

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE TIBBİ
AROMATİK ÜRÜNLERİN KURUTMA PARAMETRELERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Tuğba KOVACI

**Danışman
Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN**

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**

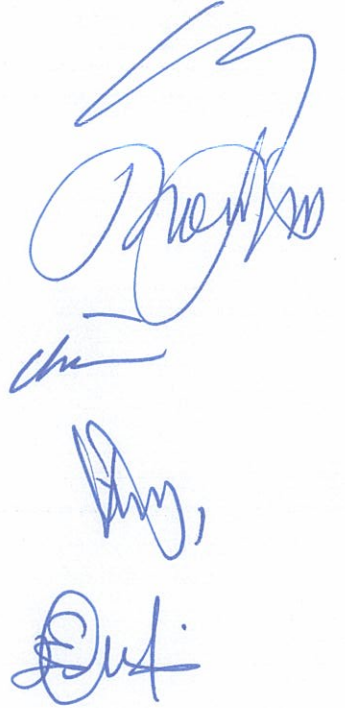


© 2019 [Tuğba KOVACI]

TEZ ONAYI

Tuğba KOVACI tarafından hazırlanan "Dondurarak Kurutma Sistemi Tasarımı ve Tıbbi Aromatik Ürünlerin Kurutma Parametrelerinin Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Ümran ESENDEMİR Süleyman Demirel Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Feyza AKARSLAN Süleyman Demirel Üniversitesi
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Erkan DİKMEN Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

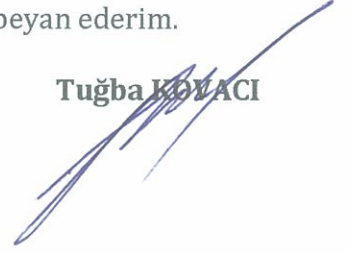


Enstitü Müdürü **Prof. Dr. Yusuf UÇAR**

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Tuğba KÖYACI



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Materyal.....	17
3.2. Dondurarak Kurutma ve Deney Sistemi	18
3.3. Kurutma Koşulları	26
3.4. Ürün Neminin Belirlenmesi	30
3.5. Ekserji ve Enerji Analizi.....	30
3.6. Dondurarak Kurutma Sisteminin Termodinamik Analizi	33
3.7. Isı ve Kütle Transferi.....	39
3.8. Matematiksel Modelleme	44
3.9. Hata Analizi	46
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	49
4.1. Kurutma Davranışları.....	49
4.2. Matematiksel Modelleme	53
4.3. Termodinamik Analiz	55
4.4. Isı ve Kütle Transferi.....	64
4.4.1. Etkili nem yayılımı ve aktivasyon enerjisi.....	64
4.4.2. Isı transfer katsayısı ve kütle transfer hızı	66
4.5. Hata Analizi	68
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR	73

ÖZET

Doktora Tezi

DONDURARAK KURUTMA SİSTEMİ TASARIMI VE TIBBİ AROMATİK ÜRÜNLERİN KURUTMA PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tuğba KOVACI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN

Dondurarak kurutma işlemi, dondurulmuş ürünün dehidrasyon süblimasyonuna dayanır. Düşük sıcaklıklar ve işlem için gerekli olan basınç ve uzun kuruma süresi nedeniyle, dondurarak kurutma teknolojisi hassas ürünlerin işlemine uygundur. Dondurarak kurutmadaki uzun kuruma süreleri, yüksek enerji tüketimi ve yüksek maliyetlere yol açmaktadır.

Bu çalışmada, nane yaprakları üç farklı sıcaklık (40, 50, 60°C) ve üç farklı basınçta (30, 50, 80 kPa) dondurarak kurutulmuştur. Kurutulan nane yapraklarının kuruma davranışları incelenmiştir. Ekserji analizi ile ekserji kayıplarını en aza indirmeyi ve ekserji verimliliğini en üst seviyeye çıkarmayı sağlayan çalışma koşulları belirlenmiştir. Enerji ve ekserji analizi yanısıra ürün görseli de değerlendirildiğinde, deneme yapılan değerler arasında nanenin dondurarak kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı ve 50°C kurutma sıcaklığının en ideal çalışma şartları olduğu belirlenmiştir. İdeal kurutma şartlarında elde edilen sonuçlarla en iyi uyum sağlayan matematiksel modelin Wang and Singh modeli olduğu belirlenmiştir.

Nane yaprakları için ısı ve kütle transfer analizleri yapılmıştır. Kurutulmuş nanenin ısı transfer katsayısı ortalama 0.33 W/m²K olarak belirlenmiştir. Ürünün kütle transfer hızı ise 3.33x10⁻¹⁰ ile 2.27x10⁻⁹ m/s arasında değişmiştir. Isı transfer katsayısı ve kütle transfer hızı sıcaklık artışıyla artmış, kabin basıncındaki artışla azalmıştır. Ayrıca, kurutma sıcaklığının nem difüzyonunu hızlandırdığı görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, dondurarak kurutma sisteminin optimizasyonunu ve çalışma parametrelerinin iyileştirmesine yardımcı olacak bilgiler sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Dondurarak kurutma, ısı ve kütle transferi, enerji ve ekserji analizi, nane.

2019, 81 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN OF DRYING DRYING SYSTEM AND INVESTIGATION OF DRYING PARAMETERS OF MEDICAL AROMATIC PRODUCTS

Tuğba KOVACI

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Energy Systems Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN

The freeze-drying process is based on dehydration sublimation of frozen product. Because of the low temperatures and pressure and long drying period required for the process, freeze-drying technology is feasible to the process of sensitive products. Long drying times in freeze-drying lead to high energy consumption and high capital costs.

In this study, mint leaves were freeze-dried at three different temperatures (40, 50, 60°C) and three different pressures (30, 50, 80 kPa). The drying behavior of dried mint leaves was investigated. With exergy analysis of the process specified the operating conditions that allow minimizing the exergy losses and maximizing the exergy efficiency. In addition to energy and exergy analysis, when the product appearance is evaluated, 30 kPa cabin pressure and the Wang and Singh model was found to be the most suitable mathematical model in the ideal drying conditions.

Heat and mass transfer analyses were performed for mint leaves. The heat transfer coefficient of dried mint was determined as 0.33 W/m²K. The mass transfer rate of the product ranged from 3.33x10⁻¹⁰ to 2.27x10⁻⁹ m/s. Both heat transfer coefficients and mass transfer rate increased with temperature increase and decreased with an increase in cabin pressure. It was also found that the drying temperature accelerates moisture diffusion. These results will provide information to help improve the system the optimization of a freeze-dryer and the operating parameters.

Keywords: Freeze drying, heat and mass transfer, energy analysis, exergy analysis, mint.

2019, 81 pages

TEŐEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN'e teőekkürlerimi sunarım. Araştırmamın her aşamasında yanımda olan maddi ve manevi olarak yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Erkan DİKMEN'e teőekkürlerimi sunarım. Araştırmanın yürütülmesinde yardımlarını gördüğüm Nurettin Doğukan GÜRPINAR'a teőekkür ederim.

4822-D1-16 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teőekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan maddi ve manevi her zaman yanımda olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tuğba KOVACI
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Kurutucuların sınıflandırılması	4
Şekil 1.2. Düşük ve yüksek değerli ürün için dondurarak kurutma maliyetleri ...	7
Şekil 3.1. Üçlü nokta basınç ve sıcaklığı	19
Şekil 3.2. Dondurarak kurutma sistemin temel çalışma şeması.....	20
Şekil 3.3. Dondurarak kurutma sistemi	21
Şekil 3.4. Dondurarak kurutma fırını kurutma tepsi.....	22
Şekil 3.5. Kurutma sistemi soğutma ünitesi	23
Şekil 3.6. Kurutma sistemi vakum pompası	24
Şekil 3.7. Dondurarak kurutma sistemi kontrol ünitesi	25
Şekil 3.8. Liyofilizasyon ile ilgili adımlar	28
Şekil 3.9. Kurutma işleminin şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.10. Birincil kurutma aşamasında sistem incelemesi	40
Şekil 4.1. Nananın 30 kPa basınçta farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri	51
Şekil 4.2. Nananın 50°C sıcaklıktaki farklı basınçlarda kuruma eğrileri.....	51
Şekil 4.3. Nananın dondurarak kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı ve 50°C kurutma sıcaklığında ölçülen ürün ve ortam sıcaklık eğrileri.....	52
Şekil 4.4. Nananın 30 kPa basınçta farklı sıcaklıklarda kurutulmasında ortam neminin değişimi.....	53
Şekil 4.5. Wang and Singh model için nanenin deneysel ve tahminlenen nem oranlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.6. Dondurarak kurutma sisteminin enerji tüketimleri.....	56
Şekil 4.7. Dondurarak kurutma sisteminde sıcaklık ve basınca bağlı enerji tüketimleri	57
Şekil 4.8. Nane için kurutma kabinindeki kuruma zamanının bir fonksiyonu olarak ekserji verimindeki değişimi	60
Şekil 4.9. Kurutma döngüsü boyunca 30 kPa ve 50°C kurutma sıcaklığında kabin yüzey sıcaklığı ile ekserji kaybının karşılaştırılması	61
Şekil 4.10. Kurutma çevrimi süresince kabin basıncı ile toplam ekserji kaybının değişimi, 50°C kurutma sıcaklığı için	62
Şekil 4.11. 30 kPa ve 50°C için soğutma kaynağı sıcaklığına bağlı olarak donma ekserji kaybı değişimi.....	63
Şekil 4.12. Nananın 30 kPa ve 50°C sıcaklık ve basınçta kurutulmasında nem içeriği ile etkili nem yayını (D _{eff}) değişimi	65
Şekil 4.13. Farklı kurutma sıcaklıkları ve basınçlarda nane için ortalama ısı transfer katsayısı.....	67
Şekil 4.14. Farklı kurutma sıcaklıkları ve basınçlarda nane için ortalama kütle transfer hızı	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Literatürdeki bazı önemli çalışmaların özeti	13
Çizelge 2.2. Literatürdeki dondurarak kurutma çalışma koşulları örnekleri	16
Çizelge 3.1. Dondurarak kurutma sistemi teknik özellikleri	26
Çizelge 3.2. Farklı çalışma koşullarındaki deneylerin parametreleri.....	27
Çizelge 3.3. İnce tabaka kurutma model eşitlikleri.....	45
Çizelge 3.4. Cihazların hata oranları.....	48
Çizelge 4.1. Nananin dondurarak kuruma karakteristikleri	50
Çizelge 4.2. Nananin ampirik sabitleri ve istatistiksel sonuçları.....	54
Çizelge 4.3. Dondurarak kurutma sisteminin performansı.....	57
Çizelge 4.4. Farklı sıcaklık ve basınçlarda donma aşamasında ekserji analizi	58
Çizelge 4.5. Farklı sıcaklık basınçlarda kurutulan nane için ortalama giren ekserji, kayıp ekserji ve ekserji verimi değerleri.....	59
Çizelge 4.6. Farklı sıcaklıklarda 30 kPa basınçta dondurarak kurutma koşullarında ortalama etkili nem yayılım değerleri	64
Çizelge 4.7. Aktivasyon enerjisinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	66
Çizelge 4.8. Farklı sıcaklık ve basınçlarda ortalama ısı transfer katsayıları ve kütle transfer hızları	66
Çizelge 4.9. Hata analizi sonuçları.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	Ürünün yarı kalınlığı, m
COP	Soğutma tesir katsayısı
C_p	Isıl kapasite/özgül ısı, kJ/kgK
$C_{p,donmamış}$	Donmamış sıvı çözeltisinin ısı kapasitesi, kJ/kgK
$C_{p,donmuş}$	Dondurulmuş çözeltinin ısı kapasitesi, kJ/kgK
D_{eff}	Etkili nem yayılım katsayısı, m ² /s
D_o	Sonsuz sıcaklıkta difüzyon hızına eşdeğer sabit
E_a	Aktivasyon enerjisi, kJ/mol
Ex	Ekserji, kJ
Ex_{fs}	Donma aşamasındaki ekserji girişi, kJ
$Ex_{T_a \rightarrow T_{phc}}$	T_a 'dan T_{phc} 'ye sıvı çözeltinin sıcaklık değişmesinden kaynaklanan ekserji kaybı, kJ
$Ex_{T_{phc}}$	Çözelti içindeki serbest suyun faz değişimi (donma) nedeniyle ekserji kaybı, kJ
$Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}}$	T_{phc} 'den T_{spds} 'a donmuş çözeltinin sıcaklık değişmesinden kaynaklanan ekserji kaybı, kJ
h	Entalpi, kJ/kg
k	Isıl iletkenlik, W/mK
k_c	Kütle transfer hızı, m/s
k_h	Isı transfer hızı, W/m ² K
L	Karakteristik lineer boyut, m
M	Anlık nem içeriği, kgsu/kgkurumadde
m	Kütle, kg
M_0	İlk nem içeriği, kgsu/kgkurumadde
M_e	Denge nem içeriği, kgsu/kgkurumadde
MER	Nem alma hızı, kgsu/h
MR	Nem içeriği, kgsu/kgkurumadde
MR_{avg}	Nem oranının ortalama değeri, kgsu/kgkurumadde
MR_{exp}	Deneysel nem oranı, kgsu/kgkurumadde
MR_{pred}	Öngörülen nem oranı, kgsu/kgkurumadde
n	Gözlem sayısı
Nu	Nusselt sayısı
P	Basınç, kPa
Pr	Prandtl sayısı
Q	Isı transferi, kJ
$Q_{fırın}$	Fırının iç havasının ısıtılması için gerekli enerji, kJ
Q_{fs}	Donma aşamasında uzaklaştırılan ısı, kJ
Q_{IK}	Toplam ısı kaybı, kJ
$Q_{ürün}$	Toplam nanenin kullandığı ısı enerjisi, kJ
$Q_{yoğuşma}$	Yoğuşma ünitesinde kullanılan enerji, kJ
R	İdeal gaz sabiti, kJ/kgK
R^2	Çoklu korelasyon katsayısının karesi
Re	Reynold sayısı
$RMSE$	Ortalama karesel hatalar karekökü
s	Entropi, kJ/kgK
Sc	Schmidt sayısı

