

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ISI POMPASI DESTEKLİ BİR DONDURARAK KURUTMA SİSTEM
TASARIMI VE DENEYSEL ANALİZİ**

Ömer EREN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2016**

Prof. Dr. Hüsamettin BULUT danışmanlığında, Ömer EREN'in hazırladığı **“Isı Pompası Destekli Bir Dondurarak Kurutma Sistem Tasarımı ve Deneysel Analizi”** konulu bu çalışma 01/04/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof. Dr. Hüsamettin BULUT

Üye : Doç. Dr. M. Azmi AKTACİR.....

Üye :Yrd. Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ

Bu Tezin Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Prof. Dr. Şerafettin ÇELİK
Enstitü Müdürü

Bu çalışma HÜBAK tarafından desteklenmiştir.
Proje No: HÜBAK-12099

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

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa No |
|--|----------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | iv |
| SİMGELER DİZİNİ..... | vii |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Kurutmanın Temel Mekanizması | 4 |
| 1.2.Kurutmanın Aşamaları..... | 6 |
| 1.2.1.Ayarlanma süreci | 6 |
| 1.2.2. Sabit hız süreci | 7 |
| 1.2.3.Kuruma hızının ilk düşüş süreci..... | 9 |
| 1.2.4. Kuruma hızının ikinci düşüş süreci..... | 9 |
| 1.3. Süblimleşme | 10 |
| 1.4. Dondurarak Kurutma | 11 |
| 1.4.1. Donma safhası..... | 13 |
| 1.4.2. Birinci kurutma safhası | 14 |
| 1.4.3. İkinci kurutma safhası..... | 15 |
| 1.5. Dondurarak Kurutma Yöntemleri..... | 16 |
| 1.5.1. Manifold yöntemi | 17 |
| 1.5.2.Grup (batch) yöntemi | 17 |
| 1.5.3.Yığın (bulk) yöntemi..... | 18 |
| 1.6. Dondurarak Kurutucular | 19 |
| 1.6.1. Pilot ölçekli dondurarak kurutucular..... | 19 |
| 1.6.2. Endüstriyel dondurarak kurutucular..... | 20 |
| 1.6.2.1. Tepsi ve ilaç tipi dondurarak kurutucular | 20 |
| 1.6.2.2. Vakum sprey dondurarak kurutucu | 21 |
| 1.6.2.3. Tünel tipi dondurarak kurutucular | 22 |
| 1.6.2.4. Sürekli dondurarak kurutucular | 23 |
| 1.7. Dondurarak Kurutma Sistem Ekipmanları | 24 |
| 1.7.1. Soğutma ve ısıtma sistemi..... | 24 |
| 1.7.2. Kurutma kabini | 25 |
| 1.7.3. Vakum pompası | 25 |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR..... | 27 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 31 |
| 3.1.Materyal..... | 31 |
| 3.1.1.Kurutma kabini | 33 |
| 3.1.1.1.Dış kaplama..... | 34 |
| 3.1.1.2.Kapak | 34 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1.3. Kurutma hücresi | 35 |
| 3.1.1.4. Dış hücre..... | 36 |
| 3.1.1.5. Tesisat hücresi | 37 |
| 3.1.1.6. Cihaz hücresi | 38 |
| 3.1.2. Isı pompası | 38 |
| 3.1.2.1. Kompresör | 39 |
| 3.1.2.2. Kondenser / Evaporatör | 40 |
| 3.1.2.3. Genişleme vanası..... | 42 |
| 3.1.2.4. 4 yollu vana | 43 |
| 3.1.3 Vakum pompası | 44 |
| 3.1.5. Ölçme cihazları | 45 |
| 3.1.5.1. Sıcaklık sensörleri | 45 |
| 3.1.5.2. Vakum manometresi..... | 46 |
| 3.1.5.3. Kontrol paneli..... | 46 |
| 3.1.5.4. Elektronik terazi | 47 |
| 3.1.5.5. Data logger | 48 |
| 3.1.5.6. Elektrik sayacı | 48 |
| 3.2. Yöntem | 49 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA | 51 |
| 4.1. Kırmızıbiber Kurutma | 51 |
| 4.2. Elma Kurutma | 55 |
| 4.3. Patlıcan Kurutma | 59 |
| 4.4. Muz Kurutma..... | 62 |
| 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER..... | 66 |
| 5.1. Sonuçlar | 66 |
| 5.2. Öneriler..... | 67 |
| KAYNAKLAR | 69 |
| ÖZGEÇMİŞ | 72 |

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ISI POMPASI DESTEKLİ BİR DONDURARAK KURUTMA SİSTEM TASARIMI VE DENEYSSEL ANALİZİ

Ömer EREN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüsamettin BULUT
Yıl:2016 , Sayfa:vii + 72

Bu çalışmada, dondurarak kurutma yöntemi anlatılmış ve diğer kurutma yöntemleri ile arasındaki farklar belirtilmiştir. Dondurarak kurutmanın evrelerini uygulamak için 40 litre kurutma hücresi hacmine sahip bir ısı pompalı dondurarak kurutma sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir. İlk olarak kurutulacak ürünler olarak çeşitli sebzeler ve meyveler, bir derin dondurucuda -20 °C ile -30°C sıcaklıklar arasında dondurulmuştur. Daha sonra farklı sıcaklık, basınç ve zaman aralıklarında dondurarak kurutma sisteminde kurutma işlemine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneylerde birinci ve ikinci kurutma evreleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, sebzeler ve meyvelerde bulunan yüzey ve bağlı suyun uzaklaştırılması tasarlanan ve imal edilen kurutucuda yapılmıştır. Sonuçta sebze ve meyvelerin ısı pompası destekli dondurarak kurutma sisteminde daha kaliteli ve sağlıklı bir şekilde kurutma işlemi gerçekleştirileceği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Dondurarak kurutma, liyofilizasyon, ısı pompası, meyve kurutma, sebze kurutma.

ABSTRACT

MSc. Thesis

THE DESIGNING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A FREEZE DRYING SYSTEM ASSISTED WITH HEAT PUMP

Ömer EREN

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

**Supervisor: Prof. Dr. Hüsamettin BULUT
Year: 2016 , Page:vii + 72**

In this study, the principles of freeze drying method were explained and the differences between it and other drying methods are also mentioned. A freeze drying system with heat pump which has a drying volume of 40 liters is designed and manufactured in order to apply the all phases of freeze drying. First, the products such as various vegetables and fruits were frozen in a deep freezer between -20 °C and -30 °C. Then, the drying processes were carried out under the different temperatures, pressures and time intervals in the freeze drying system. The first and the second drying phases were performed successfully. So, the surface and inner water in the fruits and vegetables are removed with the designed and manufactured freeze dryer. Finally, it seen that the drying of the fruits and vegetables can be performed better quality and healthy way in the freeze drying system assisted with heat pump.

KEY WORDS: Freeze drying, lyophilization, heat pump, fruit drying, vegetable drying.

TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın gerekleőtirilmesinde benden desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Hősamettin BULUT'a, teőekkÖrÖ bir bor bilirim.

Deneylerin yapılmasında bana yardımcı olan, Harran Üniversitesi Mühendislik FakÖltesi Makine Mühendisliği BÖlÖmÖ Araştırma GÖrevlileri Yunus DEMİRTAŐ, Yusuf IŐİKER ve Nesrin İLGİN'e, ÖĐrenciler Serkan GÖNEŐ ve Muhammet DEĞER'e ve cihazın imalatı esnasında yardımlarını aldığım BÖnyamin AM'a teőekkÖr ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Sergide domates kurutma | 2 |
| Şekil 1.2. Sergide balık kurutma | 2 |
| Şekil 1.3. Kurutma yöntemleri (Doğanay,2009) | 3 |
| Şekil 1.4. Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi (Doğanay,2009) | 7 |
| Şekil 1.5. Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Doğanay,2009) | 7 |
| Şekil 1.6. Suyun basınç-sıcaklık için faz denge diyagramı (www.howstuffworks.com,2015) | 10 |
| Şekil 1.7. Endüstriyel bir dondurarak kurutucu | 13 |
| Şekil 1.8. Suyun katı – gaz fazı doygunluk eğrisi | 15 |
| Şekil 1.9. Dondurarak kurutucu sistem şeması (www.howstuffworks.com, 2015) | 16 |
| Şekil 1.10. Manifolt yöntemli dondurarak kurutucu (www.millrocktech.com, 2011) | 17 |
| Şekil 1.11. Grup (batch) Yöntemli Dondurarak Kurutucu(www.technologyinscience.com, 2011) | 18 |
| Şekil 1.12. Yığın (bulk) yöntemi | 19 |
| Şekil 1.13. Pilot Ölçekli Dondurarak Kurutucular | 20 |
| Şekil 1.14. Tepsi ve ilaç tipi dondurarak kurutucunun yüklenmesi (www.sciencephoto.com) | 21 |
| Şekil 1.15. Vakum sprey dondurarak kurutucu | 22 |
| Şekil 1.16. Tünel tipi dondurarak kurutucu şeması | 23 |
| Şekil 1.17. Ticari bir sürekli dondurarak kurutucu tesisi (www.geaprocess.co.uk, 2011) | 23 |
| Şekil 3.1. Derin dondurucu | 32 |
| Şekil 3.2. Dondurarak kurutucu sisteminin önden ve arkadan şematik çizimi | 32 |
| Şekil 3.3. İmalatı tamamlanmış dondurarak kurutucu sistemi | 33 |
| Şekil 3.4. Kurutma kabini | 34 |
| Şekil 3.5. Kurutma kabini kapağı | 35 |
| Şekil 3.6. Kurutma hücresi | 36 |
| Şekil 3.7. Dış hücre arkadan görünüş | 36 |
| Şekil 3.8. Dış hücre önden görünüş | 37 |
| Şekil 3.9. Tesisat hücresi | 37 |
| Şekil 3.10. Cihaz hücresi | 38 |
| Şekil 3.11. Montajı tamamlanmış ısı pompası | 39 |
| Şekil 3.12. Kompresör(www.cantas.com,2015) | 39 |
| Şekil 3.13. Kondenser/Evaporatör | 40 |
| Şekil 3.14. Kondenser/Evaporatör fanı | 41 |
| Şekil 3.15. Borulu tip eşanjör | 42 |
| Şekil 3.16. Genişleme vanası olarak kılcal boru | 42 |
| Şekil 3.17. 4 yollu vana | 43 |
| Şekil 3.18. Vakum Pompa | 44 |
| Şekil 3.19. Sıcaklık sensörü (Termokupl) | 45 |
| Şekil 3.20. T tipi ısı çiftler | 45 |
| Şekil 3.21. Vakum manometresi | 46 |
| Şekil 3.22. Kontrol paneli | 46 |
| Şekil 3.23. Elektronik terazi | 47 |
| Şekil 3.24. Data logger | 48 |
| Şekil 3.25. Elektrik sayacı | 49 |
| Şekil 4.1. Kurutmaya hazırlanan donmuş kırmızıbiber numuneleri | 51 |
| Şekil 4.2. Kurutma işleminden çıkarılmış kırmızıbiber numuneleri | 52 |
| Şekil 4. 3. Kırmızıbiber kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1) | 53 |
| Şekil 4. 4. Deney esnasında kırmızıbiber numuneleri | 54 |
| Şekil 4. 5. Kırmızıbiber kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2) | 55 |
| Şekil 4. 6. Elma kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1) | 56 |
| Şekil 4.7. Kurutma işleminden çıkarılmış elma numuneleri | 57 |
| Şekil 4. 8. Elma kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2) | 58 |
| Şekil 4.9. Kurutma işleminden çıkarılmış elma numuneleri | 58 |
| Şekil 4. 10. Patlıcan kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1) | 60 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.11. Kurutma işleminden çıkarılmış patlıcan numuneleri | 60 |
| Şekil 4. 12. Patlıcan kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2) | 62 |
| Şekil 4.13. Kurutma işleminden çıkarılmış patlıcan numuneleri | 62 |
| Şekil 4. 14. Muz kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi | 64 |
| Şekil 4.15. Kurutmaya hazırlanan donmuş muz numuneleri..... | 64 |
| Şekil 4. 16. Deney esnasında muz numuneleri..... | 65 |
| Şekil 4.17. Kurutma işleminden çıkarılmış muz numuneleri | 65 |



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Çizelge 1.1. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine göre değişimi (Kırmacı, 2008)..... | 25 |
| Çizelge 4. 1. 29.08.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma deneyine ait veriler | 51 |
| Çizelge 4. 2. 29.08.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma işlem şartlarına ait veriler | 52 |
| Çizelge 4. 3. 01.09.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma deneyine ait veriler | 53 |
| Çizelge 4. 4. 01.09.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma işlem şartlarına ait veriler | 54 |
| Çizelge 4. 5. 11.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma deneyine ait veriler | 56 |
| Çizelge 4. 6. 11.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma işlem şartlarına ait veriler | 56 |
| Çizelge 4. 7. 13.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma deneyine ait veriler | 57 |
| Çizelge 4. 8. 13.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma işlem şartlarına ait veriler | 58 |
| Çizelge 4. 9. 16.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma deneyine ait veriler | 59 |
| Çizelge 4.10. 16.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma işlem şartlarına ait veriler | 59 |
| Çizelge 4.11. 18.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma deneyine ait veriler | 61 |
| Çizelge 4.12. 18.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma işlem şartlarına ait veriler | 61 |
| Çizelge 4.13. Muz kurutma deneyine ait veriler | 63 |
| Çizelge 4.14. Muz kurutma işlem şartlarına ait veriler | 63 |
| Çizelge 5. 1. Kurutma işlemlerine ait bilgiler | 66 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|-----------|--|
| dW/dt | Buharlaşma hızı (kg/s) |
| q | Isı aktarım hızı (J/s-w) |
| k | Kütle aktarım katsayısı (kg/m ² s) |
| A | Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m ²) |
| H_m | Kurutulacak maddenin yüzeyindeki mutlak nem (kg su/kg kuru hava) |
| H_h | Kurutucu havanın mutlak nemi h (kg su / kg kuru hava) |
| G | Kurutucu havanın kütleli akışı (debisi, kg/(m ² s)) |
| k_1 | Orantı sabiti |
| λ | Gizli buharlaşma (kuruma) ısısı (J/kg) |
| T_h | Kurutucu havanın sıcaklığı (kuru hazne sıcaklığı) (°C) |
| T_y | Maddenin yüzey sıcaklığı (Yaş hazne sıcaklığı)(°C) |
| h | Isı aktarma katsayısı |
| P_m | Kurutulacak maddenin üzerindeki havanın buhar basıncı (Pa) |
| P_h | Kurutucu havanın içindeki kısmi buhar basıncı (Pa) |

1.GİRİŞ

Meyve, sebze ve temel gıdaların bulunma durumları, mevsimsel şartlara göre değişmektedir. İnsanoğlu zamandan bağımsız her mevsimde her gıdayı bulmak için tabii koşulları, bilim ve sanayiye kullanarak birçok yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemlerden bazıları; konserve etmek, tuzla salamura yapmak, pastörize etmek, kimyasal maddelerle işlemek, kurutmak, dondurmak, serin ortamlarda muhafaza etmek ve oksijensiz ortamlarda muhafaza etmektir. Bu yöntemler arasında en yaygın olarak kullanılan yöntem ise kurutma işlemidir.

Kurutma; madde içerisinde bulunan suyun, maddenin yapısını bozmadan veya kabul edilebilir limitler çerçevesinde maddeden uzaklaştırılmasıdır. Kurutma; en önemli kullanım alanı gıda sektörü olmak üzere tıp, eczacılık, boya sanayinde, tarım ve hayvancılıkta, mobilya ve ahşap sanayinde, arkeolojide, tarihsel veya sosyo-ekonomik yönden önem arz eden evrakların arşivlenmesinde ve kâğıt sanayinde olmak üzere birçok alanda uygulanmaktadır. Kurutma gıda maddelerini dayanıklı hale getirmek için uygulanan en eski yöntemlerdendir. Çok eski zamanlardan et, balık, meyve ve sebzelerin güneşte kurutulmuş olarak muhafaza edildiği bilinmektedir (Gürses, 1986). Şekil 1.1. domates için ve Şekil 1.2.'de ise balık için güneş altında sergide kurutma görülmektedir.

Gıdaların kurutma suretiyle dayanıklı hale getirilmesi yöntemi halen önemli bir gıda muhafaza yöntemidir. Kurutulmuş gıdalar bozulmadan uzun süre depolanabilirler. Gıdaların bozulmasına ve çürümesine neden olan mikroorganizmalar su bulunmadığında gelişemez ve çoğalamazlar. Gıdaların kimyasal bileşiminde istenmeyen değişimlere neden olabilecek enzimlerin birçoğu su bulunmadığında faaliyet gösteremezler. Kurutucuları sınıflandırmanın basit bir yolu olmamakla birlikte, kimya ve farmasötik alanda kullanılan kurutma yöntemleri Şekil 1.3. 'de verilmiştir (Doğanay, 2009).



