

**DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİNDE
KURUTMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

**2014
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

Ali Osman SUIÇMEZ

**DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİNDE KURUTMA
PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Ali Osman SUIÇMEZ

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.**

**KARABÜK
Eylül 2014**

Ali Osman SUIÇMEZ tarafından hazırlanan "DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİNDE KURUTMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Emrah DENİZ

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 27/09/2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Emrah DENİZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)

...../...../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu, ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfların yapıldığını beyan ederim.”

Ali Osman SUIÇMEZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DONDURARAK KURUTMA SİSTEMLERİNDE KURUTMA PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ali Osman SUIÇMEZ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Emrah DENİZ

Eylül 2014, 55 sayfa

Bu çalışmada, bir dondurarak kurutma sisteminin tasarlanarak, prototipi oluşturulmuş ve kontrol deneyleri yapılmıştır. Oluşturulan prototipte 13 farklı geometride dilimlenmiş elmalar kurutulmuş ve kurutulan 13 farklı geometrilerin kuruma eğrileri çizilerek en hızlı kuruyan 3 geometri belirlenmiştir. Bu 3 geometride 20'şer adet numune hazırlanarak her bir numune için kuruma parametreleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Deneyler süresince belli aralıklarla değerler kaydedilmiş ve herhangi bir saatteki nem oranını veren eğriler çizilmiştir. 18 saat süren deneyler sonunda "A" tipi geometride kesilmiş numunelerde nem oranı %85.95'ten %5.9'a, "B" tipi geometride kesilmiş numunelerde nem oranı %5.03'e ve "C" tipi geometride kesilmiş numunelerde ise nem oranı %5.38'e inmiştir. Deney sonrasında numunelerin " a_w " değerleri ölçülmüş ve numunelerin 0.372 ile 0.425 arası " a_w " değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun dışında kurutma süresince harcanan

güç bir elektrik sayacı yardımı ile kaydedilmiştir. Bu veriler yardımıyla numune tipleri için kuruma süreleri belirlenmiş ve “B” tipi geometriye sahip numunelerde nem kaybının zamana bağlı olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Kurutma, dondurarak kurutma, liyofilizasyon.

Bilim Kodu : 914.1.038

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL STUDY ON DRYING PARAMETERS OF FREEZE DRYING SYSTEMS

Ali Osman SUIÇMEZ

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Emrah DENİZ

September 2014, 55 pages

In this study, a prototype freeze drying system was designed and control experiments of the system were conducted. Apple slices in 13 different geometry were dried in in the prototype dryer. Drying curves of each slice geometry were drawn and top three fastest drying geometries were identified among them. Twenty samples for each three shapes were prepared and drying parameters for each sample were investigated in detail. Data was recorded during the experiments and the curves giving the humidity ratio for a certain time were drawn. At the end of eighteen-hour-long experiments the humidity ratio decreased from 85.95% to 5.9%, 5.03% and 5.38% for the samples having A, B and C type geometry respectively. After the experiment, the water activity (a_w) values of the samples were measured and found between 0.372 and 0.425. Besides, the energy consumed during the drying process was recorded with an electricity meter. The drying times of the sample types were

determined by the means of these data and “B” type samples are found to lose the most humidity by the time.

Key Words : Drying, freeze drying, lyophilization.

Science Code : 914.1.038

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının belirlenmesiyle başlayıp sonuçlandırılmasına kadar her aşamada ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan, yönlendirmeleri ile bu çalışmamı bilimsel yönde şekillendiren danışman hocam Doç. Dr. Emrah DENİZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli bilgilerinden sıklıkla faydalandığım Karabük Üniversitesi öğretim görevlilerinden Doç. Dr. Kamil ARSLAN, Doç. Dr. Şeref KURT ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ'a, Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim görevlisi Yrd. Doç. Dr. Volkan KIRMACI'ya, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim görevlisi Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında her konuda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Ar. Gör. Abdullah UĞUR, Arş. Gör. Emrah ERDOĞDU, Arş. Gör. Cüneyt UYSAL ve diğer Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve yardımcı olan yüksek lisans arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımda maddi manevi her anlamda desteklerini her daim hissettiğim babam İsmail, annem Rahmiye, abilerim Ömer Faruk ve Muhammet Fatih, kardeşim Mahmut Zahit'e ve en yakın arkadaşlarım Ahmet Doğan ERGİN, Mengüalp YAVAŞOĞLU ve Mustafa AKSOY'a ve diğer arkadaşlarıma tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca beni bu dünyaya getiren, varlığını kalbimde her daim hissettiğim annem merhume Aynur Minure SUIÇMEZ'e teşekkürlerimi, dualarımı, şükranlarımı ve özlemlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	3
BÖLÜM 3	8
KURUTMA VE KURUTMA YÖNTEMLERİ.....	8
3.1. DOĞAL KURUTMA YÖNTEMLERİ.....	8
3.1.1. Güneşte Kurutma	8
3.1.2. Gölgede Kurutma.....	9
3.2. YAPAY KURUTMA YÖNTEMLERİ	9
3.2.1. İletimle Kurutma.....	10
3.2.2. Vakumda Kurutma.....	10
3.2.3. Akışkan Yataklı Kurutma	11
3.2.4. Isı Pompalı Kurutma.....	12
3.2.5. Tünel Tipi Kurutucu ile Kurutma	13
3.2.6. Konveyör Tipi Kurutucu ile Kurutma	14
3.2.7. Döner Kurutucular ile Kurutma.....	14

	<u>Sayfa</u>
3.2.8. Turbo Kurutucu ile Kurutma	14
3.2.9. Sprey (Püskürtmeli) Kurutucular ile Kurutma	14
BÖLÜM 4	16
DONDURARAK KURUTMA	16
4.1. SUBLİMASYON NEDİR?.....	19
4.2. ÜRÜNÜN SU AKTİVİTESİ (a_w)	21
4.3. DENGELİ.....	24
4.4. KURUMANIN STATİĞİ VE KİNETİĞİ	25
4.4.1. Kurumanın Statiği.....	25
4.4.2. Kurumanın Kinetiği	26
4.5. KURUTMA HIZI	29
BÖLÜM 5	30
MATERYAL VE METOT	30
5.1. MATERYAL.....	30
5.1.1. Kurutma Hacmi.....	31
5.1.2. Soğutma Sistemi ve Elemanları	32
5.1.3. Vakumlama Sistemi	33
5.1.4. İnkübatör	35
5.1.5. Ölçüm Sistemleri	35
5.1.5.1. Ağırlık Ölçümü	35
5.1.5.2. Sıcaklık Ölçümü.....	35
5.1.5.3. Basınç Ölçümü.....	358
5.1.5.4. Su Aktivitesi Ölçümü.....	359
5.1.5.5. Elektriksel Ölçüm	40
5.2. METOT	40
BÖLÜM 6	41
DENEY SONUÇLARI	41
6.1. FARKLI GEOMETRİDEKİ NUMUNELERİN KURUMA ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ.....	41

	<u>Sayfa</u>
6.2. BELİRLENEN GEOMETRİLERDE KURUMA PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ	45
BÖLÜM 7	49
SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Kurutma yöntemleri.....	2
Şekil 3.1. Güneşte kurutma.....	9
Şekil 3.2. İletim kurutma sistemi.....	10
Şekil 3.3. Vakumda kurutma odası.....	11
Şekil 3.4. Akışkan yataklı kurutucu çizimi.....	12
Şekil 3.5. Isı pompalı kurutma sistemi.....	13
Şekil 3.6. Tünel tipi kurutucu ile kurutma şematiği.....	13
Şekil 3.7. Dönen tip spreyci kurutucu.....	15
Şekil 4.1. Dondurularak kurutulmuş patatesler (Chuno).	16
Şekil 4.2. Saf maddenin P-T diyagramı.	19
Şekil 4.3. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doygunluk eğrisi..	20
Şekil 4.4. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statüğü açısından anlamı.	25
Şekil 4.5. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri.	26
Şekil 5.1. Deneşlerde kullanılan sistemin genel görünüşü	30
Şekil 5.2. Numune olarak kullanılan yeşil elma	31
Şekil 5.3. Kurutma hacminin imalat aşamaları.	32
Şekil 5.4. Çalışmada kullanılan soğutma sistemi.....	33
Şekil 5.5. Vakum sisteminde kullanılan bazı bağlantı elemanları.	34
Şekil 5.6. Neck WT2003H dijital hassas terazi.....	36
Şekil 5.7. Sıcaklık ölçümünde kullanılan cihazlar.	37
Şekil 5.8. Sistemde kullanılan vakum göstergesi ve basınç transduseri.	38
Şekil 5.9. Testo-650 su aktivitesi ölçüm seti.....	39
Şekil 6.1. Farklı geometrilerdeki 13 numunenin kuruma eğrileri.....	45
Şekil 6.2. Kurutma hacminin sıcaklık zaman grafiğı.	46
Şekil 6.3. Kurutma hacminin basınç-zaman grafiğı.....	47
Şekil 6.4. Zamana göre nem oranlarının değışimi.	47
Şekil 6.5. Harcanan gücün zamana göre değışimi.	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı	20
Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan mikroorganizma faaliyetleri için yaklaşık minimum su aktivite (aw) değerleri.....	22
Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (aw) değerleri	23
Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktivite (aw) değerleri	23
Çizelge 5.1. Ilmvac PK 8 Dp vakum pompası özellikleri.....	34
Çizelge 5.2. Nüve EN032 teknik özellikleri	35
Çizelge 5.3. ADAM 4018'nin teknik özellikleri.....	37
Çizelge 5.4. ADAM 4520'nin teknik özellikleri.....	38
Çizelge 6.1. Etüvde tam kuru ağırlığın belirlenmesi	41
Çizelge 6.2. Farklı geometrilere hazırlanan numuneler ve ağırlıkları	42
Çizelge 6.3. Numunelerin minimum, maksimum ve ortalama ağırlıkları.....	45
Çizelge 6.4. Dondurma işlemi sonrası numune ağırlıkları.....	46
Çizelge 6.5. Kurutma işlemi sonunda numune ağırlıkları.....	48
Çizelge 6.6. Numunelerin minimum ve maksimum su aktivitesi değerleri.....	48

SİMGELER ve KISALTMALAR

SİMGELER

- a_w : Su aktivitesi
 N_d : Denge nemi
 P : Basınç (bar, Pascal)
 P_b : Buharlaştırma basıncı (Pascal)
 P'_b : Buzun doymuş buhar basıncı (Pascal)
 $P_{\bar{u}}$: Suyun buhar basıncı (Pascal)
 T : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$)

KISALTMALAR

- GAB : Guggenheim-Anderson-de Boer
CFD : Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
SK : Salmetarol Ksinofat
ÇBN : Çevre Havası Bağlı Nemi
DBN : Denge Bağlı Nemi
IE : Materyalin Isınma Evresi
N : Nem
 $f(t)$: Kurutma Süresi
SHE : Sabit Hızla Kuruma Evresi
AHE : Azalan Hızla Kuruma Evresi
BKN : Birinci Kritik Nokta
İKN : İkinci Kritik Nokta
 S_{KA} : Kuru Ağırlığa Göre Başlangıç Su Oranı
 S_{YA} : Yaş Ağırlığa Göre Başlangıç Su Oranı
YA : Yaş Ağırlık
KA : Kuru Ağırlık

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gıdalar çevresel etkilerle bir süre sonra renk, koku, şekil, tat ve besin değeri açısından bozulmaya uğrar. Gıdaların herhangi bir koruyucu etki bulunmadan uzun süre sağlıklı bir şekilde saklanması zordur. Mevsimsel olarak gıdaların üretim miktarları ve çeşitliliği, bu ürünleri farklı zamanlarda kullanabilmek için muhafaza etme isteği doğurmuştur.

Günümüzde gıdaların bozulmadan muhafazası için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlar arasında pastörize etme, sterilize etme, soğutma ve dondurma, koruyucu maddelerle muhafaza (kimyasal koruyucular veya tuz, şeker, sirke gibi doğal maddeler) ve kurutma gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında, en eski ve en yaygın olarak kullanılan yöntem kurutmadır.

Kurutma, bir ürünün içindeki su miktarını azaltıp, mikrobiyolojik etkilerin oluşamayacağı bir ortam oluşturma yöntemidir. Bu yöntem başta gıda sektöründe olmak üzere, ilaç sektöründe, kimyasal madde üretim sektöründe, hammaddesi ağaç olan kağıt, mobilya, kereste veya yakacak odun gibi ürünlerin eldesinde, arkeolojik kazılardaki bulguların muhafazasında sıklıkla kullanılır. Geçmişten günümüze farklı yapı ve özelliklerde kurutma sistemleri olup Şekil 1.1’de gösterilmiştir.

Kurutma yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem, güneşte kurutmadır. Bu yöntem kolaylık ve maliyet açısından avantajlı olmasına rağmen, ürünün uzun sürede kurutulması ve kurutma kalitesinin düşük olması büyük bir dezavantajdır. Güneşte kurutmanın çok kontrollü bir sistem olamamasından dolayı bakteriler üründe mikrobiyolojik bozulmalara sebebiyet verir ve bu sebepten insanlar zamanla yapay kurutma yöntemleri geliştirmişlerdir. Bunlar arasında etüvde kurutma, ısı pompalı

kurutma, vakumda kurutma, akışkan yataklı kurutma, mikrodalga ile kurutma ve dondurarak kurutma gibi yöntemler vardır.



Şekil 1.1. Kurutma yöntemleri.

Dondurarak kurutma yönteminde öncelikle kurutulmak istenen ürün dondurulur. Daha sonra vakumlu hacimde ürüne bir miktar ısı verilir. Düşük basınç altında ürüne ısı geçişi ile ürün içindeki buz halinde olan su gaz fazına geçerek üründen uzaklaştırılarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu yöntem gıda sektöründe hazır kahve, et ve süt kurutulması gibi durumlarda, eczacılıkta ise serum ve ilaç sanayi gibi bir çok alanda kullanılır.

Dondurarak kurutma yönteminin dezavantajı pahalı ve uzun süreli bir işlem oluşudur. Bu yöntemin sonunda elde edilen ürün diğer yöntemlere nazaran çok daha kalitelidir. Bu sebepten ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Bu çalışmada, bir dondurarak kurutma cihazı tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Ayrıca bu cihazın kontrol deneyleri yapılarak mevcut verilerle karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR İNCELEMESİ

Koullafi ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada 2 çeşit yemişin ve 3 çeşit yaban mantarının, dondurarak kurutulmasını çalışmışlardır. Dondurarak kurutma yöntemiyle 72 saat kurutulmuş numuneleri 4, 13, 27 °C sıcaklıklara göre incelemiştir. Ayrıca yaptıkları deneyi, GAB (Googhenheim Andersonde Bor) ve kendilerinin geliştirdikleri matematiksel model ile karşılaştırmışlardır. Bunun sonucunda GAB modelinin alınan deneysel verilerle daha iyi uyduğunu tespit etmişlerdir. Yemişler için denge sıcaklığının çok önemli bir etken olmadığını, fakat mantarlar için önemli bir etken olduğunu gözlemlemiştir (Khalloufi et al., 2000).