Sh	Sherwood sayısı
SMER	Özgül nem çekme oranı, kgsu/kWh
SPC	Özgül güç tüketimi, kWh/kgsu
t	Kuruma süresi, dak
T	Sıcaklık
T _{cs}	Donma aşamasında soğutma kaynağının sıcaklığı, K
T _{phc}	Suyun faz değişimi sıcaklığı (donma) , K
T _{spds}	Dondurarak kurutma işleminin birincil kurutma aşamasının başlangıcında donmuş çözeltinin sıcaklığı, K
V _{fırın}	Fırının iç hacmi, m ³
W	İş, kW
W _e	Elektrik güç metre hata oranı
W _{ha}	Giren havanın ağırlık hata oranı
W _{mk}	Nem sensörü hata oranı
W _R	Toplam hata oranı
W _T	Sıcaklık sensörü hata oranı
x	Bağımsız değişkenler
X ²	Azaltılmış ki-kare
y	Kuru maddenin kg'ı başına kg su çözeltisinde sıvı çözeltinin nemi
z	Modeldeki sabitlerin sayısı
ΔE _{xfs}	Donma aşamasındaki ekserji değişimi, kJ
Δh _{fs}	Donma aşamasında entalpi değişimi, kJ
ΔH _{mw}	Su füzyonunun gizli ısı, kJ/kg
ΔS _{fs}	Donma aşamasında entropi değişimi, kJ
γ	Donmuş çözeltide donmuş suyun fraksiyonu
η	Verim
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
μ	Dinamik vizkozite, Ns/m ²
v	Akışkan hızı, m/s

İndisler

a	hava
ç	çıkan
g	giren
o	başlangıç hali
p	ürün
v	buhar
w	su
kyp	kayıp

1. GİRİŞ

Gıda ve zirai işleme endüstrilerinde çalışan kişiler için işleme faaliyetinin önemli bir bölümünü oluşturan suyun gıda ve tarımsal ürünlerden uzaklaştırılması işlemi, depolama süresince mikrobiyal ve enzimatik değişiklikleri büyük ölçüde azalttığı ve dolayısıyla ürünün raf ömrünü uzatacağı için gıda güvenliğini korumada kullanılır (Younis vd., 2018). Kurutmanın temel amaçları, maksimum konsantrasyon ve mikrobiyal güvenlik, düşük su aktivitesi, biyokimyasal reaksiyonları minimize etmek, besin kalitesini korumak ve raf ömrünü uzatmak olarak sayılabilir (Hui, 2006). İki ana nem giderme yöntemi vardır. Bunların biri katı bir ürün üretmek için kurutma (veya dehidrasyon), diğeri ise daha konsantre bir sıvı üretmek için buharlaştırmadır. Kurutma ve dehidrasyon kelimeleri genellikle, gıda ürünlerine atıfta bulunurken, birbirlerinin yerine kullanılır; bununla birlikte, yalnızca kurutma kelimesi, gıda dışı ürünlerin işlenmesiyle ilgili olarak yaygın olarak kullanılır. Bir katının kurutulması iki bağımsız işlem içerir; bunlardan ilki, katının yüzeyinden nemin buharlaşması, ikincisi, katının içinden yüzeye doğru nemin difüzyonudur (Lewis, 1921). Kurutma uygulamaları, tahıl, meyve ve sebzelerin tarlada kurutulmasından meyvelerin, sebzelerin, atıştırmalık gıda ürünlerinin, süt ürünlerinin, kahvelerin ve diğeri ürünlerin ticari olarak kurutulmasına kadar uzanmaktadır (Wilhelm vd., 2004).

Kurutmayı etkileyen dış faktörler şu şekilde sıralanabilir: sıcaklık, nem içeriği, akış hızı, kurutma havasının yönü ve kurutma süresi (Hui, 2006). Sadece kurutucu seçimi, gıda ürünlerinin uygun bir şekilde dehidrasyonu için yeterli değildir; ürünün fiziko-kimyasal özelliklerinin de dikkate alınması gereklidir. Kuruma hızını etkileyen temel faktörlerin ilki, olağan sıcaklık ve katının üzerinde tutunan nemdir. Doymamış hava ile temas halinde olduğunda bile çoğu katı belirli bir miktar nemi tutar. Bir materyalin kuruma hızı, temasta olduğu havanın sıcaklığı ve nem içeriği, yüzeyinden geçen havanın hızı ve maruz kaldığı kaynağın ısısı tarafından belirlenir (Lewis, 1921). Katı maddeleri kurutmada dikkat edilmesi gereken faktörlerden biri sertleşmedir. Bu problem kurutmanın ilk aşamasında düşük nispi nem ve yüksek sıcaklıkta ortaya çıkar. Bu koşullar

altında nem, materyalin içinde yayılabildiğinden daha hızlı olarak malzemenin yüzeyinden uzaklaşır. Sonuç, materyalin yüzeyi üzerinde sertleştirilmiş nispeten geçirimsiz bir tabakanın oluşmasıdır. Bu tür bir katman oluşumu, daha sonraki kurumunun, olabileceğinden çok daha yavaş olmasına neden olur (Wilhelm vd., 2004).

Bugün Dünya’da tüketilen enerji, çok sayıda enerji kaynağından elde edilirken; petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil kaynaklar, bu kaynakların %87’sini oluşturmaktadır (Türkiye Petrolleri, 2016). Küresel sera gazı emisyonlarına en fazla katkı enerji sektöründen (%34.6) gelmektedir. %34.6’nın %25’lik kısmı elektrik ve ısı üretiminden kaynaklanmaktadır. Bunda en önemli pay, enerji hizmetlerine artan talep ve küresel yakıt kullanımında kömürün artan oranıdır. Bu bakımdan, iklim değişikliği ile mücadelede enerji sektörünün etkin rol oynaması öngörülmektedir. Enerji verimliliği başta olmak üzere teknolojik gelişmelere paralel iyileştirmeler, fosil yakıtlara alternatif olarak nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında yaygınlaşma, karbon tutma ve depolama, eski kömür santrallerinin daha yüksek verimli doğalgaz kullanan kombine çevrim veya kojenerasyon santralleriyle değiştirilmesi, zararlı CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik geliştirilen politikaların temel unsurları görünümündedir (EÜAŞ, 2016).

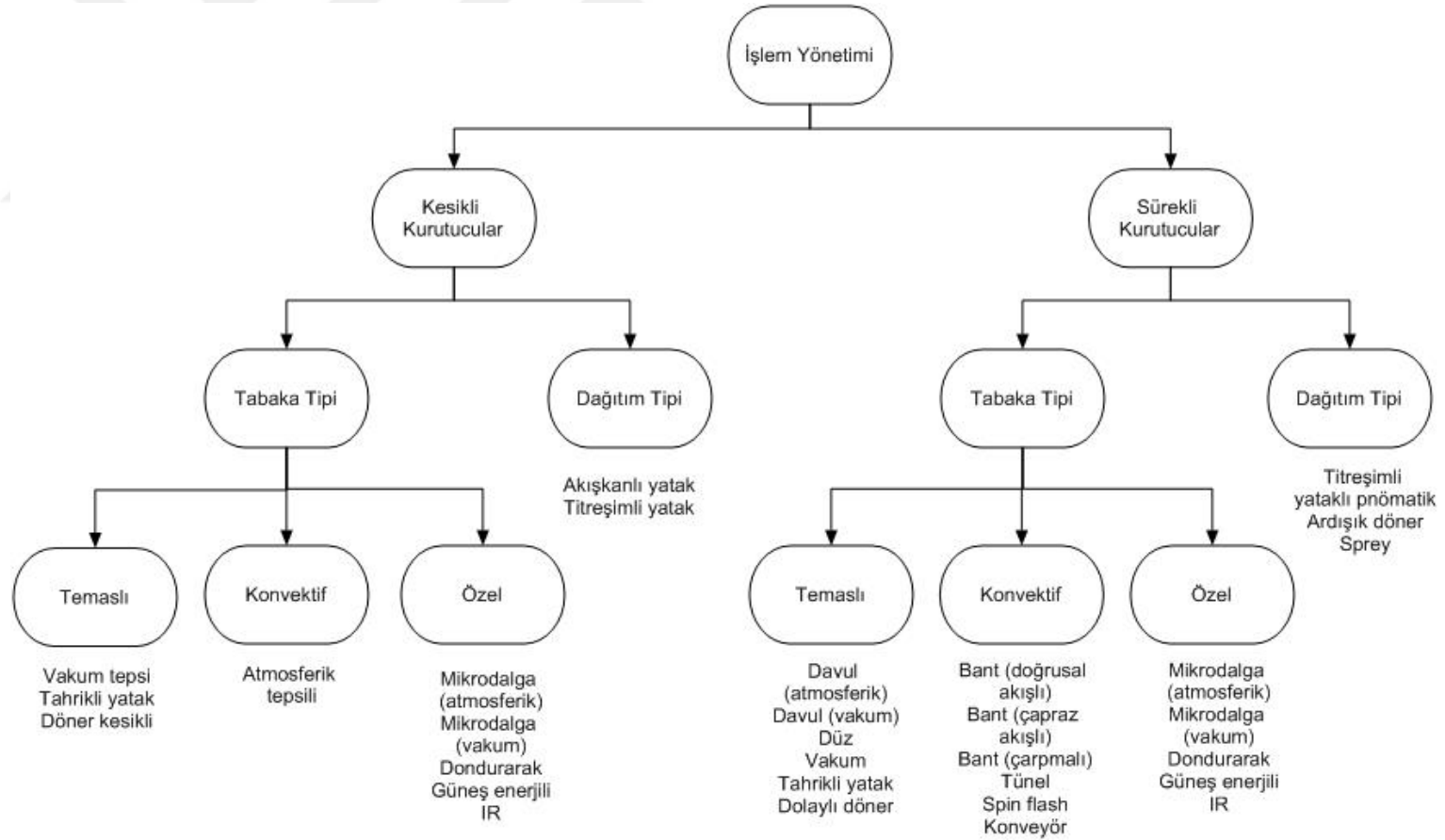
Isıl kurutma işlemleri çeşitli tahminlere göre, gelişmiş ülkelerde ulusal sanayi enerjinin % 10-25’ini tüketerek, neredeyse tüm endüstriyel sektörlerde bulunduğu bilinmektedir. Dünya çapında gelişen ekonomi ile hızlı endüstrileşme, ısıl kurutma için enerji tüketimi, zamanla kaçınılmaz olarak artacak olan sera gazları salınımının olumsuz çevresel etkisi ile sonuçlanmaktadır. Yoğun enerji endüstrisindeki bu baskı, verimli enerji teknolojileri ve daha az enerji tüketim yolları bulma arayışına neden olmaktadır. Yoğun enerjili işlemlerden biri olan kurutma için endüstriyel kurutuculardaki enerji tüketimi çok büyüktür ve bu birim işlem maliyetlerine dönüşmektedir. Bu büyüyen sorun için en etkili çözümü geliştirmek ve yüksek enerji verimliliğine sahip teknolojiler geliştirmek, net enerji tüketimini azaltacak ve çevresel etkilerini hafifletecektir. Genellikle geleneksel kurutucular, zayıf dizayn ve temel kurutma bilgisi eksikliği nedeniyle

düşük enerji verimliliği ile çalıştırılır. Dahası bu kurutucular enerji maliyetinin bol ve ucuz olduğu zamanda tasarlanmıştır. Günümüzde senaryo tamamen değişmiştir; enerji maliyeti, sadece ekonomi bakış açısıyla değil aynı zamanda çevresel etki açısından da önemli bir konu haline gelmiştir (Jangam vd., 2010).

Kurutma, ürün kalitesindeki değişimlerin yanı sıra ısı ve kütle transfer mekanizmalarında da değişikliklere neden olabilen fiziksel ve kimyasal dönüşümler gibi farklı işlemlerle birlikte geçici ısı ve kütle aktarımını içeren karmaşık bir işlemdir. Kurutma endüstrisinde, istenilen özelliklere sahip kurutulmuş ürün için maksimum nemin minimum enerji kullanımı ile uzaklaştırılması istenir. Kurutma işleminin asıl amacı sadece daha hızlı kurutma değil, kurutma sonunda kaliteli bir ürün elde etmektir. Bu nedenle kurutma işleminde seçilecek yöntem önemlidir (Mujumdar, 2006; Chen ve Mujumdar, 2008).