Şekil 1.1. Sergide domates kurutma



Şekil 1.2.Sergide balık kurutma

Kurutmada, gerekli gizli buharlaşma ısını sağlamak üzere ısının iletimi ve gıda maddesinde suyun veya su buharının hareketi ve sonra gıdadan uzaklaşmasının sağlanması ve böylece suyun gıda maddesinden ayrılması işlemleri kontrol edilmesi gerekir. Kurutma işlemleri üç sınıfta toplanabilir;

1. Atmosfer basıncı altında hava ile veya direkt kurutma. Burada gıdaya ısı, ısıtılmış havadan veya ısıtılmış bir yüzeyden iletilir. Su buharı hava ile dışarı çıkarılır.
2. Vakumda kurutma: Suyun buharlaşması alçak basınçta, atmosfer basıncındakine oranla daha kolaylıkla olur. Vakumda kurutmada bu prensipten yararlanılır. Vakumda kurutmada ısı iletimi genellikle kondüksiyonla olur, bazen de radyasyonla olur.
3. Dondurarak kurutma: Dondurarak kurutmada dondurulmuş gıdadan su süblime edilerek buharlaştırılıp uzaklaştırılır. Bu şartlarda daha iyi yapıya sahip bir ürün elde edilebilir. Süblimasyonun olabilmesi için, uygun sıcaklık derecesi ve basınç sağlanmalıdır (Gürses,1986).

İlk iki işlem maliyet ve giderler açısından uygun olarak görülür ancak kurutma dengesi ve homojenizasyonu açısından kalitesi düşüktür. Isıya duyarlı ürünlerde istenilen sonuçlar alınmaya bilinir. Dondurarak kurutma ise genelde diğer kurutma yöntemleri ile kurutulamayacak kadar hassas olan biyolojik maddeler, ilaçlar, gıdalar, önemli evraklar vb. dondurarak kurutulabilir (Gürses,1986).

1.1. Kurutmanın Temel Mekanizması

Kurutma işleminde, kurutulacak madde üzerine ısı enerjisi aktarılarak suyun (ya da organik çözücünün) buharlaşması için gerekli gizli buharlaşma ısı sağlanır. Bu ısı aktarımı sonucu buharlaşan su, madde yüzeyinden kurutucu hava içine yayılarak uzaklaşır. Böylece ısı aktarımı suyun maddeden buharlaşarak uzaklaşması şeklinde bir kütle aktarımına neden olur. Kurutulacak maddenin içerdiği nem, maddenin yüzeyi üzerinde bir film katmanı olarak kabul edilirse, bu filmin

buharlaştırma hızı ile ısı aktarım hızı (q) arasında ilişki eşitlik 1.1' de verilmiştir (Doğanay, 2009).

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q}{\lambda} \quad (1.1)$$

- dW/dt : Buharlaştırma hızı (kg/s)
- q : Isı aktarım hızı (J/s-w)
- λ : Gizli buharlaştırma (kuruma) ısısı (J/kg)

Kurutucu havanın sıcaklığı ile maddenin sıcaklığı arasındaki fark ne kadar fazla olursa ısı aktarım hızı (q) da o kadar fazla olur. Maddenin nem içeriği (H_m) ile havanın (gazın) nem içeriği (H_h) arasındaki fark arttıkça kütle aktarım hızı da artar. Bu durumda kütle aktarım hızı ile nem arasındaki ilişki eşitlik 1.2'de gösterilmiştir.

$$\frac{dW}{dt} = kA(H_m - H_h) \quad (1.2)$$

- dW/dt : Buharlaştırma hızı (kg/s)
- k : Kütle aktarım katsayısı (kg/m²s)
- A : Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m²)
- H_m : Kurutulacak maddenin yüzeyindeki mutlak nem (kg su/kg kuru hava)
- H_h : Kurutucu havanın mutlak nemi h (kg su / kg kuru hava)

Kütle aktarım hızı ile havanın kütle hızı (debisi, G) arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik 1.3'de verilmiştir.

$$k = k_1 G^{0.8} \quad (1.3)$$

- k : Kütle aktarım katsayısı (kg/m²s)
- k_1 : Orantı sabiti
- G : Kurutucu havanın kütle hızı (debisi, kg/(m²s))

Kurutucu havanın verdiği ısının bir kısmı ile yukarıdaki denklemlerle gösterilen buharlaşma olurken, diğer kısmı, ürünün sıcaklığını artırmada kullanılır. Maddenin yüzeyindeki bu sıcaklık artışı bir noktaya kadar yani yaş hazne sıcaklığına ulaşınca kadar devam eder. Bunun için kurumanın başlangıcında geçen bu süreye ayarlanma süreci denir. Ürünün sıcaklığı sabit sıcaklığa - yani yaş hazne sıcaklığına - ulaşınca, daha önce de belirtildiği gibi kurutucu havadan gelen ısı buharlaşmada kullanılır. Sabit hız süreci denilen kurumanın bu aşamasında, ısı aktarım hızı ile buharlaşma hızı eşitlenir. Eşitlik 1.4'de gösterilmiştir.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{q}{\lambda} = kA(H_m - H_h) \quad (1.4)$$

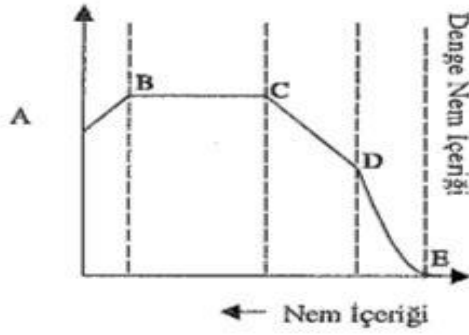
Sabit kuruma hızı aşamasından sonra kuruma hızı azalmaya ürün sıcaklığı artmaya başlar (Doğanay, 2009).

1.2.Kurumanın Aşamaları

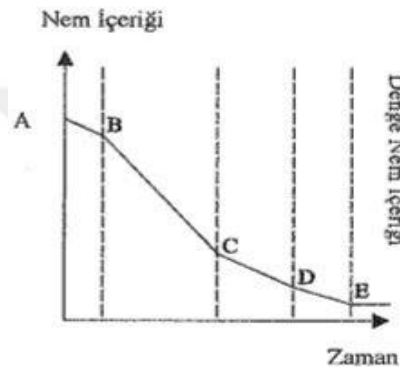
Kurutma işlemi boyunca dört önemli kuruma süreci vardır (Doğanay,2009).

1.2.1.Ayarlanma süreci

Kurutulacak olan nemli maddenin üzerinden sıcaklığı ve nem içeriği belirli olan hava akımı geçirildiğinde ısıtıcı havanın kurutulacak maddeye verdiği ısı enerjisinin bir kısmı madde yüzeyinin sıcaklığını yükseltirken, diğer kısmı gizli buharlaşma ısı olarak kullanılır. B noktasına kadar olan bu AB sürecine ayarlanma süreci denir, kuruma hızı düşüktür. Şekil 1.4. kuruma hızının, nem içeriğine göre değişimini, Şekil 1.5. ise kuruma hızının kuruma süresine göre değişimini göstermektedir.



Şekil 1.4. Kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi (Doğanay,2009)



Şekil 1.5. Kuruma hızının kuruma süresine göre değişimi (Doğanay,2009)

1.2.2. Sabit hız süreci

B noktasından sonra başlayan BC hız sürecine sabit hız süreci denir. Bu süreçte, kurutucu havadan maddeye ısı enerjisinin aktarılma hızı, buharlaşma hızına eşit olur. Kuruma hızını, maddenin yüzeyindeki su içeriği (H_m) ile kurutucu havanın su içeriği (H_h) arasındaki fark belirler (eşitlik 1.4).

Kuruma hızı, $H_m - H_h$ ile orantılı olan, kurutulacak maddenin üzerindeki havanın buhar basıncı (P_m) ile kurutucu havanın içindeki kısmi buhar basıncı (P_h) arasındaki fark ($P_m - P_h$) olarak eşitlik 1.5'den de hesaplanabilir.

$$\frac{W}{t} = \frac{q}{\lambda} = k_2 A (P_m - P_h) \quad (1.5)$$

- W/t: Buharlaşma hızı (kg/s)
- k_2 : Kütle aktarım katsayısı (kg/m²s)
- A: Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m²)
- P_m : Kurutulacak maddenin üzerindeki havanın buhar basıncı (Pa)
- P_h : Kurutucu havanın içindeki kısmi buhar basıncı (Pa)

Maddenin yüzeyindeki suyun buharlaşması esnasında harcanan gizli buharlaşma ısısı nedeniyle, maddenin yüzey sıcaklığı, kurutucu havanın sıcaklığından düşük olur. Kuruma yüzeyi ile kurutucu havanın sıcaklığı arasında fark oluşunca, havadan kuruma yüzeyine enerji aktarımı olur. Bu enerji aktarımı, yüzeydeki buharlaşmayı artırır. Havadan aktarılan bu ısı enerjisinin tamamı buharlaşma gizli enerjisi olarak kullanılıncaya, kuruma yüzeyi üzerindeki buhar basıncı sabitleşir, kurumakta olan maddenin yüzey sıcaklığı da sabitleşir. Sabitleşen bu yüzey sıcaklığına yaş hazne sıcaklığı (T_y) denir. Bu durumda, buharlaşma için harcanan ısı enerjisinin aktarılma hızı, buharlaşma hızına eşit olur. Kuruma, yaş hazne sıcaklığındaki maddenin nem içeriği ile kurutucu havanın nem içeriği farkının ($H_m - H_h$) belirleyeceği sabit hızla devam eder, kuruma hızının en yüksek olduğu süreçtir. Bu süreçte buharlaşma hızına eşit bir difüzyon hızı ile partikül içindeki sıvı yüzeye difüzlenererek madde yüzeyinin sıvı filmi devamlı yenilenir.

Sabit hız sürecinde, yaş hazne sıcaklığı (T_y) ve kuru hazne sıcaklığı (T_h) göz önüne alındığında, kuruma hızı ya da buharlaşma hızı (W/t) aşağıdaki 1.6*eşitliği ile de verilebilir.

$$\frac{W}{t} = \frac{h(T_h - T_y)A}{\lambda} (1.6)$$

- W/t: Buharlaşma hızı (kg/s)
- h: Isı aktarma katsayısı
- A: Kurutulacak maddenin yüzey alanı (m²)
- T_h : Kuru hazne sıcaklığı (°C)
- T_y : Yaş hazne sıcaklığı (°C)

- λ : Gizli buharlaşma (kuruma) ısısı (J/kg)

Bu süreçte, kurutucu havadan maddeye aktarılan ısı enerjisinin tamamı, maddenin içerdiği nemin gizli buharlaşma ısısı olarak kullanıldığı için maddenin yüzey sıcaklığı (Yaş hazne sıcaklığı) sabit kalır. Kuruma, kurutucu havanın sıcaklığı ile yaş hazne sıcaklığı arasındaki farkın ($T_h - T_y$) belirleyeceği sabit hızla, birinci kritik nem içeriği noktasına (C noktası) kadar devam eder.

1.2.3. Kuruma hızının ilk düşüş süreci

Kuruma sabit hızda devam ederken nem içeriği azalınca partikülün iç kısmındaki nem dış yüzeye difüzlenerak devamlı bir sıvı filmi oluşturamaz. Çünkü kurumadan dolayı maddenin nem içeriği azalmıştır. Kuruyan dış yüzeyde yer yer kuru noktalar oluşmaya başlar. Böylece kritik nem içeriği denen bu C noktasından itibaren kuruma hızı düşmeye maddenin yüzey sıcaklığı artmaya başlar. CD boyunca kuruma hızının devamlı azaldığı bu sürece doymamış yüzey kuruma süreci veya kuruma hızının birinci düşme süreci denir.

1.2.4. Kuruma hızının ikinci düşüş süreci

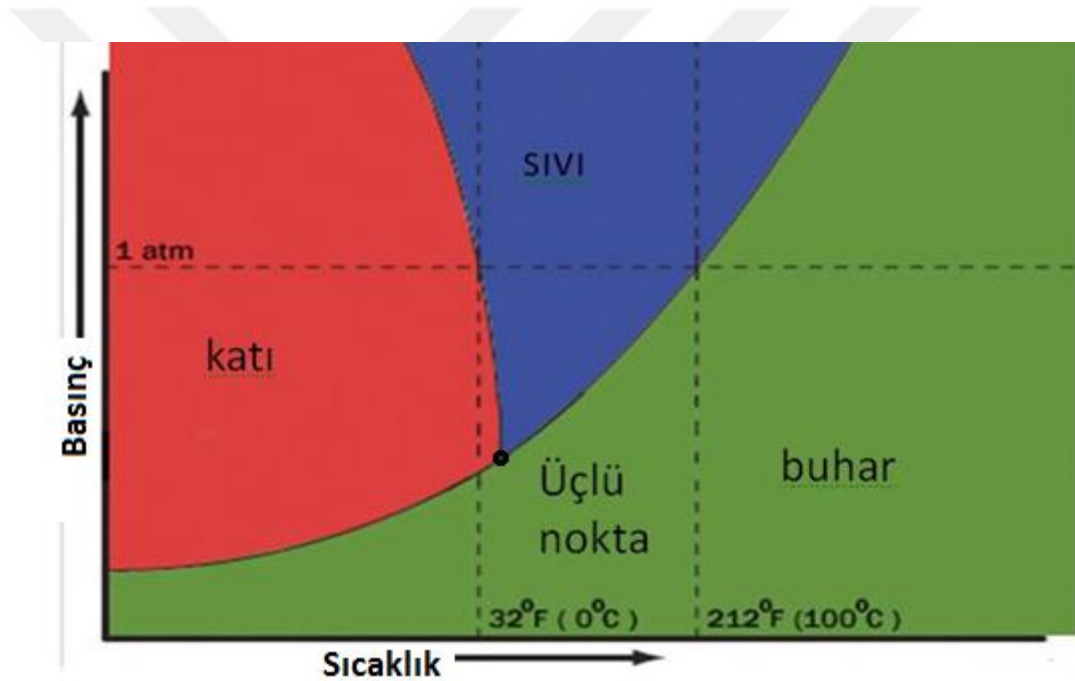
D noktasından itibaren oluşan kuru noktalar çoğalmaya ve genişlemeye başlar ve en dışta kuru bir katman oluşur. Gerek ısı geçirgenliği az olan kuru katmanın oluşması, gerek yüzeye taşınacak sıvı katmanın difüzyon hızının azalması ile kuruma hızı D noktasından itibaren devamlı bir düşüş gösterir. Bu D noktasına ikinci kritik nem içeriği noktası denir.

DE boyunca, buharlaşma hızı, iç katmanlardan yüzeye difüzlenen nemin difüzyon hızına bağlıdır. Buharlaşma (kuruma) hızı azaldıkça kurutucu havadan alınan ısı enerjisinin çok az bir miktarı buharlaşma gizli ısısı olarak kullanıldığından partiküllerin yüzey sıcaklıkları daha da artar. E noktasına ulaşıldığında buharlaşma durmuştur. Çünkü kurutucu havanın içindeki nemin buhar basıncı ile maddenin içindeki nemin buhar basıncı eşit olunca kuruma sona erer. Bu durumda, buharlaşma olmadığından verilen ısı buharlaşma gizli ısısı olarak kullanılmaz; bu ısı, ürün

sıcaklığını artırır ve kuruyan maddenin sıcaklığı kurutucu havanın sıcaklığına (kuru hazne sıcaklığına) yaklaşır. Maddenin nem içeriğini daha da düşürmek için kurutucu havanın sıcaklığını artırmak gerekir (Doğanay,2009).

1.3. Süblimleşme

Su katı fazdan sıvı hale geçmeden direkt gaz faza geçiş yapar (şekil 1.6.). Sonuç olarak dondurarak kurutulan maddenin süblimasyon bölgesinin sıcaklığının kurutulan maddedeki su veya sulu çözeltinin üçlü nokta sıcaklığının altında olması gereklidir (King, 1971).



Şekil 1.6.Suyun basınç-sıcaklık için faz denge diyagramı (www.howstuffworks.com,2015)

Üçlü nokta basıncı atmosfer basıncından büyük olan maddeler, örneğin kuru buz (katı karbondioksit) süblimasyon atmosfer basıncı altında buhar fazına geçişin tek yoludur. Süblime olabilen her maddenin süblimasyon koşulları farklıdır. Dondurarak kurutmanın temelini süblimleşme oluşturur. Bu durumda süblimasyon gizli ısıyı sağlanmalıdır yani verilmelidir. Basıncın, süblimasyon gizli ısıyı üzerinde çok az etkisi vardır.0°C ‘deki buzun Süblimasyon gizli ısıyı 2835 kJ/kg olarak alınabilir. Buz 0 °C veya altında, basınç 0.6113 kPa veya altında olunca süblime olabilmektedir. Daha net bir anlatımla buzun süblimasyonu, su buharı basıncının onu

çevreleyen ortamın su buharı basıncından daha yüksek olması durumunda gerçekleşir. Buzun buhar basıncı, sıcaklığına bağlıdır. Örneğin 0 °C'deki buzun buhar basıncı 0.6113 kPa düzeyinde olduğu halde, -10 °C'deki buzun buhar basıncı 0.2603 kPa dır.

