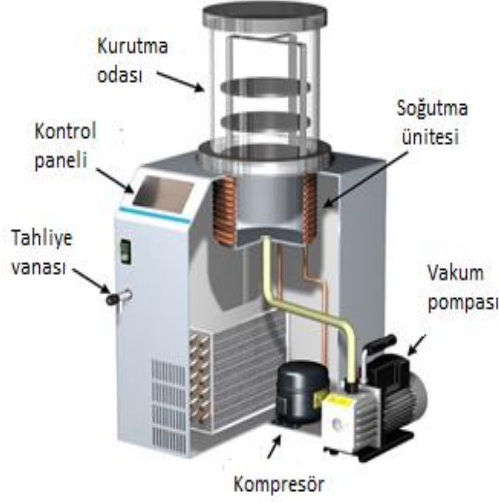
Deneysel çalışmamızda kullanılmakta olan cennet hurmasının numunesi şekil 5.1'de gösterilmektedir. Cennet hurması meyvemizin ağırlığı 100 gr, kalınlığı 5 mm kesilerek deney kabına yerleştirilmekte olup ve bu numuneden 7 adet hazırlanmaktadır. Bu hazırlıkları tamamladıktan sonra derin dondurucu konulup ertesı gün deneye bekleteceğiz.



Şekil 5.1. Cennet hurmasının meyvesi.

Deneysel çalışmamızda kullanılmakta olan dondurarak kurutma cihazı, Labogene markasının ScanVac Coolsafe tip cihazıdır. Dondurarak kurutmayı yapılandırmak için özel ihtiyaçlarınıza göre bir dizi seçenekleri mevcuttur. Uzun ömür bir makine kapasitesine sahip olabilmesi için cihazın kondansatörünü teflon ile kaplanıp agresif asitlerle çalışırken korozyon problemlerinden korumak için kolay temizlik imkanı sahip olmaktadır. Bu cihaz çok düşük evaporatör sıcaklıklara (-55 °C'e kadar) ihtiyaç duyan ürünlerin dondurma işlemleri için uygundur. 4×10^{-4} mbar vakum gücüne sahip vakum pompasına bağlı olan cihaz ile çalışmamızda ihtiyaç duyulan basınç, 0.01 kPa basınca kadar düşürerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyimizin şartlarına göre cihazın vakum gücüne sahip vakum pompasının 4×10^{-4} mbar ihtiyaç duyulan basıncın

0.01 kPa kadar düşürdük. Deney için kullanılan dondurarak kurutma cihazının şematik görünümü Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



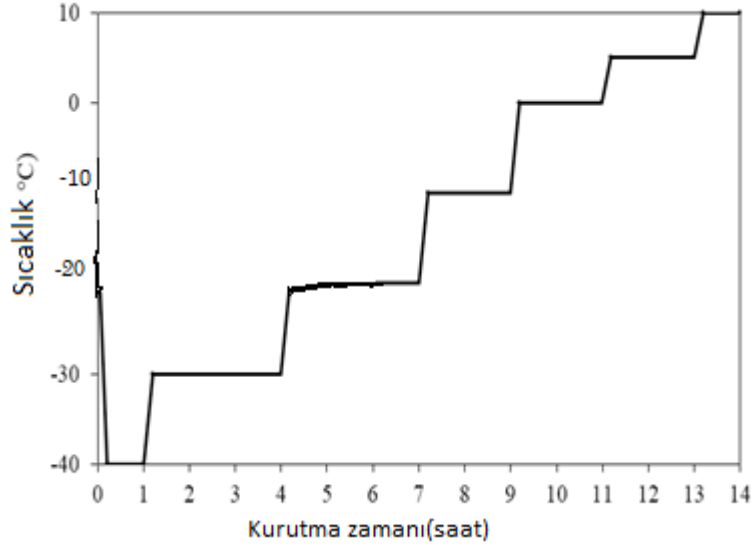
Şekil 5.2. ScanVac coolsafe dondurarak kurutma cihazı şematik görünümü.

ScanVac Coolsafe cihazının dondurarak kurutma çalışma prensibi, dondurulmuş ürünün düşük basınçta olan dondurulmuş ve kurutmak istenilen ürünün sıcaklığını artırarak süblimleşme işlemini (katı maddelerin ısıtılınca, ara bir hal olan sıvı hâle geçmeden doğrudan gaz hâle geçmesi) sonuçlandırmasına dayanmaktadır. Çalışmamızda istenilen fiziksel özellikleri (Sıcaklık, basınç) elde etmek için vakum pompası görevi kurutma odasının basıncı istenilen basınca getirirken, cihazın kompresörü ise kabin içi kurutma süreçlerine münasip sıcaklığı ayarlamaktadır. Sıcaklık ve basınç çalışmamızın şartlarına uygun değerlerde tutmak için cihazın kurutma odasına numune yerleştirildikten sonra sıcaklık ve basınç kontrol panelinden ayarları yaparak cihazı çalıştırılıp deneyimizi gerçekleştirilmiştir.