Ganguly ve arkadaşları bu çalışmada farklı seyreltilmiş gaz yaklaşımlarını incelemiştir. Knudsen sayısının yeterli küçüklükte olduğu kanal boyunca akışta klasik CFD (hesaplamalı akışkanlar mekaniği) tekniği ile modelleme yapmışlardır. Kullanılan yazılım programlarının kanal boyu akışa olan etkisini incelemiştir. Kondenserdeki akış ve buzlanmayı Monte-Carlo direk simülasyon tekniği ile simüle etmişlerdir. Kanal uzunluğunun kütle akışının homojenliğine etkisini ve buz büyüme oranlarını incelemiştir. Kanal uzunluğu arttıkça, artan rezidüel basınç ile gelişmiş homojenlik arasında değiş-tokuş gözlemlemiştir. Simülasyonlara DSMS metoduna ilaveten CFD metodunu eklemişler ve tüm dondurarak kurutma sistemindeki gaz dinamiklerini süblimasyon hızı ve geometrisi açısından modellemiştir. Kanal dizaynlarının homojenliğe ve buzlanmadaki artışa etkisini incelemiştir (Ganguly et al., 2012).

Fan ve arkadaşları bu çalışmada ginkgo biloba proteinlerinin tepki yüzeyi metoduna (RSM) dayalı içerik kompozisyonlarını analiz ederek, mikrodalga dondurarak kurutma yönteminin parametrelerini optimize etmişlerdir. Sonuç olarak tavin

katsayısı, kurutma zamanı ve protein çözünürlüğünün R^2 değerinin 0,9500 den büyük olduğunu görmüşlerdir. Kurutma süresi ve ginkgo biloba proteinlerinin çözünürlüğünün artışı mikrodalga gücü ve ön dondurma sıcaklığı eğrisel olarak, kurutma süresinin ise malzeme kalınlığı ile doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Optimum mikrodalga dondurarak kurutma koşulları 408 ila 421 W güç, 15 mm malzeme kalınlığı ve -20 ila -21 °C ön kurutma sıcaklığı olduğunu tespit etmişlerdir (Fan et al., 2012).

Fissore ve arkadaşları, enerji kullanımı verimliliğini dikkate alarak bir kahvenin kurutma işlemi için dondurarak kurutma çevrimi tasarımını incelemişlerdir. Enerji tüketiminin en fazla olduğu aşama olduğu için, analizi birincil kurutma odaklı yapmışlardır. Bu analizde raf ısıtma sıcaklığı ve kurutma odası basıncını göstermek amacıyla basitleştirilmiş bir matematiksel model tasarlamışlardır. Modelin parametrelerini belirlemek için deneysel incelemeler yapmışlardır. Aynı modelde, ekserji kayıplarını en aza indirmek ve ekserjil verimliliği maksimuma çıkartmak için gerekli koşulları belirlemek adına işlemin ekserji analizini yapmışlardır.

Sadece kurutma süresi dikkate alındığında, çalışma koşulları için tasarım alanının sağ üst kısmındaki T_{fluid} ve P_c değerlerini kullanmışlardır. Yani basit bir çevrim istenildiğinde optimum çalışma koşullarında yaklaşık olarak yüksek raf sıcaklığı değerleri ve düşük bölme basıncı değerlerinin: 5 Pa ve -5 °C olduğunu tespit etmişlerdir.

Kahve dondurarak kurutma işlemi için eğer basit bir çevrim istenilirse optimum çalışma koşulların da yaklaşık olarak yüksek bölme basıncı değerleri ve düşük akışkan ısıtma sıcaklığı değerlerinin: 30 Pa, -20 °C olduğunu tespit etmişlerdir.

Bundan dolayı kurutma işleminde sürdürülebilirliği geliştirmek için gerekli olan(örneğin enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak) en iyi çalışma koşulları, minimum kurutma süresinde sonuçlananlardan farklıdır sonucuna ulaşmışlardır.

Bu sonucun sistemin, termal özelliklerinden ve bunun yanı sıra ısı ve kütle transferi katsayıları değerlerinden etkilendiğini tespit etmişler ve bundan dolayı dondurarak

kurutma işlemi farklı ürünler için incelendiğinde farklı sonuçlara ulaşılabileceği sonucuna varmışlardır (Fissore et al., 2014).

Carullo ve Vallan, dondurarak kurutma işleminde, kütle ve sıcaklık ölçümü yapılırken karşılaşılan problemler ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Kütle ve sıcaklık ölçümlerini etkileyen temel belirsizlikleri belirlemek amacıyla liyofilizasyon işlemi ile alakalı derin bir inceleme yapmışlardır. Özellikle dondurarak kurutma işleminde kullanmak için bir ölçüm sistemi tasarlamışlardır.

Yaptıkları deney sonucunda gerçek dondurarak kurutma işleminin izlenmesi için metrolojik karakterizasyon olarak adlandırılan ölçüm sistemini önermişlerdir.

Ayrıca deneysel testler bu özel uygulama ile alakalı belirsizlikleri tahmin etmek için tasarlandığını göstermiştir (Carullo and Vallan, 2012).

Lopez - Quiroga ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada zaman ölçekli analizi detaylı bir şekilde birinci ilke bazlı bir modele uygulamışlardır. Bunun için zaman ölçeklerinin kalitesiyle alakalı dondurarak kurutma yapabilen bir model tasarlamışlardır. Model ile alakalı hesaplamaları sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapmışlardır.

Bu sayede optimum işletme politikalarının hesaplanması ile ilgili çalışmaları azalmıştır. Bu bağlamda raf sıcaklığı ve bölme basıncını bir simülasyon bazında hesaba katılarak farklı yollar kullanmışlardır. Ürün kalitesini sağlarken her durumda elde edilen uygun kontrol profillerinin döngü süresinde önemli azalmalara yol açtığını tespit etmişlerdir (Lopez – Quiroga et al., 2012).

Chung ve arkadaşları, nano partiküllerin veya proteinlerin dondurarak kurutma işlemi sırasında bir araya gelme sürecinin derinlemesine anlaşılması kolaylaştıracak bir çalışma yapmışlardır. Yeniden dağılıbilir katı formülasyonların geliştirilmesi için tersinmez agregasyon mekanizması bu çalışmada detaylı olarak incelemişlerdir. Bununla birlikte kriyoprotektanların molekül ağırlığı ve dondurma oranı sistematik olarak çeşitlendirilmiş ve kriyoprotektanların dağılıbilirliğini ve dağıtımını incelemişlerdir.

Kriyoprotektan moleküllerinin ağırlığında meydana gelen artışla birlikte nanopartiküllerin dağılma oranında artış olduğunu tespit etmişlerdir. Yavaş dondurma oranının nanopartiküllerin dağılma oranı için PEG durumunda daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Artan buz kristallerinden kaynaklanan kritik dondurma oranını temsil eden solutların dışa eğilimini bir kinetik yaklaşımla açıklamışlardır.

Kriyoprotektanların dışa eğilimleri ile ilaç nanopartiküllerinin arasındaki farklılıklar yardımcıyla dağılılabirliğin donma oranı ve molekül ağırlığının her ikisine de bağlı olduğunu açıklamışlardır. FT-IR'nin haritaladığı PEG ve naproksenin uzaysal dağılımları dondurma ve kurutma sırasında onların difüzyon mekanizmalarının aydınlatılmasına yardımcı olduğunu tespit etmişlerdir (Chung et al., 2012).

Cai ve arkadaşları, dondurarak kurutma teknolojisi ve termal indirgeme ile ilgili yapılan yeni bir metodla Grafennanosheets sentezlemesini yaptılar. Mikro yapısı ve morfolojisini X-ışını difraksiyonu, Brunauer–Emmet-Teller ölçümleri, Fourier infrared dönüşüm spektroskopisi ve yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu yardımcıyla karakterize etmişlerdir.

Sonuçta yüksek spesifik yüzey alanı ve artan ara tabaka mesafesiyle birlikte dondurarak kurutma işlemi boyunca başarılı Grafennanosheets elde etmişlerdir. Ayrıca dondurarak kurutma teknolojisinin Grafennanosheets performans oranı ve stabilite çevriminin gelişmesine yardımcı olduğunu tespit etmişlerdir.

Hazırlama yöntemi; lityum-iyon piller, süper kapasitör veya lithium-air pillerin imalatında kullanılan diğer yüksek dağılmış grafen tabanlı malzemeler için akılcı bir yön verebileceğini öne sürmüşlerdir (Cai et al., 2014).

Wang ve arkadaşları kurutma prosesinde paligorskit nanofiberlerinin tekrar topaklanmasının önüne geçmek için yüksek basınçlı homojenizasyon ile topaklanma gideriminden sonra geleneksel fırın kurutma yönteminin yerine dondurarak kurutma yöntemini denemişlerdir ve bunun en basit ve etkili yöntem olduğundan bahsederler. Ek olarak, dondurarak kurutma aşikar bir şekilde görünür vizkozite ve ayrılma kararlılığını artırdığını ispatlamışlardır. Bu ve benzer sebeplerden ötürü dondurarak

kurutma paligorskitin ve belki diğer killerinde 6zelliklerini iyileştiren gayet faydalı bir y6ntem olduğunu lanse etmektedirler (Wang et al., 2013).

Rahmati ve arkadaşları salmeterol ksinafat mikro parçacıklarının formülasyon içeriğinin fiziksel karakterlerine etkilerini spreyle dondurarak kurutma y6ntemiyle etkilerini araştırmışlardır. SK parçacıklarının fiziksel karakteristiklerinin değişimi ilaç teslimi ve kısmi olarak solunum bozuklukları için daha etkili parçacık araştırmalarında 6nemini fark ettiler. Bu y6ntemle spre y durumu ve nozıl 6zellikleri gibi diğer uygulama parametreleri daha iyi parçacıklar 6retmek için geliştirilmesi gerektiğini 6nerirler (Rahmati et al., 2012).

Marefati ve arkadaşları kimyasal olarak modifiye edilmiş nişasta gran6lleriyle stabilize edilmiş yağ-su em6lsiyonu esaslı ‘novel tozu’ malzemesi 6retimi olanaklarını araştırmışlardır. Em6lsiyonlar y6ksek don 6z6n6rl6đ6 kararlılığı g6sterdi. Parçacıkların rehidrasyonuna bağlı olarak nişastayla stabilize edilmiş yağ damlalarının sadece g6zel bir şekilde bazı topaklaşmalardan etkilendiğini g6zlemlemişlerdir (Marefati et al., 2013).

Segura ve Oyarzu, g6zenek mertebesinde gerçekleşen k6tle taşınımı mekanizması ile kuruma morfolojisi hakkında çalışmalar y6r6tm6şlerdir. Dondurarak kurutma konusunda yapılan başlıca deneysel çalışmaların sonuçları iki boyutlu cam bir model olarak sunmuşlardır ve iki farklı akış rejimi g6zlemlemişlerdir bunlar ; hızlı gelişen ve yavaş gelişen karakterli akışlardır (Segura and Oyarzun, 2012).

BÖLÜM 3

KURUTMA VE KURUTMA YÖNTEMLERİ

Kurutma, bir katı, yarı-katı veya sıvının içindeki su yada başka bir çözücünün çıkarılmasından oluşan bir kütle transfer işlemidir. Bu işlem genellikle satım öncesi veya paketleme öncesi, son işlem olarak kullanılır. Bir ürünü kuru olarak adlandırabilmek için, son ürün katı olmalı ve, sürekli bir tabaka halinde (örneğin: kağıt), uzun parçalar halinde (örneğin: odun), partikül halinde (örneğin: tahıl taneleri ve mısır gevreği) yada toz halinde (örneğin: kum, tuz ve süt tozu) olmalıdır. Genelde işlemde, bir ısı kaynağı ve işlem sırasında çıkan buharı uzaklaştırma için kullanılan bir aracı ekipman kullanılır. Gıda, tahıl, aşı gibi biyolojik ürünlerin kurutulmasında, üründen alınan çözücü genellikle sudur.

Kurutma yöntemleri, genel başlık olarak doğal ve yapay kurutma yöntemleri adıyla iki grupta toplanır.

3.1. DOĞAL KURUTMA YÖNTEMLERİ

Doğal kurutma yöntemleri, en eski kurutma yöntemleridir. Bu kurutma yöntemlerinde ürün, dışarıdan zorlama olmadan doğal çevre şartları kullanılarak kurutulur.

3.1.1. Güneşte Kurutma

En genel ve yaygın olarak kullanılan güneşte kurutma yöntemi doğal bir yöntem olup, ancak beraberinde kontaminasyon başta olmak üzere birçok problem getirmektedir (Şekil 3.1).. Her yerde ve her zaman güneş ısısından faydalanarak kurutma mümkün olmaması, ürünün böcek vb. dış etkiye maruz kalması, kurutmayla

birlikte hafif bir fermantasyon meydana gelebilme riski yapay kurutma sistemlerinin zamanla güneşte kurutmaya tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır. (Cemeroğlu et al., 2004). Oldukça uzun zaman alan bir metot olması, daha hızlı, hijyenik ve homojen özellik taşıyan endüstriyel boyutlu, farklı kurutma metotlarının gelişimini teşvik etmiştir.



Şekil 3.1. Güneşte kurutma (www.mku.edu.tr, 2014).

3.1.2. Gölgede Kurutma

Bitki içeriğinde bulunan etken maddelerin zarar görmesi ve bitki bünyesindeki uçucu yağın bitkiden uzaklaşmasını engellemek amacıyla sıcaklık uygulayarak kurutma yönteminden kaçınılır. Bu nedenle de gölgede kurutulması tercih edilir. Bu kurutma yöntemi bitkinin hava akımı olan fakat güneş almayan bir yerde kurutulması yöntemidir.

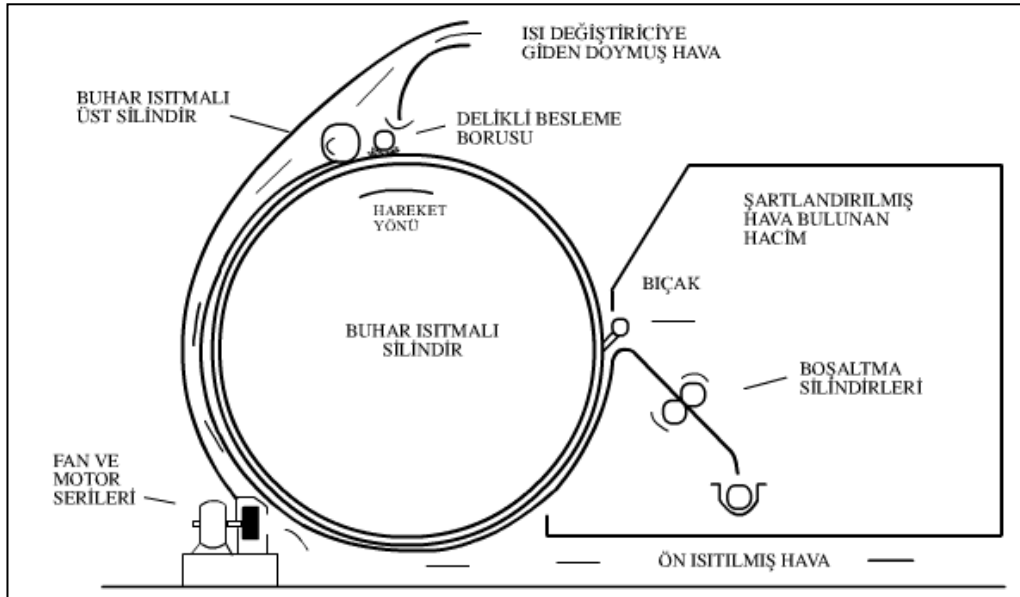
3.2. YAPAY KURUTMA YÖNTEMLERİ

Yüksek kurutma süreleri, kurutma sırasında oluşan istenmeyen etkiler (radyasyon, etken madde kaybı, vitamin kaybı vb.), doğal kurutma yöntemlerinin

dezavantajlarındandır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak veya azaltmak için yapay kurutma yöntemleri kullanılmaktadır. Aşağıda bazı yapay kurutma yöntemleri açıklanmıştır.