1.4. Dondurarak Kurutma

Geleneksel kurutma yöntemi ile kurutulması sakıncalı olan sıcaklığa çok hassas bazı biyolojik maddeler, ilaçlar ve gıda maddeleri dondurarak kurutulabilir. Kurutulacak madde genelde donmuş haldedir. Dondurarak kurutma işleminde, su veya herhangi bir çözücü, vakum ortamında bulunan maddeden süblimasyon ile buhar olarak ayrıştırılır. Süblimasyon ile buhar olarak ayrıştırılan çözücü, kurutma işleminin meydana geldiği odadan uzaklaştırılır (Liapis ve Bruttini, 1997).

Liyofilizasyon olarak da bilinen dondurarak kurutma, gıda işleme, süt endüstrisinde, nutrasöktikler, ilaç sanayinde (enzimler, hormonlar, aşular vb. Biyolojik ürünler),belge kurutmada, çiçek kurutmada, tahniçilikte ve ar-ge birimlerinde yaygın olarak kullanılan ayrıştırma işlemidir. Dondurarak kurutma yöntemi çok düşük basınç altında donmuş materyalden ya da donmuş çözeltilerden çözücünün (serbest su) süblimasyonla, bağlı suyun uzaklaştırılması (desorpsiyon) işlemidir.

Dondurarak kurutma işlemi yavaş ve pahalıdır. Ancak kurutma sonunda diğer kurutma teknikleriyle karşılaştırıldığında en kaliteli ürün elde edilmektedir. Dondurarak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde, büzölmüş ve gözenekli yapısı sayesinde su alarak (rehidrasyon), kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşır. Ürünün raf ömrünün uzaması, ağırlığının azalması, depolama alanından tasarruf ve soğukta saklamaya gerek kalmadan oda sıcaklığında muhafaza gibi avantajları vardır. Şekil 1.7'de bir endüstriyel dondurarak kurutucu görölmektedir.

Diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında kural olarak en kaliteli ürün dondurarak kurutma yöntemiyle elde edilebilir. Burada en önemli faktör olan yapısal

sertlik, süblimasyonun meydana geldiği yüzeyin donmuş olmasıyla sağlanmasıdır. Bu yapısal sertlik, kurutma işleminden sonra, kurutulmuş maddenin şeklinin bozulmasını da önler. Sonuç olarak dondurarak kurutulmuş maddeye tekrar su ilave edildiğinde büzülmemiş gözenekli yapısı sayesinde hızlı bir şekilde bünyesine su alarak (rehidrasyon) kurutma öncesi yapısına çok yakın bir yapıya ulaşır (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

Dondurarak kurutulmuş gıda ve biyolojik maddelerin diğer bir avantajı da kurutma işlemi sırasında çok az tat ve aroma kaybına uğramalarıdır. Sıcaklığın çok düşük olması, bağıl nemin düşük olması, lokal olarak su kaybının çok hızlı olması, diğer geleneksel kurutma yöntemlerine göre enzimatik olmayan kararma; gıdanın yapısındaki proteinlerin bozulmasını ve enzimatik reaksiyonları minimuma indirir (Liapis ve Bruttini, 1997).

Dondurarak kurutma işlemi sırasında her gıda maddesinde bağılı su olarak adlandırılan donmamış halde bir miktar suyun bulunması kaçınılmazdır. Bununla birlikte bu suyun bulunduğu nemli bölgedeki geçiş sıcaklığının çok düşük olması kurutulmuş ürün kalitesini oldukça artırmaktadır. Kurutulacak maddenin içerisinde yeterli miktarda donmuş suyun bulunması, dondurarak kurutma işlemi için oldukça önem taşır. Bununla birlikte dondurarak kurutma düşük kurutma hızı ve vakum uygulamasından dolayı gıdalar için pahalı bir kurutma yöntemidir (Liapis ve Bruttini, 1995).

Dondurarak kurutma sistematik olarak aşağıdaki maddelerin kurutulması için uygulanır: (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

- Kan plazması, serum, hormon çözeltileri, gıda maddeleri, ilaçlar (antibiyotik), seramikler, süper iletkenler ve tarihsel dökümanlar (arkeolojik buluntular) gibi cansız maddeler.
- Nakil edilebilen organlar, yapay deri ve kemik gibi cansız maddeler.
- Maya, virüs ve bakteri gibi uzun süre yaşaması gereken canlı maddeler.

Diğer bir örnek ise nükleer atıkların dondurarak kurutulmasıdır. Bu yöntemde, orta radyoaktivitedeki kuru toz haldeki nükleer atıklara uygun kimyasallar ilave edilir ve daha sonra bunlar cam tuğlaların içerisine eritilerek ve dökülerek ucuz depolama sağlanır. Dondurarak kurutma yöntemi yüksek kalitede homojen submikron süper iletken tozların üretiminde ve süper iletken maddelerin sentezinde de kullanılmaktadır (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

Dondurarak kurutma üç safhadan oluşmaktadır: (1) Donma safhası; (2) Birinci kurutma safhası ve (3) İkinci kurutma safhası (Mellor, 1978; Millman ve Ark, 1985; Pikal ve Ark, 1990; Liapis ve Bruttini, 1997).



Şekil 1.7. Endüstriyel bir dondurarak kurutucu

1.4.1. Donma safhası

Kurutulacak materyal özelliğine uygun olarak dondurulur. Materyali dondurma işlemi ya dondurarak kurutma cihaz içinde ya da başka bir dondurucuda yapılabilir. Gıdalardaki su saf halde bulunmaz. Suyun içinde bulunan maddenin özelliği ve konsantrasyonuna göre ötektik değeri değişir. Biyolojik dokular için bu sıcaklık genellikle NaCl'in ötektik değeri olan $-21,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ alınmaktadır. Dokular bu değer in altındaki sıcaklıklarda dondurulur (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

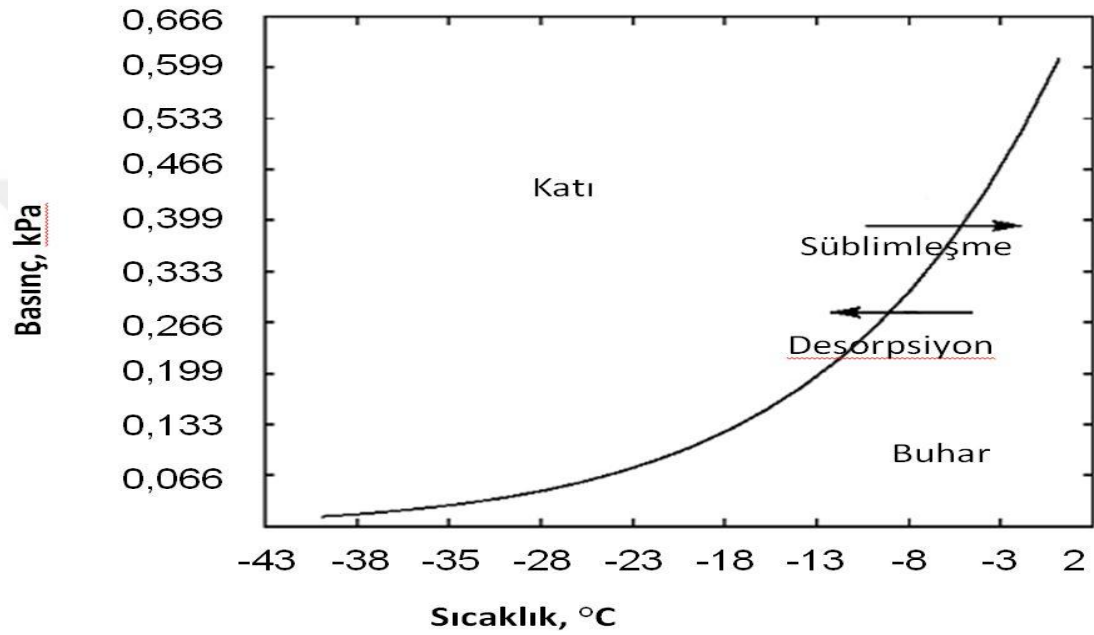
Ürün büyük ise ürünün dış kısmındaki çözücü donar fakat iç kısım donmamış olarak kalabilir. Bunun için ürünün içerdiği çözücünün ve katı maddenin tümünün donması gerekir. Çözücünün kristal hale geçmesi büyük önem taşır. Buz kristali oluşmadan sıvıdan camsı katı tabaka haline dönüşüm olabilir. Bu yapıdan suyun uzaklaştırılması zordur. Eğer doku ötektik değerinin üstündeki sıcaklıklarda dondurulursa kristal yapı sağlanamayacak ve dokunun kurutulması oldukça zorlaşacaktır. Hızlı dondurma işleminde, küçük buz kristalleri oluşur. Küçük buz kristalleri dondurarak kurutmak zordur fakat bunların süblimasyonu materyalin yapısına daha az zarar verir. Yavaş dondurma işleminde, büyük buz kristalleri oluşur. Büyük buz kristalleri dondurarak kurutmak, küçük buz kristallere göre daha kolaydır. Fakat materyalin yapısına daha fazla zarar verir. Dondurma işleminin sonunda, başlangıçta sistemde bulunan suyun % 65-90'ı donmuş, geri kalan % 10-35 oranındaki su ise bağlı su (donmamış su) olarak bulunur (King, 1971; Golglith ve Ark, 1975; Millman ve Ark, 1985).

1.4.2. Birinci kurutma safhası

Dondurma işleminden sonra kurutma odasının basıncı çözücünün süblimasyonunu sağlayacak şekilde düşürülür. Su buharının materyalden sürekli biçimde uzaklaştırılmasını sağlayacak dengesiz şartları oluşturmak için su buharı kurutma hücresinden yoğunlaştırıcıya vakum vasıtası ile sürekli şekilde taşınır. Su molekülleri süblime olup buhar hale geçerken, çok yüksek olan süblimasyon ısısını (2840 kJ/kg) kurutulacak maddeden alırlar ve böylece donmuş tabakanın sıcaklığı daha da düşer. Eğer sisteme herhangi bir ısı kaynağından ısı sağlanmazsa, ürünün içindeki donmuş suyun buhar basıncı kurutma odasının içindeki su buharının kısmi basıncı ile dengeye ulaşır ve üründen suyun süblimasyonu durur (King, 1971; Golglith ve Ark, 1975).

Sisteme sağlanan ısı gelişi güzel artırılmaz. Dondurarak kurutulmuş tabakanın maksimum sıcaklığı biyoaktiviteyi kaybetmeyecek, rengini değiştirmeyecek, kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlara sebep olmayacak şekilde seçilmelidir. Birinci kurutma safhasında donmuş haldeki su (buz) süblimasyonla maddeden

uzaklaştırılır, süblimasyon ara yüzeyi aşağıya doğru ilerler ve geriye gözenekli yapıda kurumuş tabaka kalır. Birinci kurutma safhası boyunca kurumuş tabakadaki donmamış suyun (bağlı su) bir kısmı desorpsiyonla uzaklaştırılabilir. Şekil 1.8’de suyun katı-gaz fazı doygunluk eğrisi görülmektedir. Kurutulacak madde içerisindeki tüm donmuş haldeki su bittiği an birinci kurutma periyodunun sonu olarak kabul edilir (Pikal ve Ark, 1990;Liapis ve Bruttini, 1997;Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).



Şekil 1.8.Suyun katı – gaz fazı doygunluk eğrisi

1.4.3. İkinci kurutma safhası

İkinci kurutma safhası donmamış (bağlı suyun) suyun uzaklaştırılmasını içerir. Materyalde toplam suyun % 65-90’ı serbest haldeki su olup, birinci kurutma safhası boyunca süblimasyonla uzaklaştırılır. Toplam suyun %10-35’i bağlı sudur. Bağlı suyun uzaklaştırılması kurutma hızını ve toplam kurutma süresini etkiler. Bağlı suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zaman serbest suyun uzaklaştırılması için gerekli olan zamana eşit veya daha uzun olabilir (King, 1971; Golgblith ve Ark, 1975; Millman ve Ark, 1985).

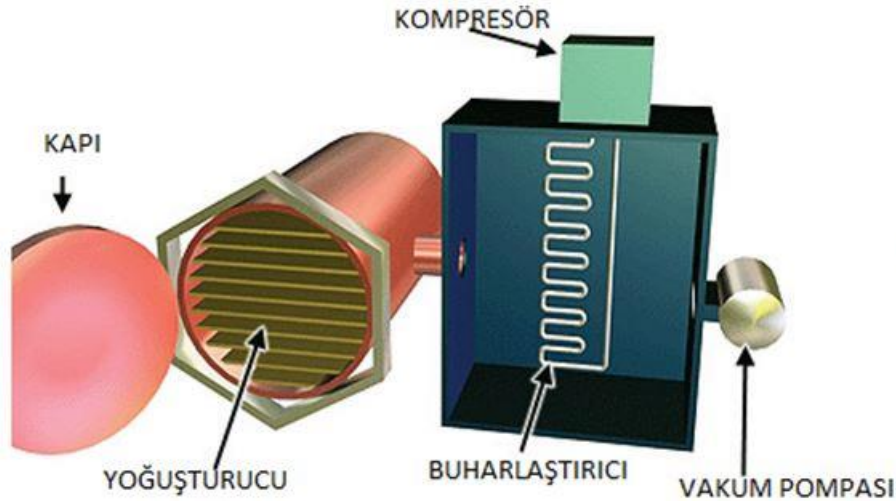
Kurutulacak maddede bulunan bağlı su maddeye vakum altında ısı verilerek uzaklaştırılır. Fakat birinci kurutma periyodunda olduğu gibi, ikinci kurutma

periyodu süresince sisteme yüklenen ısı gelişi güzel artırılamaz ve uyulması gereken sınırlamalar mevcuttur. Bu sınırlamalar nem içeriği ve kurutulan ürünün sıcaklığı ile ilgilidir. Bu iki değişken, kurutma sırasında ve kurutmadan sonraki yapısal kararlılığı ve ürünün kalitesini etkiler. Sıcaklığa bağlı ürünler için genellikle 10-35 °C arası, sıcaklığa daha az bağlı ürünler için ise 50 °C ve üstündeki sıcaklıklar tercih edilir (Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

1.5. Dondurarak Kurutma Yöntemleri

Şekil 1.9 'da dondurarak kurutucu sistem şeması görülmektedir. Dondurarak kurutmada genel olarak üç yöntem kullanılır. Her yöntemin özel bir amacı olmakla beraber kullanılacak yöntem ürünün yapısına bağlıdır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır (www.labconco.com, 2011).

- 1.Manifolt yöntemi
- 2.Grup (Batch) yöntemi
- 3.Yığın (Bulk) yöntemi



Şekil 1.9. Dondurarak kurutucu sistem şeması (www.howstuffworks.com, 2015)

1.5.1. Manifold yöntemi

Şekil 1.10 'da manifold yöntemli dondurarak kurutucu görülmektedir. Manifold yönteminde dar boyunlu küçük şişe, ampul ya da küçük ilaç şişeleri manifold ya da kurutma odasının girişlerine takılır. Ürün, dondurucuda, düşük sıcaklık banyosuna batırılarak ya da kabuk dondurma yöntemlerinin herhangi birisi ile ürünün yapısına ve dondurarak kurutulacak hacme bağlı olarak dondurulur. Kabuk dondurma düşük sıcaklık banyosunda döndürülerek ürünün ince tabaka halinde şişenin içerisinde dondurulmasıyla gerçekleştirilir. Dondurulan ürün, ısınmayı önlemek için hızlı bir şekilde manifold ya da kurutma odasına yerleştirilir. Hızlı bir şekilde ürün kaplarının içerisine vakum uygulanır ve buharlaşma için düşük sıcaklık sağlanır. Bu prosedür yalnızca küçük hacimler ve yüksek ötektik ve çökme sıcaklığına sahip ürünler için kullanılır (www.labconco.com,2011).