5.2. NUMUNE HAZIRLAMA VE DENEY PROSEDURU

Deney çalışmamızı başlamadan önce istenilen sıcaklık, basınç ve çalışma süreleri (hurma numuneleri dondurarak kurutma süresi 14 saat) kontrol panelinden gerekli ayarlar yapılmıştır. Zaman ve sıcaklık diyagramı Şekil 5.3’de gösterdiği gibi hazırlanmıştır. Planlanan çalışma sistemine göre -15 °C’de derin dondurucudan çıkartılan cennet hurmanın dilimleri cihaza yerleştirilerek ilk 60 dk. -40 °C de ve 0.01

kPa basınçta deney çalışmamızı başlatılır ve daha sonra basınç sabit tutularak sırasıyla -30 °C de 180 dk., -20 °C de 180 dk., -10°C de 120 dk., 0 °C de 120 dk., 5 °C de 120 dk. ve son olarak 10 °C de 60 dk. İşlem gerçekleştirilir ve bu aşmaları tamamladığımda toplam 14 saatin sonun da dondurarak kurutma işlemi sonlanmış olur.



Şekil 5.3. Sıcaklık ve zaman diyagramı.

Deney süresinde numunenin ağırlık kaybı tespit etmek için çalışmada 7 farklı, iki saatte bir numune değiştirilmiştir.

Ağırlık kaybı tespiti yapmak için ilk numuneyi cihaza alıp çalıştırdıktan sonra bu numuneyi iki saat sonunda ve bu sürede ağırlık kaybı teyit etmek için çok hassas teraziyi kullanarak (0,001 gr. hassasiyet sahip olan terazi) hurma numunenin ağırlık kaybını tespit edilir. İlk numunenin ağırlık kaybı tespit ettikten sonra ikinci numuneyi aynı kurutma ayarlarına işleme alınarak cihaz çalıştırılır ve bu sefer iki saat yerine dört saat süre surati ile işlem sürdürülmekte olup dört saat sonunda ağırlık kaybı ölçülmüştür. Bir önceki işlem diğer hurma numuneleri için de gerçekleştirerek 6., 8., 10., 12. ve en son 14. saat sonunda numune cihaza alınıp kaybı tespit edilir. Daha sonra etüve yerleştirilerek yaklaşık 60 dakika bekletilir.

Bazı gıda ürünleri cennet hurması olduğu gibi belli bir nem miktarda içermektedir. Deney çalışmamızda kullanılmakta olan cennet hurmanın numunesindeki kurutma

sonunda nemin miktarı ölçmek için numuneyi desikatöre işletilir. Numune ettüvden alınıp içerisinde bol miktarda silikajel bulunan bombeli camdan tasarlanmış olan desikatöre konularak yaklaşık 15 dk. bekletilir ve ondan sonra teraziye tartılarak nemin oranı dikkatli biçimde hesaplanmış olur.

5.3. YARI TEORİK MODELİ KULLANIMI

Teorik modeller her türlü madde ve koşul için uygulanmak mümkündür zira bir modelin çözümü arandığında eşitlerin içerdiği birçok parametre ve ona bağlı karmaşık yapıya sahip oldukları için kullanışlılığını zorlaştırılır. Yarı teorik modellerin daha az karmaşık yapıya sahip olmasına rağmen, eşitliklerinin içerdikleri parametrelerin sadece ele alınan ürünlerle ilgilenmesi için kullanışlılığı da kısıtlıdır. Deneysel çalışmalarla bir ürünün kuruma hızını belirlemede elde edilen verilere dayanarak karmaşık matematiksel eşitlikler mevcut değildir. Ancak deneysel çalışmalarda elde edilen eşitlikler işlem yapılan numune ve deney koşulları için de geçerli. Yarı teorik modeller içinde en yaygın kullanım alanı bulunan eşitlik “logaritmik kurutma” denklemini olarak bilinmektedir [49].