3.2.1. İletimle Kurutma

Bu kurutma yönteminde kurutulacak ürünün, ısıtılan yüzeyle doğrudan teması söz konusudur. Doğrudan temas sırasında iletimle olan ısı transferinin etkisiyle ürün kurutulur (Şekil 3.2). Kurutma silindri veya topları, düz yüzeyler, açık kazanlar ve daldırma ısıtıcılar iletimle kurutmaya örnek verilebilir.

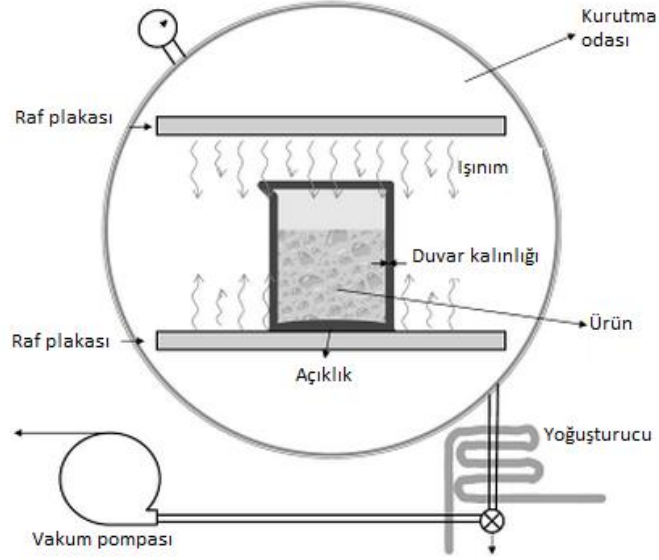


Şekil 3.2. İletimle kurutma sistemi (Günerhan, 2005).

3.2.2. Vakumda Kurutma

Vakumda kurutma, malzemenin düşük basınç altında kurutma için gerekli ısının azalması gerçeğine dayanan kurutma işlemidir. Bu işler için kullanılan cihazlar vakumlu kurutucu olarak bilinir ve mutfaklarda kullanılabilecek şekilde dizayn edilmiş küçük boyutlardan, örneğin kereste ürünleri için kullanılan oda büyüklüğündeki boyutlara kadar değişebilir (Şekil 3.3).

Kurutma genellikle ısı ile gerçekleşir fakat vakumda kurutma da ısının çok yüksek olmasına gerek kalmadan hızlı bir kuruma elde edilir. Vakumda kurutmada çok yüksek seviyede kuruma elde edilebilir.



Şekil 3.3. Vakumda kurutma odası (Chen and Mujumdar, 2008).

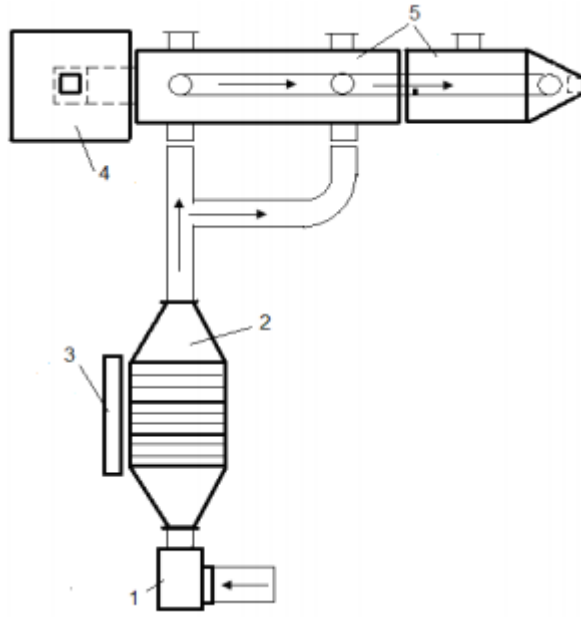
Vakumda kurutmanın bir diğer avantajı enerji tasarruflu olmasıdır. Kurutma için düşük enerji gereksinimi olması, kurutmanın maliyet fiyatlarının az olmasını bu da rekabet gücünü artırır. Aynı zamanda bu işlem süre olarak diğer kurutma yöntemlerine göre daha az olma eğilimindedir. Kurutma süresinin daha az olması üretimin artmasıyla direkt orantılıdır.

Bu işlemin bir diğer avantajı ise daha az zarar verici kurutma işlemi olmasıdır. Bazı malzemelerde yüksek sıcaklıklarda problemler oluşabilir, örneğin kurutma esnasında sert kösele kabuklar oluşması gibi. Vakumda kurutma da ortam sıcaklığı düşük olduğundan malzemeler bu gibi etkilere maruz kalmazlar bu da ürünün daha iyi kalitede olmasını sağlar.

3.2.3. Akışkan Yataklı Kurutma

Akışkan yatak kurutucular, biyolojik ürünlerin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin en önemli üstünlüğü yatak içinde tanecik

karışımının yüksek seviyede olması ve bu nedenle kurutma için daha homojen bir sürecin meydana gelmesidir (Şekil 3.4). Ürünün aşırı ısıya maruz kalmıyor olması ısıya duyarlı malzemelerin kurutulmasında akışkan yataklı kurutucunun tercih sebeplerindendir. Ürün taneciklerinin mekanik olarak zarara uğrama riski, şeklinin değişmesi ve taneciklerin topaklaşıp akışkanlığı zorlaştırmaları ise akışkan yataklar için sakınca teşkil etmektedirler (Doğan and Ersöz, 2009).

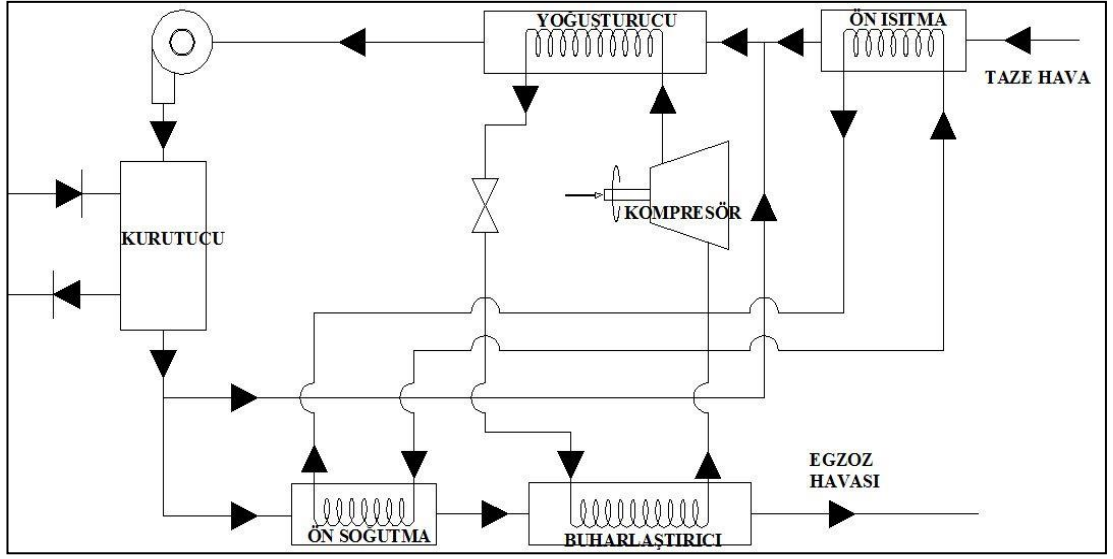


Şekil 3.4. Akışkan yataklı sürekli kurutma sistemi şeması 1. Fan, 2. Isı üreticisi, 3. Kontrol panosu, 4. Silo, 5. Akışkan yataklı sürekli kurutucu (Doğan and Ersöz, 2009).

3.2.4. Isı Pompalı Kurutma

Isı pompalı kurutucu temel olarak, ısıtıcı, kompresör ve yoğuşturucudan oluşmaktadır. Isıtıcıda ısıtılan kuru hava, kompresör yardımıyla kurutma hacmine gönderilir. Kurutma hacminde kurutulmak istenen ürünün içinde nem havaya geçer ve nemli hava yoğuşturucuya yönlendirilir. Yoğuşturucuda, yoğuşan nem sistem dışarı atılır. Hava ise tekrardan ısıtıcıya gönderilerek çevrim tamamlanmış olur.

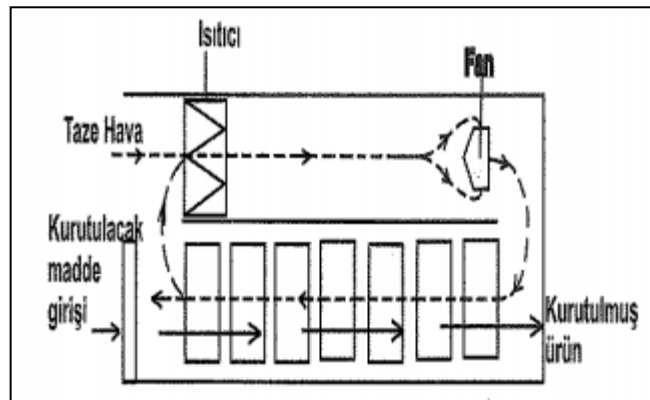
Yoğuşturucuya gelen nemli havanın sahip olduğu enerji geri kazanılarak ısıtıcıda kullanmak amacıyla sisteme tekrar verilir. Bu sistemlerde enerji verimliliği oldukça yüksektir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Isı pompalı kurutma sistemi (Akgün and Küçüka, 2011).

3.2.5. Tünel Tipi Kurutucu ile Kurutma

Tünel tipi kurutucularda, kurutulmak istenen ürün bant vasıtasıyla sürekli hareket ettirilen tepsilerin içine yerleştirilerek, iki ucu açık tünel şeklindeki fırınlardan geçirilir. Bu fırınlarda bantın hareket doğrultusuna paralel şekilde sıcak hava akımı vasıtasıyla kurutma işlemi yapılır. Bu yöntemdeki hava akışı hareket doğrultusunda, aynı yönde veya zıt yönde olabilir. Kurutulacak malzemedeki kurutma oranı, tünelin boyu, bantın hızı ve hava parametleri değiştirilerek ayarlanabilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Tünel tipi kurutucu ile kurutma şematığı (Acartürk et al., 2009).

3.2.6. Konveyör Tipi Kurutucu ile Kurutma

Konveyör tipi kurutucular, temel olarak tünel tipi kurutucular ile benzerlik gösterirler. Tünel tipi kurutucular ile aralarındaki temel fark, tünel tipi kurutucularda sıcak hava ürünle aynı doğrultuda hareket ederken, konveyör tipi kurutucularda kurutulacak ürünün hareket yönüne dik doğrultuda akar. Bazı konveyör tipi kurutucu sistemlerinde ızgara tipi tepsiler kullanılarak havanın akışı kolaylaştırılır (Acartürk et al., 2009).

3.2.7. Döner Kurutucular ile Kurutma

Döner kurutucular ile kurutmada, kurutulacak ürün silindirik şekilde tasarlanmış kurutucu haznenin içine gönderilir. Kurutma için gereken sıcak hava kurutma haznesinin alt kısmına verilir. Hava akışı her iki tarafa da olabilir. Sistemde kuruyan malzeme kuru ürün haznesine dolar (Günerhan, 2005).

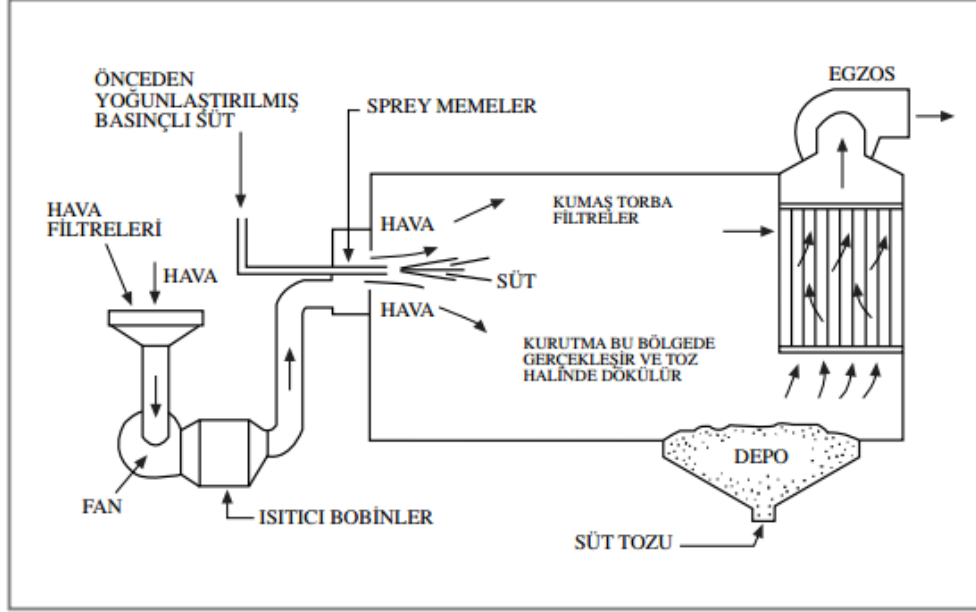
3.2.8. Turbo Kurutucu ile Kurutma

Bu tip kurutucularda dairesel şekilde hazırlanan alt alta sıralanmış rafların merkezinde turbo fanlar ve ısıtıcılar bulunur. En üst raftan sisteme giren kurutulacak ürünün süpürücü yardımı ile alt raflara indirilmesi sırasında sıcak havanın ürüne temasıyla kurutma işlemi yapılır. En alt rafta ürün soğumuş ve kurutulmuş olarak alınır. Bu tip kurutucularda kesintisiz kurutma işlemi yapılır (Acartürk et al., 2009).

3.2.9. Sprey (Püskürtmeli) Kurutucular ile Kurutma

Sprey kurutucular ile kurutma yönteminde, süt, kahve, sabun kurutulur. Bu sistemde (Şekil 3.7) önceden yoğunlaştırılmış ürün yüksek basınçlarda sprej halinde kurutma hacmine gönderilir. Aynı esnada dışardan alınan hava ısıtıcı bobinler yardımıyla ısıtılarak (93-760 °C) kurutma hacmine gönderilir. Kurutma hacminde sıcaklık ile damla halindeki ürünlerdeki su gaz fazına geçirilir. Kurutulmuş ürün toz halinde yer çekimi etkisiyle hacmin alt kısmında bulunan depo ya düşer. Gaz halindeki su buharı

filtrelerden geçerek içerisinde kalmış olan üründen arındırılır ve egzoz yardımıyla sistemden atılır (Günerhan, 2005).



Şekil 3.7. Dönen tip sprey kurutucu (Günerhan, 2005).