Kurutma, hammaddeye ısı vererek sıvının buharlaşması ile meydana gelir. Isı, konveksiyonla (direkt kurutucular), konduksiyonla (temaslı ya da indirect kurutucular), radyasyon ya da bir mikrodalga ya da radyo frekansı elektromanyetik alanındaki ıslak bir materyalle hacimsel olarak yer değiştirmesi ile sağlanabilir. Gıda kurutma uygulamalarının %99'u, suyun uzaklaştırılmasını içerir (Mujumdar, 2014).

Herbir kurutucu tipinin uygun yada uygunsuz belirli özellikleri vardır. Bazı kurutucular yapısı gereği pahalıdır (dondurarak kurutucular gibi), bazıları çok verimlidir (indirekt veya temaslı kurutucular gibi). Birçok olası kurutucu tipinin arasında uygun olanın seçilmesi zordur. Yapılacak uygulama için yanlış kurutucu seçilirse, ne kadar iyi tasarlanmış olursa olsun yine de kötü kurutucudur. Verilen ürünün fiziksel özelliklerindeki veya bileşimindeki küçük değişimler, onun kurutma karakteristiklerini, işleme özellikleri gibi parametreleri etkileyecek ve sonuçta farklı bir ürüne ve bazı durumlarda kurutucuda bazı tıkanıklıklara neden olabilecektir (Jangam vd., 2010). Literatürde kurutucuların sınıflandırılmasında pek çok şema mevcuttur. Bunlardan biri Şekil 1.1'de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Kurutucuların sınıflandırılması
(Jangam vd., 2010)

Kurutucuların zamanla geliştirilmesi ile geleneksel kurutma yöntemlerine göre hem ürün kayıpları azalmış hem de ürün kalitesi önemli derecede iyileştirilmiştir. İletim ve taşınım, taşınım ve radyasyon, taşınım ve dielektrik alan, vb. ısı transfer yöntemlerinin kombinasyonunun kullanılması bazı durumlarda gerçekten de gereklidir. Genellikle ısı entegrasyonu, geleneksel ısı dönüşüm kazanım yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek enerji etkinliği verir. Enerji verimliliğini maksimize etmek ve özellikle ısı ve güç sisteminin birlikte olduğu alanlardaki kurutma işlemlerinde enerji tüketimini minimize etmek için ısı entegrasyonunun kullanımı yararlıdır (Jangam vd., 2010). Bu tür kombinasyonların kullanılması sermaye maliyetini artırır, ancak bu olumsuzluk düşük enerji maliyetleri ve gelişmiş ürün kalitesi ile telafi edilebilir. Kurutma işleminde, güneş enerjili sıcak hava ile kurutma, mikrodalgalı sıcak hava ile kurutma gibi farklı iki ya da üç enerji kaynağının kombinasyonunun kullanılması ile hibrit kurutma yapılan denemelerde ürün kalitesinde ve enerji tüketiminde iyileşmeler sağlandığı görülmüştür (Chou ve Chua, 2001; Favre-Marinet ve Tardu, 2013; Silva vd., 2016; Sonmete vd., 2016; Szadzinska vd., 2017; Kovacı vd., 2018). Dondurarak kurutma gibi enerji maliyeti çok yüksek olan kurutma yöntemlerinde yoğun olarak tercih edilen hibrit kurutma sistemlerinin birçok avantajı vardır. Örneğin ürünün yüzeyindeki ve yüzeye yakın bölgelerindeki serbest suyun uzaklaştırılması için konvektif kurutma yöntemi mikrodalgaya göre daha verimlidir, fakat kurutmada oluşan yüzey sertleşmesi, üründeki serbest suyun uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Bu iki yöntemin birleştirilmesi, ürünün kurutulmasında enerji verimliliğini ve ürün kalitesini olumlu yönde etkilemektedir (Xu vd., 2018).

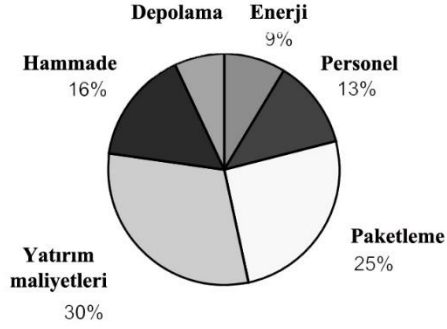
Doğal yöntemlerle yapılan güneşte kurutma, ürün kalitesindeki olumsuz etkilerin yanı sıra düşük işletme maliyetleri ve sermaye avantajına sahiptir. Hava ile kurutmayı düşük maliyet olarak akışkan yatakta kurutma, tamburlu kurutma, sprey kurutma, vakum kurutma ve dondurarak kurutma izlemektedir. Geleneksel kurutma yöntemleri, uzun işletme süreleri yanı sıra meteorolojik koşullar, küf veya böcek kirlilikleri gibi çeşitli kısıtlamalardan da önemli derecede etkilenir.

Taze gıda ürünlerinin rengini, viskozitesini, kütlesini, tadını ve aroma özelliğini koruyan koruma işlemlerine ihtiyaç vardır (Roser, 1991; Nireesha vd., 2013).

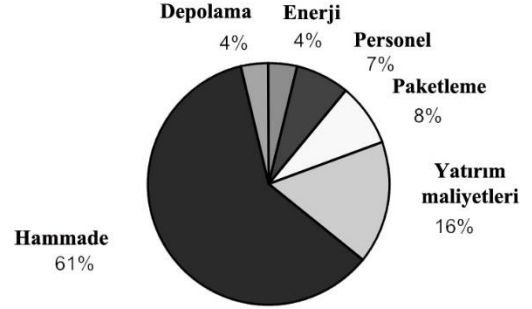
Dondurarak kurutma (liyofilizasyon), suyun (veya başka bir çözücünün) donmuş bir üründen süblimasyon yoluyla alındığı, dolayısıyla düşük sıcaklıkta ve düşük basınçta çalışan bir kurutma işlemidir. Bu nedenle dondurarak kurutma işlemi ısıya duyarlı malzemeler, örneğin farmasötikler için uygundur. Yiyecek ürünlerinin yanı sıra (kahve, çay, çıtır meyveler ve sebzeler, hazır yiyecekler ve bazı aromatik bitkiler için), çiçekler, mikroorganizmalar, kozmetikler, özellikle kimyasallar ve pigmentler, enzimler ve seramik tozları dahil olmak üzere diğer birçok ürün için de uygundur. Dondurarak kurutma, yüksek kalitede istikrarlı ürünlerin üretilmesini sağlayan biyo-sanayi sektöründe standart bir işleme tekniği haline gelmiştir. Dondurarak kurutmanın, her ne kadar pahalı olsa da, kurutulmuş ve dondurulmuş gıdaların faydalarını büyük ölçüde birleştirdiği için zengin ülkelerde popülerliği artmıştır (Barresi vd., 2010; Ciurzyńska ve Lenart, 2011). İşlemin endüstriyel bakış açısından ana dezavantajı, diğer kurutma yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok yavaş olmasıdır (Jafar ve Farid, 2003). Bu nedenle işlem için gerekli enerji miktarı çok büyüktür. Süblimasyon ısısı, buharlaşma ısısı ile yaklaşık aynı olmasına rağmen, dondurarak kurutma işleminde gereken enerji miktarı diğer kurutma işlemine göre, tüm işlem ve ekipman dikkate alındığında daha yüksektir. Kurutmanın birincil kurutma aşaması, işlem için gereken toplam enerjinin yaklaşık %45'ini oluşturur (Fissore vd., 2014).

Dondurarak kurutma maliyetleri, hammadde tipi, ürün, paketleme, tesis kapasitesi, çevrim süreci gibi faktörlerle değişir. Hava ile kurutmayla karşılaştırdığımızda, dondurarak kurutma 4-8 kat daha maliyetlidir. Şekil 1.2'de de görülebileceği gibi, yüksek maliyetli bir hammadde kullandığımızda, daha az maliyetli hammadde kullanımı ile karşılaştırdığımızda yapacağımız dondurarak kurutma işlemindeki enerji harcamaları önemsiz olmaktadır (Ratti, 2001).

Düşük maliyetli ürün



Yüksek maliyetli ürün



Şekil 1.2. Düşük ve yüksek değerli ürün için dondurarak kurutma maliyetleri (Ratti, 2001)

Dondurarak kurutma ile en kaliteli kurutulmuş gıdaların üretilebildiği iyi bilinmektedir. Bununla birlikte, vakumlu dondurarak kurutma ile ilgili büyük bir problem, gereken uzun kuruma süresidir ve bu da yüksek enerji tüketimine ve yüksek maliyetlere yol açmaktadır. Dondurarak kurutma sürecinin gerektirdiği büyük miktarda enerjiye rağmen, özellikle enerji ve ekserji analizi konusunda çok fazla çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma kapsamında tasarlanıp imal edilen vakumlu dondurarak kurutma (liyofilizasyon) sistemi ile ürünlerin kurutma süresinin ve enerji maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Mikrobiyolojik yapısı uygun nane, taze karakteristik görünüm ve aromasının korunmasına olanak sağlayacak olan dondurarak kurutma sisteminde kurutulmuştur, sisteminin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır. Optimum kurutma koşullarını elde etmek için, kaliteyi korurken, ürünlerin dondurarak kurutma özelliklerini ayrı ayrı incelemek için farklı sıcaklık ve basınçlarda kuruma eğrileri değerlendirilmiş ve matematiksel modelleme yapılmıştır. Isı transfer katsayıları ve kütle transfer hızları belirlenmiş ve etkili nem yayılımı ve aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dünya nüfusundaki artış, hızlı sanayileşme gibi etkenler bizleri enerjiden maksimum verimlilikte yararlanmaya yönlendirmiştir. Diğer üretim teknolojileriyle rekabet etmesi konusunda sağlanan iyileşmeler, gelişen teknolojiler ve buna bağlı olarak düşen maliyetler, yükselen fosil yakıt fiyatları ve fosil yakıtların çevresel etkileri üzerine duyulan endişeler, karbon fiyatlama mekanizması, en önemlisi dünyanın pek çok ülkesinde verilen büyük teşvikler (2014'te 135 milyar dolara ulaştı ki bu değer 2008 yılına göre yaklaşık 3 katlık bir artışı göstermiştir), enerji kaynaklarının daha dikkatli kullanımının yolunu açmaya devam etmektedir (EÜAŞ, 2016; Türkiye Petrolleri, 2016). Bu nedenle enerji kaynaklı işlemlerde meydana gelen kayıplar ve verimsizlikleri belirleyip, bunların minimize edilmesi yönünde çalışmalar hızla artmaktadır.

Wang vd. (2019) çalışmalarında katı ve gözenekli donmuş malzemelerin dondurarak kurutulma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dondurulmuş malzemeleri hazırlamak için sıvı azot yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlara göre, dondurarak kurutma işleminin, katı malzemeye kıyasla başlangıçta gözenekli dondurulmuş malzeme kullanılarak önemli ölçüde hızlandırılabileceği belirtilmiştir. Ürün sadece radyasyon ile ısıtıldığında, gözenekli donmuş malzemenin kuruma süresi, katı olanın yaklaşık üçte biri kadardır. Kabin yüzey sıcaklığının uygun şekilde artırılması dondurarak kurutma işlemine fayda sağlarken, kabin basıncını değiştirmek işlem üzerinde çok az etki yapmıştır. Radyasyon ve iletim ile ısıtma birlikte kullanıldığında ise, kuruma süresinin %36.4'ünden tasarruf sağlanmıştır.

Srinivasan vd. (2019) çalışmalarında şişedeki sütün dondurarak kurutma işlemi boyunca ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Çalışmada şişe ısı transfer katsayısının kabin basıncına büyük ölçüde bağlı iken, raf sıcaklığının etkisinin çok az olduğu belirlenmiştir. Şişenin dibindeki eğriliğin birincil kuruma süresini arttırdığı ancak ürün sıcaklığını azalttığı gözlemlenmiştir.

Bourlès vd. (2019) çalışmalarında dondurarak kurutma işleminde süblimasyon işlemi için istatistiksel bir model geliştirmişlerdir. Denemede donma hızı, raf sıcaklığı ve birincil kurutmada kabin basıncı olmak üzere üç çalışma değişkeni test edilmiştir. Uygulanan model, süblimasyon oranını ve ürün sıcaklığını tahmin etmek için kullanılmıştır. Çalışmada aynı zamanda ısı transferi belirlenmiştir.

Baptestini vd. (2017) çalışmalarında dört farklı sıcaklıkta (65, 75, 85 ve 95°C) kızılötesi ısıtma kaynağına sahip bir kurutucu kullanarak kurutulan muz dilimlerinin ısı ve kütle transfer katsayılarını belirlemişlerdir. Etkili yayılım katsayısı ve muzun olgunlaşma aşamaları ile kuruma arasında ilişki elde etmişlerdir. Midilli modeli, muz dilimlerinin kızılötesi kurutulmasını en iyi temsil eden model olarak belirlenmiştir. Isı ve kütle transfer katsayıları, farklı olgunlaşma aşamalarında, 46.84 ila 70.54 W/m²K ve 0.040 ila 0.0632 m/s arasında değişmiştir. Etkin difüzyon katsayısı 1.96 ila 3.59×10⁻¹⁵ m²/s arasındadır. Olgunlaşma aşamaları, muzun kızılötesi kurumasını etkilememiştir. Aktivasyon enerjileri, 2., 3., 5. ve 7. olgunlaşma aşamaları için sırasıyla 16.392, 29.531, 23.194 ve 25.206 kJ/mol'dir.