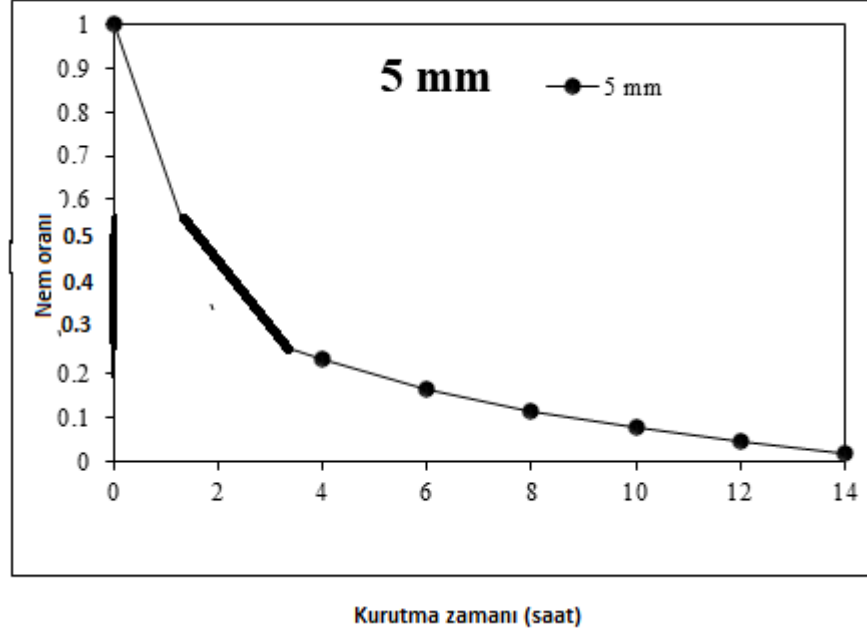
$$MR = \frac{M_t - M_d}{M_0 - M_d} \quad (5.1)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5.2)$$

Eşitlikte (5,1) de (M_0) başlangıç nemini, (M_t) t anındaki nemi, (M_d) ise denge nemini ifade eder. Eşitliğin sol tarafında yer alan kısım ise, kurutmanın farklı t(time) anlarındaki nem oranı (MR) değerlerini vermektedir. Eşitlik (5,2) de verilen (DR) kurutma hızı (Mt), t zamanındaki nem miktarıdır, M_{t+dt} ise t+dt zamandaki nem miktarını göstermektedir [50].

5.4. DENEYSEL SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Şekil 5.4’de 5 mm kalınlıkta dilimlenmiş cennet hurmanın numunelerinin 14 saatlik dondurarak kurutma deney çalışmamızın sonucunda elde edilen deneysel nem oranı grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Cennet hurma numunelerinin zamana (time) göre nem(moisture) oranları.

Deneysel yollarla ürünün nem oranı hesaplanır ve zamana bağlı olarak bu ürünün ağırlık kaybı belirledikten sonra matematiksel modellere bağlı grafiği oluşturulmaktadır. Dondurarak kurutma çalışmamıza uygulamada olan 8 farklı kurutma kinetik modelinden en uygun modeli seçip belirlenmesi sağlanmıştır. Matematiksel modeli seçme işleminde MATALAB programı kullanılmıştır.

Çizelge 5.1’de Deneyde tahmin olarak ürünün nem oranı (MR) MATALAB programı kullanarak 8 farklı kurutma kinetik modeli göstermektedir [51].

Çizelge 5.1. Kurutma kinetiği için ampirik ve yarı deneysel denklemler.

Model No	Model Adı	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Geliştirilmiş Page I	$MR = \exp[-(kt)^n]$
4	Henderson ve Pabis	$MR = a.\exp(-kt)$
5	Logaritmik	$MR = a.\exp(-kt) + c$
6	İki terimli- eksponansiyel	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-k a t)$
7	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Difüzyon Yaklaşım	$MR = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-k b t)$

Uygulamalı olarak (deneyde) bulunan değerler ve teoride (modeller) değerleri arasında uyum istatikseli belirlemek için standart hatası (RMSE), khi-kare (X^2) değerleri modelin modelleme yeterliliği (R^2) Eşitlik (4,5) Eşitlik (4,6) ve Eşitlik (4,7)'de denklemleri kullanılarak bulabiliriz [52,53].

Deney çalışmamızda bulunmuş olduğu veriler ve tahmini olarak kullanılan modelin elde edilen verileri arasındaki farkı belirlemek için standart hatası (RMSE) “Root Mean Square Error”, Eşitlik 5.3’de gösterir. Eşitlik 5.4’de olan khi-kare (X^2) değeri ve istatikselle uyum arasında ters orantı mevcuttur ve (X^2) değerindeki azalma uyumun arttığı ifade eder. Modelleme yeterliliği (R^2) bulma denklemi Eşitlik 5.5 te olduğu gibi hesaplanır ve elde edilen sonuç (1) bire ne kadar yakın ise o kadar modelin uygunluğu ve doğruya en yakın kullanılabilirliğini anlamına gelir. Bu hesaplamaları sonucunda istatikselle olarak en uygun modelde bulunan katsayılar çoklu regresyon metodu kullanarak tespit edilmektedir.