BÖLÜM 4

DONDURARAK KURUTMA

Dondurarak kurutma veya diğer adıyla liyofilizasyon işlemi, tarihte ilk defa İnkalar tarafından patatesin korunması amacıyla kullanıldığı düşünölmektedir. İnkalar bu ürüne “chuno” demişlerdir (şekil 4.1).



şekil 4.1. Dondurularak kurutulmuş patatesler (Chuno) (photos.oregonlive.com, 2014).

Yakın tarihimizde II. Dünya Savaşı sıralarında tedavi amacıyla kullanılan ilaç ve serumların zarar görmeden nakliyesi amacıyla geliştirilip kullanılmıştır. Günümüzde dondurarak kurutma, ilaç ve gıda sanayinde, sudan zarar görmüş tarihi dökümanların onarımında, yapay deri imalatında, yarıiletken endüstrisinde kullanılan seramik malzemelerin imalatında kullanılmaktadır.

Dondurarak kurutma yöntemi temel olarak ürünün dondurulması ile doğal özelliklerinin bozulmadan kalabilmesine olanak sağlayan bir kurutma işlemi yöntemidir. Bu yöntemde ürün ilk haliyle hemen dondurulur ve daha sonra kurutma işlemine geçilir. Bu sebeple üründe oluşabilecek herhangi bir bakteriyel oluşum engellenmiş olur. Dondurarak kurutma yönteminde kurutulan ürün şekil, boyut, tat

ve renk açısından çok fazla değişime uğramaz. Bunun sebebi dondurarak kurutma işleminde, ürünün kurutulması için yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmamasıdır. Ürünün içindeki su, süblimasyon ile katı halden, sıvı hale geçmeden direk gaz haline geçirilerek uzaklaştırılır. Daha sonra tekrar su ile temas eden ürünler tazeliğini korumuş şekilde kullanılabilir.

Dondurarak kurutma yöntemi, diğer kurutma yöntemlerine kıyasla çok pahalı bir yöntem olmasına rağmen kurutulmuş ürünlerin kalitesinin çok yüksek olması ve düşük sıcaklıklardan dolayı bakteriyel etkilerin oluşmaması nedeniyle, özellikle sağlık ve gıda sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Gıda sektöründe özellikle uzun süre bozulmadan dayanabilmesi ve kurutma işlemi sonrasında ağırlığının yaklaşık %80-90 oranında azalması ile taşınmasının kolaylaşması gibi olumlu etkilerden dolayı tercih edilmektedir.

Dondurarak kurutma işlemlerinde kurutma süresi 1 hafta veya daha fazlaya kadar çıkabilir. Bunun nedeni düşük sıcaklıklardır. Sıcaklık arttırıldıkça kurutma süreleri 1 gün veya daha kısa zamanlara düşebilmektedir. Bu sebeple kurutulacak ürünün sıcaklıktan nasıl etkilendiği göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktördür.

Dondurarak kurutma işlemi üç önemli safhadan oluşur. Bunlar,

- Dondurma safhası,
- Birinci kurutma safhası,
- İkinci kurutma safhasıdır.
- Dondurma safhası

Bu safhada kurutulmak istenen ürün özelliğine göre uygun olarak dondurulur. Dondurma safhası dondurarak kurutma işleminin en önemli safhasıdır. Bunun sebebi dondurarak kurutma işlemi süblimasyon esasına dayandığından, kurutulacak ürünün gözenek yapısı ve dondurma işlemi sonrası ürün içindeki buzun yapısı önem teşkil etmektedir. Dondurma işlemi öncesinde ürün özelliğine göre küçük parçalara ayrılabilir. Bu kurutma işleminde süblimasyon hızına etki etmesinin yanı sıra donma

hızına da etki eder. Örneğin ince dilimlenmiş bir meyvenin donması çabuk olurken, kalın dilimlenmiş meyvenin iç kısımlarında kalan suyun donması zaman alacaktır. Bu durumda kalın dilimlenmiş ürünlerde dondurma işlemi sonrasında dış yüzeydeki donma yapısı ile iç yüzeydeki farklılık gösterecektir.

- Birinci kurutma safhası

Dondurarak kurutma işleminde ürün içinde bulunan su katı hale geçirildikten sonra düşük basınçta süblimasyona uğrattırılıp sistemden uzaklaştırılır. Bu işlem vakum pompası yardımıyla yapılır. Kurutma hacmine yerleştirilmiş ürünün etrafındaki hava vakum pompası ile hacim dışına atılır. Yeterli vakum değerine ulaşıldığında süblimasyon ısısının yardımıyla katı haldeki su gaz fazına geçer. Gaz haline geçmiş su buharı vakum pompası yardımıyla emilir ve sistem dışına atılır. Bu sistemlerde vakum pompası öncesi yerleştirilen bir yoğuşturucu vasıtası ile gaz halindeki suyun vakum pompasına ulaşması ve orada yoğunlaşma ihtimali engellenmiş olur.

Süblimasyon sırasında gerekli olan ısı ürünün kendisinden çekilir. Bu sebeple ürünün sıcaklığı düşer. Bu durum süblimasyon hızını yavaşlatan bir etkidir. Bu sebeple sistem içerisine yerleştirilmiş ısıtıcı vasıtası ile ürün için gerekli süblimasyon ısısı sağlanmış olur.

Sistem içerisine yerleştirilen ısıtıcının sıcaklığı gelişigüzel seçilemez. Sıcaklığın üründe bozulma, buruşma, renk değişimi, biyokimyasal aktivitelere sebep olan bir değerde olmaması önemlidir.

Birinci kurutma safhası ürünün süblimasyonu bitinceye kadar devam eder.

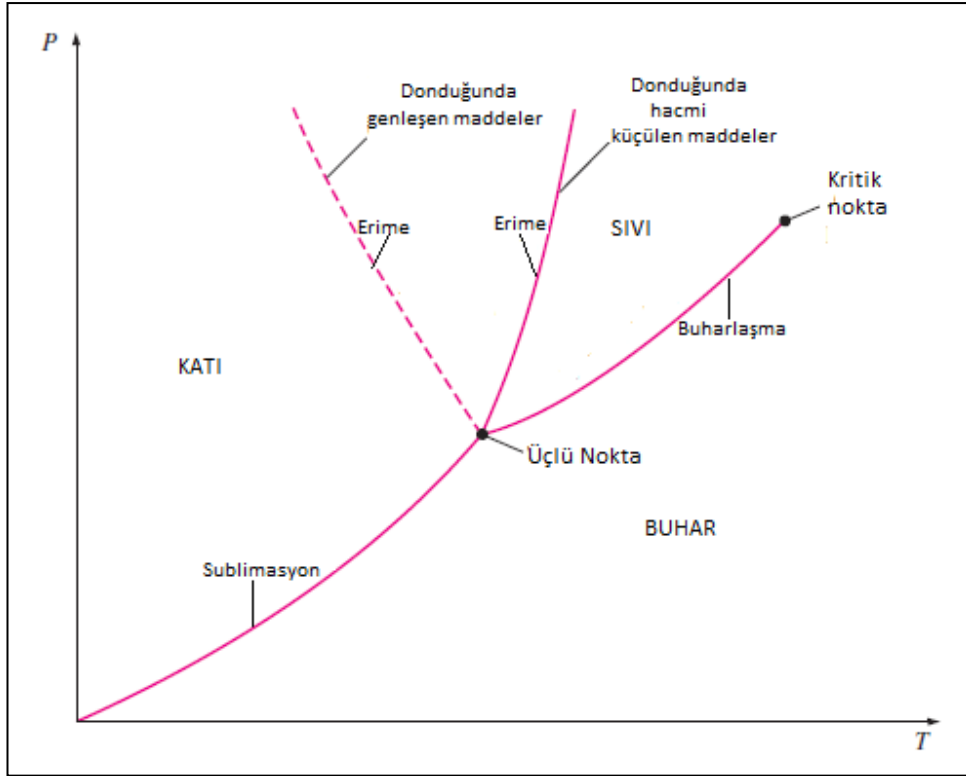
- İkinci kurutma safhası

İkinci kurutma safhası, dondurarak kurutma işleminin son safhasıdır. Bu safhada sıvı haldeki su üründen uzaklaştırılır. Bu safhada da birinci kurutma safhasındaki gibi ürüne vakum altında sıcaklık verilir. Bu safhada verilen sıcaklık birinci kurutma safhasına oranla daha yüksektir. Fakat bu kısımda da ürüne verilen sıcaklık çok hızlı

artırılmaz. Bu safhada sıcaklıktan etkilenen ürünler 10-35 °C, sıcaklıktan etkilenmeyen ürünler ise 50 °C lerde kurutulur (Sadıkoğlu and Özdemir, 2001). İkinci kurutma safhası sonunda ürün kurumuş kabul edilir.

4.1. SUBLİMASYON NEDİR?

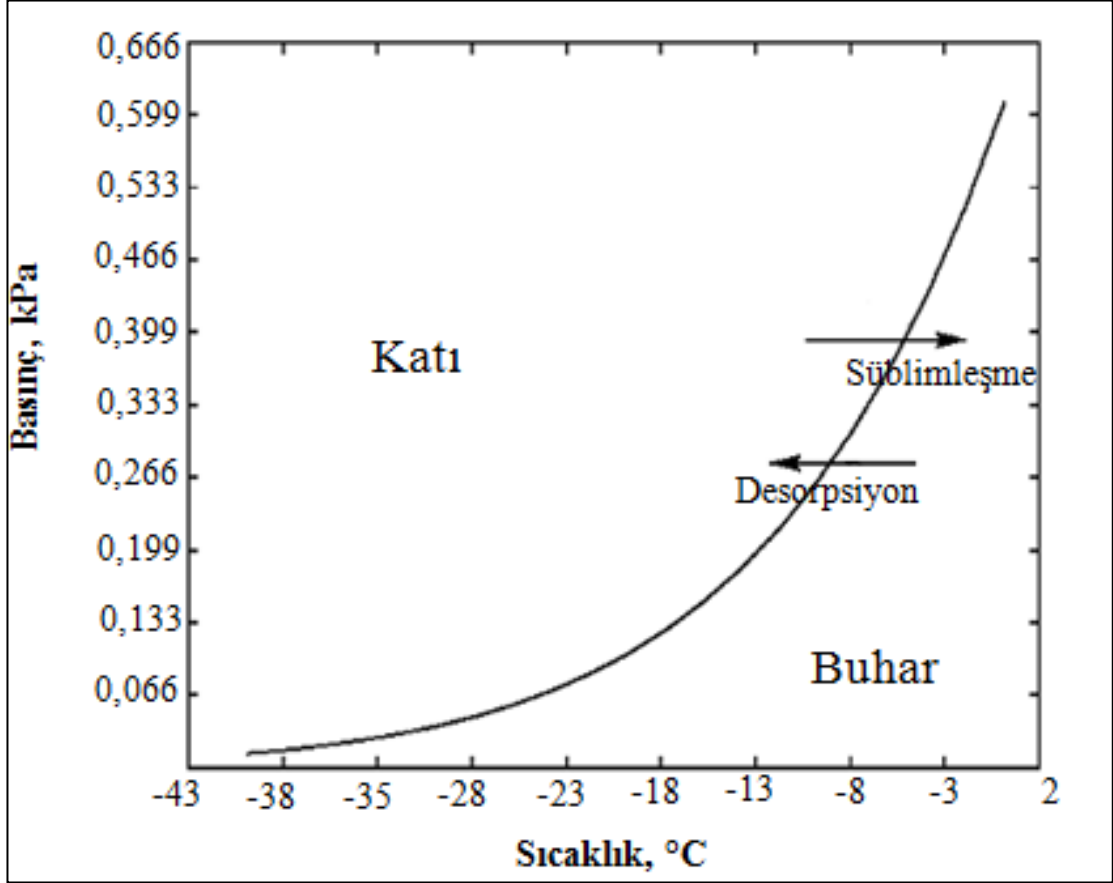
Maddenin katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç temel fazı vardır. Madde sahip olduğu enerji ve bulunduğu ortama göre bu üç fazdan birinde, ikisinde veya üçünde bulunabilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Saf maddenin P-T diyagramı (Çengel and Boles, 2002).

Maddenin sahip olduğu enerji ve bulunduğu ortam basıncının değişmesi maddenin bulunduğu fazdan başka bir faza geçmesine sebep olabilir. Maddenin katı fazdan sıvı fazına geçmesine erime, sıvı fazdan buhar fazına geçmesine buharlaşma, katı fazdan buhar fazına direk geçmesine ise süblimleşme denir. Süblimasyon hal değişiminin gerçekleşebilmesi için maddenin hal değişimi grafiği o maddeye ait P-T diyagramında süblimasyon eğrisinin üzerinden geçmelidir (Şekil 4.3). Bunun için

düşük basınç en önemli faktördür. Çizelge 4.1’de buzun farklı sıcaklıklarda buhar basıncı verilmiştir.



Şekil 4.3. Suyun katı fazı ile gaz fazı arasındaki doyumluk eğrisi (Pikal et al., 1984).

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklıklarda buzun buhar basıncı (Kırmacı, 2008).

SICAKLIK °C	Basınç Değerleri (mmHg)				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
-29	0,317	0,311	0,304	0,298	0,292
-28	0,351	0,344	0,337	0,330	0,324
-27	0,389	0,381	0,374	0,366	0,359
-26	0,430	0,422	0,414	0,405	0,397
-25	0,476	0,467	0,457	0,448	0,439

Çizelge 4.1. (devam ediyor.)

-24	0,526	0,515	0,505	0,495	0,486
-23	0,580	0,569	0,558	0,547	0,536
-22	0,640	0,627	0,615	0,603	0,592
-21	0,705	0,691	0,678	0,665	0,652
-20	0,776	0,761	0,747	0,733	0,719
-19	0,854	0,838	0,822	0,806	0,791
-18	0,939	0,921	0,904	0,887	0,870
-17	1,031	1,012	0,993	0,975	0,956
-16	1,132	1,111	1,091	1,070	1,051
-15	1,241	1,219	1,196	1,175	1,153
-14	1,361	1,336	1,312	1,288	1,264
-13	1,490	1,464	1,437	1,411	1,386
-12	1,632	1,602	1,574	1,546	1,518
-11	1,785	1,753	1,722	1,691	1,661
-10	1,950	1,916	1,883	1,849	1,817
-9	2,131	2,093	2,057	2,021	1,985
-8	2,326	2,285	2,246	2,207	2,168
-7	2,537	2,493	2,450	2,408	2,367
-6	2,765	2,718	2,672	2,626	2,581
-5	3,013	2,962	2,912	2,862	2,813
-4	3,280	3,225	3,171	3,117	3,065
-3	3,568	3,509	3,451	3,393	3,336
-2	3,880	3,816	3,753	3,691	3,630
-1	4,217	4,147	4,079	4,012	3,946
0	4,579	4,504	4,431	4,359	4,287

4.2. ÜRÜNÜN SU AKTİVİTESİ (a_w)

Bir gıdanın su aktivitesi (a_w), gıdanın mikrobiyolojik veya kimyasal-biyokimyasal yollarla bozularak kalitesini kaybetmesi üzerinde rol oynayan önemli bir faktördür (Anthony and Fontana, 2000). Gıdaların su aktivite değerleri saf suyun su aktivitesi ($a_w= 1.0$) değerine çok yakındır. Gerçekte meyve ve sebzelerin su aktivitesi değerleri

genellikle $a_w=0.970-996$ arasında bulunmaktadır. Meyvelerin su aktiviteleri sebzeleinkinden biraz daha düşüktür.