Şekil 1.10. Manifold yöntemli dondurarak kurutucu (www.millrocktech.com, 2011)

1.5.2. Grup (batch) yöntemi

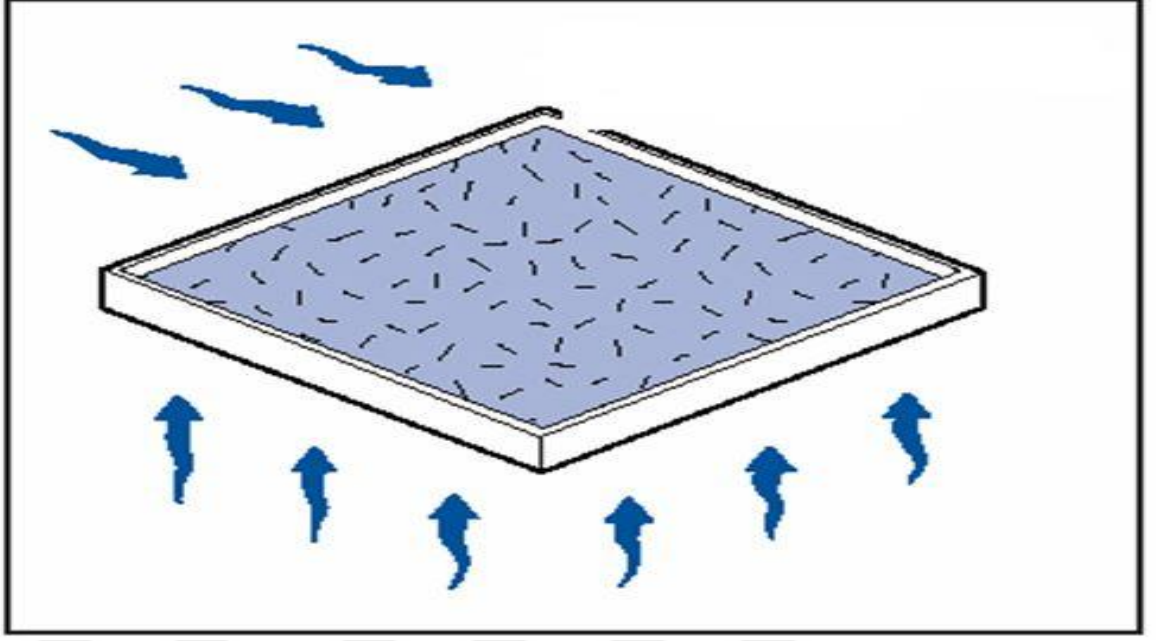
Şekil 1.11 'da grup (batch) yöntemli dondurarak kurutucu görülmektedir. Grup kurutma yönteminde, çok sayıda aynı büyüklükteki şişeler tepsili dondurarak kurutucuya yerleştirilir. Ürün genelde tepsili dondurarak kurutucuda dondurulur. Ürün sıcaklığı ve ürüne uygulanacak ısı miktarı dikkatli bir şekilde kurutma boyunca ürüne beslenir. Grup yöntemi tek bir ürün için genelde ilaç endüstrisinde çok sayıda ampul ya da küçük ilaç şişesi hazırlamak için kullanılır (www.labconco.com,2011).



Şekil 1.11.Grup (batch) Yöntemli Dondurarak Kurutucu(www.technologyinscience.com, 2011)

1.5.3.Yığın (bulk) yöntemi

Şekil 1.12’de yığın (bulk) yöntemi görülmektedir. Yığın kurutma grup yöntemi gibi tepsili dondurarak kurutucuda gerçekleştirilir. Ürün, tepsi içine dökülür ve tek bir birim olarak kurutulur. Yığın kurutma manifold ya da grup kurutmada olduğu gibi kontrollü koşullar altında ürünün kapatılmasını sağlamaz. Genellikle, ürün dondurarak kurutma sisteminden uzaklaştırılır ve havasız kaplarda paketlenir. Yığın kurutma genelde oksijene ve neme aşırı duyarlı olmayan kararlı ürünler için kullanılır (www.labconco.com,2011).



Şekil 1.12.Yığın (bulk)yöntemi

1.6. Dondurarak Kurutucular

Dondurarak kurutucuları, arge hizmetleri(laboratuvar araştırmaları, ürün geliştirme) yani küçük ölçekli kullanımlar ve endüstriyel kullanımlarda görölmektedir.

1.6.1. Pilot ölçekli dondurarak kurutucular

Ecza ve gıda endüstrisinde olduğu kadar laboratuvarlarda da kullanmaya uygun olan pilot ölçekli dondurarak kurutucuların talepleri yüksektir çünkü bu kurutucular dayanıksız ürünlerin özellikle biyolojik kökenlilerin saklanması için gerekli olanakların araştırılması için kullanılmaktadır. Bu sistemler taşınabilirler ve dünyanın her tarafında fabrikalarda ve laboratuvarlarda dondurarak kurutulan ürünlerin geliştirilmesi çalışmalarına elverişlidir. Bu cihazlarda 20 kg'a kadar ürün kurutulabilmektedir. Şekil 1.13'de pilot ölçekli dondurarak kurutucular görölmektedir.



Şekil 1.13. Pilot Ölçekli Dondurarak Kurutucular

1.6.2. Endüstriyel dondurarak kurutucular

1.6.2.1. Tepsi ve ilaç tipi dondurarak kurutucular

İlaç çözeltilerinin dondurarak kurutulmasındaki temel problem işlemin steril koşullarda yapılmasını sağlamaktır. Tesisin konumunun ilacın kurutmadan önce yüklenmesi kurutmadan sonra boşaltılması esnasında steril koşulları sağlaması gerekmektedir. Bu durum kurutma odası kapısının, steril odadan makine ya da steril olmayan oda olarak adlandırılan odanın ayrılmasını sağlayan duvara karşı olması ile sağlanabilir. Ürün kapları (paslanmaz çelik tepsilere yüklenen şişeler) doldurma ve dondurarak kurutucuya yüklemeyen önce genellikle ayrı bir ünite desteril hale getirilir. Sistemde olası kirlenme için insanın olmasını gerektirmektedir. Bu sebepten dolayı, genelde steril odadaki insan sayısını birkaç kişiye düşürmek kesinlikle gereklidir. Şekil 1.14'de tepsi ve ilaç tipi dondurarak kurutucunun yüklenmesi görülmektedir.



Şekil 1.14. Tepsi ve ilaç tipi dondurarak kurutucunun yüklenmesi (www.sciencephoto.com)

1.6.2.2. Vakum sprey dondurarak kurutucu

Vakum sprey dondurarak kurutucu kahve ekstraktı, çay infüzyonu veya süt tozu için geliştirilmiştir. Ürün aşağıya ya da yukarıya giden tek bir jetten 3.7 m çapında 5.5 m yüksekliğindeki silindir kulenin içine püskürtülür. Sıvılar buharlaştırmalı dondurma ile küçük tanecikler halinde katılaşır. Şekil 1.15’de Vakum sprey dondurarak kurutucu görülmektedir.

Bu tesiste dondurarak kurutma işleminden önce giriş ürününün ön konsantrasyonu % 30 katı içeriğine kadar kullanılabilir. Vakuma spreyle gönderilerek elde edilen partiküller yaklaşık 15 µm çapındadır ve başlangıç evaporasyonunda yaklaşık % 15 nemini kaybederler. Bu partiküllerin yapışması söz konusu değildir. Genellikle sprey dondurarak kurutma ile yapılan kahve normal dondurarak kurutma ile yapılan kahveden daha az lezzetlidir (Mellor, 1978).

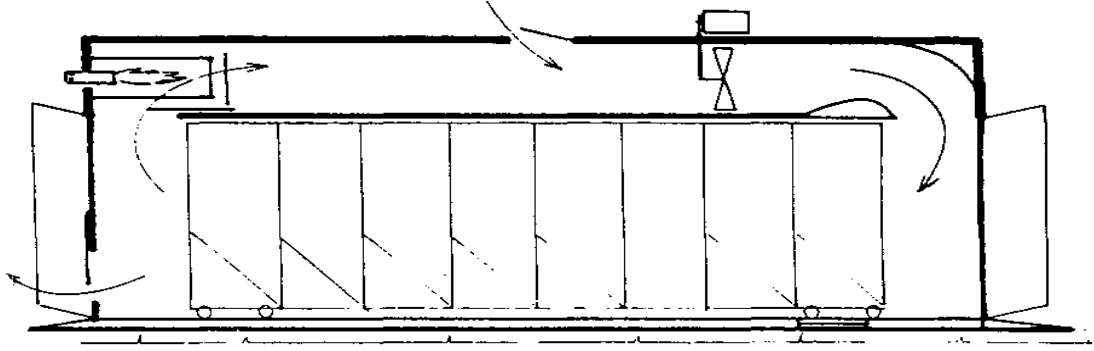


Şekil 1.15.Vakum sprey dondurarak kurutucu

1.6.2.3. Tünel tipi dondurarak kurutucular

Tünel tipi dondurarak kurutucularda işlem tepsi taşıyan yük arabalarının aralıklarla tünelin bir ucundaki geniş vakum kilitlerinde doldurulduğu ve aynı şekilde diğer ucunda boşaltıldığı geniş vakum kabininde gerçekleşmektedir. Şekil 1.16'da tünel tipi dondurarak kurutucu şeması görülmektedir.

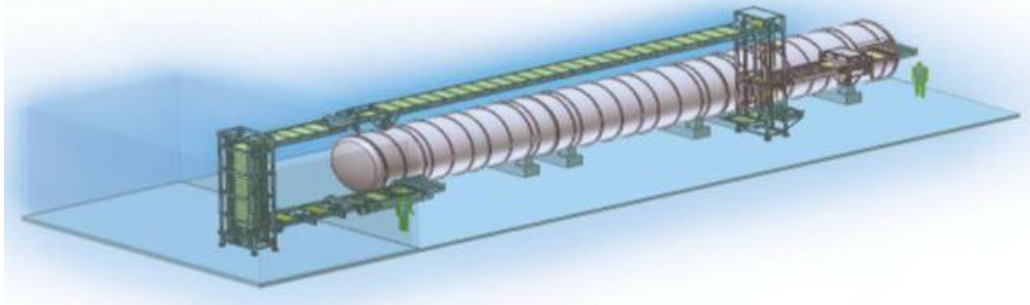
Periyot boyunca yük arabası hareket etmezken tepsi kaldırma aracı bütün tepsilerin alt taraftaki ısıtıcıların üst kısmında kalmasını sağlar. Vakum buharı ısıtma (vacuum steam heating) yoğunlaşma yüksek gizli ısı ve basınç aracılığıyla sıcaklık kontrolünü içeren bazı avantajları vardır. Soğutma sistemi sıkıştırma sistemi yerine geniş sulu amonyak absorpsiyon soğutucudan oluşmaktadır. Tünel tipi dondurarak kurutucunun kapasitesi yapılacak isin hacmine bağlı olarak artırılabilir (Liapis ve Bruttini, 1995).



Şekil 1.16. Tünel tipi dondurarak kurutucu şeması

1.6.2.4. Sürekli dondurarak kurutucular

Sürekli dondurarak kurutucular günümüzde ticari olarak bulunmaktadır. Şekil 1.17'de ticari bir sürekli dondurarak kurutucu tesisi gösterilmektedir. Bu tesisler işlemin her yerinde süreklilik, kolaylıkla kontrol edilebilen sabit işlem şartları ve kontrol sağlar. Granüllü formdaki ürünlere olan genel ilgi iki farklı tesis türünün gelişimini kolaylaştırmıştır. Birinci tür tesis ürünün tepsiyerde ve karıştırılmış yığın maddelerin dondurarak kurutulması için kullanılmaktadır. Ürüne ve tepsilere ısı transferi radyasyonla olmaktadır. İkinci tür sürekli dondurarak kurutucu tesisi ise tepsiler olmadan granüllü ürünler için kullanılmaktadır. Conrad ürünün tepsiyerde işlem yapılmasını sağlayan sürekli dondurarak kurutucudur. Bu tür tesisin başarısı basitliğine ve bütün sistemi oluşturan her bir bileşenin güvenilirliğine dayanmaktadır. Derin olmayan katmanlı ürünlü paralel tepsiler herhangi bir ürün kaybı olmaksızın hızlı dondurarak kurutma sağlar(Goldblith,1975).



Şekil 1.17. Ticari bir sürekli dondurarak kurutucu tesisi (www.geaprocess.co.uk, 2011)

1.7. Dondurarak Kurutma Sistem Ekipmanları

Dondurarak kurutma sistemi ana elemanları; soğutma ve ısıtma sistemi, kurutma kabini, vakum pompası olarak göze çarpar.

1.7.1. Soğutma ve ısıtma sistemi

Dondurarak kurutma sisteminde ve diğer küçük ölçekli soğutma sistemlerinde de genelde buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi kullanılmaktadır. Bu amaç için kullanılan soğutma makinesinde kompresör, evaporatör, kondenser, ve genişleme vanası bulunur. Soğutma işlemi, evaporatör tarafından gerçekleştirilir.

Dondurarak kurutma işleminde önemli noktalardan biri de kurutulacak ürüne ısı vermektir. Eğer sisteme herhangi bir ısı kaynağından ısı sağlanmazsa, ürünün içindeki donmuş suyun buhar basıncı kurutma odasının içindeki su buharının kısmi basıncı ile dengeye ulaşır ve üründen suyun süblimasyonla ayrışması durur. Bu bilgiler ışığında kurutulacak maddeden suyun sürekli süblime olabilmesi için süblimasyon ısısı herhangi bir ısı kaynağından sisteme beslenmelidir.(Sadıkoğlu ve Özdemir, 2001).

Dondurarak kurutma sistemlerinde ısı kaynağı olarak iletim ve radyasyona dayalı cihazlar kullanılmaktadır. İnfrared, mikro dalga, rezistans gibi ısı kaynakları kullanımı tercih edilmesinin nedeni, ürünlerdeki kurumanın yüzeyde başlayıp merkeze doğru inmesidir. Yüzeyde kuruyan tabaka yalıtım etkisi göstererek ısının ürünün içlerine nüfus etmesini güçleştirir bundan dolayı radyasyonla ısı transferi ürünün içlerine nüfus etme oranını arttırır. Çizelge 1.1’de Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısısı ve buhar basınç sıcaklık dereceleri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Buz-buhar sisteminde süblimasyon gizli ısı ve buhar basınç sıcaklık derecesine göre değişimi (Kırmacı, 2008)

| Basınç (kPa) | Buharlaştırma sıcaklığı (°C) | Buharlaştırma ısı (MJ.kg ⁻¹) |
|--------------|------------------------------|--|
| 101.3 | 100 | 2.27 |
| 2.5 | 21.1 | 2.45 |
| 1.3 | 1.1 | 2.47 |
| 0.7 | 0.1 | 2.49 |
| 0.29 | -10 | 2.51 |
| 0.13 | -19.8 | 2.51 |

1.7.2. Kurutma kabini

Dondurarak kurutma işlemlerinde kurutma işleminin ve bazen de dondurma işleminin gerçekleştirildiği ünitelerdir. Vakum basıncına dayanıklı, sızdırmaz yapıya sahip ve korozyona dirençli malzemelerden imal edilmelidir. Ayrıca kabinin etrafı ısı transferini en aza indirecek şekilde yalıtımlı olmalıdır. Kurutma kabini içinde gerçekleşen süblimasyonu ve ürünün durumuna bakmak için kapağa veya yan yüzeyine gözetleme camı bulunmalıdır. Isıl farklardan meydana gelebilecek yoğunlaşmaların tahliye edilebileceği gider sistemine sahip olmalıdır.

1.7.3. Vakum pompası

Kapalı bir ortamdaki basıncı atmosfer basıncı altına düşüren cihazlardır. Dondurarak kurutma işleminde, kurutma kabini içindeki basıncı istenilen seviyelere düşürerek, kabinin içindeki donmuş materyaldeki buzun faz atlayarak (süblimleşerek) diğer parametrelerinde etkisi ile su buharına dönüşmesini sağlayan sistem elemanıdır. Bakımı kolay ve giderleri uygun olmalıdır. Su buharına dayanım derecesi yüksek olmalıdır.

Vakum Türleri:

1. Normal Vakum: Aralığı 1 mbar'dan 10⁻² mbar'a kadar olan vakum işlemleridir.

2. Yüksek Vakum: Aralığı 10^{-3} mbar ile 10^{-5} mbar arasında olan vakum işlemleridir.
3. Ultra yüksek Vakum: Aralığı 10^{-6} mbar ile 10^{-10} mbar arasında olan vakum işlemleridir.

Vakum Pompası Türleri:

1. Rotary tip vakum Pompaları:

Yağlı tip paletli vakum pompalarıdır. Normalde Rotary vakum pompalarının çalışma sıcaklıkları 85°C ile 90°C arasındadır. Rotary pompalarda en önemli kriterlerden bir tanesi pompanın su buharına olan dayanımıdır. İki farklı türü vardır.

a) Tek Kademeli Rotary Vakum Pompaları

b) Çift Kademeli Rotary Vakum Pompaları

2. Roots tip vakum pompaları:

Bu tür pompaları tek başına hiçbir zaman kullanılamaz Roots tip pompaların özellikleri taşıyıcı pompalar olmalarıdır. Pompalar mutlaka Rotary tip pompaların önüne bağlanır. Bu şekilde bağlanmaları nedeniyle vakum süresini kısaltırlar ve maksimum emiş kapasitesine çıkmayı hızlandırır. Roots tip pompanın seçiminde önemli olan nokta pompanın gücünün Rotary tip pompanın gücünden 5 kat daha fazla olması gerekliliğidir.

3. Difüzyon vakum pompaları:

Amacı yüksek vakum değerlerine çıkmaktır. Difüzyon vakum pompaları tamamen buhardan yararlanma prensibi ile çalışmaktadır. Aşırı ısınma sebebi ile alt taraftan yukarıya doğru buharlaşıp çıkmaya başlayan yağ pompanın etrafını saran su soğutma sistemin sayesinde ters tepki görerek vakum oluşturur ve bu şekilde vakum değerinin yükselmesine sebep olur. Difüzyon vakum pompaları sayesinde 10^{-7} mbar değerine ulaşabilir(www.an-ka.com,2015).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kurutma ile ilgili birçok değerli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada dondurarak kurutma, vakumla kurutma ve ısı pompasıyla kurutma ile ilgili literatür taraması verilmiştir. Literatürde dondurarak kurutma ile ilgili ulusal çalışmalar çok nadirdir.