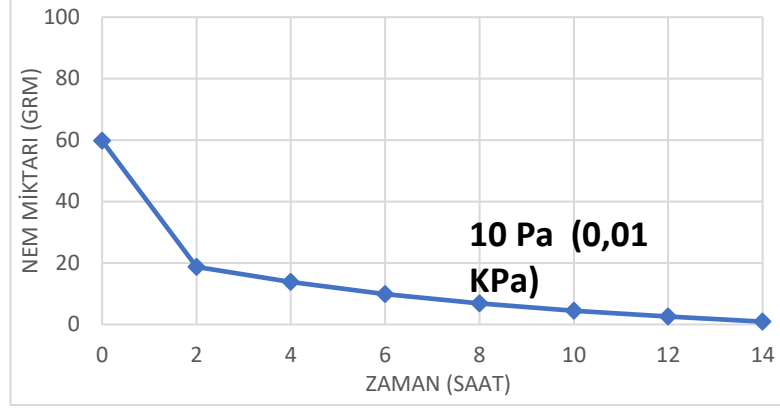
Kurutma kinetiği 8 farklı modellerinden en uygun modeli belirlemek için elde edilen verileri (R^2 , X^2 ve RMSE) bu 8 modeli üzerinde uygulanıp belirlenmektedir.

Çizelge 5.2. Kurutma kinetiği için kullanılan modellerden elde edilen sonuçlar.

Model Adı	Modelin Parametreleri	R ²	X ²	RMSE
Newton	k= 0,4134	0,9521	4,929 x 10 ⁻³	0,065678
Page	k= 0,7569 n= 0,5262	0,9558	5,062 x 10 ⁻⁴	0,019483
Geliştirilmiş Page I	k= 0,5799 n= 0,5317	0,9947	5,078 x 10 ⁻⁴	0,019516
Henderson ve Pabis	a= 0,9635 k= 0,3967	0,9539	5,537 x 10 ⁻³	0,064443
Logaritmik	a= 0,9138 c= 0,07533 k= 0,5599	0,9776	3,223 x 10 ⁻³	0,044883
İki Terimli-Ekspansiyel	a= 0,2782 k= 1,121	0,9731	3,235 x 10 ⁻³	0,049261
Wang ve Singh	a= -0,2058 b= 0,01024	0,7932	2,483 x 10 ⁻²	0,136482
Difüzyon Yaklaşım	a= -1,545 b= 0,9977 k= 0,417	0,9521	6,902 x 10 ⁻³	0,06568

R², X²ve RMSE değerleri 8 model için değerleri Çizelge 5.2’de görülmektedir. Tablodaki verileri incelediğinde hurma numunelerine ait R² değeri bire en yakın değer 0,9558 ve sırası ile sıfır değerine en çok yakın olan X² değeri 5,062 x 10⁻⁴ bulunmaktadır. Onun beraberinde tahmini standart hata (RMSE) değeri 0,019483 en düşük değerdir. Bu verileri ışığında Page modeli bizim deney çalışmamız için kurutma kinetiği için kullanılan matematiksel modellerinden en uygun model olduğunu göstermektedir.

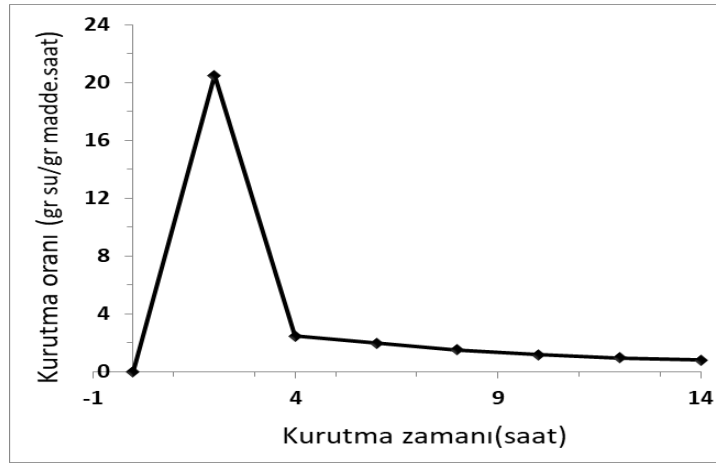
Şekil 5.5.de cennet hurma dilimlerinin kurutma süresine göre nem içeriği grafiği verilmektedir.



Şekil 5.5. Cennet hurma numunelerinin kurutma süresine göre nem miktarı.

Cennet hurmanın nem içeriği numunede mevcut suyun kuru maddeye oranı olarak gösterilmektedir. Şekilde olduğu gibi; grafik ilk iki saatte hızlı bir düşüş seyrede ve ondan sonra yavaş meylile devam eder onu da deneyde nemin büyük bir kısmı ilk iki saatte azaldığını gösterir.