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

Çeşitli kaynaklarda mikroorganizmaların faaliyeti ile ilgili belirlenmiş minimum su aktivite değerlerinde farklı değerler bulunmaktadır. Bu durum su aktivitesinin mikroorganizmalar üzerindeki inhibishon etkisinin diğer koşullar ile çok ilişkili olmasından kaynaklanmaktadır. Bazı mikroorganizmalar zamanla düşük su aktivitesine adapte olabilmekte ve bu nedenle faaliyetlerini engelleyen minimum su aktivite değeri değişiklik göstermektedir. Mikroorganizmaların üreyecekleri en düşük su aktivitesi değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Gıdalarda önemli olan mikroorganizma faaliyetleri için yaklaşık minimum su aktivite (a_w)değerleri (Kırmacı, 2008).

Mikroorganizmalar	a_w	Mikroorganizmalar	a_w
Gruplar		Gruplar	
Bozulma yapan bakterin çoğu	0.90	Halofilik bakteriler	0.75
Bozulma yapan mayaların çoğu	0.88	Kserofilik küfler	0.61
Bozulma yapan küflerin çoğu	0.80	Ozmofilik mayalar	0.61

Su aktivitesinin 0.6'nın altında bulunduğu durumlarda bile gıdalarda bozulmaya sebep olan bazı reaksiyonlar gerçekleşebilmektedir. Ancak su aktivitesinin daha aşağı düzeye inmesi durumunda bu reaksiyonların hızı yavaşlamaktadır. Su aktivitesi mikroorganizmaların sadece çoğalma ve faaliyetleri üzerine değil; metabolit üretme

yetenekleri üzerinde de etkili olmaktadır. Örneğin herhangi bir küfün belli bir su aktivitesi değerinde bir gıdada çeşitli değişimlere ve bozulmalara neden olabilmesine rağmen, mikotoksin oluşturabilmesi için içinde bulunduğu su aktivitesi değerinden daha yüksek düzeyde bir su aktivitesine gereksinim duymaktadır. Çizelge 4.3’de bu durumu açıklayan değerler gösterilmiştir. Mikroorganizmalar düşük su aktivite değerlerinde üremelerine ve faaliyet göstermelerine karşın toksin oluşturabilmeleri için daha yüksek su aktivitesine gereksinim duymaları “orta nemli gıdaların” bu açıdan güvenli olmalarının başlıca nedenidir.

Çizelge 4.3. Bazı toksijenik küflerin faaliyetleri ve toksin üretebilmeleri için gerekli en düşük su aktivitesi (a_w) değerleri (Romero et al., 2004).

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

Çizelge 4.4’de bazı gıda gruplarının su aktivite değerleri verilmiştir. Su aktivite değerlerinin aralık olarak verilmesi, söz konusu gıdaların farkı bileşimlerinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.4. Bazı gıda gruplarının su aktivite (a_w)değerleri (Kırmacı, 2008).

GIDALAR	Su Aktivitesi (a_w)	GIDALAR	Su Aktivitesi (a_w)
Kuru meyveler	0.60 – 0.75	Bal	0.75
Kuru sebzeler	0.30 – 0.40	Kek ve kuru pasta	0.60 – 0.90
Reçel – marmelat	0.80 – 0.91	Şekerlemeler	0.60 – 0.65
Meyve suyu konsantreleri	0.79 – 0.84	Ekmek	0.96
Tahıl ve baklagiller	0.65 – 0.75	Dondurulmuş gıdalar	0.60 – 0.90

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

Gıdanın içerisindeki su oranının bulunduğu çevre havası bağıl nemi (ÇBN) ile dengeye ulaştığında, çevre havası bağıl neminin 100'e bölünmesi ile gıdaya ait mevcut su oranındaki su aktivitesi (a_w) bulunmaktadır (Cemeroğlu et al., 2003).

4.3. DENGİ NEMİ

Bir ortamda bulunan su buharlaşarak bir süre sonra çevresiyle denge noktasına geldiği gibi, diğer ıslak maddelerde aynı şekilde bulunduğu ortam ile nem bakımından denge noktasına gelir. Gıdanın nem içeriği ile çevre havasının bağıl nemi arasındaki ilişkiye "sorpsiyon izotermi" denir.

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

Başlangıçta tam anlamıyla kuru olan bir materyalin, yine değişik bağıl nemli ortamlarda tutularak elde edilen eğriye "adsorpsiyon izotermi" denir. Sorpsiyon izotermilerinden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır. Nitekim desorpsiyon izotermi, ürünlerin kurutulma işleminin izlenmesi ve incelenmesinde yararlı bilgiler

vermektedir. Adsorpsiyon izotermi ise kurutulmuş ürünlerin higroskopik nitelikleri ile bunların depolanma koşullarını ortaya koymaktadır (Demirtaş, 1996).

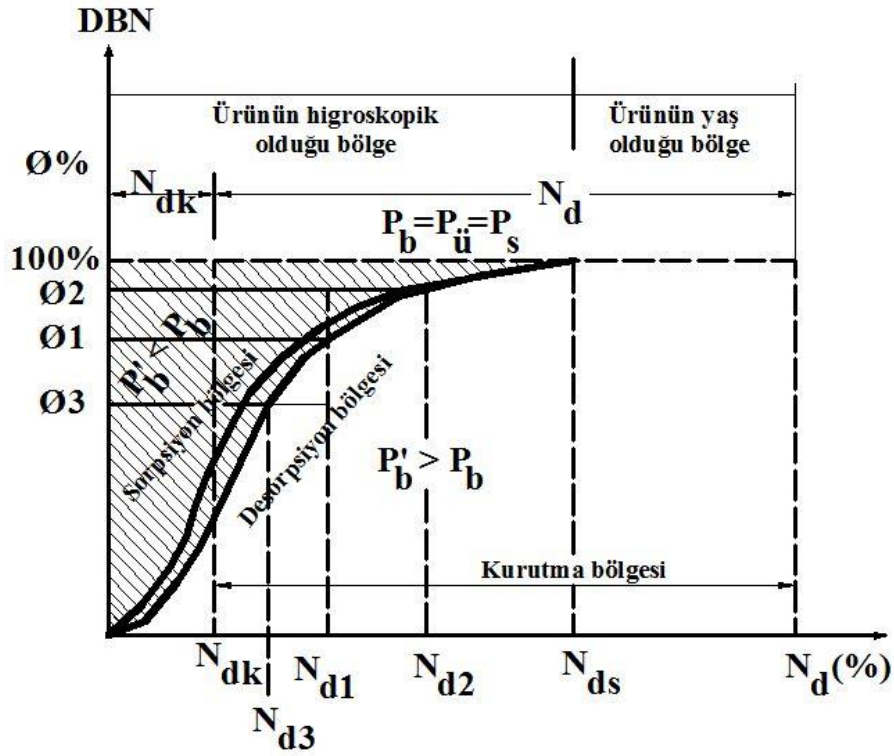
4.4. KURUMANIN STATİĞİ VE KİNETİĞİ

4.4.1. Kurumanın Statiği

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

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

Denge durumunda; havada bulunan su buharının kısmi basıncı (P_b) ile ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ($P_{\bar{u}}$) birbirine eşittir. Materyalin yüzey sıcaklığı yaklaşık çevre havası ya da termometre havası sıcaklığına eşit olduğundan ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı ile ($P_{\bar{u}}$), havanın ya da termometre sıcaklığındaki su buharının kısmi buhar basıncı (P'_b) eşit alınabilmektedir. Bu nedenle denge durumunda materyalin ulaştığı nem (N_d), havanın kısmi buhar basıncına yani bağıl nemine (ϕ) bağlıdır (Yağcıoğlu, 1999).

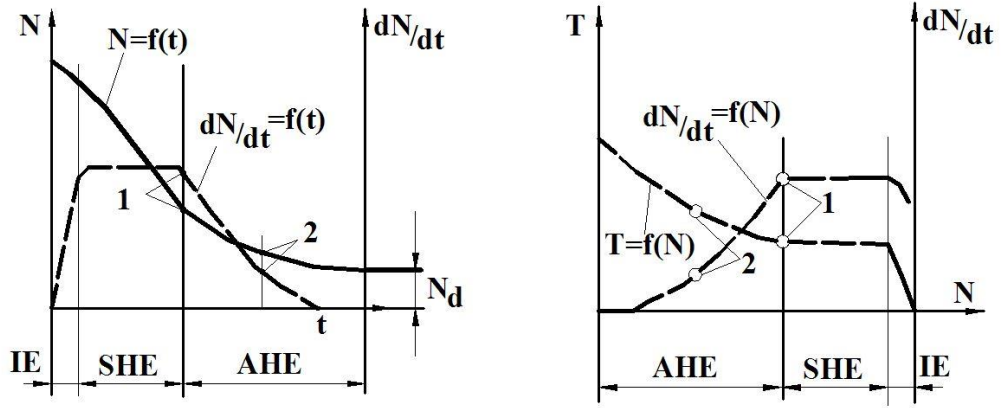


Şekil 4.4. Sorpsiyon eğrisinin kurutmanın statığı açısından anlamı.

Herhangi bir materyalin sorpsiyon izoterm eğrisi kurutma açısından incelendiğinde sorpsiyon ve desorpsiyon bölgeleri Şekil 4.4'te gösterildiği gibi olmaktadır. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere izotermin denge bağıl nemi (DBN) eksenini ile arasında kalan bölge içindeki her noktada ürünün yüzeyinde bulunan suyun buhar basıncı havada bulunan suyun buhar basıncından daha küçük olduğundan bu bölge, materyalin bünyesine nem aldığı şartları belirtmektedir. İzotermin denge nemi eksenini ile arasında kalan bölge içinde ise durum tam ters olduğundan bu bölge materyalin çevreye nem verdiği şartları belirtmektedir. Kuruma bölgesi ürünün ulaşabileceği en küçük denge nemi N_{dk} değerinden geçen bir eksenden başlatılarak gösterilmektedir.

4.4.2. Kurumunun Kinetiği

Kurumunun kinetiğinde, materyal ile çevresindeki hava arasındaki nem alışverişi, kuruma sürecinde geçen zaman dikkate alınarak incelenmektedir. Şekil 4.5'te tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri verilmiştir (Demir and Günhan, 2002).



Şekil 4.5. Tarım ürünlerinin kinetik kuruma eğrileri.

Şekil 4.5'te grafiklerden de anlaşılacağı üzere kuruma olayının kinetik olarak incelenmesi sırasında aşağıdaki ilişkiler dikkate alınmaktadır:

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

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

- Materyalin ısınma evresi (IE),
- Sabit hızla kuruma evresi (SHE),
- Azalan hızla kuruma evresi (AHE) şeklinde sıralanabilir.

Kuruma işleminin başlangıcında görülen ısınma evresi (IE), kurutulacak ürünün sıcaklığı, kurutma ortamının sıcaklığı ile dengede oluncaya kadar devam etmektedir. Bu evrede kuruma hızı giderek artar ve evrenin sonunda en yüksek değerine ulaşır. IE süresi, toplam kurutma süresine göre çok kısa olduğundan kuruma eğrilerinde gösterilmemektedir (Güner, 1991; Mengeş, 2005).

Sabit hızla kuruma evresinde (SHE), kurutulacak materyalin yüzeyi başlangıçta ince bir su tabakası ile kaplı halde bulunur. Öncelikle bu su tabakası buharlaşmaya başlar.

Ürünün özelliklerine bağlı olmayan bu buharlaşma tamamen dış hava koşullarınca belirlenmektedir. Nem materyalin yüzeyinden, herhangi bir serbest su tabakasının yüzeyinden buharlaşan su ile aynı davranışı göstererek buharlaşmaktadır.

Yüzeydeki serbest su tabakası sabit bir kuruma hızı ile buharlaşırken devamlı olarak hücre aralarındaki hava boşluklarının meydana getirdiği kılcal borularla beslenmektedir. Diğer bir ifadeyle, sabit hızla kuruma evresi (SHE) boyunca, suyun materyal yüzeyine iletim hızı ile yüzeyden buharlaşan suyun hızı birbirine eşit olmaktadır (Akyurt et al., 1971).

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

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

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

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

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

Bu evre sırasındaki kuruma olayını incelemek amacıyla;

- Teorik
- Yarı teorik,
- Deneysel yöntemlerle elde edilen çeşitli matematiksel modellerden,

yararlanmak mümkündür (Mengeş, 2005).

4.5. KURUTMA HIZI

Birim zamanda birim alandan buharlaşarak ayrılan su kütlesi kurutma hızını verir. Ürünün kalitesi ve maliyeti açısından kurutma hızı önemlidir (Kırmacı, 2008).

Kurutma hızı üründen istenen kaliteye ve ürünün maliyet fiyatına göre sıcaklık, basınç ve geometri parametrelerinin değiştirilmesi ile kontrol edilebilen bir faktördür. Örneğin, ürünün kurutulduğu sıcaklık değeri artırılsa kuruma hızı artar. Fakat artan sıcaklık ürünün kurutulması sırasında bazı fiziksel ve kimyasal değişimlere sebep olabilir ve bu da ürünün kalitesini etkiler. Bu sebeple kurutma hızı istenilen özelliklere göre optimum olarak ayarlanması gereken bir parametredir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

5.1. MATERYAL

Yapılan deneysel çalışmalar Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda, geniş çaplı olarak gerçekleştirilen literatür çalışması ve araştırmalar neticesinde tasarımı yapılarak prototip halinde imal edilen bir dondurarak kurutma sistemi kullanılmıştır. Dondurarak kurutma sistemi; vakum hacmi, soğutma sistemi, vakum pompası ve ölçüm sistemi başta olmak üzere çeşitli kısımlardan (parçalardan) oluşmaktadır. Deneyselerde kullanılan sistem Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Deneyselerde kullanılan sistemin genel görünüşü.

Sistemde yer alan soğutma sistemine bir dört yollu valf ve dijital termostat yerleştirilerek vakum hacmi içerisindeki sıcaklığın -30 ile +63 °C aralığında hassas bir biçimde ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, sistemin taşınması veya hareket ettirilmesinin gerekli olduğu durumlarda kolaylık sağlanabilmesi açısından uygun konstrüksiyon hazırlanmış ve sistem bu konstrüksiyon üzerine yerleştirilmiştir.

Çalışmalarda numune olarak ekşi yeşil elma kullanılmıştır (Şekil 5.2). Bunun nedenleri arasında, bol sulu bir meyve olmasından dolayı kuruma eğilimini kolayca gözlemlenebilmesi ve kolay tedarik edilebilir olması deneysel çalışmalar sırasında taze ürün kullanılabilmesine olanak sağlaması gösterilebilir.