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

Nail (1980), kurutma hücresindeki basıncın kurutmaya olan etkisini incelemiştir. Yazar, sıvı solüsyon halindeki ilacı dondurarak kurutmuştur. Cam şişeler içinde bulunan donmuş ilacı kurutma hücresi içinde bulunan ısıtıcı raf üzerindeki bir metal tepsiye yerleştirmiştir. Nail, bazı durumlarda kütle transferi hızını sınırlayan bir faktör olabileceğini belirlemiş ve ısı kaynağından süblimleşme yüzeyine olan ısı transferine karşı bir direnç olduğunu belirtmiştir. Isı transferine karşı olan bu direncin tepsi ile şişe ve tepsi ile ısıtıcı raf arasındaki hava boşluğundan olduğunu ve düşük basınç ortamında daha belirgin olduğunu bulmuştur. Bu durumu, serbest moleküllerin ısı akışının meydana geldiği basınç aralığında, gazın ısı iletkenliğinin düşmesi ile açıklamıştır. Kurutma oranlarını 1.3, 0.25 ve 0.04 Torr basınçlarda ölçerek incelemiştir. Sonuçlar, kurutma oranının azalan basınçla birlikte azaldığını göstermiştir.

Liapis (1980), kurutulmuş bölgede hem buzun süblimleşmesini hem de suyun desorpsiyonunu içeren bir model geliştirdi. Daha önce açıklanmış modellerden farklı olarak bu modelde hem süblimleşme hem de desorpsiyonun aynı anda oluşmasına

olarak tanıyan geçici bir analiz kullanıldı. Bu model, desorpsiyon-süblimleşme modeli olarak adlandırılır.

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

Pikal ve ark. (1984), dondurarak kurutma işlemindeki ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Isıtıcı raf üzerine içinde donmuş ürün bulunan birkaç şişe yerleştirilerek kurutma oranlarını ölçmüşler ve ısı akısını tahmin etmişlerdir. Çalışmaya göre kurutma hücresindeki basınç azaldıkça süblimleşme oranı düşmektedir. Ayrıca, farklı kısmen kapatılmış şişe tipleri ile ilişkili direnci analiz edilmiştir. Kütle transfer katsayıları daha önce bahsedilen çalışmada belirlenen kuru ürün dirençleri ile birleşik basit ölçümleri üzerinden belirlenmiştir. Isı transferini iletim ve radyasyon ile değerlendirmişlerdir. Denklemlerde ölçülmüş sıcaklık farklarına dayalı etkin ısı transferi katsayılarını kullanmışlardır.

Liapis ve Bruttini'nin (1994) geçici süblimleşme modeli nem salımının ilk % 60-90'luk kısmını tahmin eden hassas bir modeldir. Ancak, ikincil kurutmaya tahmin etmediği sonucuna varmışlardır.

Sadıkoğlu ve Liapis (1997), birinci kurutma safhasında bağlı suyun çıkarılmasını tanımlamak için kullanılabilecek mekanizmanın işlevsel formunu belirlemek üzere parametre tahmini ve model ayrımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sadıkoğlu ve Liapis (1998), yaptıkları deneysel çalışmada yağsız sütün erime

sıcaklığında 2 °C'lik bir artışın birinci kurutma safhasındaki kurutma süresini % 8.28 oranında azaltabileceğini göstermişlerdir.

Litvin ve ark. (1998), havuç dilimlerini, dondurarak kurutmaya, kısa süreli mikrodalga uygulaması, havalı ve vakumlu kurutma ile birleştirilerek kurutmuşlardır. Dilimleme kalınlığının ve dondurmadan önceki haşlama işleminin ürünün kurutma zamanına etkisini ölçmüşlerdir.

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

Sadıkoglu ve Özdemir (2001), dondurarak kurutma işleminin prensibini ve dikkat edilecek önemli noktaları, klasik dondurarak kurutma yöntemine göre kurutma hızını arttıran bir metot olan mikrodalga ile kurutmanın daha hızlı olduğunun sonucuna varmışlardır.

Araki ve ark. (2001), dondurarak kurutma işleminde 15 mm kalınlığında dilimlenmiş ve ezilmiş elmaları -10 ile 70 °C'lik ısıtıcı yüzey sıcaklığı ve 20 ila 30 Pa basınç aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Ezilmiş elmanın kuruma oranı dilimlenmiş elmaya göre 2.5 daha yüksek gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

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

Ceylan ve ark. (2005), ısı pompalı bir kurutma fırınının elma kurutulmasında kullanılmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, ayarlı kapak (damper) ile bağıl nemi daha düşük olan dış hava sisteme alınarak, sistem havasının neminin düşürülmesini sağlamışlardır. Elmalar; 40 °C’de, ortalama % 20 bağıl nemde, 2.8 m/s hava hızında, 4.8 (g su / g kuru madde) su oranından 0.18 (g su / g kuru madde) su oranına kadar 3.5 saatte kurutmuşlardır. Araştırmacılar, bağıl nemin düşük olduğu bölgelerde yapmış oldukları ısı pompalı kurutma sisteminin verimli bir şekilde çalışabileceğini ifade etmişlerdir. Elmaların kurutma sonrası su aktivitesi değerini 0.65 olarak bulmuşlar ve böylece elmalarda düşük su aktivitesinden dolayı bazı toksijenik küflerin faaliyetlerinin ve toksin üretiminin engellenmiş olduğunu tespit etmişlerdir.

Kırmacı (2008), bir dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerini yapmıştır. İmalatı yapılan sistemde 5 ve 7 mm’lik dilimlenmiş çilekler kurutulmuş ve deneyler sonunda, çileklerin nem oranını %91.2’den %9.1’e düşüğünü tespit etmiştir. Deney sonuçlarını matematiksel modellerle karşılaştırmıştır. Dondurarak kurutucunun ülkemiz şartlarında imal edilebileceğini göstermiştir.

Kayhan (2008), zeytin ve zeytinyağı üretiminde ortaya çıkan karasunun bu antioksidan maddelerin düşük sıcaklıkta dondurarak kurutularak kristal toz halinde elde edilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Aynı miktarda zeytin karasuyu numunesi kullanılarak farklı işlem şartlarında dondurarak kurutma denemeleri yapmıştır. Dondurarak kurutma deneme sonuçları işlem için uygun sıcaklıkların seçilmesi ve birinci ve ikinci kurutma safhaları için yeterli zamanın verilmesiyle zeytin kara suyunun dondurarak kurutulabileceğini göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

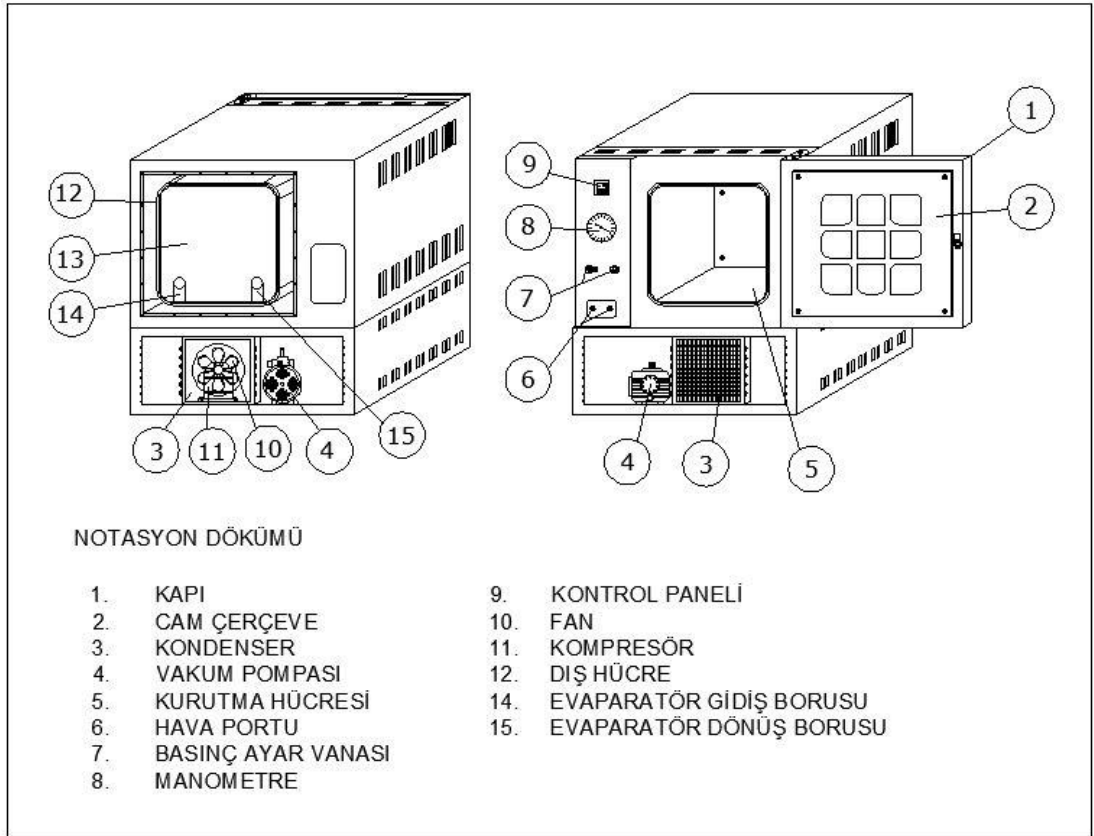
Bu çalışmada deneysel amaçlı ısı pompalı dondurarak kurutucu prototipi tasarlanıp, imalatı gerçekleştirilmiştir. Sistem üç ana bölüm olarak tasarlanmıştır. Bu ana bölümler kurutma kabini, vakum pompası ve ısı pompasından oluşmaktadır. Temin edilen ana bölümler birbirlerine uygun kesitteki bakır borular ve kablolar ile bağlanmıştır.

İmalatı gerçekleştirilen makine işlenmek istenen ürünleri dondurma kabiliyetine de sahiptir. Ancak deney sürelerinin uzamaması ve hızlı bir dondurma işleminin gerçekleştirilmesi amacı ile -40°C sıcaklığa kadar dondurma işlemi yapabilen bir derin dondurucu kullanılmıştır. Şekil 3.1'de derin dondurucu gösterilmiştir. Deneme yapılacak numuneler üzerinde -20°C ile -25°C sıcaklıklarda dondurma işlemi uygulanmıştır.

Kabin içindeki ürünün ısıtılması işlemi ısı pompasından alınan enerji ile sağlanmıştır. Yapılan deneylerden sonra kabin içerisinde mikro organizma oluşumunu önlemek veya birinci ve ikinci kurutma evreleri için ısı vermek amacı ile kabin iç sıcaklığını 200°C sıcaklığa çıkarabilen elektrikli rezistans monte edilmiştir. Şekil 3.2'de sistemin şematik çizimi ve Şekil 3.3'de ise imalatı tamamlanmış dondurarak kurutucu sistemi görülmektedir.



Şekil 3.1. Derin dondurucu



Şekil 3.2. Dondurarak kurutucu sisteminin önden ve arkadan şematik çizimi



Şekil 3.3. İmalatı tamamlanmış dondurarak kurutucu sistemi

3.1.1.Kurutma kabini

Dondurarak kurutma sisteminde kurutma kabini, ürünün kurutulduğu ve diğer ana elemanların ve aksesuarların monte edildiği taşıyıcı şase görevini görmektedir. Kurutma kabini dış kaplama, kapak, kurutma hücresi, dış hücre, tesisat hücresi ve cihaz hücresi kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Kurutma kabini

3.1.1.1.Dış kaplama

0.5 mm kalınlığa sahip sacdan talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri ile şekillendirilerek dayanıklı olarak imal edilmiştir. Dış kaplama elektrostatik boya ile boyanmıştır.

3.1.1.2.Kapak

Kurutma hücresini tam karşılayacak şekilde tasarlanıp, kurutma hücresinde gerçekleşen olayları gözlemlemek için 4 mm kalınlığında çift camlı çerçeve monte edilmiştir (Şekil 3.5.). Kapağın dış yüzeyi ise cama gelebilecek darbeleri önlemek amacı ile petek şeklinde muhafazalar yapıldı.



Şekil 3.5. Kurutma kabini kapağı

Cam çerçeve ile kapak şasesi arasına 4 adet spiral yay konularak sıkışma ve zorlanmalarda meydana gelebilecek çatlama ve kırılmalara karşı tedbir alındı. Kabin gövdesine 2 adet menteşe ile monte edilerek ve 1 adet kilit vasıtası ile gövdeye baskı yapılarak kapağın tam olarak kapanması sağlanmıştır. Gövdenin kapağı karşılayan kısımlarına tüm çerçeve boyunca kauçuk conta çekilerek sızdırmazlık sağlanmıştır.

3.1.1.3. Kurutma hücresi

Kurutulacak numunenin yerleştirildiği kısımdır (Şekil 3.6.). Hacmi 40 litredir. Paslanmaz çelik sac U biçiminde bükülerek imal edilmiştir. Dış hücreye cıvata somun bağlantısı ile sabitlenmiştir. Arka yüzeyine sirkülasyon için bir adet fan yuvası bırakılmıştır. Ayrıca numunelerin dizileceği tepsi ve tepsinin oturduğu sehpa da portatif olarak kurutma hücresinin içindedir.



Şekil 3.6. Kurutma hücresi

3.1.1.4. Dış hücre

Kurutma hücresinin, evaporatörün, sezici uçların, rezistansın ve vakum uçlarının monte edildiği kısımdır. Paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Dış yüzeyi taş yünü ile yalıtılarak ısı kayıpları minimize edilmiştir.(Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.)



Şekil 3.7. Dış hücre arkadan görünüş



Şekil 3.8. Dış hücre önden görünüş

3.1.1.5. Tesisat hücresi

Kabinin sol tarafına bırakılan bu kısımda ayar üniteleri, elektrik tesisatı, vakum ayar vanaları ve vakum boruları, portlar, manometre ve kontrol paneli bulunmaktadır (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9. Tesisat hücresi

3.1.1.6. Cihaz hücresi

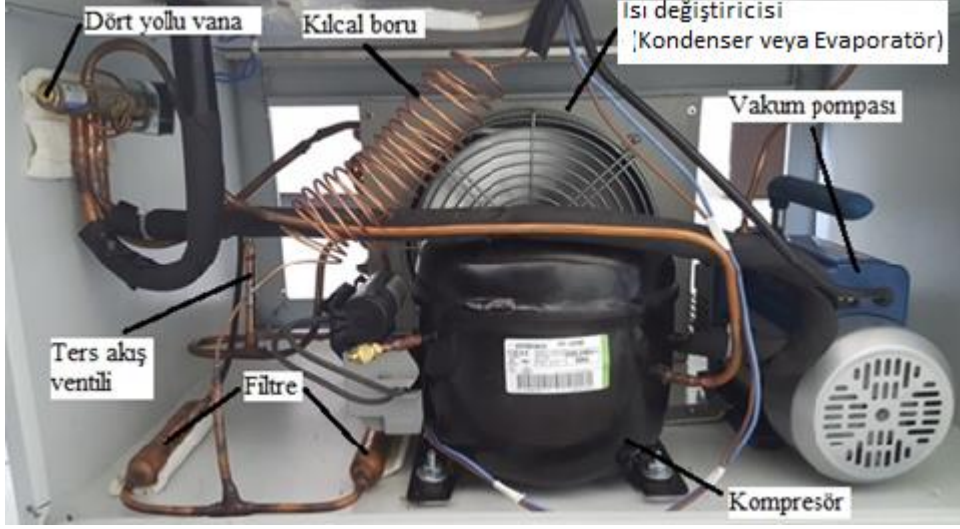
Kabinin alt tarafına bırakılan hücredir. Vakum pompası ve ısı pompası grubunun monte edildiği kısımdır. Ön ve arka tarafı eğik kanatlı panjurlar ile kapatılmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Cihaz hücresi

3.1.2. Isı pompası

Dondurarak kurutma sisteminin ısı gereksinimlerini karşılayan ana elemandır. Isı pompasının özelliği ihtiyaç halinde çevrim akışını ters çevirerek hem ısıtma hem soğutma yapabilmesidir. Sistemde hava kaynaklı bir ısı pompası kullanılmıştır. Çevrimde R134a soğutucu akışkan kullanılmıştır. Isı pompasını oluşturan elemanlar kompresör, ısı değiştiricileri (kondenser ve evaporatör), kısılma vanası ve 4 yollu vanadır. Isı pompasının ısıtma veya soğutma konumunda çalışması, kontrol paneli ile sağlanmıştır. Şekil 3.11’de montajı tamamlanmış ısı pompası görülmektedir.