Fissore vd. (2014) çalışmalarında kahveyi dondurarak kurutmuşlardır. Isıtma rafının sıcaklığı ve kurutma odasının basıncı gibi çalışma koşullarını belirtmek amacıyla basitleştirilmiş bir matematiksel model kullanmışlardır. Sistemde ekserji kayıplarının minimum olacağı optimum çalışma koşulları 30 Pa basınç ve -20°C sıcaklık olarak belirlenmiştir.

Botelho vd. (2011) çalışmalarında havuç dilimlerinin kızılötesi ile kurutulmasını incelemişler ve kurutmadaki ısı transfer katsayılarını ve kütle transfer hızlarını belirlemişlerdir. Sabit kuruma hızı boyunca ısı transfer katsayıları ve kütle transfer hızları, sıcaklık arttıkça anlamlı şekilde artmıştır. Havuç dilimlerinin azalan kuruma sürecini Difüzyon yaklaşımı, Two Terms, Midilli and Verna modelleri ile tanımlamışlardır. Çalışmada etkili yayılım katsayısının sıcaklık artışıyla arttığı belirlenmiştir.

Cheng vd. (2014) çalışmalarında vakumlu dondurarak kurutma sisteminde sayısal simülasyon ve akışın ısı transfer özelliklerini belirlemek için farklı giriş pozisyonları ve giriş hızlarında beş farklı raf kullanmışlardır. Sonuçlara göre, hava akış hızı, sıcaklık gradyanı ile ters doğrusal olarak ilişkili iken, ısı transfer hızı ile pozitif doğrusal ilişkilidir.

Karagüzel vd. (2011) çalışmalarında ekserji veriminin sıcaklıkla arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında aynı zamanda ekserji veriminin kurutma havasının hızı ile doğru orantılı olarak ancak çok az etkilendiğini belirtmişlerdir.

Arévalo-Pinedo ve Xidieh Murr (2007), havuç ve balkabağının 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta ve 5 ve 15 kPa'lık vakum basıncında kurutmada ön işlem olarak donma ve haşlamanın kurutma kinetiklerine etkisini belirlemişlerdir. Sonuçlara göre, ön kurutma işlemlerinin bu ürünlerin nem taşınımını etkilediği ve kabak numunelerinin etkili nem yayılım değerleri, havuçlarınkinden daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Doymaz (2006), nane yapraklarının ince tabaka kuruma davranışlarını 35 ila 60°C sıcaklık aralığında bir kabin kurutucusunda belirlemiştir. Fick'in difüzyon modelini uygulayarak açıklanan nane yapraklarından nem transferinde, etkili nem yayılım değeri 3.067×10^{-9} ile 1.941×10^{-8} m²/s arasında değişmiştir. Çalışmada belirlenen aktivasyon enerjisi 62.96 kJ /mol'dür.

Jafar ve Farid (2003) çalışmalarında sütün dondurarak kurutulmasında hem plaka ısıtma hem de radyasyonla ısıtma uygulayarak, ısı ve kütle transferini tanımlayan matematiksel bir model oluşturmuşlardır.

Tambunan vd. (2001) çalışmaların kuruma süresinin, ürünün yüzey sıcaklığındaki değişim ile karşılaştırıldığında kabin basıncı ve donma hızından daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Daha yüksek kabin basıncı ve daha hızlı donma işlemi, birincil kuruma süresini kısaltırken, ikincil kuruma süresini uzatmıştır. Dondurarak kurutulmuş ürünün kalitesi, hammaddenin kalitesinden

bir miktar düşük, ancak 35-40°C'de sıcaklıkta fırında kurutulmuş ürüne kıyasla daha yüksek olarak değerlendirilmiştir.

Liu vd. (2008), çalışmalarında dondurarak kurutmada ekserji girişinin büyük kısmının, birincil kurutma, yoğuşma ve vakum pompası tarafından tüketildiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmaya göre birincil kurutmadaki ekserji tüketimi, toplam ekserji girişinin %35.69'udur. Vakumlama işleminde toplam ekserji girişinin %23.29'u tüketilir. Donma ve ikincil kurutmadaki ekserji tüketimi, toplam ekserji girişinin sırasıyla %3.56 ve %5.71'idir. Yüzey sıcaklığındaki artış, toplam ekserji kaybında önemli bir artışa neden olmaktadır. Sistemin ekserji kaybı, kabin basıncının artmasıyla artmaktadır.

Gungor vd. (2015) çalışmalarında üç farklı tıbbi ve aromatik bitkinin gaz motorlu ısı pompalı kurutucu ile kurutulmasını incelemişlerdir. Toplam önlenebilir maliyetlere dayanan en önemli bileşenlerin kurutma kanalları, kondenser ve genişleme vanası olduğunu, evaporatör ve kurutma kabiniindeki ekserji yıkımının ise nispeten düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Hossain vd. (2010) çalışmalarında üç farklı kurutma işleminden sonra (hava ile, dondurarak ve vakumlu kurutma) altı adet Lamiaceae bitkisinin (biberiye, kekik, mercanköşk, adaçayı, fesleğen ve kekik) toplam fenol, rosmarinik asit içeriği ve antioksidan kapasitesindeki değişiklikleri araştırmışlardır. Test edilen kurutma yöntemleri arasında, havayla kurutmanın tüm numuneler için en iyi yöntem olduğu bulunmuştur. Havayla kurutmanın etkisi kekik ve biberiye gibi odunsu bitkilerde daha belirgindir. Vakumlu fırında kurutma, Lamiaceae bitkilerinden antioksidan bileşiklerin çıkarılmasında daha iyi etkinlik göstermiştir. Çalışmada taze otlar, uygulamalar arasında en kötü performansı sergilemiş, taze otların dış (atmosferik oksijenle oksidasyon) ve iç (enzimatik) bozulmaya çok eğilimli oldukları belirlenmiştir.

Coskun vd. (2009) talaş kurutma işleminde tambur kurutma sisteminin enerji ve ekserji verimliliklerini sırasıyla %34.07 ve %4.39 olarak belirlemişlerdir.

Çalışmada enerji ve ekserji verimlilik değerlerinin sisteme bir ısı eşanjörü dahil edilerek sırasıyla %93.15 ve %43.08'e yükseltilebileceği bulunmuştur.

George ve Datta (2002) çalışmalarında, sebze dilimlerinin dondurulması için ısı ve kütle transfer ilkelerine dayanan matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Kurutma eğrileri elde etmek için 1, 2 ve 3 mm kalınlığındaki havuç örnekleri dondurarak kurutulmuştur. Kırmızı biber, bir mantar delici kullanılarak bütün kırmızı biberden elde edilen iki tip dairesel disk örneği kullanılarak kurutulmuştur. 2 mm kalınlığındaki mantar örnekleri, havuç örneklerine çok benzer bir kurutma davranışı göstermiştir. 1, 2 ve 3 mm kalınlıklarındaki havuç numuneleri için ortalama kütle yayılım değerleri 5.39×10^{-5} , 1.05×10^{-4} ve $1.52 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak belirlenmiştir.

Díaz-Maroto vd. (2002) çalışmalarında defne yapraklarının kurutulmasında fırın kurutma (45°C kurutma sıcaklığı) ve ortam sıcaklığında kurutmanın uçucu bileşenlerde küçük kayıplara neden olduğunu belirtirken; dondurarak kurutmanın ürünün genel aromasına da dahil olabilecek bazı daha az uçucu maddelerde artışlar sağladığını belirtmişlerdir.

Ratti (2001) çalışmasında sıcak hava ve dondurarak kurutmayı karşılaştırmıştır. Dondurarak kurutma boyunca toplam enerji tüketiminin %45'inin süblimasyon işleminde, %35'inin yoğunlaşma işleminde, %26'sının vakumlama işleminde ve %4'ünün de donma işleminde harcadığını belirtmiştir. Ayrıca dondurarak kurutmada düşük ve yüksek maliyetli olarak kuruttuğu ürünlerin maliyetlerini karşılaştırmıştır. Düşük maliyetli ürün için yatırım maliyeti %30, paketleme %25, işlenmemiş materyal %16, depolama %7, enerji %9 ve personel maliyetlerini %13 olarak belirtmiştir. Yüksek maliyetli ürün için yatırım maliyeti %16, paketleme %8, işlenmemiş materyal %61, depolama %4, enerji %4 ve personel maliyetlerini %7 olarak belirtmiştir. Yüksek maliyetli ürünün dondurarak kurutulmasında enerji maliyeti daha azdır.

Çizelge 2.1'de literatürdeki bazı önemli çalışmalar kurutma yöntemleri ve çalışma parametrelerine göre belirtilerek özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Literatürdeki bazı önemli çalışmaların özeti

Ürün		Kurutma yöntemi	Kurutma koşulları	İncelenen fiziko kimyasal özellikler	Bulgular	Referans
Kabak	dilim	Mikrodalga multi-flash	7 dakika için 1000 W, 10 dakika için 300 W ve 60 dakika için 200 W, 3-5 kPa basınç	Kurutma kinetikleri, rehidrasyon	Mikrodalga vakum ve multi-flash kurutma, kabak dilimlerinin kurutulmasında en etkili yöntem olarak belirlenmiştir.	Monteiro vd. (2018)
		Mikrodalga vakum	3 ve 5 kPa basınç			
		İletken multiflash	-60°C donma ısısı, 0.002 kPa vakum basıncı			
		Dondurarak	60°C sıcaklık, 0.6 m/s kurutma hızı			
		Sıcak hava				
Havuç	küp	Mikrodalga destekli sıcak hava	95°C'de sıcak suda 5 dakika beyazlaştırma işlemi, 60-80°C sıcak	Renk, kimyasal özellikler, duyuşal değerlendirme, rehidrasyon	6 C/mm sıcaklık gradyanında en kaliteli kurutulmuş beyazlaştırılmış havuç küpleri elde edilmiştir. Ortalama sıcaklık gradyanının azalmasıyla, renk farkı ve rehidrasyon kapasitesi azaldı, ancak kuruma süresi artmıştır.	Xu vd. (2018)

Çizelge 2.1-devamı. Literatürdeki bazı önemli çalışmaların özeti

Sarımsak	dilim	Infrared	0.075, 0.15, 0.225 ve 0.3 W/cm ² radyasyon yoğunluğu ve 0.75 ve 1.25 m/s hava hızı	Etkili nem yayılımı ve nem içeriği, ortalama aktivasyon enerjisi	Modified Henderson and Pabis model, sarımsak dilimlerinin kurutulmasında en etkili tanımlayıcı modeldir.	Younis vd. (2018)
Patates	dilim	Vakumlu dondurarak kurutulma	-40°C donma sıcaklığı	Kimyasal ve fiziksel özellikler, renk özellikleri	Mikrodalgalı dondurarak kurutma işlemi ile %37 daha kısa sürede kuruma elde edilmiştir	Wang vd. (2010)
		Mikrodalgalı dondurarak kurutulma	1.6 W/g mikrodalga gücü, 55°C sıcaklık			
Elma ve patates	cips	Mikrodalga destekli dondurarak	4 W/g mikrodalga gücü	Doku, renk, rehidrasyon, duyuşal, mikroyapısal ve diğer kalite parametreleri	Mikrodalgalı dondurarak kurutma yöntemi, daha kısa kurutma süresi ve daha kaliteli ürün elde edilmesinde daha etkili olmuştur.	Huang vd. (2011)
		Dondurarak	50°C sıcaklık and -40°C donma sıcaklığı, 100 Pa basınç			
		Mikrodalga vakum	100 Pa basınç, -40°C donma sıcaklığı, 1.6 W/g mikrodalga gücü, 50°C sıcaklık			

Çizelge 2.1-devamı. Literatürdeki bazı önemli çalışmaların özeti

Patlıcan	kübik	Ultrason destekli atmosferik dondurarak kurutma	-5, -7.5 ve -10 °C sıcaklık, 0, 25 , 50 W ve 21.9 kHz ultrason seviyesi, 2, 5 m/s hava hızı	Kimyasal ve fiziksel özellikler	Hava hızı ve sıcaklıktaki artış ile örneklerdeki antioksidan potansiyeli azalmıştır. Ürün boyutu arttıkça antioksidan potansiyel yıkımı daha büyüktür. Ultrasonunun uygulanması kuruma süresini kısaltmış, antioksidan içeriğini etkilememiştir.	Colucci vd. (2018)
Meksika kekiği (<i>Lippia berlandieri</i> Schauer)	yaprak	Dondurarak Geleneksel sıcak hava Vakumlu mikrodalga		Rehidrasyon hızı, renk, fiziksel özellikler, uçucu maddeler	Dondurarak kurutmanın aksine, kekikin vakumla mikrodalga ile kurutulması, dondurarak kurutulmuş numunelere benzer niteliklere sahip (renk, rehidrasyon ve yapı bakımından) kuru bir bitki materyali üretebilen hızlı bir işlemdir.	Yousif vd. (2000)