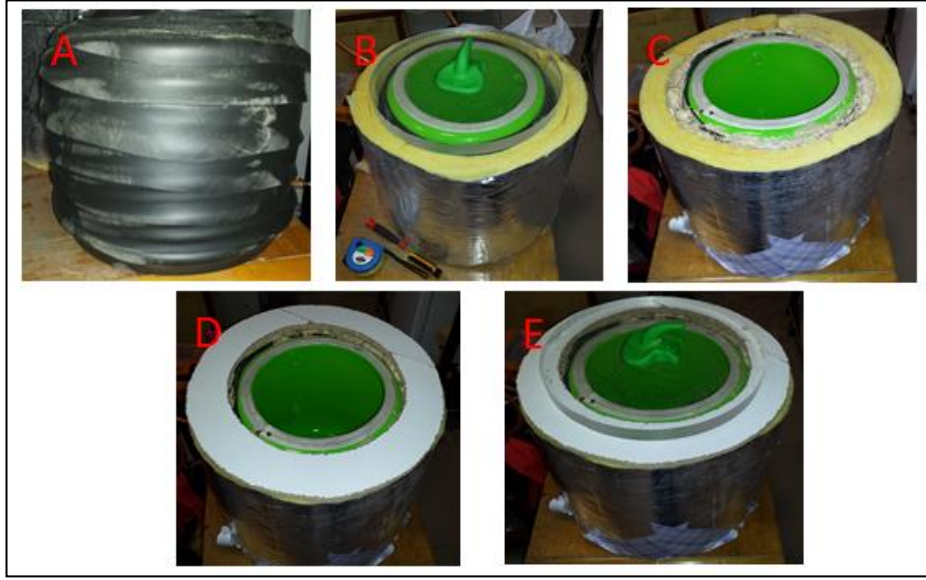


Şekil 5.2. Numune olarak kullanılan yeşil elma.

5.1.1. Kurutma Hacmi

Kurutma hacmi olarak 240 mm çapında, 32 cm yüksekliğinde, 3 mm et kalınlığında alüminyum malzemedan bir hacim kullanılmıştır. Kurutma sırasında hacim içerisindeki değişimlerin gözlemlenebilmesi için pleksi malzemedan imal edilmiş 30 mm kalınlığında kapak üretilmiştir. Sisteme vakum pompasının bağlanması için 1 adet ve kurutma hacmini vakum altındayken tekrar atmosfer basıncına getirecek havanın girişini sağlamak için de 1 adet bağlantı yeri açılmıştır. Bu iki bağlantı noktası vana ile kontrol edilecek şekilde tasarlanmıştır. Pleksi malzemenin kurutma hacmine temas ettiği noktaya uygun conta yerleştirilmiştir. Bu contanın altından sistemin içerisine termostatın sıcaklık algılayıcı probunun girişi sağlanmıştır. Kurutma hacminin dışına soğutma ve ısıtma yapılması için bakır boru sarılmış ve bu

bakır boruların dışına yalıtım amaçlı kauçuk malzemeden yapışkanlı bant sarılmıştır (Şekil 5.3a). Kauçuk malzemenin üzerine 30 mm kalınlığında cam yünüden yalıtım yapılmıştır (Şekil 5.3b). Cam yünüün dolduramadığı boşluklar sıvı poliüretan malzeme sıkılarak yalıtılmıştır (Şekil 5.3c). Hacmin dış etkilerden korunması amacıyla alt ve üst yüzeyleri uygun geometride kontrplak malzeme kesilerek sağlamlaştırılmıştır (Şekil 5.3d). Sistemin en dışı lifli alüminyum bant ile sarılarak sistem bütünlüğü sağlanmıştır (Şekil 5.3e).

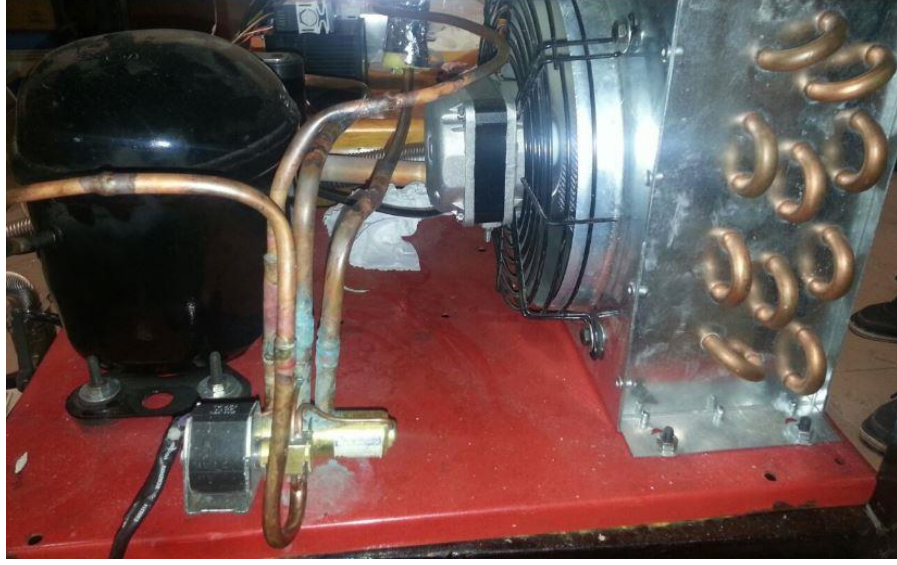


Şekil 5.3. Kurutma hacminin imalat aşamaları, a) Kauçuk malzemeden yapışkanlı bantın sarılması, b) Cam yünü ile yalıtım yapılması, c) Sıvı poliüretan ile boşlukların doldurulması, d) Uygun kesilmiş kontrplak malzeme montajı, e) Kurutma hacminin son hali.

5.1.2. Soğutma Sistemi ve Elemanları

Kurutma hücresinin sıcaklığını istenen değerlerde ayarlayabilmek amacıyla bir soğutma sistemi tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 5.4). Sıcaklığın kontrolü Dixell marka XR10CX model termostat yardımıyla sağlanmıştır. Soğutma sistemi, kurutma hacmi dışına sarılmış bakır boru (evaporatör), R404A soğutucu gaz kompresörü, yoğuşturucu, dört yollu valf, kılcal boru gibi elemanların birleşimiyle oluşturulmuştur. Dört yollu valfin çalışması manuel kontrol edilebilir olup bir açma-kapama tuşu bulunmaktadır. Kurulan sistemin çalışma aralığı $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+63\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası ölçülmüştür. Sistemde bulunan serbest bakır borular dış ortama karşı cam yünü

malzeme ile yalıtılmıştır. Kılcal boru kompresöre giriş yapan bakır boru etrafına sarılmış bu da verimi bir miktar artırmıştır.



Şekil 5.4. Çalışmada kullanılan soğutma sistemi.

5.1.3. Vakumlama Sistemi

Vakumlama sistemi, her türlü vakumlama işleminin kolaylıkla yapılabileceği otomatik bir sistem olarak temin edilmiştir. Deneylerde ILMVAC marka PK 8 Dp model bir vakum pompası kullanılmıştır (Çizelge 5.1). Sistemin güvenliği açısından vanalar, sızdırmazlık için contalar, kelepçeler, sıvı conta ve teflon bant, bazı kontrol ekipmanlarının bağlanabilmesi için ara bağlantı elemanları ve borular kullanılmıştır. Şekil 5.5’de vakum pompası ile vakumlanacak hacim arasında kullanılan bağlantı elemanları ve sızdırmazlık elemanları gösterilmiştir. Bu bağlantıda birer adet filtre, manuel küresel vana ve esnek alüminyum hortum kullanılmıştır. Filtre, vakum hacminden gelebilecek toz ve benzeri maddelerden vakum pompasını korumak amacıyla kullanılmıştır. Manuel vana ise, vakum pompası çalıştığı anda vakum hacminde ani basınç düşümleri oluşmasını engellemek ve vakum pompasının gaz balast modunda çalışma şartlarını sağlayabilmek amacıyla kullanılmıştır. Sistemde kullanılan esnek alüminyum hortum, gaz sızıntılarının engellenmesi, esneklik, bağlantı ağızlarının özel birleştirme kelepçeleri ile kolayca birbirine birleştirilebilme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir.

Çizelge 5.1. Ilmvac PK 8 Dp vakum pompası özellikleri.

Parametre	Birim	PK 8 Dp
Pompalama Hızı (Hacimsel Debisi) 50/60 Hz (DIN 28426)	m ³ /h ⁻¹	7.2/8.6
Bağlantı Flanşı	-	DN 25 KF
Gerilim/Frekans	V, Hz	230, 50/60 (230/400, 50/60) (115, 50/60)
Motor Gücü	kW	0.37
1500/dak. (50 Hz) En Yüksek Basıncı (DIN 28426)		
-Gaz Balast Olmadan (Kısmi)	mbar	2 x 10 ⁻⁴
-Gaz Balast Olmadan (Toplam)		2 x 10 ⁻³
- Gaz Balast İle (Toplam)		1 x 10 ⁻²

Basıncın ölçülebilmesi için bir adet hassas vakum sensörü kullanılmıştır. Bu sensörden alınan bilgiler vakum göstergesine aktarılmıştır. Sistemin elektriksel güvenliği açısından selenoid valf ve röleler kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Vakum sisteminde kullanılan bazı bağlantı elemanları.

5.1.4. İnkübatör

Çalışmada numunelerin tam kuru ağırlığının belirlenmesi için Nüve EN032 PID kontrollü inkübatör kullanılmıştır. İnkübatörün teknik özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Nüve EN032 teknik özellikleri.

EN032 Teknik Özellikler	
Sıcaklık ayar ve okuma hassasiyeti	0.1 °C
Kullanılabilir hacim, (lt)	32
Raf sayısı (standart/maksimum), (adet)	2/6
Kurulu güç (W)	300
Güç değerleri	230 V, 50Hz
İç yüzey yapısı	Paslanmaz çelik
Dış yüzey yapısı	Elektrostatik toz boyalı çelik sac
İç ölçüler (ExDxY), (mm)	330x300x327
Dış ölçüler (ExDxY), (mm)	565x495x680
Net ağırlık, (kg)	34

5.1.5. Ölçüm Sistemleri

Deney sırasında önemli parametrelerin ölçülebilmesi için basınç, sıcaklık, ağırlık, a_w değeri ve elektriksel ölçüm sistemleri kullanılmıştır. Çalışma sırasında düzenli aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerden gerekli görülenler bu çalışmada düzenlenerek sunulmuştur.

5.1.5.1. Ağırlık Ölçümü

Çalışma süresince numunelerin ağırlıklarını ölçebilmek için Neck marka WT2003H model dijital hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 5.6). Terazinin hassasiyeti 0,001 g olup maksimum 200 g ölçüm yapabilmektedir. Çalışmalara başlanmadan önce terazi referans ağırlığa göre kalibre edilmiştir.



Şekil 5.6. Neck WT2003H dijital hassas terazi.

5.1.5.2. Sıcaklık Ölçümü

Dondurarak kurutma sistemlerinde sıcaklık ve sıcaklığın hassas ayarlanabilmesi oldukça önemli faktörlerdir. Bu sebeple sistemin belirli noktalarına sıcaklık ölçüm problemleri yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri konusunda en önemli eleman, kurutma hacmi iç sıcaklığının hassas biçimde ayarlanmasını ve ayar değerinde uzun süre kalmasını sağlayacak termostattır. Kurutma hacminin sıcaklığı, içerisine yerleştirilmiş 1 adet Dixell marka termostat ile ölçülmüş ve bu ölçümler çalışma süresince kaydedilmiştir (Şekil 5.7).

Çalışmada, vakum hacmi içerisinde farklı noktalara ısı çiftleri yerleştirilmiş ve bu ısı çiftleri tarafından üretilen veriler Advantech marka ADAM 4018 model veri algılayıcı ile ADAM 4520 model dönüştürücü kullanılarak bilgisayar ortamına

aktarılmıştır. ADAM 4018'in teknik özellikleri Çizelge 5.3'de, ADAM 4520'nin teknik özellikleri ise Çizelge 5.4'de verilmiştir (Kavak, 2014).



Şekil 5.7. Sıcaklık ölçümünde kullanılan cihazlar.

Çizelge 5.3. ADAM 4018'nin teknik özellikleri.

Parametre	Özellik
Güç Tüketimi	10 – 30 V _{DC}
Doğruluk	± %0,1
Ölçüm Kanalı Sayısı	8
Çözünürlük	16
Girdi Tipleri	T/C, mV, V, Ma
İzolasyon Koruması	3000 V _{DC}
Boyutlar	
Ölçüm Aralıkları	J, K, T, E, R, S, B Termokupl +/- 1 V, +/- 2.5 V, +/- 5 V, +/-10 V +/-100 mV, +/- 500 mV, +A20 mA, +4-20 mA
Çevre Şartları	
Nem	5 - %95 RH
Uygulama Sıcaklığı	-10 ~ 70 ° C (14 ~ 158 ° F)
Depolama Sıcaklığı	-25 ~ 85 ° C (-13 ~ 185 ° F)

Çizelge 5.4. ADAM 4520'nin teknik özellikleri.

Parametre	Özellik
Bağlantı	USB
Güç Tüketimi	10 – 30 V _{DC}
Data Bits	5, 6 ,7, 8
Max. Uzaklık	15 m
Çalışma Sıcaklığı	10 – 70 °C
Depolama Sıcaklığı	-25 ~ 85 °C
Çalışma Nem Aralığı	5 ~95% RH

5.1.5.3. Basınç Ölçümü

Kurutma hücresinin basıncı, dondurarak kurutma yönteminin prensibi olan süblimleşmenin en önemli parametresidir. Bu sebeple kurutma hücresinin basıncı çalışma süresince ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Basınç değerinin ölçülebilmesi için sistem girişine T boru bağlantı elemanı ile ILMVAC marka 1000 mbar ile 10⁻⁵ mbar aralığında basınç ölçebilme özelliğine sahip olan pirani transduser (Series 925C) monte edilmiştir. Basınç sensöründen alınan bilgiler dönüştürücü ile vakum göstergesine aktarılmıştır (Şekil 5.8). Vakum ölçümünde Şekil 5.8'de gösterilen ILMVAC marka MRV 3000 model vakum gösterge ve veri kaydedicisi kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Sistemde kullanılan vakum göstergesi ve basınç transduseri.

5.1.5.4. Su Aktivitesi Ölçümü

Su aktivitesi (a_w), kurutulmuş ürünler için önemli bir faktördür. Su aktivitesi belli bir değerin altında olan ürünler biyolojik açıdan bozulmaya uğramaz veya daha az uğrarlar. Bu sebeple yapılan çalışmada kurutulan ürünlerin su aktivitesi Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesinde bulunan Testo-650 ölçüm seti kullanılarak tespit edilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Testo-650 su aktivitesi ölçüm seti (www.coleparmer.com).

5.1.5.5. Elektriksel Ölçüm

Sistemin harcadığı toplam elektriğin ölçümü için sistemin elektrik giriş hattına Köhler marka AEL.MF.07 model monofaze elektronik elektrik sayacı monte edilmiştir. Sistemdeki bütün ekipmanlar bir çoklu prizde toplanmış, bu çoklu priz de sayacın girişine tasarlanmış prize monte edilmiştir. Sayacın elektrik beslemesi şehir şebekesinden yapılmıştır.

5.2. METOT

Çalışmada, deneysel yöntem kullanılmış olup 13 farklı geometride kesilmiş olan elmanın numuneleri, tasarlanarak imal edilen kurutma sisteminde kurutulmuş ve kuruma grafikleri çizilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde elde edilen veriler yardımıyla en hızlı kuruyan 3 geometri belirlenmiş ve bu geometrilere sahip 20'şer adet numune hazırlanarak değişen sıcaklık değerlerinde kurutulmuştur. Kurutma işlemleri sonrasında numunelerin su aktivitesi (a_w) değerleri ölçülmüştür. " a_w " değerinin 0,6

dan küçük olması kimyasal ve mikrobiyolojik etkilerin oluşmasında alt sınır kabul edilerek, deneyler sonucunda elde edilen “ a_w ” değerleri yorumlanmıştır.