Şekil 3.11. Montajı tamamlanmış ısı pompası

3.1.2.1. Kompresör

Sistemdeki akışkanın basıncını ve sıcaklığını arttırarak dolaşımını sağlayan elemandır. Sistemde kullanılan kompresör Embraco marka FFI 12 HBK modelinde hermetik bir kompresördür (Şekil 3.12.). Kompresörün teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.12. Kompresör(www.cantas.com,2015)

Kompresör Teknik Özellikleri:

- Üretim Yeri → Brezilya
- Marka → Embraco
- Kompresör Tipi → Hermetik Pistonlu
- Çalışma Rejimi → HBP (+7,2°C / +54,4°C)

- Kompresör Gücü → 3/8Hp
- Elektrik Beslemesi →220-240V
- Soğutucu Akışkan →R134a
- Soğutma Kapasitesi →1.316 Watt
- Motor Tipi →1 Faz - RSIR
- Kompresör Modeli → FFI 12HBK
- Süpürme Hacmi →11,14cm³/rev
- Frekans → 50Hz
- Emiş Hattı →5/16"
- Basma Hattı →1/4"

3.1.2.2. Kondenser / Evaporatör

Soğutma modunda, kompresörden gelen kızgın buhar halindeki soğutucu akışkanın doymuş sıvı hale getiren (Kondenser) veya ısıtma modunda soğutucu akışkanı ortamdan ısı çekerek buharlaştıran (Evaporatör) elemandır (Şekil 3.13.). Sistemde kullandığımız ısı değiştiricisi kanatçıklı yapıya sahip olup havayı zorlanmış konveksiyonla ısı transferi yapması için bir aksiyal fan ile emiş yaptırılmıştır (Şekil 3.14.). Kondenser/Evaporatör teknik özellikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.13.Kondenser/Evaporatör



Şekil 3.14. Kondenser/Evaporatör fanı

Kondenser Teknik Özellikleri:

- Kondenser Markası → Karyer
- Kondenser Modeli → FrigoCraft Kondenser - 04 (B-20927)
- Kondenser Kapasitesi → 1.345Watt (Dt=15 °C)
- Kondenser Hatve Aralığı → 2,50mm
- Kondenser Yüzey Alanı → 3,89m²
- Hava Debisi → 435m³/h
- Fan Motoru Markası → FrigoCraft
- Fan Motoru Modeli → FrigoCraft FCSMQ 16-26 16W Fan Motoru
- Fan Motoru Deviri → 4 Kutup ~1.400 devir RPM
- Fan Kanadı → Q Fan Kanat (Emme) 250mm - 28°
- Fan Motoru (Miktar X Çap) → 1x250
- Fan Motoru Çektiği Güç → 1x0,600 kW
- Fan Motoru Elektrik Besl. → 220 - 230 / 1 / 50V/Ph/Hz

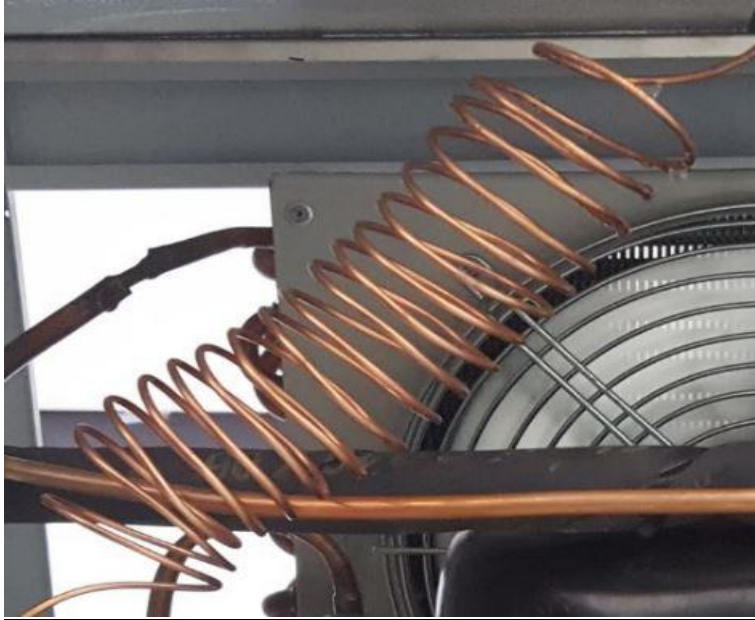
Soğutma durumunda bulunduğu ortamdan sabit basınçta ısıyı çekerek soğutucu akışkanı doymuş buhar haline getirerek ortamı soğutan veya ısıtma durumunda soğutucu akışkanı yoğuşturarak ortamı ısıtan elemandır. Kabin içinde kullandığımız ısı değiştiricisi borulu tip düz eşanjör olup kapasitesi 1065 Watt olarak 3/8 inç bakır borular ile imal edilmiştir (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Borulu tip eşanjör

3.1.2.3. Genişleme vanası

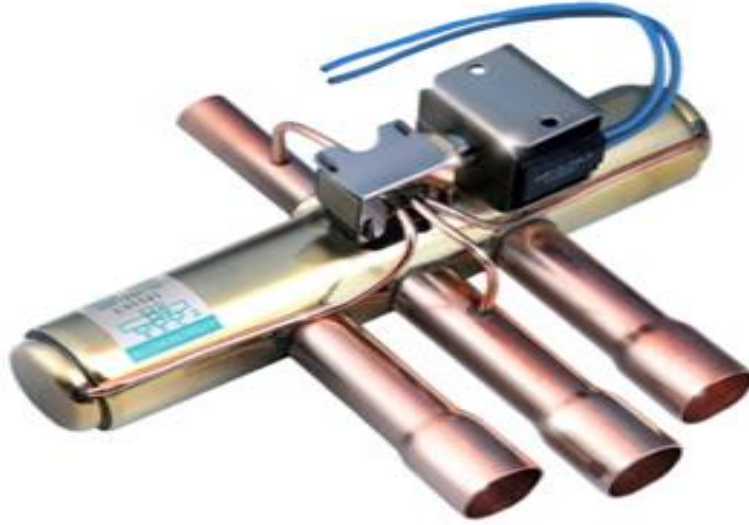
İzentalp işlemle soğutucu akışkanın basıncını buharlaştırıcı basıncına düşüren elemandır. Sistemde basıncı düşürmek için kılcal boru kullanılmıştır (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Genişleme vanası olarak kılcal boru

3.1.2.4. 4 yollu vana

Sistemde dolaşan soğutucu akışkanın akış yönünü değiştirerek evaporatör ve kondenserin sistemde üstlendikleri rolü değiştirerek soğutma ve ısıtma yapılacak ortamları değiştiren elemandır (Şekil 3.17.). Sistemde kullanılan 4 yollu vananın teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.17. 4 yollu vana

4 Yollu Vana Teknik Özellikleri:

- Üretim Yeri → Çin
- Marka → Sanhua
- Vana Tipi → SHF Tipi 4 Yollu Vana
- Vana Gövdesi Ø → 8,0 mm
- Kapasite → 1,87 (USg/M)
- Bağlantı ØD → 5/16"
- Bağlantı ØE/S/C → 3/8"

3.1.3 Vakum pompası

Kurutma hücresindeki basıncı istenilen seviyelere getirmek için denemelerdeki vakum değerlerini karşılayacak ve su buharına dirençli uygun kapasitedeki Value marka 115 n modelinde bir vakum pompası seçilmiştir (Şekil 3.18.). Kurutma hücresindeki vakum basıncı ayarlanması pnömatik olarak gerçekleştirilmiştir. Sistemde kullanılan vakum pompasının kapasitesi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.18. Vakum Pompa

Vakum Pompası Teknik Özellikleri:

- Üretim Yeri → Çin
- Marka → Value
- Kademe → Tek Kademe
- Elektrik Beslemesi → 220V
- Frekans → 50-60Hz
- Akış Hızı → 3.06 m³/h - 51 Lt/min
- Kısmi Basınç → 2 Pa
- Toplam Basınç → 150 Micron
- Motor Gücü → 1/4 HP
- Bağlantı Ölçüsü → 1/4" Vanalı
- Yağ Kapasitesi → 250 ml
- Ölçüler → 290x124x224 mm
- Ağırlık → 6.6 kg

3.1.5. Ölçme cihazları

3.1.5.1. Sıcaklık sensörleri

Sıcaklık sensörleri kurutma hücresinin içindeki sıcaklığı algılayıp kontrol paneline veya data logger'e aktaran kalibrasyonu yapılmış sıcaklık ölçerlerdir (Şekil 3.19.). Çalışmada kullanılan sensörün ölçüm hassasiyeti $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Ayrıca T-tipi ısı çiftleri, kabin iç sıcaklığını ve ürün sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.19. Sıcaklık sensörü (Termokupl)



Şekil 3.20. T tipi ısı çiftleri

3.1.5.2. Vakum manometresi

Kurutma hücresindeki vakum basıncını gösteren kalibrasyonu yapılmış göstergedir. Sistemde Pakkens marka gliserinli manometre kullanıldı. Kullanılan manometrenin hassasiyeti ± 1 mmHg'dır (Şekil 3.21.).



Şekil 3.21. Vakum manometresi

3.1.5.3. Kontrol paneli

Sistemin sıcaklık ve zaman parametrelerini görüp, denetleyip müdahale edebileceğimiz elektronik kumandalardır. Prosesi kontrol ettiğimiz cihazlardır. Sistemimizde ORDEL marka OC440 modeli kullanılmıştır (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Kontrol paneli

Kontrol Paneli Teknik Özellikleri:

- Besleme Gerilimi → 100 – 240 Vac/dc: +%10 - %15
- Güç Tüketimi → 4W,6VA
- Analog Giriş (AI) → Termokupl(B,E,J,K,L,N,R,S,T,U),Rezistans (Pt100)
- Analog Giriş Empedansı → Termokupl: 10MΩ
- Analog Çıkış (OU) → Akım:0/4-20mA,20-4/0mA (RL≤500Ω), Gerilim: 0/2-10 V, 10-2/0V (RL ≥ 1MΩ)
- Dijital Çıkışlar (DO1,DO2) → NO Kontak: 250 Vac 3A, NC Kontak: 250 Vac 3A, Pulse: 24 Vdc 20mA
- Kontak Ömrü → Yüksüz: 10.000.000 anahtarlama, 250V 3A Rezistif Yükte: 100.000 anahtarlama
- Hafıza → 100 yıl, 100.000 yenileme
- Doğruluk → +/- %0,2
- Örnekleme Zamanı → 100ms
- Ortam Sıcaklığı → Çalışma: -10 +55°C, Depolama: -20 +65°C
- Koruma Sınıfı → IP20
- Ölçüler → Genişlik: 48mm, Yükseklik: 48mm, Derinlik: 108mm
- Pano Kesim Ölçüleri → 45+/- 0.5mm x 45+/- 0.5mm
- Ağırlık → 154 gr

3.1.5.4. Elektronik terazi

Kurutma işleminden önce başlangıç ağırlığını ve kurutma işlemi sonunda kurutulmuş olan ürün örneklerinin yüzde kütle değişimlerini belirlemek amacıyla hassas ölçüm yapabilen terazi kullanılmıştır (Şekil 3.23.).Hassasiyeti ± 1 gram'dır.



Şekil 3.23. Elektronik terazi

3.1.5.5. Data logger

Gösterme ve tarama aralıklarını programlama olanağı sağlayan, 16 bit çözünürlükte yüksek okuma hassasiyeti bulunan ve giriş kanal sayısı 8 adet olan data logger kullanılmıştır (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Data logger

3.1.5.6. Elektrik sayacı

Yapılan deneylerin sürelerine bağlı olarak tükettikleri elektrik enerjisinin ölçümünü gerçekleştirmek amacı ile Makel marka bir monofaze sayaç kullanılmıştır (Şekil 3.25.).



Şekil 3.25. Elektrik sayacı

3.2. Yöntem

Montaj işlemi tamamlandıktan sonra imalatı gerçekleştirilen dondurarak kurutucuda ürünlerin kurutulmasında aşağıdaki aşamalar takip edilmiştir;

- 1. Ürünün hazırlanması ve dondurulması:** Seçilen numuneler yıkayıp temizlendikten sonra ürün tipine göre uygun ölçülerde dilimlenip kurutma tepsisine yerleştirilerek derin dondurucuya konulur. Derin dondurucuda -20°C ile -25°C sıcaklık arasında dondurma işlemi uygulanır. Kurutulacak ürünler için kurutma zaman dilimi belirlenir.
- 2. Kurutma kabininin soğutulması:** Kurutma işlemine başlamadan önce dondurarak kurutucunun kurutma hücresinin sıcaklığı -15°C ile 0°C derece arasında bir değere düşürülür. Bu sıcaklık değerine düşürme nedenimiz, ürünü hücre içine aldığımızda sıcaklık farkından dolayı ürün yüzeyinde oluşabilecek yoğuşmaların önüne geçmektir.
- 3. Ürünün kurutulması (1. kurutma evresi):** İstenilen düzeyde dondurulan ürün derin dondurucudan çıkarılarak, hızlı bir şekilde elektronik terazide tartılıp kurutma hücreğine yerleştirilir. Vakum pompası çalıştırılarak vakum ayar vanası ile basınç istenilen değere getirilir. Vakum pompası kurutma işlemi bitene kadar çalıştırılır.

4. **Ürünün kurutulması (2. kurutma evresi):** Kontrol panelinde sıcaklık ve zaman aralığı girilerek kurutma hücresi sıcaklığı kontrollü bir şekilde ısı pompasının enerji sağlaması ile yavaş yavaş yükseltilir. Bu zaman dilimlerinde gözetleme camından ürün kontrol edilir.
5. **Kurutma sonu:** Kurutma işlemi sonunda Kurutma hücresi basıncı atmosfer basıncı şartlarına getirilir ve kabin kapağı açılır. Ürün elektronik terazide tartılarak kütleli olarak gösterdiği değişimler gözlenir. Ürün paketlenir. Kabin kapağı kapatılarak kurutma hücresi sıcaklığı rezistansın enerji vermesi ile 200°C sıcaklığa çıkarılarak hücre içerisinde mikro organizmaların üremesi önlenir

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

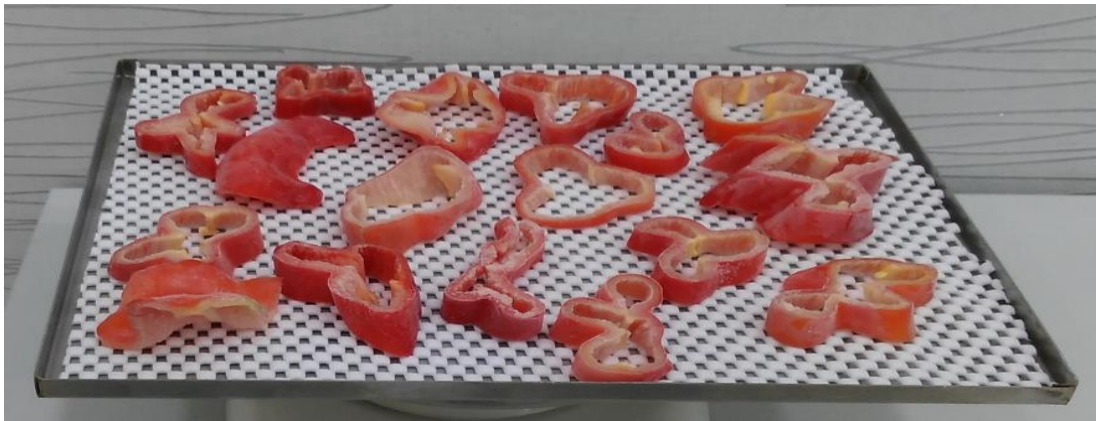
Dondurarak kurutucu sisteminde kırmızıbiber, elma, patlıcan ve muz kurutulmaya çalışılmıştır.

4.1. Kırmızıbiber Kurutma

Kırmızıbiber kurutma ile ilgili iki adet deney yapılmıştır. Şekil 4.1’de kurutma öncesi kırmızı biberler gösterilmiştir. Kırmızıbiber kurutma ile ilgili ilk deneyimiz 29 Ağustos 2015 tarihinde yapılmıştır. Çalışmaya ait veriler çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. 29.08.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|--------------|
| Ürün Adı | Kırmızıbiber |
| İlk Ağırlık | 108 gr |
| Son Ağırlık | 58 gr |
| Kurutma Süresi | 8 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 0°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 25°C |
| Başlangıç Basıncı | -650 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -650 mmHg |



Şekil 4.1. Kurutmaya hazırlanan donmuş kırmızıbiber numuneleri

Kırmızıbiber kurutma deneyi saat 12:30’da başlatılmış ve 20:30’da sonlandırılmıştır. Deney sabit basınç altında yapılarak kurutma hücresi sıcaklığı

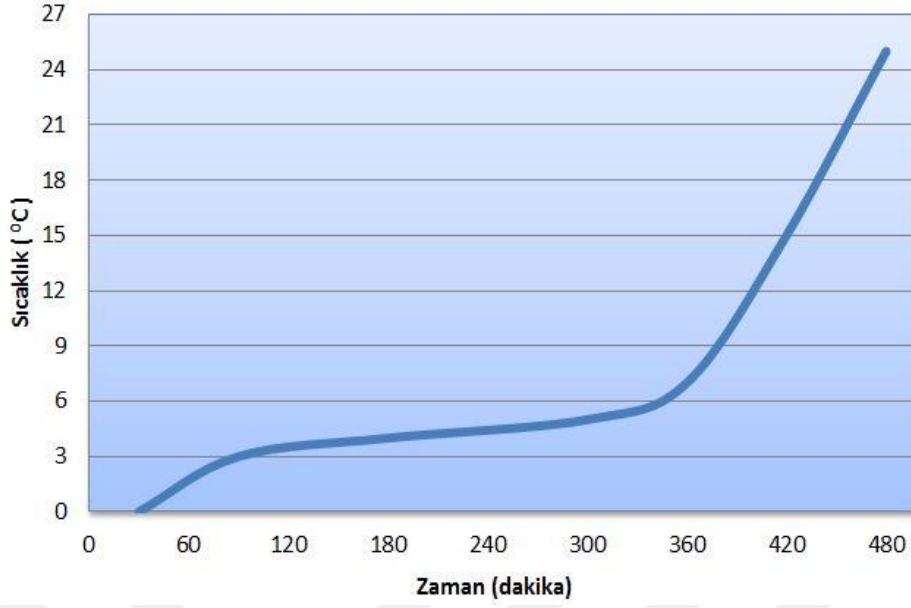
kademeli şekilde yavaş yavaş arttırılmıştır. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun yarısına yakın bir kısmı süblimasyonla uzaklaştırılmıştır. Şekil 4.2’de kurutma işleminden çıkarılmış kırmızıbiber numuneleri görülmektedir. Kırmızıbiberin kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.3’de de kurutma hücresinin sıcaklığının zamana göre değişim grafiği gösterilmektedir.