Şekil 5.6'da ise cennet hurma dilimlerinin dondurarak kurutulması esnasında zamana bağlı olarak kurutma hızını göstermektedir. Kurutma işleminin ilk iki saatinde ürünün yüzey kısmında yüksek nem miktarında ihtiva ettiği için kurutma hızı oldukça yüksektir. Bir sonraki aşamayı seyrettiğimizde cennet hurma numunelerinin yüzey kısmındaki nemin içeriği (MC) hızla kurur ve kurutma cihazın sıcaklığı çok düşük nedeni ile kurutma hızı iki saatlik bir sürede çok düşmektedir.



Şekil 5.6. Cennet hurma numunelerinin dondurarak kurutulmasında kurutma hızının değişimi.

Şekil 5.6’da gösterdiği gibi ilk 2 saatlik süreden sonra, dondurarak kurutma cihazının plaka sıcaklığındaki sıcaklık arttırmanın bir neticesi olarak kurutma hızı kurutma işleminin sonuna kadar kademeli olarak düşmektedir. Şekil 5.5’i de nemin içeriği azaldığında kurutma hızını azaldığını belli biçimde gösterir.

Süblimasyon sonucunda yüzeyde oluşan su buharı, dondurularak kurutulan numunenin kurutulmuş bölgesine kılcal kanal yardımıyla numune yüzeyine aktarılmasıyla oluşur. Numunenin yüzeyine ulaşan su buharı, dondurarak kurutucunun kondenseri vasıtasıyla uzaklaştırılır, çünkü kondenserin yüzeyindeki kısmi su buharı basıncı, dondurularak kurutulan numunenin yüzeyindeki kısmi su buharı basıncından önemli ölçüde daha düşüktür.

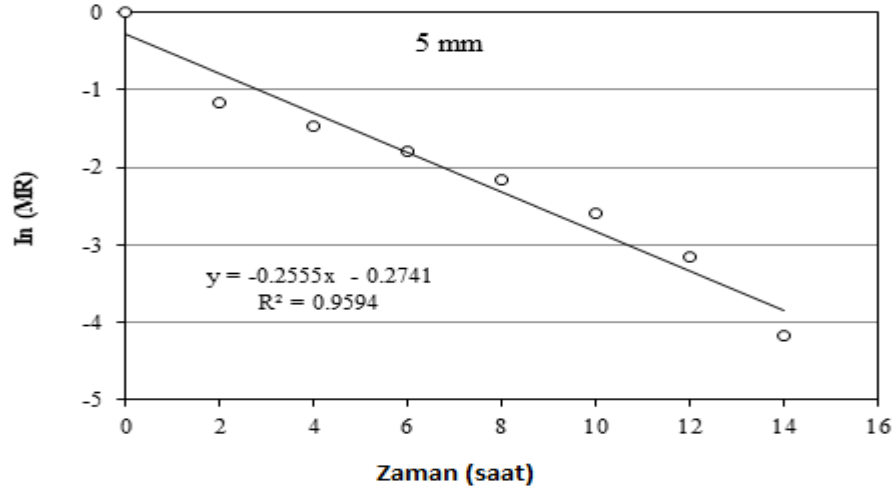
Dondurarak kurutma işlemi esnasında süblimasyon neticesinde ürün numunesinin yüzeyine su buharı oluşur ve cennet hurmanın numunesinin dondurarak kurutma operasyonu sırasında numunenin kurutulmuş bölgesine kılcal kanal aracılığı ile numune yüzeyine aktarılır. Bu su buharın kurutma işlemine etkini ortadan dondurarak kurutma kondenseri kaldırır. Çünkü hidrostatik basınç dengesine dayanarak dondurarak kurutma cihazın kondenseri yüzeyindeki kısmi su buhar basıncı (partial water vapor pressure), kurutulması istenilen ürünün numunesinin kısmi su buhar basıncı belli bir oranda daha düşüktür.

Teorik Model çok geniş ve büyük araştırma potansiyeline sahip olup gıdaların kurutulması istenilen tabak ince olmasından; atomların dinamik veya statik halini tanımlayan Fick’in ikinci kanunu uygulanarak çözümü bulunmaktadır [54].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (5,3)$$

Difüzyon katsayısı sabit alınarak Kartezyen koordinatlar için çözümlenmiş uygun sınır koşulları ile basitleştirme yapıldığında Eşitlik 5,4’de bulunmaktadır.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5,4)$$



Şekil 5.7. Cennet hurması için ln (mr) ve kurutma zamanı grafiği.