Çizelge 2.1-devamı. Literatürdeki bazı önemli çalışmaların özeti

Fesleğen	yaprak	Sıcak hava	50 °C sıcaklık	Kimyasal özellikler	Mineral özelliklerinin daha iyi korunduğu fırın kurutma 15 saat sürerken, güneşte kurutma 2 gün devam etmiştir.	Özcan vd. (2005)
		güneşte	30-35 °C sıcaklık			
Bakhtiari savory (Satureja bachtiarica Bunge.)	yaprak	güneşte	25 ve 35°C sıcaklık	Kimyasal özellikler	Bakhtiari'nın fırın içinde 45°C'de kurutulması kısa kuruma süresi ve yüksek yağ verimi dikkate alındığında en uygun kurutma yöntemidir.	Ghasemi Pirbalouti vd. (2013)
		Fırın kurutma	45 ve 65°C sıcaklık			
		dondurarak	-15 °C donma sıcaklığı, 65 °C sıcaklık			

Literatürde dondurarak kurutma yapılan bazı çalışmaların basınç, donma ve kurutma sıcaklık değerleri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 Literatürdeki dondurarak kurutma çalışma koşulları örnekleri

Ürün	Basınç (Pa)	Donma sıcaklığı (°C)	Sıcaklık (°C)	Kalınlık	Referans
Süs lahanası yaprakları	52	-35	20, 40, 60	0.5 mm	Dziki vd. (2018)
Bakhtiari savory bakterisi	-	-15	65	yaprak	Ghasemi Pirbalouti vd. (2013)
Arpa otu	30	-55	0 ile 60	90×175mm	Cao vd. (2017)
Patates, Elma	100	-40	-45 ile 15	2.5x 2.0 x 0.7cm	Sablani ve Rahman (2007)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bazı yapraklar ayırıcı lezzetleri ve aromaları için mutfak amaçlı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapraklar, tadı arttırmanın yanı sıra, görsel olarak çekici olmaları için çeşitli yemekleri süslemek için de kullanılırlar. Yeşil yapraklar tipik olarak kalori bakımından düşük, yağ bakımından düşük, kalori başına protein bakımından yüksek, demir, diyet lifi, kalsiyum açısından yüksek ve vitamin C, vitamin K, lutein, karotenoidler ve folik asit gibi fitokimyasallarda çok yüksektir. Yeşil yaprakların hızla yok olma eğilimindedir ve bu yaprakların verimlilikleri mevsimlik olması sebebiyle bunları yıl boyunca yeterli miktarda bulmak mümkün değildir. Herhangi bir enzimik reaksiyonu ve oksidasyonu önlemek için, yapraklardaki yüksek doğal nem içeriğinin kabul edilebilir yüzde nem içeriğine düşürülmesi gerekir. Yaş ürün özelliklerini daha fazla koruyan işlenmiş ürünler için tüketici talebi giderek artmaktadır. Aromatik otlar ve baharatlar biyolojik bozulmayı artıran kurutma işlemlerine en duyarlı olanlardır. Bu işlem uçucu ve aroma kaybına, renk ve dokudaki değişikliklere ve besin değerinde düşüşe neden olur (Özcan vd., 2005; Babu vd., 2018).

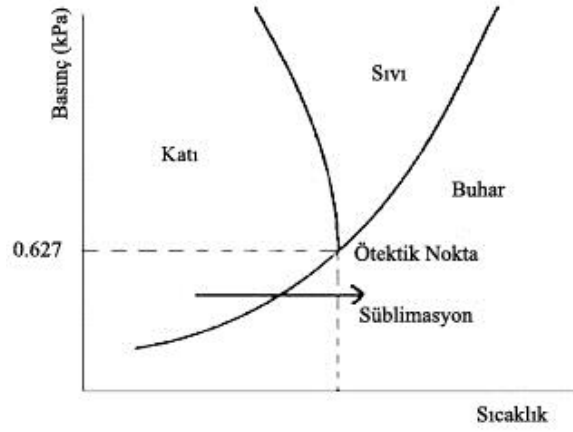
Yapraklar normalde kurutmada ağırlıklarının %85'ini kaybeder. Kurutulmuş yaprakların genellikle taze yapraklardan üç ila dört kat daha yüksek aktif besin seviyelerine sahiptir. Yaprakların kurutulması ya doğal ya da yapay yöntemlerle yapılır. Açık güneşte kurutma, gölgede kurutma ve ortam sıcaklıklarında rüzgarla kurutma, birçok bölgede hala kullanılan geleneksel doğal kurutma yöntemleridir. Zorlanmış konveksiyon yöntemi gibi birçok yapay kurutma yöntemi, büyük miktarlardaki yaprakları kabul edilebilir kalitede daha yüksek bir hızda kurutmak için kullanılmıştır. Bu yöntemlerden bazıları: kabin tepsi kurutma, taşıyıcı bant kurutma, vakumla kurutma, kimyasal kurutma, dondurarak kurutma, mikrodalga kurutma, radyo frekanslı kurutma, vb. (Özcan vd., 2005; Babu vd., 2018).

Nane (*Mentha spicata* L.), dünya genelinde bulunur, ancak ana dağıtım merkezi bu bitkilerin bitki örtüsünün baskın bir bölümünü oluşturduğu Akdeniz

bölgesidir. Nane, eski zamanlardan beri tıbbi ve aromatik bir bitki olarak kullanılmıştır. Nane yaprakları lezzet vermek için ve aynı zamanda çay ve baharat olarak kullanılır. Yeni patates, domates, havuç ve bezelye gibi birçok sebzeyle iyi birleşiyor. Kuru nane, humus ve diğer nabız ve tahıl yemekleri üzerine serpilir. Ayrıca, nane yağı yaygın olarak kullanılan esanslardan biridir. Bu mevsimsel bitkinin korunması ve tüm yıl boyunca tüketicilerin kullanımına sunulması için, kurutma gibi belirli teknolojik işlemlere tabi tutulur (Doymaz, 2006).

3.2. Dondurarak Kurutma ve Deney Sistemi

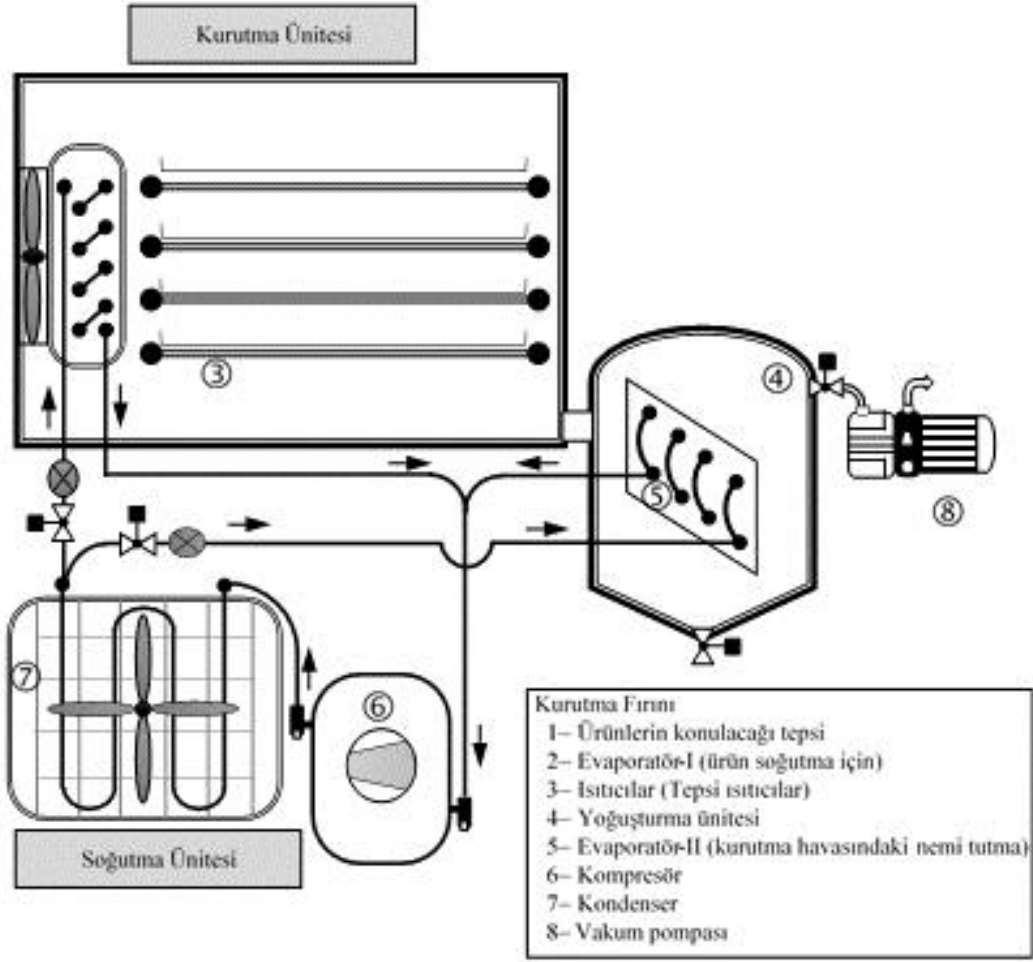
Liyofilizasyon veya dondurarak kurutma, bir ürünün vakum altında tutulmasından ve dondurulmasından sonra üründen suyun uzaklaştırılması ve buzun sıvı faza geçmeden doğrudan katıdan buhara geçmesine izin veren bir işlemdir. Bu işlem biyoteknolojide, gıda ve ilaç endüstrisinde sıkça ürünleri stabilize etmek ve korumak için kullanılan bir kurutma işlemidir. Dondurarak kurutulmuş ürünlerin, tazeleriyle aynı özelliklere sahip olduğuna inanılmaktadır. Taze numunelerin şekil, görünüm, tat, besin maddeleri, gözeneklilik, renk, lezzet, doku ve biyolojik aktivite gibi özelliklerinin korunması ve saklanması, bu tekniği gıda maddelerinin kurutulması için en etkileyici ve uygulanabilir işlemlerden biri haline getirir. Bununla birlikte, dondurarak kurutma, geleneksel kurutma yöntemlerine kıyasla daha düşük buhar basıncı itici gücü nedeniyle daha uzun kuruma süresi gerektirir. Liyofilizasyon, buzun süblimasyonunu sağlamak için üçlü noktanın altındaki sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştirilir (Şekil 3.1). Tüm işlem düşük sıcaklıkta ve basınçta gerçekleştirilir, bu nedenle bu yöntem ısıya dayanıksız bileşiklerin kurutulması için uygundur. Donma aşamasının temel amacı, ürün içinde hareketli halde bulunan serbest suyun dondurulmasıdır. Donma aşaması ürünün yapısı, şekli, içinde bulunan buz kristallerinin dağılımı açısından önemli olduğundan son ürünün yapısını da etkilemektedir (Nireesha vd., 2013).



Şekil 3.1. Üçlü nokta basınç ve sıcaklığı
(0.627 kPa ve 0.02°C noktası)

Dondurarak kurutma işlemi sırasında, bazı bileşiklerin bozulması nedeniyle antioksidanların içeriğinde bir düşüş olabilir. Ayrıca, dondurarak kurutma işleminin operasyonel maliyeti de yüksektir (Shofian vd., 2011). Geleneksel kurutma teknikleriyle karşılaştırıldığında, bugüne kadar dondurarak kurutmanın kullanımı maliyeti ile sınırlıdır ve bu nedenle bu yöntem farmasötik ürünler gibi katma değeri yüksek ürünler için daha yaygın kullanılır. Dondurarak kurutmanın yüksek maliyetinin ana nedeni, önemli bir işlem süresi içeren vakum altında çalıştırma gereksinimidir.