BÖLÜM 6

DENEY SONUÇLARI

Deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada farklı geometrilere sahip numunelerin kuruma özellikleri tespit edilmiş, ikinci aşamada ise birinci aşamada kurutulan numunelerden en hızlı kuruma eğilimi gösteren numuneler geometrilerinden çok miktarda örnek hazırlanarak kuruma özellikleri incelenmiştir.

6.1. FARKLI GEOMETRİDEKİ NUMUNELERİN KURUMA ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Kurutma işlemlerinde referans noktası alınmak üzere elmalar kesilip etüv fırınında çevre basıncında, 102 ± 2 °C de kurutulmuştur. İşlem sırasıyla şu şekilde yapılmıştır.

- Elmaların dış kabukları soyulup, 3 farklı geometride kesilmiştir ve ilk ağırlıkları kayıt edilmiştir.
- Kesilen numuneler çevre basıncında 102 ± 2 °C de etüv fırınına yerleştirilmiştir.
- Numuneler 6 saat aralıklarla 0.001 g ölçme hassasiyetli hassas dijital terazi ile tartılıp kaydedilmiştir.
- Kurutma işlemi iki ölçüm arasındaki farkın %1 den daha az olmasına kadar devam ettirilmiştir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Etüvde tam kuru ağırlığın belirlenmesi.

Numune	İlk ağırlık	Son ağırlık
Numune 1	9.829 g	1.373 g
Numune 2	7.860 g	1.079 g
Numune 3	21.598 g	3.125 g

Elmanın kuru baza göre başlangıç nem miktarı aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir (Aktaş, 2007).

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

Burada;

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







YA : Yaş ağırlık, (g)

KA : Kuru ağırlık, (g)













Bu çalışmada farklı geometrilere kesilen elmaların kurutma işleminin yapılabildiği aralarında en hızlı kuruduğu tespit edilen numunelerden çok miktarda hazırlanıp asıl kurutma işlemine geçilmiştir. Sıcaklık, basınç, numunelerin ağırlık kaybı ve harcanan elektrik belirli aralıklarla ölçülüp kayıt edilmiştir. Çalışma süresince sıcaklık termostat yardımıyla kontrol edilmiş ve belli aralıklarla değiştirilmiştir.

Taze alınan elmalar bol su ile yıkanıp kabukları soyulmuştur. 13 farklı geometride dilimlenen elmalar tek tek tartılıp kaydedilmiştir (Çizelge 6.2).









Çizelge 6.2. Farklı geometrilere hazırlanan numuneler ve ağırlıkları.

Numune	İlk ağırlığı	Kurutma öncesi fotoğraf	Son ağırlığı	Kurutma sonrası fotoğraf
1. 3mm	5.334 g		0.791 g	
2. 2mm	4.103 g		0.620 g	
3. 4 mm	6.125 g		0.906 g	

Çizelge 6.2. (devam ediyor.)

4. Kare delikli	8.368 g		1.336 g	
5. Kare deliksiz	9.815 g		1.557 g	
6. Elma dilim	19.371 g		2.919 g	
7. Küçük yaprak	1.928 g		0.286 g	
8. Küçük kalın	3.624 g		0.569 g	
9. Büyük (2mm)	14.591 g		2.413 g	

Çizelge 6.2. (devam ediyor.)

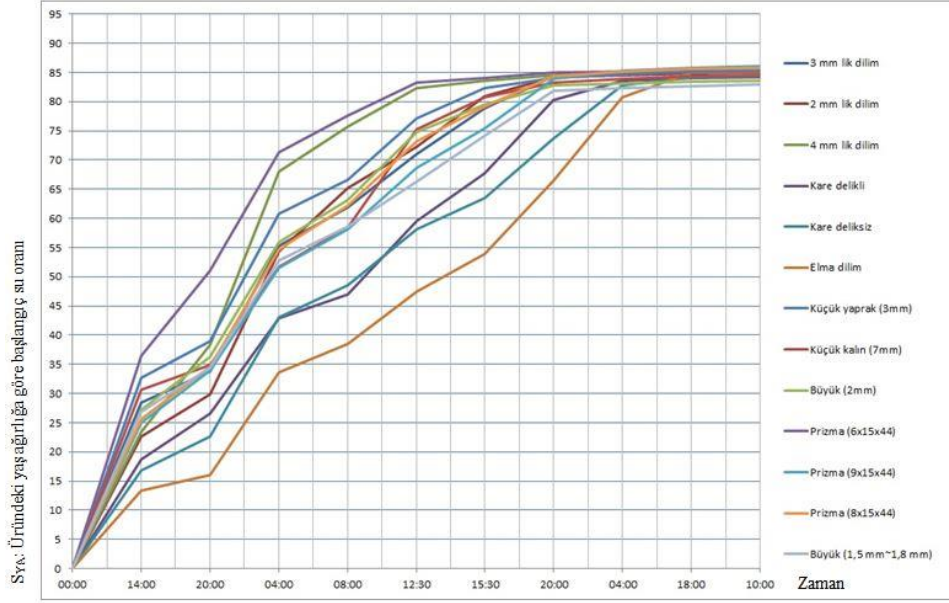
10. Prizma (6x15x44)	3.393 g		0.490 g	
11. Prizma (9x15x44)	5.098 g		0.721 g	
12. Prizma (8x15x44)	4.529 g		0.649 g	
13. Büyük (1.5 – 2mm)	11.104 g		1.920 g	

Numunelerin kuruma eğrileri çizilmiş ve en hızlı kuruyan 3 farklı geometrideki numuneler tespit edilmiştir (Şekil 6.1).

Şekil 6.1’de ki eğrilerin çizilmesinde yaş ağırlığa göre düzenlenen denklem kullanılmıştır.

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

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



Şekil 6.1. Farklı geometrilerdeki 13 numunenin kuruma eğrileri.

6.2. BELİRLENEN GEOMETRİLERDE KURUMAPARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Denklem 1 e göre numunelerin ortalama S_{KA} değeri 6.1181 (g su/g kuru ağırlık) hesap edilmiştir.

Şekil 6.1'deki eğrilere göre 3, 7 ve 10 numaralı numunelerin geometrileri en hızlı kuruyan geometriler olarak belirlenmiştir. Bu geometrilerde 20 şer adet numune hazırlanmış ve kurutma işlemine geçilmiştir. Bu işlemler sırasında numuneler A, B ve C olarak isimlendirilmiştir (Çizelge 6.3).

Numune A : Prizma (6x15x44)

Numune B : Küçük yaprak

Numune C : 4 mm lik dilim

Çizelge 6.3. Numunelerin minimum, maksimum ve ortalama ağırlıkları.

Numune Tipi	Minimum Ağırlık	Maksimum Ağırlık	Ortalama Ağırlık	S_{YA} (%)
Numune A	2.663 g	3.506 g	3.212 g	85.95
Numune B	1.490 g	2.555 g	1.962 g	
Numune C	4.284 g	7.343 g	5.447g	

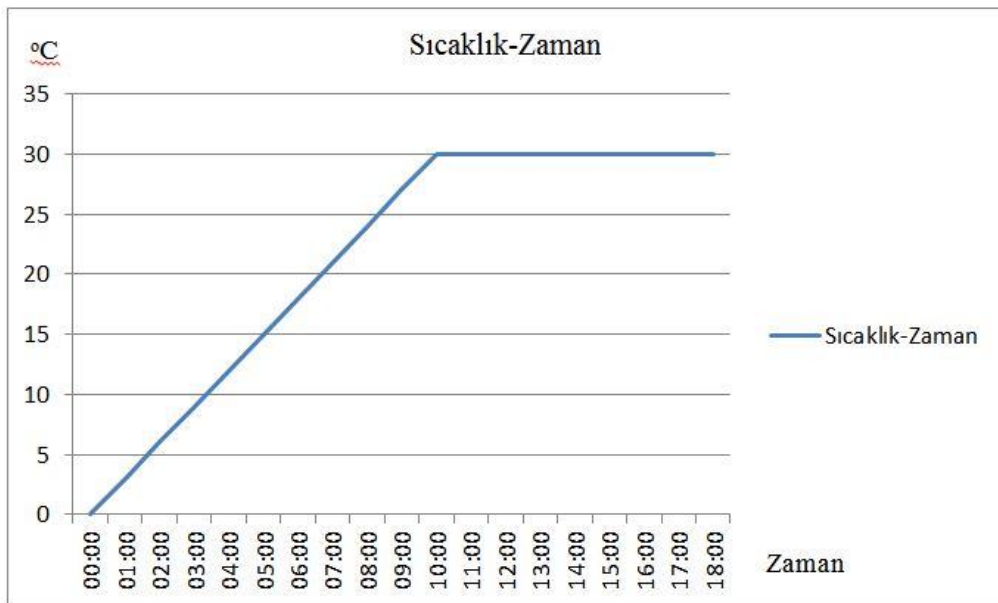
Ağırlıkları ölçülen numuneler dondurma işlemi için sisteme yerleştirilmiş ve $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 12 saat dondurulmuştur. Ürünlerin dondurma işlemi sonrasında ağırlıkları Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Dondurma işlemi sonrası numune ağırlıkları.

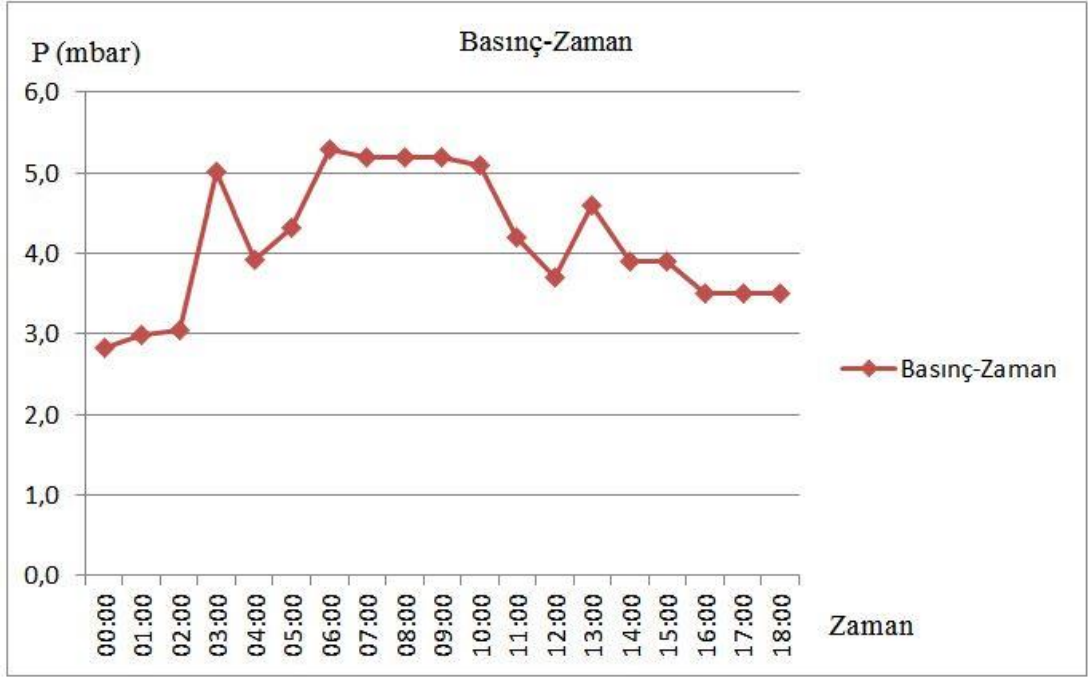
Numune Tipi	Minimum Ağırlık	Maksimum Ağırlık	Ortalama Ağırlık	S _{YA} (%)
Numune A	2.768 g	3.471 g	2.994 g	84.93
Numune B	1.381 g	2.348 g	1.823 g	84.88
Numune C	3.973 g	6.936 g	5.094 g	84.98

Dondurma işlemi sonrasında kurutma işlemine geçilmiştir. Kurutma işlemi için kurutma hacminin sıcaklığı $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye getirilmiş ve vakum pompası çalıştırılmıştır. Kurutma hacminin basıncı 3 dakika içerisinde 2.82 mbar a düşürülmüştür. Kurutma işlemi sırasında numunelerin ağırlıkları her saat ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Kurutma süresince kurutma hacminin sıcaklık-zaman grafiği Şekil 6.2’de verilmiştir. Ölçümler sırasında kurutma hacmi atmosfer basıncına getirilip numuneler dışarı çıkarılmış ağırlıkları ölçülüp ve tekrardan sisteme alındığında kurutma hacminin basıncında oluşan değişimler Şekil 6.3’de verilen grafikte gösterilmiştir.

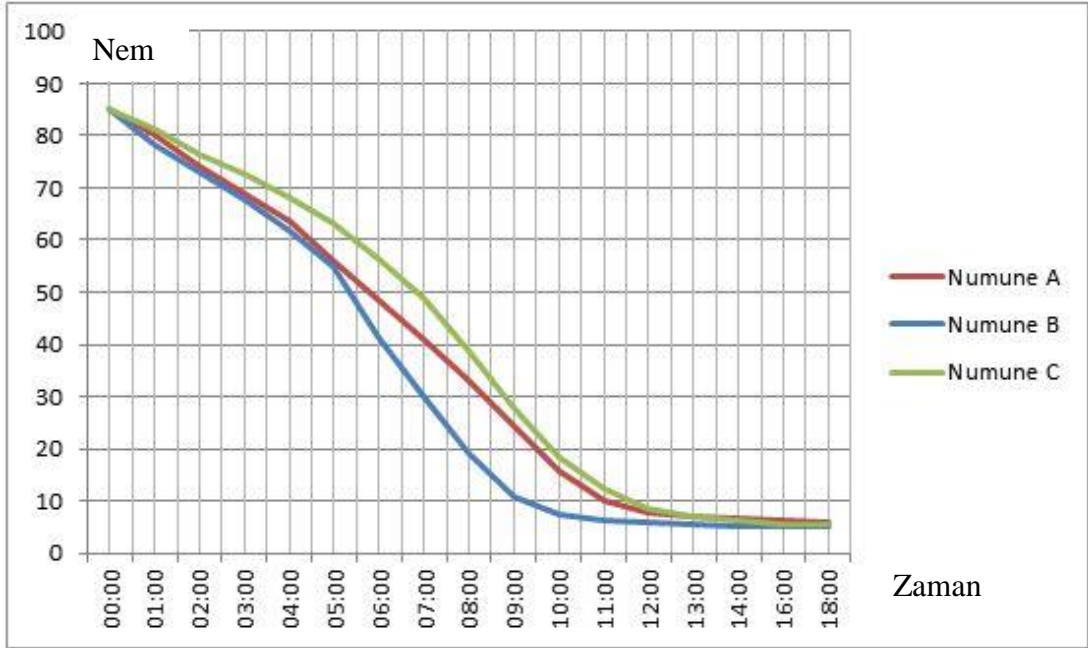


Şekil 6.2. Kurutma hacminin sıcaklık zaman grafiği.