Eşitlik (5,4) ve Şekil 5.7 (Cennet Hurması için ln (MR) ve Kurutma Zamanı Grafiği)' den K'yi buluruz;

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (5,5)$$

$$D_{eff} = \frac{0,2555 \times 4 \times \left(\frac{2,5}{1000}\right)^2}{(3,14)^2}$$

$$D_{eff} = 6,47189 \times 10^{-7} \left(\frac{m^2}{h}\right)$$

$$D_{eff} = 1,79775 \times 10^{-10} \left(\frac{m^2}{h}\right)$$

Cennet hurma numunelerinin Efektif difüzyon değeri bulmak için Eşitlik (5,5) Kullanarak hesaplanmaktadır. Çalışmamızda kullanılmakta olan 5 mm numunenin efektif difüzyon değeri;

$D_{eff} = 1.7975 \times 10^{-10}$ m²/s olarak bulunmuştur. Literatürde, gıda ürünleri için Efektif Difüzyon katsayısı (10⁻¹² , 10⁻⁸) m²/s değerler arasında belirlenmektedir[55].

BÖLÜM 6

SONUÇ

Cennet hurması meyvesinin insan sağlığına birçok faydası bulunmaktadır. Bu açıdan cennet hurması meyvesinin Türkiye’de olan üretiminin her geçen yıl artması ile meyvenin sadece hasat zamanında tüketilmesi mümkün değildir. Kurutma yöntemleri arasında en hızlı ve ürünün besin değerlerine zarar vermeden olabildiğince taze halinde muhafaza eden dondurarak kurutma yöntemi ile kurutularak muhafaza edilmesi ile mevsimi dışında da meyvenin besin değerlerinin kaybedebilmeden tüketilmesi mümkündür. Bu sayede insan vücudunda birçok alanda fayda gösteren cennet hurması meyvesinden her an yararlanılabilmektedir. Bu uygulamalı çalışmanın elde edilen sonuçlar tahmini standart hatalar olan (RMSE), ki-kare (X^2), regresyon katsayıları (R^2) bulunmuştur, hata analizleri yapılmış ve R^2 , X^2 , RMSE değerleri sırasıyla, 0,019483, $5,062 \times 10^{-4}$ ve 0,9558 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre en uygun modelin Page modeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yaban mersini için efektif difüzyon katsayılarının $1,79775 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR

1. Onur S, "Trabzon hurması", *Derim Narenciye Araştırma Enstitüsü Yayını*, 7 (1), 4- 46 (1990)
2. Sponberg SA, Ebenecaea Hardy In Temperate North America (Q.W. Ruscoe, SIPC, DISR). "Persimmon culture in new zeland". DSIR Information Series No. 159, *Science Information Publishing Centre*, Wellington 1984, 1-1.(1977).
3. Yonemori K, Sugiura A, Yamada M, "Persimmon genetics and breeding, plant breeding reviews", 19(6): 191-225 (2000).
4. Kaplankıran M, "Subtropik meyveler" 2 (Ders Notları), *Mustafa Kemal 5. Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü*, Hatay (2010).
5. Onur S, "Trabzon hurması çeşitlerinin adaptasyonu", *Derim*, 12(1): 8-18 (1995).
6. Tuzcu Ö, Yıldırım B, "Trabzon hurması (diospyros kaki l.) ve yetiştiriciliği", *Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu, Türkiye Tarımsal Araştırma Projesi Yayınları*, Adana, 24 (2000).
7. Karakasova L, Babanouska- Milenkouska F, Lazou M, Karakasov B, Stojanova M, "Quality properties of solar dried persimmon (diospyros kaki)", *J Hygienic Eng Des*. 4: 54-59(2013).
8. Türk R, "Uludağ üniversitesi ziraat fakültesi bahçe bitkileri ders notları" (1995).
9. Hirai S, Yamazaki K, "Studies on sugar compenents of sweet and astringet persimmon by gas chromatography", *Nippon. Shokuhin Kogyo Gakaishi*, 31,24-30 (1984).
10. Yönel S, Uylaser V, Yonak S, "Trabzon hurmasının bileşimi ve besleyici değeri türkiye", *Gıda Kongresi*, Erzurum, Türkiye, 339-342 (2008).
11. Özcan M., "Trabzon hurması yetiştiriciliği". Hasad Yayınları. 42-6 (2005):
12. Uçar, H., "Farklı dönemlerde hasat edilen Trabzon hurması (Diospyros kaki) meyvelerinin kalite özelliklerinin araştırılması", *Ege Üniversitesi* (2010).
13. Nurdan, E. "Çanakkale koşullarında Diospyros lotus anacı üzerine aşılınmış değişik Trabzon hurması (Diospyros kaki) çeşitlerinin fenolojik özellikleri, klorofil düzeyleri ile çöğür peroksidaz enzim aktivitelerinin ölçülmesi", (2006).
14. Şeker, M., ve Toplu, C., "Trabzon hurması yetiştiriciliği". *Türk Tarım*.149: 35-37 (2003).