Tez kapsamında kullanılan dondurarak kurutma sisteminin temel çalışma şeması Şekil 3.2' de verilmiştir. Kurutulacak ürünün önce dondurulmasını sonrasında vakum basıncı altında kurutulmasını sağlayacak olan kurutma fırını; kurutma ünitesi, soğutma ünitesi ve otomasyon ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır. Dondurarak kurutma makinesinin resmi Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Dondurarak kurutma sistemin temel çalışma şeması



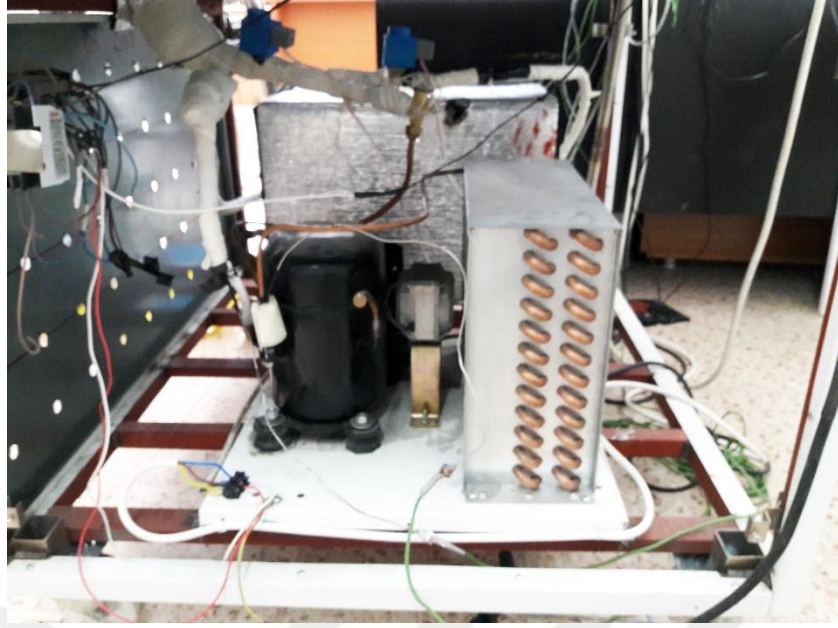
Şekil 3.3. Dondurarak kurutma sistemi

Kabin: Bu vakum sızdırmaz bir bölmedir ve hem donma hem de kurutma işlemlerine uygun tasarlanmıştır. Ürünlerin yerleştireceği ısıtmalı raflardan oluşur. Kabin, paslanmaz çelikten imal edilmiş, vakum işletme basıncı dayanıklı ve dıştan yalıtılmıştır. Tepsi yüzeyinin altında ürünün ısıtılmasını sağlayacak rezistans ısıtıcılar bulunmaktadır. Bu tasarımda raflar 40x60 cm ebatlarındadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Dondurarak kurutma fırını kurutma tepsisi

Soğutma Ünitesi: Soğutma ünitesi; ürünün dondurulmasını, donmuş haldeki ürünün buzu çözülmeden kuruması için gerekli vakum basıncının sağlanmasını ve kurutma sürecinde oluşan su buharının dondurarak tutulmasını sağlar. Ürünün dondurulması ve buharlaşan nemin dondurulması farklı zamanlarda olduğundan soğutma sistemi tek kompresörlü, tek kondenserli ve çift evaporatörlü olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.5). Evaporatörlerden biri ürünün dondurulması için, diğeri ise üründen ayrılan su buharının dondurulması için görev yapmaktadır.



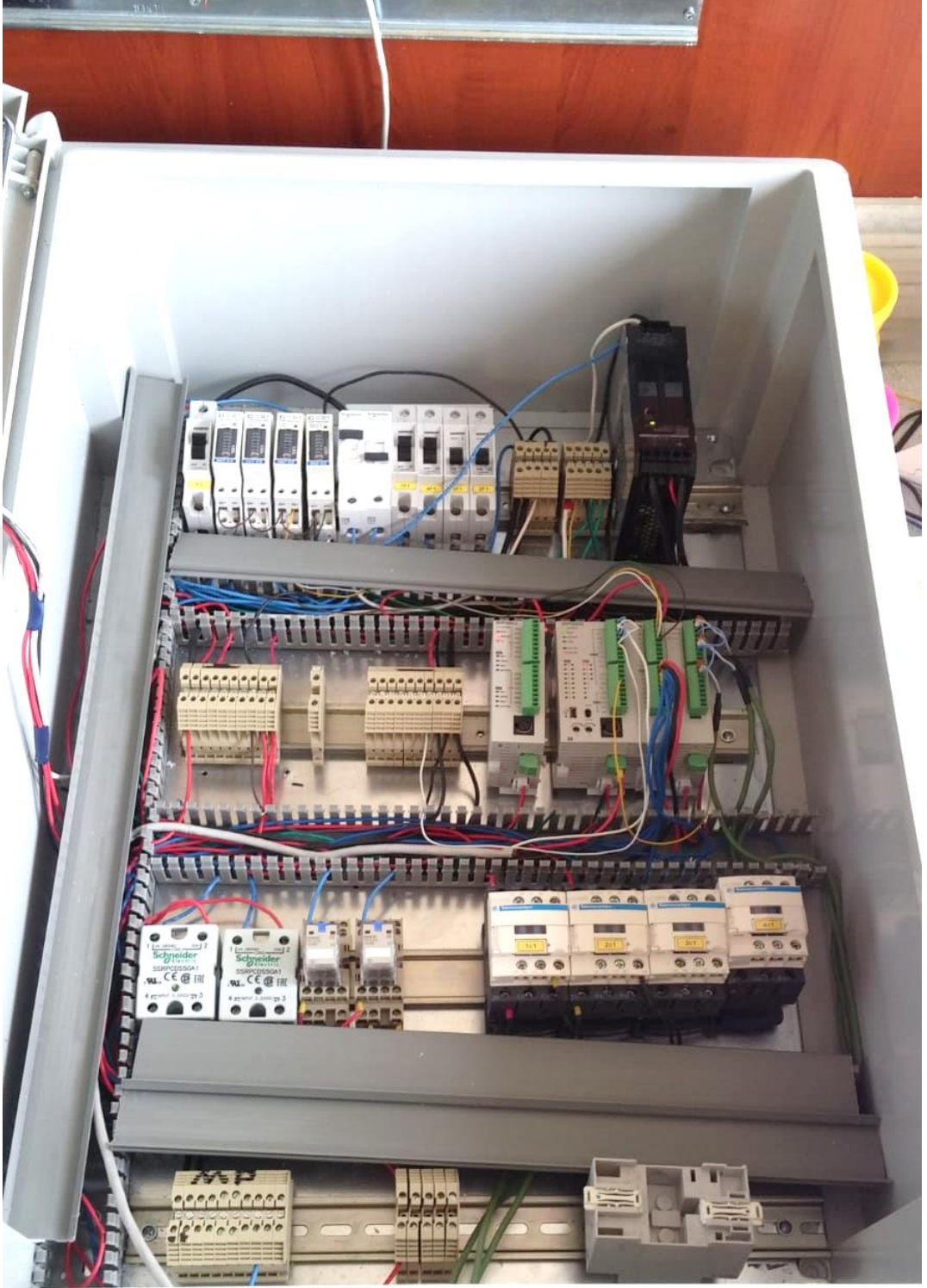
Şekil 3.5. Kurutma sistemi soğutma ünitesi

Yoğuşturma ünitesi: Kurutma süresinin kısaltılması ve süblimasyon işleminin gerçekleştirilmesi için, kurutma işlemi sırasında vakum uygulanmalıdır. Düşük vakum elde etmek için iki kademeli bir döner vakum pompası kullanılmıştır. Vakum pompasının gücü 745 W'dır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kurutma sistemi vakum pompası

Kontrol sistemi: Tasarlanan sistemde kullanılan kontrol elemanları raf sıcaklığı, basınç ve zamandır. Bir kontrol programı, bu değerleri ürünün veya işlemin gerektirdiği şekilde ayarlamaktadır. Ürün sıcaklığı, kabin sıcaklığı ve basıncı, üründen uzaklaştırılan suyun kütlesi gibi veriler kaydedilmektedir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Dondurarak kurutma sistemi kontrol ünitesi

Dondurarak kurutma sisteminde donma işlemi sürecinde; kurutma yapan fırın bir dondurucu gibi çalışmaktadır. Denemelerde taze nane yaprakları iki tepsiye eşit şekilde dağıtılmıştır. Çalışma kapsamında kurutulacak ürünler yaklaşık -15°C sıcaklıkta kurutma ünitesinde dondurulmuştur. Donmuş numuneler istenilen sıcaklığa ayarlı kurutma aşamasına alınmıştır. Kurutma sürecinde; vakum basıncında dondurulmuş olan ürüne düşük seviyede ısı enerjisi verilerek suyun buharlaştırılması sağlanmıştır. Kurutulan üründen buharlaştırılan nemin yoğunlaştırma ünitesinde dondurulması sağlanmaktadır. Kurutma aşamasında 40, 50 ve 60°C kurutma sıcaklığı ve 30, 50 ve 80 kPa vakum basıncında değişik kombinasyonlar denenmiştir. Kurutma süreci ortalama olarak 12-14 saat aralığında durdurulmuştur. Bu süreçte nane nem içeriği %8-15 seviyelerine düşürülmüştür. Ölçüm değerleri saat başı kaydedilmiştir. Tasarlanan dondurarak kurutma sisteminin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Dondurarak kurutma sistemi teknik özellikleri

Soğutma kaynağı sıcaklığı	-30°C
Kabin hacmi	272 lt
Kurutma tepsi boyutları	40x60 cm
Kurutma tepsi adedi	2
Kurutma sistemi ısıtma gücü	1500 W
Soğutma kapasitesi	1500 W
Vakum pompası gücü	745 W
Soğutma sisteminin kompresör gücü	450 W
Soğutucu akışkan	R404a

3.3. Kurutma Koşulları

Dondurarak kurutma işlemi, genellikle raf sıcaklığı ve kabindeki basınç ile belirtilir. Bu tarif genellikle deneme yanılma ile elde edilen çok genişletilmiş deneylerle elde edilebilir. Her deneyde donma ve süblimasyon adımları elde

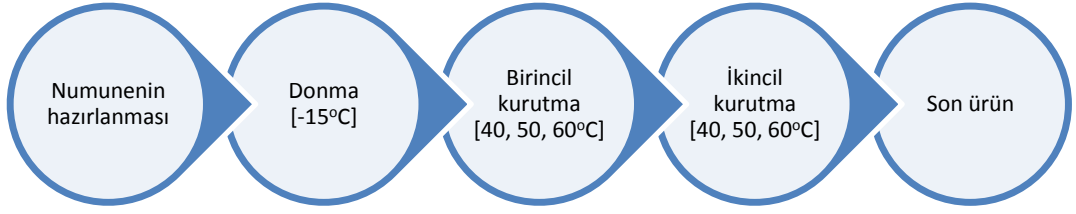
edilemeyebilir, deneylerde farklı ürün çekirdek sıcaklıkları elde edilebilir. Kurutma için temin edilen zirai üründen ve zamanla değişen çalışma ortamı farklılıklarından da kaynaklanan başka değişiklikler de olabilmektedir.

Vakumlu dondurarak kurutma işlemindeki düşük sıcaklık, yüksek basınç ve uzun işlem süreleri gibi sıkıntılı koşullar nedeniyle işlem devamlılığı ve verimliliği, ürün kalitesi için kritiktir. Literatürdeki çalışmaların kurutma parametreleri incelenmiş ve pilot ölçekli olarak geliştirilen dondurarak kurutma ünitesinde bu değişkenler dikkate alınarak yapılan birçok deneme yanılma sonucunda nane için belirlenen çalışma şartları Çizelge 3.2'de sunulmuştur. Referans ortamı verileri için $T_0=30^{\circ}\text{C}$, $P_0= 1 \text{ atm}$, $\omega_0=0.0153$ değerleri kabul edilmiştir.

Çizelge 3.2. Farklı çalışma koşullarındaki deneylerin parametreleri

	Ürün miktarı (g)	Basınç (kPa)	Donma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Kurutma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
Deney 1	100	30	-15	40
Deney 2	100	30	-15	50
Deney 3	100	30	-15	60
Deney 4	100	50	-15	40
Deney 5	100	50	-15	50
Deney 6	100	50	-15	60
Deney 7	100	80	-15	40
Deney 8	100	80	-15	50
Deney 9	100	80	-15	60

Liyofilizasyona dahil olan adımlar, istenen nem içeriğine sahip nihai kurutulmuş ürünü elde etmek için, numune hazırlama işleminden başlayıp ardından donma, birincil kurutma ve ikincil kurutma ile devam eder (Şekil 3.8). Bu işlemleri gerçekleştirmek için, genel olarak bir vana ile -10°C ila -80°C arasında çok düşük sıcaklıklara ulaşabilen bobinler içeren bir "yoğuşturucu" ve odaya bağlanan sıcaklık kontrollü rafları tutan bir "kurutma odası" olmak üzere iki temel parça gerekir (Nireesha vd., 2013).



Şekil 3.8. Liyofilizasyon ile ilgili adımlar

1. Donma aşaması: Kurutulacak ürün şok dondurucular gibi kurutucu içinde taze halde yerleştirilir ve ürün sıcaklığı donma noktasının altına düşürülür. Böylece materyalin çoğu donar ve buz kristalleri oluşur. Ürünün sahip olduğu suyun hacminin genişlemesi sonucu hücre yapısındaki su dışarıya çıkmak istemektedir. Buna bağlı olarak ürünün hücre yapısında deformasyon oluşur. Donma işleminin sonunda ürün sahip olduğu suyla beraber katı fazındadır. Bu şekilde üründe mikrobiyolojik faaliyetler yani ürünün bozulma süreci durdurulmuş olur. Hedeflenen sıcaklık nanenin (merkez) sıcaklığı ile eşit oluncaya kadar donma işlemi devam etmektedir. Ürünün tamamen donmasıyla bu safha tamamlanmış olur. Literatürdeki çalışmalar incelenerek nanenin donma sıcaklığı -15°C olarak belirlenmiştir.

2. Birincil kurutma: Birincil kurutma aşamasında, kurutma kabinindeki basınç düşürülür, ürün içinde bulunan toplam nemin %90'ı, serbest suyun tamamı ve bir kısım bağlı su, süblimasyon yolu ile üründen uzaklaştırılır. Kurutma kabini ile kondenser arasındaki su buharının konsantrasyon gradyanı, liyofilizasyon sırasında suyun uzaklaştırılması için itici güçtür. Suyun buhar basıncı, birincil kurutma sırasında sıcaklıktaki artışla artar. Bu nedenle, birincil kurutma sıcaklığı, materyalin yapısındaki kayıpları önlemek için mümkün olduğu kadar yüksek, ancak kritik işlem sıcaklığının altında tutulmalıdır (Nireesha vd., 2013). Süblimasyon enerji gerektirdiğinden, ısı, ürünün sıcaklığına göre raf boyunca ürüne aktarılır. Literatürdeki bilgiler yardımıyla yapılan deneme yanılma

kurutmalarından sonra nanelerin dondurarak kurutulmasında farklı basınçlarda 40, 50 ve 60°C kurutma sıcaklıkları seçilmiştir.