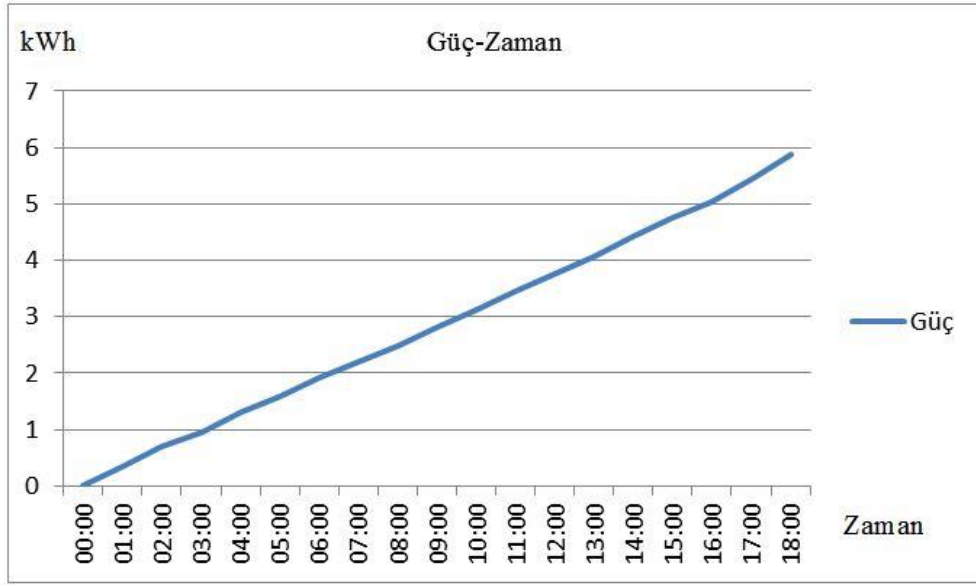
Şekil 6.3. Kurutma hacminin basınç-zaman grafiği.

Etüvde elde edilen $S_{KA} = 6.1181$ değerine göre, deney süresince numunelerin nem oranının zamana göre değişimi Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Zamana göre nem oranlarının değişimi.

Kurutma süresince harcanan elektrik enerjisi Şekil 6.5’te verilmiştir.



Şekil 6.5. Harcanan gücün zamana göre değişimi.

Numunelerin deney sonrasında ağırlıkları Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Deney sonunda kuruyan numunelerin su aktivitesi değerleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi laboratuvarında bulunan Testo-650 cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler sonrası numunelerin minimum ve maksimum a_w değerleri Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kurutma işlemi sonunda numune ağırlıkları.

Numune	Minimum Ağırlık	Maksimum ağırlık	Ortalama ağırlık	S_{YA}
Numune A	0.533 g	0.672 g	0.628 g	5.9
Numune B	0.289 g	0.462 g	0.367 g	5.03
Numune C	0.813 g	1.364 g	1.039 g	5.38

Çizelge 6.6. Numunelerin minimum ve maksimum su aktivitesi değerleri.

Numune	Minimum a_w değeri	Maksimum a_w değeri
Numune A	0.406	0.425
Numune B	0.398	0.408
Numune C	0.372	0.392

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Kurutma sistemleri gıda, kimya, ilaç gibi birçok sanayide sıklıkla kullanılan sistemlerdir. Bu sistemler kullanıldıkları sektörün ihtiyaçlarına göre farklı özelliklerde tasarlanabilmekte ve amaca uygun işlevsel özelliklere sahip olabilmektedirler. Bunlar arasında dondurarak kurutma sistemi yüksek kaliteli ürünlerin elde edilmesinde kullanılan pahalı bir yöntemdir.

Dondurarak kurutma sisteminin ülkemizde imalatının gerçekleşmemesi, sistemin yurtdışından ithal edilmesine veya istenilen kurutulmuş ürünlerin yurt dışından tedarik edilmesine sebep olmaktadır. Bu durum, dondurarak kurutma teknolojinin gerekli olduğu sektörlerde maliyetleri büyük oranda arttıran bir sebeptir. Bu çalışmada dört ana konu üzerine durulmuştur. Bunlar;

- Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı ve prototip hazırlanması,
- İmal edilen deney sisteminin kontrol deneylerinin yapılması,
- Elmanın farklı geometrilere kurutulması ve en uygun geometrilerin belirlenmesi,
- Belirlenen uygun geometrilere dondurarak kurutma işlemi yapılarak, kurutma parametrelerinin incelenmesi.

Yapılan çalışmada hedefler doğrultusunda:

- Soğutma sistemi vakum hacmine adapte edilmiş bu da ürünün sistem dışına çıkarılmadan tek bir hacimde tüm işlemlere tabi tutulabilmesini sağlamıştır.
- Soğutma sisteminde R404A kullanılmıştır. Kurutma hacminde -30 °C ile +63 °C arası herhangi bir sıcaklığa ulaşabilme olanağı sağlanmıştır.
- Oluşturulan sistemde muz, üzüm, incir ve bitki yaprakları kurutulmuş ve sistemin kurutma kabiliyeti denenmiştir.

- Elmanın farklı geometrilerde kuruma eğrileri çizilmiş, en hızlı kuruyan üç geometri belirlenmiştir.
- Belirlenen üç geometride yirmişer adet numune hazırlanmış ve kurutulmuştur. Kurutma süresince basınç, sıcaklık, ağırlık ve harcanan güç ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Çalışma sonucunda;

- Başlangıçta %85.95 olan nem oranı 18 saat sonunda A tipi numunede %5.9'a, B tipi numunede %5.03'e, C tipi numunede ise %5.38'e düşmüştür. Çizilen nem-zaman grafiklerine göre en hızlı nem kaybı B tipi numunede verilmiş ve optimum kabul edilebilecek %6 nem oranının altına iniş süreleri A, B ve C numuneleri için sırasıyla yaklaşık 17, 12 ve 15 saat olarak belirlenmiştir. Buna göre kurutulmak istenen numunelerin B tipi şeklinde dilimlenmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- Elde edilen veriler kullanılarak güç-zaman eğrisi çizilmiş ve doğrusal bir eğri elde edilmiştir. Buna göre 1. ve 2. kurutma evrelerinde saatlik ortalama 0.327 kWh, toplamda ise 5.886 kWh elektrik enerjisi tüketildiği ve tüketilen enerjinin büyük çoğunluğunun vakum pompası tarafından harcandığı belirlenmiştir.
- Deneyler sonunda numunelerin "a_w" değeri Testo 650 cihazı ile ölçülmüş ve numunelerin en az 0.372 en fazla 0.425 su aktivitesi değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu değerlerin ürünlerde mikrobiyolojik oluşumlar için gerekli minimum su aktivitesi değerinin çok altında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen "a_w" değerleri tasarlanan kurutma sisteminin kaliteli kurutma özelliğinin yüksek olduğunun göstergesi olarak kabul edilmiştir.
- Kurutma işlemleri sonunda elmalar renk, koku, şekil ve tat olarak özelliklerini hemen hemen hiç kaybetmemiştir. Bu durumun çok daha etkin olarak sağlanabilmesi için sıcaklığın daha düşük seviyelere indirilmesinin çözüm olacağı gözlemlenmiştir.
- Yapılan deneylerde vakum hacmi iç sıcaklığının oldukça önemli bir parametre olduğu ve düşük sıcaklıklarda kuruma hızının yavaş olmasına karşın sıcaklığın artması ile kuruma hızının da arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sonunda elde edilen veriler ve edinilen tecrübeler doğrultusunda şu öneriler uygun görülmüştür;

- Bir dondurarak kurutma sisteminin imalat aşamasında mümkün olduğunca sızdırmazlığın sağlanması vakum pompasının göreceli olarak daha kısa süre çalışmasına ve enerji sarfiyatının daha düşük seviyelerde olmasına sebep olacaktır.
- Kurutma hacminin sızdırmazlığı iç ortam basınç seviyesinin daha düşük seviyelere ulaşmasına ve düşük sıcaklık değerlerinde süblimasyonun gerçekleşmesine imkân sağlayarak kurutma kalitesini artırır.
- Sistem içerisine $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dan $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a kadar sıcaklık değişiminden etkilenmeyecek yapıda bir ağırlık sensörü yerleştirilmesi sistemin kurutma süresince kontrolünü kolaylaştıracaktır.
- Dondurarak kurutma sistemlerinde kurutma hacmi vakum altında tutulduğundan, taşınım veya iletimle ısı transferi yapan ısıtıcıların kullanmasının yerine, ışınlama ile ısı transferi yapan infrared ısıtıcılar kullanılarak daha kolay ısı transferi sağlanabilir. Ayrıca, infrared ısıtma sistemiyle kurutulmak istenen maddenin iç kısımlarına daha hızlı etki edileceğinden bu ısıtma sisteminin süblimasyon hızını artıracığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Acartürk, F., Ağabeyoğlu, İ., Çelebi, N., Değim, T., Değim, Z., Doğanay, T., Takka, S. ve Tırnaksız, F., “Modern Farmasotik Teknoloji”, **Türk Eczacılar Birliği Eczacılık Akademisi Yayını**, Ankara, 18-47 (2009).

Akgün, A. ve Küçüka, S., “Isı pompalı kurutucuların enerji etkin tasarımı – modelleme çalışması-”, **X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi**, İzmir, 729-740 (2011).

Aktaş, M., “Isı pompası destekli fındık kurutma fırınının tasarımı, imalatı ve deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 41-81 (2007).

Akyurt, M., Sevilir, E., Söylemez, E. ve Selçuk, K., “Güneş enerjisi ve bazı yakıtlarla meyve ve sebze kurutulması”, **TUBİTAK**, Proje No:TOAG-97, Yayın No:299, Ankara (1971).

Anthony, J. and Fontana, Jr., “Water activity’s role in food safety and quality”, **Second NSF International Conference on Food Safety**, Savannah, GA, USA, 1 (2000).

Cai, D., Wang, S., Ding, L., Lian, P., Zhang, S., Peng, F. and Wang, H., “Superior cycle stability of graphene nanosheets prepared by freeze-drying process as anodes for lithium-ion batteries”, **Journal of Power Sources**, 254: 198-203 (2014).

Carullo, A. and Vallan, A., “Measurement uncertainty issues in freeze-drying processes”, **Measurement**, 45: 1706-1712 (2012).

Cemeroğlu, B., Karadeniz, F. ve Özkan, M., “Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi”, **Gıda Teknolojisi Derneği**, Ankara, 77-570 (2003).

Chen, X. D., Mujumdar, A. S., “Drying Technologies in Food Processing”, **Wiley - Blackwell**, West Sussex, UK, 233 (2008).

Chung, N. O., Lee, M. K. and Lee, J., “Mechanism of freeze-drying drug nanosuspensions”, **International Journal of Pharmaceutics**, 437 (1-2): 42-50 (2012).

Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., “Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik 2. Basım”, **McGraw-Hill – Literatür**, İstanbul, 45 (2002).

Demir, V. ve Günhan, T., “Tarım ürünlerinin kuruma karakteristik değerlerinin belirlenmesi”, **Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği Çalıştayı**, İzmir, 17-31 (2002).

Demirtaş, C., “Fındık kurutma şartlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 58 (1996).

Doğan, H. ve Ersöz, M. A., “Akışkan yatak sürekli kurutucuda tuz kurutulmasının deneysel incelenmesi”, **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09)**, Karabük, 1544-1550 (2009).

Fan, L., Ding, S., Liu, Y. and Ai, L., “Dehydration of crude protein from Ginkgo biloba L. by microwave freeze drying”, **International Journal of Biological Macromolecules**, 50 (2): 1008-1010 (2012).

Fissore, D., Pisano, R. and Barresi, A. A., “Applying quality-by-design to develop a coffee freeze-drying process”, **Journal of Food Engineering**, 123: 179-187 (2014).

Ganguly, A., Nail, S. L. and Alexeenko A. A., “Rarefied gas dynamics aspects of pharmaceutical freeze-drying”, **Vacuum**, 86 (11): 1739-1747 (2012).

Güner, M., “Kurutmanın bilimsel temelleri, kurutma modelleri ve güneşli kurutucular”, **Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları**, Ankara, 1205: 48 (1991).

Günerhan, H., “Endüstriyel kurutma sistemleri”, **Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi**, Ankara, 36 (13): 1-10 (2005).

İnternet: Mustafa Kemal Üniversitesi, “Tütün Tarımı”, **www.mku.edu.tr/getblogfile.php?keyid=1002** (2014).

İnternet: Oregonian Media Group, “Photos from the Oregonian”, **http://photos.oregonlive.com/oregonian/2013/08/bolivias_freeze_dried_chuno_po_4.html** (2014).

Kavak, B. B., “Güneş enerjili termoelektrik soğutma sistemlerinde ardışık (kaskat) soğutma yöntemi uygulanabilirliğinin deneysel incelenmesi.”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 120,121 (2014).

Khalloufi, S., Giasson J. and Ratti C., “Water activity of freeze dried mushrooms and berries”, **Canadian Agricultural Engineering**, 42 (1): 71-79 (2000).

Kırmacı, V., “Dondurarak kurutma sisteminin tasarımı, imalatı ve performans deneylerinin yapılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 45, 69 (2008).

Lopez – Quiroga, E., Antelo, L. T. and Alonso, A. A., “Time-scale modeling and optimal control of freeze-drying”, **Journal of Food Engineering**, 111 (4): 655-666 (2012).

Marefati, A., Rayner, M., Timgren, A., Dejmek, P. and Sjöo, M., “Freezing and freeze-drying of pickering emulsions stabilized by starch granules”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 436: 512-520 (2013).

Mengeş, G., “Patatesin farklı kurutma şartlarındaki kurutma karakteristiklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 4-8 (2005).

Pikal, M. J., Roy, M.L. and Shah, S., “Heat and Mass Transfer in vial freeze-drying of pharmaceuticals: role of the vial”, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 73 (9): 1224-1237 (1984).

Rahmati, M. R., Vatanara, A., Parsian, A. R., Gilani, K., Khosravi, K. M., Darabi, M. and Najafabadi, A. R., “Effect of formulation ingredients on the physical characteristics of salmeterol xinafoate microparticles, tailored by spray freeze drying”, *Advanced Powder Technology*, 24 (1): 36-42 (2012).

Romero, T. J., Gabas, A.L. and Sobral, P. J. A., “Osmo-convective drying of mango cubes in fluidized bed and tray dryer”, *Drying 2004-Proceedings Of The 14th International Drying Symposium*, Sao Paulo, Brazil, C: 1868-1875 (2004).

Sadıkoğlu, H. ve Özdemir, M., “Dondurarak kurutma teknolojisi”, *Termoklima*, 102: 53-61 (2001).

Segura, L. A. and Oyarzun, C. A., “Experimental evidence of mass transfer mechanisms during freeze-drying in a capillary porous medium”, *International Journal of Refrigeration*, 35 (8): 2102-2019 (2012).

Wang, Q., Zhang, J. and Wang, A., “Freeze-drying: A versatile method to overcome re-aggregation and improve dispersion stability of palygorskite for sustained release of ofloxacin”, *Applied Clay Science*, 87: 7-13 (2013).

Yağcıoğlu, A., “Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği”, *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*, İzmir, 536-540 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

1988’de Karabük’te doğan Ali Osman SUIÇMEZ, ilk orta ve lise öğrenimini yine Karabük’te tamamladı. 2005’de Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2011 yılında mezun olduktan sonra 2012 yılında Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Şuan yüksek lisansının tez aşamasındadır.

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Telefon : (0505) 289 11 91

E-posta : aliosmansuicmez@hotmail.com