Çizelge 4. 2. 29.08.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma Hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 0 | 30 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 3 | 60 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | 4 | 90 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 5 | 120 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 5. Aşama | 7 | 60 | -650 |
| İkinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 15 | 60 | -650 |
| İkinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 25 | 60 | -650 |



Şekil 4.2. Kurutma işleminden çıkarılmış kırmızıbiber numuneleri



Şekil 4. 3. Kırmızıbiber kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1)

Kırmızıbiber kurutma ile ilgili ikinci deney 1 Eylül 2015 tarihinde yapılmıştır. Çalışmaya ait veriler çizelge 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.4’te deney esnasında kırmızıbiber numunelerinin gözetleme camından görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 4. 3. 01.09.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|--------------|
| Ürün Adı | Kırmızıbiber |
| İlk Ağırlık | 100 gr |
| Son Ağırlık | 42 gr |
| Kurutma Süresi | 10.5 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 0°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 35°C |
| Başlangıç Basıncı | -650 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -650 mmHg |

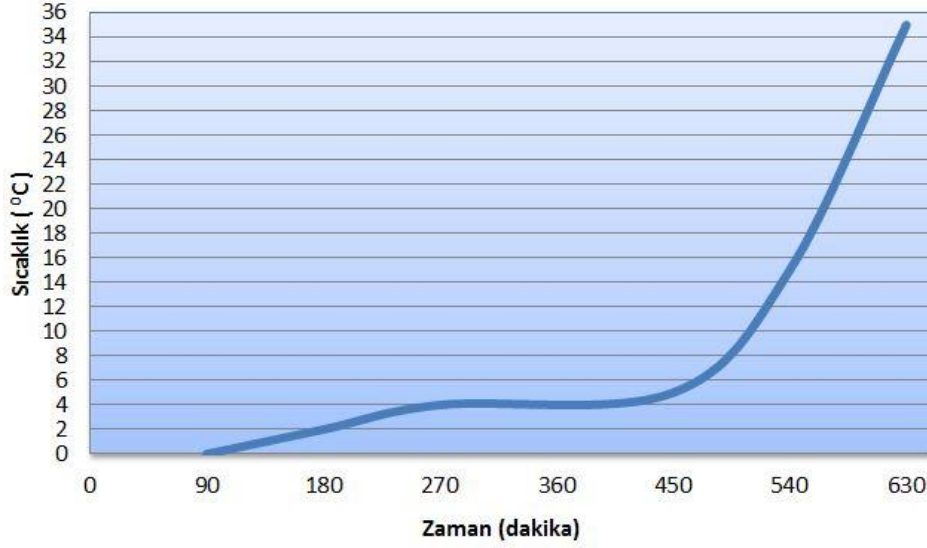


Şekil 4. 4. Deney esnasında kırmızıbiber numuneleri

Kırmızıbiber kurutma deneyi saat 12:15’de başlatılmış ve 22:45’de sonlandırılmıştır. Deney sabit basınç altında yapıp kurutma hücresi sıcaklığı kademeli şekilde yavaş yavaş arttırılmıştır. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun yarısından fazla bir kısmı süblimasyonla uzaklaştırılmıştır. Kırmızı biberin kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.5’de de kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir.

Çizelge 4. 4. 01.09.2015 tarihinde yapılan kırmızıbiber kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma Hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 0 | 90 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 2 | 90 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | 4 | 90 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 5 | 180 | -650 |
| İkinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 15 | 90 | -650 |
| İkinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 35 | 90 | -650 |



Şekil 4. 5. Kırmızıbiber kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2)

Kırmızıbiber için yaptığımız deneyler neticesinde imal edilen sistemin çalıştığı gözlenmiştir. 1. Deneyde 8 saatlik sürenin sonunda % 46.3 kurutma sağlanmıştır. Kurutma süresi 10.5 saate çıkarıldığı 2. Deneyde ise toplam kütlede % 58 nem uzaklaştırılmıştır. Kurutma evrelerinin süreleri uzatılarak ve sıcaklıklar yükseltilerek daha iyi neticeler alınabileceği görülmüştür.

4.2. Elma Kurutma

Elma kurutmada iki adet deney yapılmıştır. Elma kurutma ile ilgili ilk deney 11 Aralık 2015 tarihinde yapılmıştır. Küp şeklinde dilimlenip, dondurma işlemini tamamladığımız elmaları, kurutma hücre sıcaklığını 0°C dereceye getirildikten sonra derin dondurucudan çıkarıp hızlı bir şekilde tartılıp kurutma hücresine yerleştirilmiştir. Vakum pompası çalıştırılarak basınç - 640 mmHg seviyelerine getirilmiştir. Deneye ait veriler çizelge 4.5’de verilmiştir.

Elma kurutma işlemi saat 08:30’da başlatılmış ve 18:30’de sonlandırılmıştır. Deney sabit basınç altında yapılarak kurutma hücresi sıcaklığı kademeli şekilde artırılmıştır. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun % 28.2 kısmı uzaklaştırılmıştır. Ancak su kaybının yeterli olmadığı görülmüştür. Şekil 4.7’de kurutma işleminde çıkarılmış elma numuneleri görülmektedir. Elma kurutma işlem şartlarına ait bilgiler

çizelge 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'de de kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir.

Çizelge 4. 5. 11.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Ürün Adı | Elma |
| İlk Ağırlık | 202 gr |
| Son Ağırlık | 145 gr |
| Kurutma Süresi | 10 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 0°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 30°C |
| Başlangıç Basıncı | -640 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -640 mmHg |

Çizelge 4. 6. 11.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 0 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 5 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | 10 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 15 | 120 | -640 |
| İkinci Kurutma Evresi | 30 | 120 | -640 |



Şekil 4. 6. Elma kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1)



Şekil 4.7. Kurutma işleminden çıkarılmış elma numuneleri

Elma kurutma ile ilgili ikinci deney 13 Aralık 2015 tarihinde yapılmıştır. Deneye ait veriler çizelge 4.7’de verilmiştir. Bir önceki deneyde yeterli su kaybı meydana gelmediğinden sıcaklık ve zaman parametreleri değiştirilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

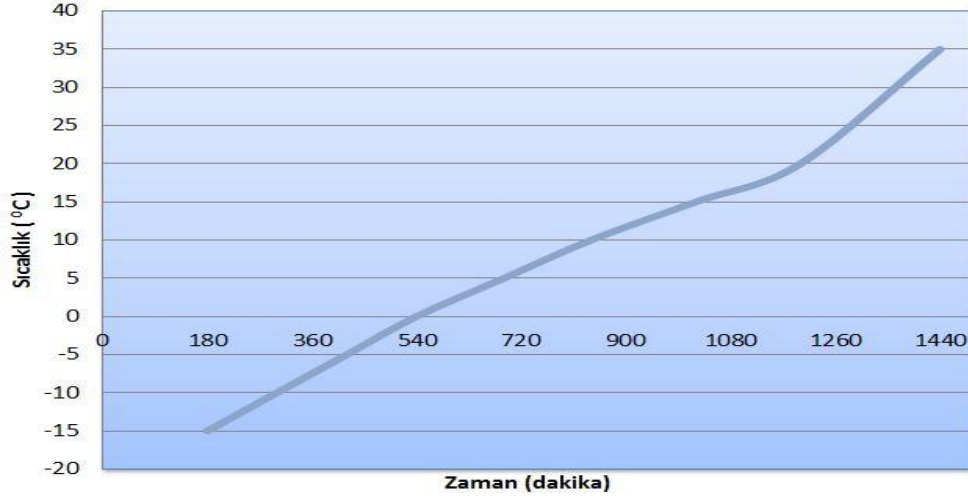
Çizelge 4. 7. 13.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Ürün Adı | Elma |
| İlk Ağırlık | 110 gr |
| Son Ağırlık | 33 gr |
| Kurutma Süresi | 24 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | -15°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 35°C |
| Başlangıç Basıncı | -640 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -400 mmHg |

Elma kurutma işlemi saat 12:00’da başlatılmış ve ertesi gün 12:00’da sonlandırılmıştır. Kurutma işlemi sonunda elmada kütleli olarak % 70 azalma olmuştur. Elma kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’de de kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi kurutma işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Çizelge 4. 8. 13.12.2015 tarihinde yapılan elma kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | -15 | 180 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | -10 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | -5 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 0 | 120 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 5. Aşama | 5 | 150 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 6. Aşama | 10 | 150 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 7. Aşama | 15 | 180 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 8. Aşama | 20 | 180 | -640 |
| İkinci Kurutma Evresi | 35 | 240 | -400 |



Şekil 4. 8. Elma kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2)



Şekil 4.9. Kurutma işleminden çıkarılmış elma numuneleri

4.3. Patlıcan Kurutma

Patlıcan kurutma ile ilgili olarak da iki adet deney yapılmıştır. Patlıcan kurutma ile ilgili ilk deneyimiz 16 Aralık 2015 tarihinde yapılmıştır. Patlıcanları küp şeklinde dilimleyip, dondurduktan sonra kurutma hücre sıcaklığını 0°C dereceye getirip, derin dondurucudan çıkarıp hızlı bir şekilde tartıp kurutma hücresine yerleştirilmiştir. Vakum pompası çalıştırıp kabin basıncı - 640 mmHg değerine getirilmiştir. Deneye ait veriler çizelge 4.9’da verilmiştir.

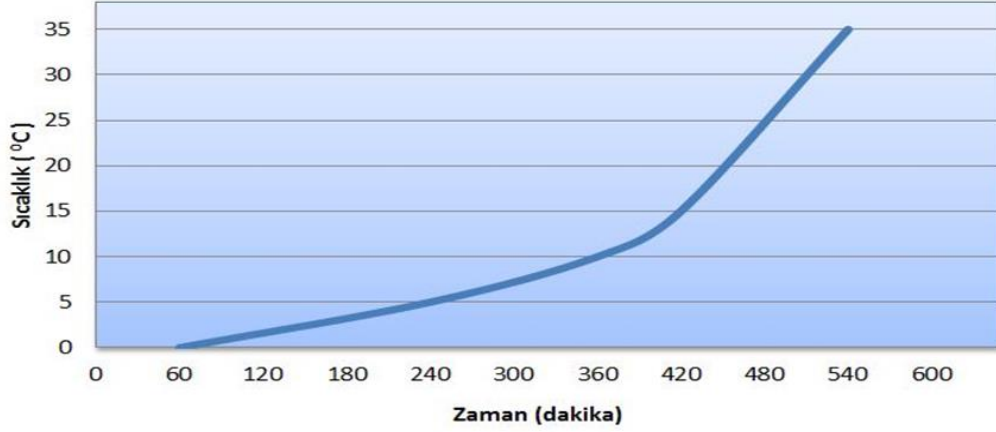
Çizelge 4. 9. 16.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Ürün Adı | Patlıcan |
| İlk Ağırlık | 100 gr |
| Son Ağırlık | 57,7 gr |
| Kurutma Süresi | 9 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 0°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 35°C |
| Başlangıç Basıncı | -640 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -640 mmHg |

Patlıcan kurutma işlemi saat 10:30’da başlatılmış 19:30’da sonlandırılmıştır. Deney sabit basınç altında yapıp kurutma hücresi sıcaklığı kademeli şekilde arttırılmıştır. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun % 42.3 kısmı uzaklaştırılmıştır. Patlıcan kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.10’da verilmiştir. Şekil 4.10’da da kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir. Kısmi olarak başarılı bir şekilde kurutulmuş patlıcan numuneleri Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. 16.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | 0 | 60 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | 5 | 180 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | 10 | 120 | -650 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 15 | 60 | -650 |
| İkinci Kurutma Evresi | 35 | 120 | -650 |



Şekil 4. 10. Patlıcan kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 1)



Şekil 4.11. Kurutma işleminden çıkarılmış patlıcan numuneleri

Patlıcan kurutmanın ikinci deneyi 18 Aralık 2015 tarihinde yapılmıştır. Bir önceki deneyde yetersiz bulduğumuz kurutmayı iyileştirmek için sıcaklık ve zaman parametrelerini değiştirilerek deney yapılmıştır. Çalışmaya ait veriler çizelge 4.11’de verilmiştir.

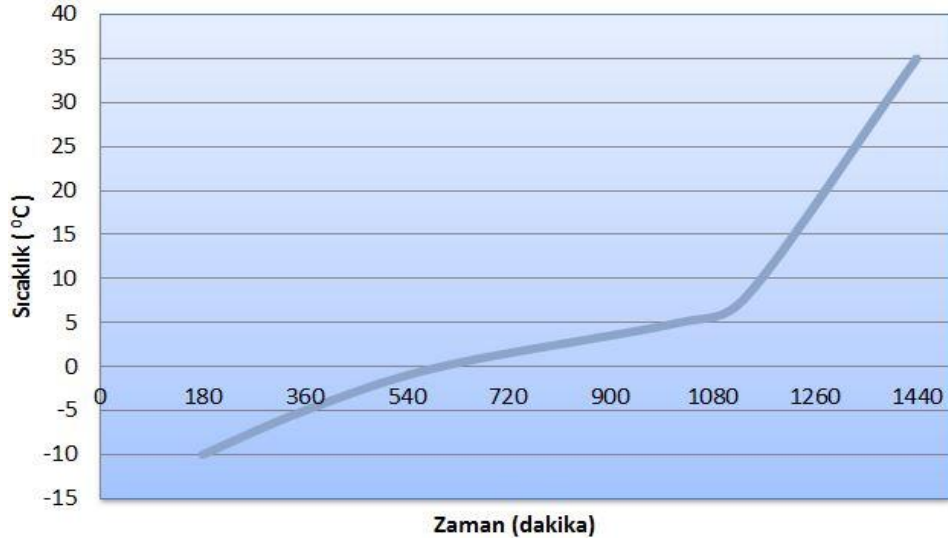
Çizelge 4. 11. 18.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma deneyine ait veriler

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Ürün Adı | Patlıcan |
| İlk Ağırlık | 120 gr |
| Son Ağırlık | 45 gr |
| Kurutma Süresi | 24 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | -10°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 35°C |
| Başlangıç Basıncı | -640 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -400 mmHg |

Patlıcan kurutma işlemi saat 13:30'da başlatılmış ve ertesi gün 13:30'da sonlandırılmıştır. Deney birinci kurutma evresinde sabit basınç altında yapıp kurutma hücresi sıcaklığı kademeli şekilde arttırılmıştır. İkinci kurutma evresinde kabin basıncı -400 mmHg olarak yükseltilmiştir. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun % 62.3 kısmı süblimasyonla uzaklaştırılmıştır. Patlıcan kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12'de de kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.13'te başarılı bir şekilde kurutulmuş patlıcan numuneleri görülmektedir.