3. İkincil kurutma: Buzun süblimleştirilmesi tamamlandığında, raf sıcaklığı yükseltilir ve ürüne bağlı suyun desorpsiyonu yolu ile uzaklaştırılır. Son aşama sıcaklık arttırılarak ve suyun kısmi buhar basıncı düşürülerek gerçekleştirilir. Ürünün sıcaklığı ağır ağır yükseltilirken üründen çıkan buhar vakum pompası yardımıyla kurutma ortamından yoğuşturulacağı bölüme geçer. Yoğuşturucu bölümünde, su buharının dondurarak kurutulmuş ürüne geri dönmesi ve vakum pompasına gitmesi engellenmiş olur. İkincil kurutma aşaması bağlı suyun düşük buhar basıncından dolayı birincil kurutma aşamasının %30-50'si arasında bir zaman dilimine ihtiyaç duyar. Dondurarak kurutma işlemi, mevcut tüm serbest ve bağlı su uzaklaştığı zaman sonlandırılır. Son durumda ürün içinde kalan nem miktarı ürünün yapısal bütünlüğüne ve raf ömrüne etki etmeyecek miktardadır (Jangam vd., 2010).

Dondurarak kurutma, genellikle "yumuşak" bir kurutma işlemi olarak kabul edilmekle birlikte, düşük çalışma sıcaklıkları nedeniyle, ürünün aşırı ısınmasının önlenmesi için ürüne yapılan ısı transferinin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Gerçekte, istenmeyen olayların oluşmasını önlemek için ürün sıcaklığının bir sınır değerinin altında tutulması gerekir. Donma sırasında kristalleşen ürünler söz konusu olduğunda, sınır sıcaklığı ötektik noktaya tekabül eder: amaç, sıvı faz oluşumunu ve düşük basınç nedeniyle art arda kaynamayı önlemektir. Ürünün kurutulmasında kuru ürünün çökmesini önlemek için izin verilen maksimum ürün sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığına yakındır: bu değer çok düşük olabilir ve ayrıca kalan neme de bağlıdır. Ürün sıcaklığının yanı sıra, üründe kalan buz miktarının da birincil kurutma sırasında dikkatlice kontrol edilmesi gerekir, böylece bu fazın bitiş noktası belirlenir. Aslında, raf sıcaklığı, döngünün son evresinin gerektirdiği değere çok erken yükselirse, ürün sıcaklığı izin verilen maksimum değeri aşabilir ve böylece erime veya çökmeye neden olabilir (Pisano vd., 2011).

3.4. Ürün Neminin Belirlenmesi

Doğal haliyle hiçbir tarım ürünü tamamen kuru değildir. Biraz su her zaman mevcuttur. Bu nem genellikle ürün için yüzde nem içeriği olarak gösterilir (Wilhelm vd., 2004). Literatürde kurutma işleminin düşme hızı süresince kütlenin değişimini öngören birçok matematiksel ifade vardır. Kurutma işlemi, numunenin nem içeriğinin zaman içindeki azalmasını ölçen, boyutsuz bir parametre olan nem içeriği (MR) ile tanımlanmaktadır (Amami vd., 2017; Muliterno vd., 2017). Nem içeriği şu şekilde tanımlanır:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.1)$$

M, M₀ ve M_e sırasıyla anlık nem içeriği, ilk nem içeriği ve denge nem içeriğidir.

3.5. Ekserji ve Enerji Analizi

En temel doğa yasalarından biri enerji ilkesinin korunmasıdır. Basitçe, etkileşim sırasında enerjinin bir formdan diğerine değişebileceğini ancak toplam enerji miktarının sabit kaldığını belirtir. Yani, enerji yaratılmaz veya yok edilemez. Herhangi bir sistemin enerji içeriğindeki değişiklik, enerji girişi ile enerji çıkışı arasındaki farka eşittir ve bu enerji dengesi olarak ifade edilir. Bir sistemdeki miktar için genel enerji dengeleri şu şekilde yazılabilir (Özgener ve Hepbaşlı, 2003, Hui, 2006, Çengel ve Boles, 2012, Dincer ve Rosen, 2012; Aghbashlo vd., 2013):

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (3.2)$$

burada m_g ve m_ç sırasıyla sisteme giren ve çıkan kütleleri ifade etmektedir.

Kurutuculardaki teknolojik hesapların temeli, kurutucuya giren kütlenin çıkan kütleye eşit olduğu, kütle korunumu yasasıdır. Sürekli bir işlem için hesaplamalar materyalin kütle akışı (kg/s) ile olmalıdır. Kurutma, kuru materyalin kütlesini değiştirmez. Giren ve çıkan kütleler ya da kütle akışları eşittir. Hava akış kütlesi,

temasta olduğu borunun boyutları ve hava hızından etkilenir. Kurutma sıcaklığı, materyale verilen ısının miktarını belirler, bu nedenle materyalin yapısal ve kalitesel özelliklerini etkiler. Teorik olarak, ısı akışı gıdalarda suyun buharlaşması için yeterlidir; fakat pratikte durum böyle değildir. Kurutma süresince sadece su değil aynı zamanda gıda ve kurutma ekipmanları parçaları da kurutma sıcaklığında ısıtılmalıdır. Isı kaybını telefi etmek için daima ekstra ısı verilmelidir. Isı kayıpları, ekipmanların izolasyonu ve çıkan havanın kullanımı ile azaltılabilir. Kurutma etkinliği, teorik ısı akışının pratikte kullanılabileceği orandır ve kurutulacak olan materyalin kalitesine ve kurutucu tipine bağlıdır. Bunların yanında sıcaklık, nem içeriği ve kurutma havasının hızı da kurutma sürecini etkilemektedir (Hui, 2006; Aghbashlo vd., 2013).

Soğutma makinelerinin çalışma verimleri ısı tesir katsayısı (COP), elde edilmek istenen etkinin, harcanan işe oranı olarak ifade edilir (Çengel ve Boles, 2012).

$$COP = \frac{\text{Soğutma etkisi}}{\text{İş girişi}} = \frac{Q_{\text{evaporatör}}}{W_{\text{kompresör}}} \quad (3.3)$$

Maksimum teorik ısı pompası etkinliği Carnot etkinliği ile belirlenir. Pratikte gerçek ısı pompası etkinliği, teorik Carnot etkinliğinin %40-50'si kadardır. (Mujumdar, 2006)

$$COP_{\text{ısı pompası,carnot}} = \frac{T_{\text{kondanser}}}{T_{\text{kondanser}} - T_{\text{buharlaştırıcı}}} \quad (3.4)$$

Kurutma sabit aşamalı bir işlem olmadığı için enerji etkinliği tüm kurutma işlemi boyunca değişmektedir. Kurutucunun performansını belirlemek için genellikle özgül nem çekme oranı (SMER) belirleyici gösterge olarak kullanılır (Mujumdar, 2006; Dikmen vd., 2014).

$$SMER = \frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}}{\text{Harcanan enerji}} \left[\frac{kg\ su}{kWh} \right] \quad (3.5)$$

SMER, 1kWh enerji için uzaklaştırılan su miktarını belirtir. Yüksek SMER değeri

düşük işletme maliyetleri demektir ve başlangıçtaki yatırımı kısa sürede geri ödeyecektir (Mujumdar, 2006; Jangam vd., 2010).

SPC, özgül güç tüketimi olarak ifade edilmektedir.

$$SPC = \frac{\text{Harcanan enerji}}{\text{Üründen Uzaklaştırılan Nem Kütlesi}} = \frac{1}{SMER} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kgsu}} \right] \quad (3.6)$$

Kurutucudan birim zamanda uzaklaştırılan nem kütlesini ifade eden nem alma hızı olan (MER) şu şekilde belirlenir:

$$MER = \frac{\text{Üründen Uzaklaştırılan nem kütlesi}}{\text{Kurutma Süresi}} \left[\frac{\text{kgsu}}{\text{h}} \right] \quad (3.7)$$

Termodinamiğin birinci yasası işlemlerin değerlendirilmesinde tek başına yeterli değildir. Bu yetersizliği gidermek amacıyla ortaya konulan en etkin değerlendirme yöntemlerinden birisi de ekserji analizidir. Bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapma olanağının değerlendirilememesi gibi birinci yasada göz önüne alınmayan kavramlar termodinamiğin ikinci yasasında dikkate alınmaktadır. Ekserji analizi, termodinamik işlemlerinin analiz, dizayn ve geliştirilmesinde termodinamiğin birinci ve ikinci yasasının birlikte alındığı etkin bir araçtır (Karagüzel vd., 2011).

Ekserji, enerjinin kalite ve sınıfının bir ölçüsüdür ve ısıl bir sistemde yok edilebilir. Ekserji dengesi termal sistemlerin tasarımında kullanılır. Termodinamiğin ikinci yasa analizi kapsamında, kurutma kabine giren, çıkan ve kaybolan ekserjiler tahmin edilir. Ekserji değerleri, birinci yasa enerji dengesinden çalışma ortamının özellikleri kullanılarak hesaplanır (Prommas vd., 2010).

Açık sistem için herhangi bir sıcaklık (T), basınç (P) şartlarındaki maddenin birim kütlesi başına ekserji ifadesi (Çengel ve Boles, 2012);

$$Ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (3.8)$$

Toplam ekserji ifadesi;

$$\dot{E}_x = \dot{m}_p [(h - h_o) - T_o (s - s_o)] \quad (3.9)$$

Bir hal değişimi sırasındaki entropi değişimi;

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{içten,tr} \quad (3.10)$$

Ekserjinin giriş ve çıkış akımları, kurutma sisteminin giriş ve çıkış sıcaklıklarına bağlıdır. Bu nedenle ekserji kaybını belirlerken aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\text{Ekserji kaybı} = \text{Giren ekserji akımı} - \text{Çıkan ekserji akımı} \quad (3.11)$$

$$\sum \dot{E}_{x_{kyp}} = \sum \dot{E}_{x_g} - \sum \dot{E}_{x_ç} \quad (3.12)$$

Ekserjetik, ekserji kavramına dayalı mühendislik bilimi için kullanılan uygun bir genel terimdir. Ekserjetik verim, ürün ekserjisinin (her bölümün ekserji kaybının) kurutucunun her bir bölümüne giren ekserji akımına oranıdır. Aynı zamanda kabinden çıkan ekserji akımının giren ekserji akımına oranı olarak da açıklanabilir. Genel olarak ekserjetik verimi şu şekilde gösterebilir (Sarker vd., 2015):

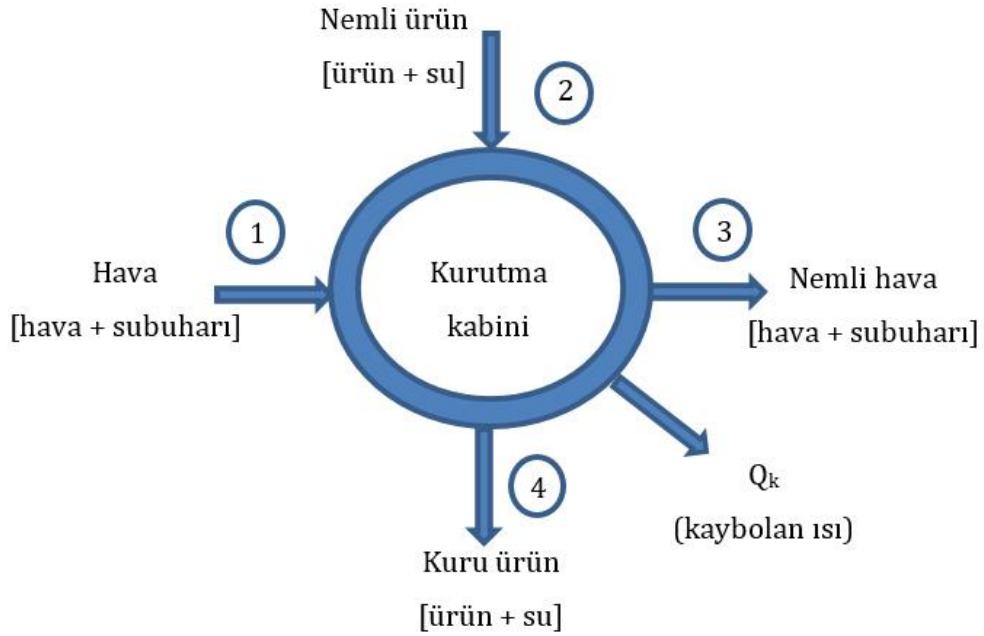
$$\text{Ekserji verimliliği} = \frac{(\text{Giren ekserji} - \text{Ekserji kaybı})}{\text{Giren ekserji}} \quad (3.13)$$

$$\eta_{Ex} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{kyp}}}{\dot{E}_{x_g}} \quad (3.14)$$

3.6. Dondurarak Kurutma Sisteminin Termodinamik Analizi

Bu bölümde şematik şekli önceki bölümde verilen sistemin termodinamik analizinde kullanılan denklemler verilecektir. Sistem kabininin giriş ve çıkış

terimleri ile üç ana etkileşimi, Şekil 3.9’da simüle edilmiştir. Kabine nemli ürün 2 noktasında girmekte ve kuru ürün ise 4 noktasından çıkmaktadır. Üründen uzaklaştırılan nemli hava ise kabini 3 noktasından terketmektedir.