15. <https://www.ordutb.org.tr/wp-content/uploads/2021/01/Trabzon-Hurmasi-Guncel.pdf>
16. Güneri, M., “Hatay’da yetişen Trabzon Hurması’nın (Diospyros kaki L.) RAPD (Rastgele çoğaltılmış polimorfik DNA) Analizi”, *Ankara Üniversitesi*, (2005).
17. Kuzucu, F., Kaynaş, K., “Farklı zamanlarda hasat edilen Trabzon hurması (Diospyros kaki L.) meyvelerinin fizyolojik ve kimyasal yapılarında meydana gelen değişimler”;33:17-25 (2004).
18. Ito, S., “The persimmon”. *The Biochemistry of Fruits and Products.*; 281-301(1971).
19. Zorlugenç, F., “Ozmotik dehidrasyon uygulamasının Trabzon hurması meyvelerinin kuruma davranışı ve ürün kalitesi üzerine etkileri”. *Çukurova Üniversitesi*. (2010).
20. Taira, S., Astringency in persimmon. In: Linskens, H.F., Jackson, J.F. (Eds.), “Modern Methods of Plant Analysis. Fruit Analysis”, vol. 18. *Springer-Verlag*, Berlin, pp. 97-110 (1996).
21. Matsuo, Eisuke. “What is horticultural wellbeing ‘in relation to horticultural therapy’?” *Towards a new millennium in people-plant relationships* (1999).
22. Asgar, Md. Ali, Ryo Yamauchi, and Koji Kato. “Modification of pectin in Japanese persimmon fruit during the sun-drying process.” *Food chemistry* 81.4: 555-560(2003).
23. Park, Y.S., Jung, S.T., Kang, S.G., Delgado, L.E., Ayala, A.L.M., Tapia, M.S., Martin-Belloso, O., Trakhtenberg, S., Gorinstein, S., “Drying of Persimmon (Diospyros kaki L.) and the Following Changes in the Studied Bioactive Compounds and the Total Radical Scavenging Activities”. *LWT-Food Science and Technology.*; 39: 748-755 (2006).
24. Jung, T.C., Park, Y.S., Zacwieja, Z., Folta, M., Barton, H., Piotrowics, J., Katrich, E., Trakhtenberg, S., Gorinstein, S., “Some Essential Phytochemicals and the Antioxidant Potential in Fresh and Dried Persimmon”. *International Journal of Food Sciences and Nutrition.*; 56: 105-113(2005).
25. Pesis, E., Levi, A., Ben-Arie R., “Role of Acetaldehyde Production in the Removal of Astringency from Persimmon Fruits Under Various Modified Atmospheres”. *Journal of Food Science.*; 53: 153-156(1988).
26. Akyıldız, A., Aksay, S., Benli, H., Kiroğlu, F., Fenercioğlu, H., “Determination of Changes in Some Characteristics of Persimmon During Dehydration at Different Temperatures”. *Journal of Food Engineering.*; 65: 95-99(2004).
27. Ben-Arie, R., Sonogo, L., “Temperature Affects Astringency Removal and Recurrence in Persimmon”. *Journal of Food Science.*; 6: 1397-1400(1993).

28. Woolf, A.B, Ball, S., Spooner, K.J., Lay-yee, M., Fergusen, I.B., Watkins, C.B., Gunson, A., Forbes, S.K., “Reduction of Chilling Injury in the Sweet Persimmon “Fuyu” During Storage by Dry Air Heat Treatments”. *Postharvest Biology and Technology*.11: 155-164(1997).
29. Wright, K.P., Kader, A.A., “Effect of Controlled-Atmosphere Storage on the Quality and Carotenoid Content of Sliced Persimmons and Peaches”. *Postharvest Biology and Technology*.; 10: 89-97(1997).
30. Lee, H., Kim, T.C., Kim, S.J., Park, S.J., “Bruising Injury of Persimmon (Diospyros kaki cv. Huyu) Fruits”. *Scientia Horticulturae*.; 103: 179-185(2005).
31. Bibi, N., Khattak, A.B., Mehmood, Z., “Quality Improvement and Shelf-Life Extension of Persimmon Fruit (Diospyros kaki)”. *Journal of Food Engineering*.; 79: 1359-1363 (2007).
32. Yamada, M., Yamane, H., Sato, A., Hirakawa, N., Wang, R., “Variations in Fruit Ripening Time, Fruit Weight and Soluble Solids Content in Oriental Cultivars Native to Japan”. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*.; 3:485-491(1994).
33. Suzuki, T., Someya, S., Hu, F., “Tanokura, M., Comparative Study of Catechin Compositions in Five Japanese Persimmons (Diospyros kaki L.)”. *Food Chemistry*.; 93: 149-152(2005).
34. Bölek S, Obuz E, “Quality Characteristics Of Trabzon Persimmon Dried At Several Temperatures And Pretreated By Different Methods”, *Turk J Agric For*.38:1-8(2014).
35. Kaya A, M S Kamer, H E Şahin “Trabzon Hurmasının (Diospyros Kaki L.) kuruma davranışının deneysel incelenmesi”. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü* (2014).
36. Doymaz, “Evaluation of some thinlayer drying models of persimmon slices (diospyros kaki l.)” *Energ Convers Manage*, 56: 199-205 (2012).
37. Karaaslan S, *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 9 (1): 8-15, ISSN 1304-9984, Araştırma Makalesi (2014).
38. Ramin, A., Tabatabaei, F., “Effect of various maturity stages at harvest on storability of persimmon fruits (Diospyros kaki L.)” *J. Agric. Sci. Technol.*; 5: 113123(2003).
39. Özkul, N., “Uygulamalı Soğutma Tekniği” (5. Baskı). Ankara: *Makine Mühendisleri Odası Yayın*, 115-709(1999).
40. Cemeroğlu, B., Karadeniz, F., Özkan, M., 3 *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi, Gıda Teknolojisi Derneği*, Ankara, 77-570(2003).
41. Chassagne, S., Poirier,C., Devaux, M., Fonseca, F., Lahaye, M., Pıgorını, G., Girault, C., Marin, M., Guillon, F., “Changes in texture, cellular structure and cell