Çizelge 4.12. 18.12.2015 tarihinde yapılan patlıcan kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | -10 | 180 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | -5 | 180 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | 0 | 240 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 5 | 420 | -640 |
| Birinci Kurutma Evresi 5. Aşama | 8 | 120 | -640 |
| İkinci Kurutma Evresi | 35 | 300 | -400 |



Şekil 4. 12. Patlıcan kurutmada kurutma hücresinde sıcaklığın zamanla değişimi (Deney 2)



Şekil 4.13. Kurutma işleminden çıkarılmış patlıcan numuneleri

4.4. Muz Kurutma

Muz kurutma ile ilgili olarak bir adet deney yapılmıştır. Kurutma öncesi kurutma hücre sıcaklığı 0 °C dereceye getirilmiştir. Muzlar dondurulduktan sonra derin dondurucudan çıkarıp hızlı bir şekilde tartıp kurutma hücresine yerleştirilmiştir. Vakum pompası çalıştırıp kabin basıncı - 640 mmHg değerine getirilmiştir. Deneye ait veriler çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4. 13. Muz kurutma deneyine ait veriler

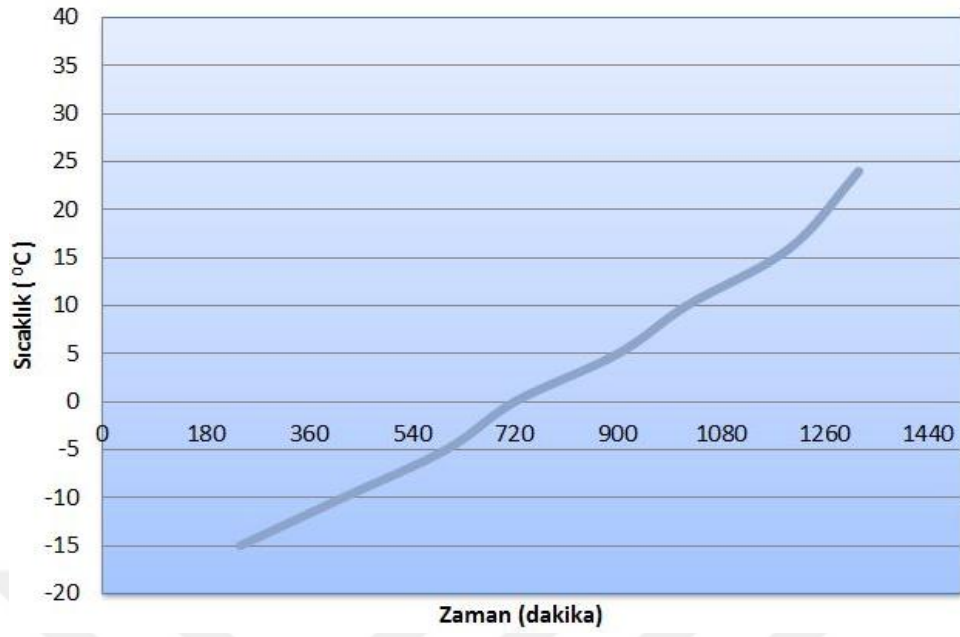
| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Ürün Adı | Muz |
| İlk Ağırlık | 218.5 gr |
| Son Ağırlık | 66.5 gr |
| Kurutma Süresi | 22 Saat |
| Başlangıç Kurutma Hücresi Sıcaklığı | -15°C |
| Bitiş Kurutma Hücresi Sıcaklığı | 24°C |
| Başlangıç Basıncı | -640 mmHg |
| Bitiş Basıncı | -695 mmHg |

Muz kurutma işlemi saat 10:30'da başlatılmış ve ertesi gün 08:30'da sonlandırılmıştır. Deney sabit basınç altında yapılmıştır. Kurutma hücresi sıcaklığı kademeli şekilde arttırılmıştır. Kütleli olarak ihtiva ettiği suyun % 70 yakın kısmı süblimasyonla uzaklaştırılmıştır. Muz kurutma işlem şartlarına ait bilgiler çizelge 4.14'de verilmiştir.

Şekil 4.14'de de kurutma hücresinin sıcaklığının değişim grafiği gösterilmektedir. Şekil 4.15'de kurutma işlemine başlanmadan önceki muz numuneler, Şekil 4.16'da kurutma esnasındaki muz numuneleri ve Şekil 4.17'te başarılı bir şekilde kurutulmuş muz numuneleri görülmektedir.

Çizelge 4. 14. Muz kurutma işlem şartlarına ait veriler

| Dondurarak Kurutma Evreleri | Kurutma hücresi Sıcaklığı (°C) | Zaman (Dakika) | Kurutma Hücresi Basıncı (Torr) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| Birinci Kurutma Evresi 1. Aşama | -15 | 240 | -690 |
| Birinci Kurutma Evresi 2. Aşama | -10 | 180 | -690 |
| Birinci Kurutma Evresi 3. Aşama | -5 | 180 | -690 |
| Birinci Kurutma Evresi 4. Aşama | 0 | 120 | -690 |
| Birinci Kurutma Evresi 5. Aşama | 5 | 180 | -690 |
| Birinci Kurutma Evresi 6. Aşama | 10 | 120 | -690 |
| İkinci Kurutma Evresi 1. aşama | 16 | 180 | -690 |
| İkinci Kurutma Evresi 2. aşama | 24 | 120 | -690 |



Şekil 4. 14. Muz kurutmada kurutma hücreinde sıcaklığın zamanla değişimi



Şekil 4.15. Kurutmaya hazırlanan donmuş muz numuneleri



Şekil 4. 16. Deney esnasında muz numuneleri



Şekil 4.17. Kurutma işleminden çıkarılmış muz numuneleri

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Ülkemizde dondurarak kurutma çok bilinmeyen ve yaygın olamayan bir kurutma yöntemidir. Yaygın olmadığından ötürü ticari olarak gıda ve diğer sektörlerde yeterince yer bulamamıştır. Ülkemizde kullanıldığı alanlarda ise dondurarak kurutma sistemleri yurt dışından ithal edilmekte veya kurutulacak ürünler yurtdışına yollanıp kurutulduktan sonra tekrar yurda geri getirilmektedir. Dondurarak kurutma işlemi diğer yöntemlere göre biraz daha masraflı ve kontrol gerektiren bir yöntem olduğu göze çarpmaktadır.

Bu çalışmada, bir kurutma kabini, ısı pompası ve vakum pompası gibi ana elemanlar kullanılarak bir ısı pompalı dondurarak kurutucu sistemi tasarlanıp imal edilmiştir. Kurutma kabini haricindeki diğer ana ekipman ve elemanlar yabancı menşeli olup ithal edilen ürünlerdir. Tedarik ve servis bakımından sıkıntı oluşmadığı gözlenmiştir. Bazı sebze ve meyvelerin kurutulması ile ilgili deneyler yapılarak sistemin çalıştığı görülmüştür. Çizelge 5.1'de yapılan kurutma deneyleri ile ilgili bilgiler özetlenmiştir.

Çizelge 5. 1. Kurutma işlemlerine ait bilgiler

| Ürün | Başlangıç Numune Ağırlığı (gram) | Kurutma Sonu Numune Ağırlığı (gram) | Kaybolan Kütle Oranı (%) | Kurutma İçin Harcanan Enerji (Watt) | Kurutma Hücresi Başlangıç Sıcaklığı (°C) | Kurutma Hücresi Bitiş Sıcaklığı (°C) | Kurutma Hücresi Başlangıç Basıncı (Torr) | Kurutma Hücresi Bitiş Basıncı (Torr) | Kurutma Süresi (saat) |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------|
| Kırmızıbiber 1 | 108 | 58 | 46.3 | 2076 | 0 | 25 | -650 | -650 | 8 |
| Kırmızıbiber 2 | 100 | 42 | 58.0 | 2471 | 0 | 35 | -650 | -650 | 10.5 |
| Elma 1 | 202 | 145 | 28.2 | 2589 | 0 | 30 | -640 | -640 | 10 |
| Elma 2 | 110 | 33 | 70.0 | 10000 | -15 | 35 | -640 | -400 | 24 |
| Patlıcan 1 | 100 | 57.7 | 42.3 | 2456 | 0 | 35 | -640 | -640 | 9 |
| Patlıcan 2 | 120 | 45 | 62.5 | 10562 | -10 | 35 | -640 | -400 | 24 |
| Muz | 218.5 | 66.5 | 69.6 | 9033 | -15 | 24 | -690 | -690 | 22 |

Gerçekleştirilen deneyler neticesinde kurutulacak olan ürünün sıcaklık ve zaman parametrelerinin iyi belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Hassas ürünler sıcaklık düzeyi fazla olunca ürün yüzeyinde kavrulmalara ve şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Parametreler olması gerektiğinden düşük verilir ise ideal bir kurutma olayı gerçekleşmemektedir. Kurutulacak farklı her ürün için ayrı bir kurutma reçetesi uygulanmalıdır.

Dondurarak kurutma işleminde dış hava şartlarından bağımsızdır ve her türlü iklim şartlarında kurutma işlemi gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla uygulanan düşük kurutma sıcaklığından dolayı kurutulmuş ürün kalitesi, özellikle güneş kaynaklı kurutuculara göre yüksek olduğu görülmüştür.

Sistemde 2. Kurutma aşamasında ısı kaynağı olarak ısı pompası kullanılmıştır. Bunun en önemli sebebi dondurarak kurutma işlemlerinde düşük sıcaklıklara ihtiyaç duyulması ve ısı pompası ile sıcaklık parametreleri daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Ayrıca ısı pompaları tüketilen enerji miktarını da düşürmektedir.

Bu çalışma neticesinde, bir kısmı ithal ve bir kısmı yerli malzemeler ile ısı pompalı dondurarak kurutucunun ülkemiz şartlarında imal edilebileceği ve ürün kurutmada kullanılabileceği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışmalar ve deneyler neticesinde aşağıdaki önerilerin yapılması uygun görülmüştür.

Vakum pompasının, kompresörün ve fanın frekans kontrollü bir elektrikli motora sahip olması enerji tüketiminin düşürülmesinde önemli bir rol oynayacaktır. Vakum pompasında basıncın ayarlanmasında da kolaylık sağlayacaktır.

Vakum pompası kurutma işleminin başından sonuna durmadan çalışmaktadır. Bu uzun süreli çalışmadan kaynaklanan aşırı bir ısınmaya maruz kalmaktadır.

Pompanın yağının soğutulması bir eşanjör sistemi kullanılması sistemin rahat çalışmasını ve kullanım ömrünün uzamasını sağlayacaktır.

Kurutma kabının içinde load cell kullanılması kurutma parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir etken olacaktır.

Dondurarak kurutma işlemlerinin uzun olması ve ara verilip tekrar başlanmasının kurutulacak ürüne zarar verebilecek olmasından dolayı, kurutma işlemine uzaktan erişim imkânı veren bir yazılım kullanılması daha hassas bir kurutma işlemi gerçekleştirmemize olanak sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- AKTAŞ, M., MENLİK, T., BORAN, K., AKTEKELİ, B. ve AKTEKELİ Z., 2014. Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi , Tasarım Ve Teknoloji 2(2):229-238.
- AKTAŞ, M. ve AKTEKELİ, B., 2015. Isı pompalı kurutucuda atık ısı kullanımının performansa etkisi ve deneysel analizi. Tarım Bilimleri Dergisi – Journal of Agricultural Sciences, 21: 220-235.
- AKTAŞ, M., 2007. Isı Pompası Destekli Fındık Kurutma Fırınının Tasarımı, İmalat Ve Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 116s.
- ANONİM I <http://www.an-ka.com>, erişim: Aralık 2015.
- ANONİM II <http://www.cantas.com>, erişim: Şubat 2015.
- ANONİM III <http://www.eng.harran.edu.tr/~hbulut/>, erişim: Şubat 2016.
- ANONİM IV <http://www.geaprocess.co.uk>, erişim: Aralık 2011.
- ANONİM V <http://www.sciencephoto.com>, erişim: Aralık 2011.
- ANONİM VI <http://www.labconco.com>, erişim: Aralık 2011.
- ANONİM VII <http://www.manufacturingchemist.com>, erişim: Ocak 2012.
- ANONİM VIII <http://www.millrocktech.com>, erişim: Ocak 2011.
- ANONİM IX <http://www.nbsyclon.en.made-in-china.com>, erişim: Ocak 2012.
- ANONİM X <http://www.science.howstuffworks.com>, erişim: Aralık 2015
- ANONİM XI <http://www.technologyinscience.com>, erişim: Aralık 2011
- ANONİM XII <http://www.wikipedia.org>, erişim: Ocak 2012
- CEYLAN, İ., AKTAŞ, M. ve DOĞAN, H., 2005. Isı pompalı kurutma odasında elma kurutulması. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 25 (2): 9-14.
- ÇENGEL, Y.A. ve BOLES, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. McGraw-Hill Literatür Yayıncılık, İstanbul, 867s.
- DOĞANAY, T., 2009. Kurutma. TEB Eczacılık Akademisi - Modern Farmasötik Teknoloji, 18-47.
- GOLDBLITH, S. A., REY, L. and ROTHMAYR, W. W., 1975, Freeze Drying and Advanced Food Technology. Academic Pres, London, xvii-xviii, 193 196, 438-441.
- GÜRSES, Ö.L., 1986. Gıda İşleme Mühendisliği-II. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları No:963, Ders Kitabı:282, Ankara, 132s.
- HOUSKA, M., PODLOUCKY, S., ZITNY, R., GREE, R., SESTAK, J., DOSTAL, M. and BURFOOT, D., 1996. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids. Journal of Food Engineering, 29: 339-348.
- KAYHAN, Ö., 2008. Zeytin Karasuyundan Antioksidanların Dondurarak Kurutma Yöntemi İle Ayrıştırılması. Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 60s.
- KIRMACI, V., 2008. Dondurarak Kurutma Sisteminin Tasarımı, İmalatı ve Performans Deneylelerinin Yapılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 136s.
- KING, C. J., 1971. Freeze Drying of Foods. Chemical Rubber Co.Press, Cleveland, Ohio, 9:10, 66.

- LIAPIS, A. I. and BRUTTINI, R., 1997. Mathematical Models for the Primary and Secondary Drying Stages of The Freeze- Drying of Pharmaceuticals on Trays and in Vials. In *Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology*, Turner I. and Mujumdar S. A., Ed., Newyork, 481-535.
- LIAPIS, A. I. and BRUTTINI, R., 1995. Freeze Drying . in *Handbook of Industrial Drying 2nd Ed*, Mujumdar A.S. Marcel Dekker, Inc., Newyork and Basel, 309-343.
- LIAPIS, A. I., PIKAL, M. J. and BRUTTINI, R., 1996. Research and Development Needs and Opportunities in Freeze Drying. *Drying Technology*, 14: 1265-1300
- LIAPIS, A.I. and BRUTTINI, R.,1994. A Theory for the Primary and Secondary Drying Stages of the Freeze-Drying of Pharmaceutical Crystalline and Amorphous Solutes: A Comparison Between Experimental Data and Theory. *Seperation Technology*, 4: 144-155.
- LITVIN, S., MANNHEIM, C.H. and MILTZ, J., 1998. Dehydration of Carrots by a Combination of Freeze Drying, Microwave Heating and Air or Vacuum Drying. *Journal of Food Engineering*, 36: 103-111.
- MADAMBA, P.S., 2002. The Response Surface Methodology: An Application to Optimize Dehydration Operations of Selected Agricultural Crops. *Lebensm.- Wiss- u. Technol.*, 35: 584-592.
- MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), 2009. Gıda Teknolojisi Dondurulmuş Sebze ve Meyve Üretimi, Ankara, 40s.
- MELLOR, J. D., 1978. *Fundamentals of Freeze Drying*. Academic Press, London, 9-10, 251-252, 261-263.
- MILLMAN, M. J., LIAPIS, A. I. and MARCHELLO, J. M., 1985. An Analysis of the Lyophilization Process Using a Sorption-Sublimation Model and Various Operational Policies. *AIChE Journal*, 31: 1594-1604.
- MMO (Makine Mühendisleri Odası), 2006. Soğutma Tesisatı. *Can Matbaacılık*, Yayın No: MMO/295/3, İstanbul, 192s.
- PIKAL, M.J., SHAH, S., ROY, M.L. and PUTMAN, R.,1990. The Secondary Drying Stage of Freeze Drying: Drying Kinetics as a Function of Temperature and Chamber Pressure. *International Journal of Pharmaceutical*, 60: 203-217.
- RATTI, C., 2001. Hot Air and Freeze Drying of High Value Foods: A Review. *Journal of Food Engineering*, 49: 311-319.
- SADIKOĞLU, H., ÖZDEMİR, M. and SEKER, M., 2006. Freeze Drying of Pharmaceutical Products: Research and Development Needs. *Drying Technology*, 24: 829-861.
- SADIKOĞLU, H. ve ÖZDEMİR, M., 2001. Dondurarak Kurutma Teknolojisi. *Termoklima*, 102: 53-61.
- SADIKOĞLU, H. and LIAPIS A. I., 1997. Mathematical Modelling of the Primary and Secondary Drying Stages of Bulk Solution Freeze Drying in Trays: Parameter Estimation and Model Discrimination by Comparison of Theoretical Results with Experimental Data. *Drying Technology*, 15: 791-810.
- SADIKOĞLU, H., LIAPIS, A.I. and CROSSER, O.K.,1998. Optimal control of the primary and secondary drying stage of bulk solution freeze drying in trays. *Drying Technology*, 16: 399-431.

WANG, L. and SUN, D.W.,2001. Modelling vacuum cooling process of cooked meatpart 1: analysis of vacuum cooling system. International Journal of Refrigeration, 25: 854-861.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ömer EREN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Şanlıurfa / 29.03.1979
Telefon : 0 414 3158033
Faks : 0 414 3158033
e-mail : omeren@hotmail.com

EĞİTİM

| Derece | Adı | İlçe | İl | Bitirme Yılı |
|---------------|---|----------|-------------|--------------|
| Lise | : Fatih Fen Lisesi | / Fatih | / İstanbul | 1996 |
| Üniversite | : Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü | / Merkez | / Şanlıurfa | 2002 |
| Yüksek Lisans | : Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü | / Merkez | / Şanlıurfa | 2016 |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|------|-------------------|------------------|
| 2002 | Gateks A.Ş. | Vardiya Mühendis |
| 2003 | Harran Pamuk A.Ş. | Yetkili Mühendis |
| 2005 | End-Mak Ltd. Şti. | Firma Sahibi |

UZMANLIK ALANI : Isıtma, soğutma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri projelendirme ve uygulama

YABANCI DİLLER : İngilizce