- wall composition in apple tissue as a result of freezing”, *Food Research International*, 42, 788–797 (2009).
42. Güngör, A., Özbalta, N., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi*, İzmir, 737-747(1997).
 43. Günerkan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 36 (13), 1-10 (2005).
 44. Topuz, A., “Akışkan yatakta fındık kurutma prosesinde ısı ve kütle geçişinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 1- 93(2002).
 45. Kırmacı, V., “Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerinin yapılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-117 (2008).
 46. Öz Ö., “Dondurarak kurutma yöntemi ile çözünebilir çay üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Ünversitesi. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 1- 65 (2009).
 47. Sadıkoğlu, H., Özdemir, M., “Dondurarak Kurutma Teknolojisi”, *Termoklima*, 102, 53-61 (2001).
 48. Duran, A., Karakaya, M., Sarıçoban, C., “Liyofilizasyon uygulamasının sığır ve tavuk etlerinin bazı emülsiyon özellikleri üzerine etkisi, *Standart*, 75-80 (2002).
 49. H. Sadıkoğlu, A.I. Liapis ve O.K. Crosser, “*Optimal control of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze drying in trays*,” *Drying Technology*, vol. 16, pp. 399-431, 2007.
 50. B. Acar, H. Sadıkoğlu, İ. Doymaz, “Freeze-Drying Kinetics And Diffusion Modeling Of Saffron (*Crocus Sativus L.*)”, *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 39, pp. 142 – 149, 2015.
 51. H.O. Menges and C. Ertekin, “*Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples*,” *Journal of Food Engineering*, vol. 77 pp. 119-125, 2006.
 52. A.V. Gálvez, M. Miranda, C. Bilbao-Sáinz, E. Uribe, and R. Lemus-mondaca, “*Empirical modeling of drying process for apple (Cv. Granny Smith) slices at different air temperatures*,” *Journal of Food Processing Preservation*, vol. 32, pp. 972–986, 2008.
 53. K. Rayaguru, W. Routray, and S.N. Mohanty, “*Mathematical modelling and quality parameters of air-dried betel leaf (Piper betle L.)*,” *Journal of Food Processing Preservation*, vol. 35, pp. 394–401, 2011.
 54. K. Rayaguru, W. Routray, and S.N. Mohanty, “*Mathematical modelling and quality parameters of air-dried betel leaf (Piper betle L.)*,” *Journal of Food Processing Preservation*, vol. 35, pp. 394–401, 2011.

55. N. P. Zogzas, Z.B. Maroulis, Z.B. and D. Marmos-Kouris, “*Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs*” *Drying Technology*. 14, pp. 2225–2253,1996.

ÖZGEÇMİŞ

Abdullatif Alhammadiy 1992 yılında Suriye Halep' de doğdu; ilk ve orta öğrenimini Om Alkaremil Köyü okulunda tamamladı. Alawda Fen lisesinden 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılı sonbahar döneminde Homs Albaath Üniversitesine Petrokimya Fakültesine Petrol Mühendisliğine başladı ve savaştan dolayı okulu tamamlayamadı. 2015 yılında yatay geçiş yaptığı Batman Üniversitesine üçüncü sınıf olarak Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği bölümüne devam etti. 25.05.2018 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2020 yılı ocak ayında Karabük Üniversitesine Enerji Sistemleri Mühendisliği Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, 2022 yılında tamamladı.