Şekil 3.9. Kurutma işleminin şematik gösterimi (Dincer ve Rosen, 2012)

Şekil 3.9’da kabinin dört önemli etkileşiminin giriş ve çıkış koşulları gösterilmiştir (Dincer ve Rosen, 2012):

1. Kabine hava girişi
2. Kabine kurutulacak olan ürün girişi
3. Üründen buharlaştırılan nemli hava çıkışı
4. Kurutulmuş ürünün çıkışı

Deneysel sistem gözönüne alındığında, girdi ve çıktı enerji terimlerini eşitleyerek, tüm sistem için bir enerji dengesi yazılabilir (Dincer ve Rosen, 2012):

$$m_a h_1 + m_p (h_p)_2 + (m_w)_2 (h_w)_2 = m_a h_3 + m_p (h_p)_4 + (m_w)_4 (h_w)_4 + \dot{Q}_k \quad (3.15)$$

Mühendisler uzun zamandır enerji kullanan işlemleri değerlendirirken termodinamiğin birinci yasasını kullanmışlardır. Termodinamiğin birinci yasası, bir hal değişimi sırasında enerjinin bilançosunu tutmak için bir yöntem ortaya koyar.

Enerjinin korunumu genel olarak;

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilir. Kurutma sistemi için kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilebilir. Sisteme giren iş olarak suyun buharlaşmasını sağlamak amacıyla kullanılan ısıtıcıların kullandığı elektrik enerjisi, suyun buharlaştırılmasını hızlandırmak amacıyla kullanılan vakum pompası ve fanın harcadığı enerji vardır. Enerji korunumunu daha detaylı yazarsak;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c \left(h_c + \frac{V_c^2}{2} \right) - \sum \dot{m}_g \left(h_g + \frac{V_g^2}{2} \right) \quad (3.17)$$

olarak ifade edilebilir.

Kurutma kabine giren enerjileri fan, soğutma makinesi, elektrik su ısıtma ve sirkülasyon pompaları oluşturmaktadır.

$$W_g = W_{vakum} + W_{ısıtıcı} + W_{fan} + W_{soğutucu} \quad (3.18)$$

Sistemden çıkan ısı enerjisi çıkışı:

$$Q_c = Q_{fırın} + Q_{ürün} + Q_{yoğuşma} \quad (3.19)$$

Fırının ilk çalıştırılmasında içerideki havanın ısıtılması için gerekli ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2012):

$$Q_{fırın} = V\rho C_p (T_{yüzey} - T_o) \quad (3.20)$$

Kurutulacak nanelerden uzaklaştırılacak suyun ısıtılması:

$$Q_{ürün} = mC_p(T_{ürün} - T_o) \quad (3.21)$$

Kurutma kabine giren ve çıkan havalar nemli havadır. Bu nedenle havanın entalpisi kJ/kgkuru hava olarak şu şekilde belirlenir (Çengel ve Boles, 2012):

$$h = h_a + \omega h_v \quad (3.22)$$

$$h_a = C_p T \quad (3.23)$$

Sistemde kurutma kabinin yalıtımından kaynaklı oluşan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.

Kurutma sisteminin verimini, elde edilen enerjiyi verilen enerjiye oranlayarak bulabiliriz. Buna göre;

$$\eta_{tüm} = \frac{Q_{ç}}{W_{g,tümsistem}} \quad (3.24)$$

Sistemin ekserji analizinde donma ve kurutma aşamaları ayrı olarak incelenmiştir.

Donma Aşaması:

Donma aşaması, dondurarak kurutma için önemli bir adımdır. Dondurulmuş üründe oluşan iç yapı, kurutma dinamiklerini ve enerji tüketimini etkiler; kurutma aşamalarının davranışını karakterize eder. Bu aşamada, kabinde ve üründe meydana gelen değişiklikler şu şekildedir: (1) Donma aşamasının başlangıcındaki ürünün sıcaklığı olan T_o çevre sıcaklığının, sıvı aşamasından donma aşamasına geçen üründeki serbest suyun T_{phc} sıcaklığına düşmesi; (2) üründeki tüm serbest suyun T_{phc} sıcaklığında donması; (3) dondurulmuş ürün sıcaklığı, T_{phc} , birincil kuruma aşamasının başlangıcında donmuş ürünün sıcaklığını temsil eden T_{spds} sıcaklığına düşmesi. Donma aşaması boyunca,

bahsedilen (1)-(3) işlemlerinde meydana gelen entalpi ve entropi değişimlerinde basınç önemsizdir. Donma aşamasındaki toplam ekserji kaybı, $Ex_{kyp_{toplam}}$, belirtilen süreçlerde meydana gelen ekserji kayıplarıdır (Bruttini vd., 2007);

$$Ex_{kyp_{toplam}} = Ex_{T_o \rightarrow T_{phc}} + Ex_{T_{phc}} + Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}} \quad (3.25)$$

Eşitlikte $Ex_{T_o \rightarrow T_{phc}}$, T_o 'dan T_{phc} ' ye kadar olan sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan ekserji kaybını gösterir; $Ex_{T_{phc}}$ serbest suyun faz değişiminden kaynaklanan ekserji kaybını temsil eder, ve $Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}}$ T_{phc} 'den T_{spds} 'ye sıcaklık değişimi nedeniyle ekserji kaybını gösterir. $Ex_{T_o \rightarrow T_{phc}}$, $Ex_{T_{phc}}$ ve $Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}}$ değerleri aşağıdaki ifadelerle belirlenebilir:

$$Ex_{T_o \rightarrow T_{phc}} = T_o C_{p,donmamış} m(1 + \gamma) \left[\ln \left(\frac{T_{phc}}{T_o} \right) - \left(\frac{T_{phc} - T_o}{T_{cs}} \right) \right] \quad (3.26)$$

$$Ex_{T_{phc}} = T_a \gamma(m\gamma) \Delta H_{mw} \left[\frac{1}{T_{cs}} - \frac{1}{T_{phc}} \right] \quad (3.27)$$

$$Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}} = T_a C_{p,donmuş} m(1 + \gamma) \left[\ln \left(\frac{T_{spds}}{T_{phc}} \right) - \left(\frac{T_{spds} - T_{phc}}{T_{cs}} \right) \right] \quad (3.28)$$

Donma aşaması sırasında entalpi ve entalpideki değişiklikler, şu şekilde elde edilebilir;

$$\Delta h_{fs} = m(1 + \gamma) [C_{p,donmamış} (T_{phc} - T_o)] - \gamma(m\gamma) \Delta H_{mw} + m(1 + \gamma) [C_{p,donmuş} (T_{spds} - T_{phc})] \quad (3.29)$$

$$\Delta s_{fs} = m(1 + \gamma) \left[C_{p,donmamış} \left(\ln \frac{T_{phc}}{T_o} \right) \right] - \gamma(m\gamma) \left[\frac{\Delta H_{mw}}{T_{phc}} \right] + m(1 + \gamma) \left[C_{p,donmuş} \left(\ln \frac{T_{spds}}{T_{phc}} \right) \right] \quad (3.30)$$

burada γ parametresi, donmuş çözeltide buza dönüştürülen sıvı çözeltideki suyun fraksiyonunu temsil eder ve 0.9 olarak alınır. Donma aşaması sırasında çıkarılması gereken ısı, Q_{fs} , donma aşaması sırasında entalpi değişimine eşit olmalıdır. Ve böylece (Bruttini vd., 2007);

$$Q_{fs} = \Delta h_{fs} \quad (3.31)$$

Ekserji değişimi ΔEx_{fs} ;

$$\Delta Ex_{fs} = \Delta h_{fs} + T_o \Delta s_{fs} \quad (3.32)$$

Donma işlemindeki ekserji girişi, Ex_{fs} ;

$$Ex_{fs} = Q_{fs} \left[\frac{(T_{cs} - T_o)}{T_{cs}} \right] \quad (3.33)$$

Kurutma Aşaması:

Dondurarak kurutma sisteminin ekserji analizinde kabinin giriş ve çıkışındaki ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Bu amaçla kurutma sürecindeki ekserji değişimleri belirlenmiştir. Sistemin kurutma aşamasındaki ekserji dengesi, enerji dengesine benzer biçimde şu şekilde yazılabilir (Dincer ve Rosen, 2012):

$$m_a ex_1 + m_p (ex_p)_2 + (m_w)_2 (ex_w)_2 = m_a ex_3 + m_p (ex_p)_4 + (m_w)_4 (ex_w)_4 \quad (3.34)$$

Havanın entalpi değişimi:

$$\Delta h_a = C_{p_a} (T - T_o) \quad (3.35)$$

Özgül ısı değeri sabit kabul edilerek, hal değişimindeki entropi farkı:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \quad (3.36)$$

Kurutma havası mükemmel gaz kabul edilirse,

$$s - s_o = C_p \ln \frac{T}{T_o} - R \ln \frac{P}{P_o} \quad (3.37)$$

Basınç değişimi ihmal edilirse (Karagüzel vd., 2011);

$$Ex = mC_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] \quad (3.38)$$

Fırın içindeki havanın ilk ısıtılması (Çengel ve Boles, 2012),

$$Ex_{fırın} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ks}} \right) (V_{fırın} \rho_a) C_{p_a} (T_{ks} - T_0) \quad (3.39)$$

Ekserji verimliliği, ürünlerin ekserji içeriğine göre de tanımlanabilir:

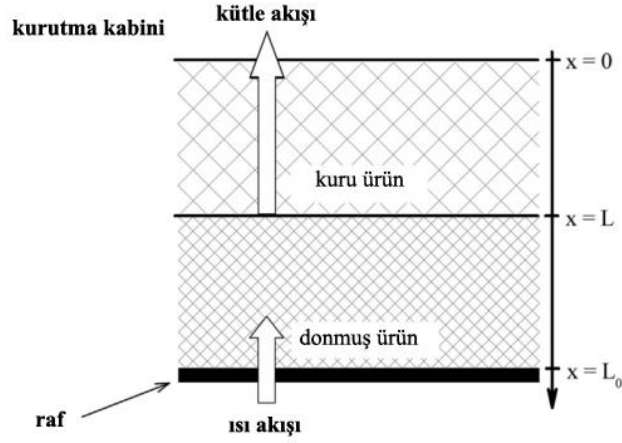
$$\eta_{ex} = \frac{m_p(ex_4 - ex_2)}{\dot{m}_a(ex_1 - ex_3)} \quad (3.40)$$

3.7. Isı ve Kütle Transferi

Momentum, kütle ve ısının moleküler transferleri birbirlerine çok benzerdir. Momentum için Newton'un moleküler yayılım eşitlikleri, ısı için Fourier eşitliği ve kütle için Fick eşitliği çok benzerdir ve bu üç moleküler transfer işlemi arasında paralellik vardır (Geankoplis, 1993).

Kurutma, eşzamanlı ısı ve kütle transfer işlemlerini içerir. Isı, kurutma havasından nane yaprakları yüzeyine konveksiyon yoluyla ve daha sonra iç kısma iletilir. Öte yandan nem, iç kısımdan yüzeye difüzyonla hareket eder, faz değişimine uğrar ve daha sonra konveksiyonla hava ortamına geçer (Agrawal ve Methekar, 2017).

Dondurarak kurutulmuş ürünün dinamiklerini yani ürünün sıcaklığının ve kalan buz miktarının gelişimini çalışma koşullarına (sıcaklık ve basınç) bağlı olarak belirleyebilmek için çalışma koşullarındaki süblimleşme arayüzünden kütle akışı ve ürüne ısı akışının ilişkisini belirlemek gerekir (Şekil 3.11) (Fissore vd., 2014).



Şekil 3.10. Birincil kurutma aşamasında sistem incelemesi
(Fissore vd., 2014)

Isı transfer katsayısının ve kütle transfer hızının belirlenmesinde iki yöntem kullanılır. Bunlardan biri deneysel veriler ile hesaplamadır. Diğer yöntem ise kütle transfer diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerine uygun olarak kullanılan analitik bağıntılar kullanımına dayanır. Çeşitli akışkanlar, farklı hızlar ve farklı geometriler kullanılarak elde edilen kütle transfer hızları için deneysel veriler, ısı ve momentum transferine benzer boyutsuz sayılar kullanılarak ilişkilendirilir.

Dondurarak kurutmadaki ısı transferini simüle etmek için ilk olarak akış türünün belirlenmesi gerekir. En önemli boyutsuz sayı olan Reynold sayısı (Re), türbülans derecesini belirtir (Geankoplis, 1993). Düz bir plakada Re sayısı $5 \cdot 10^5$ değerinin üzerinde ise akış türbülans kabul edilir (Çengel, 2011; Eriksson ve Nielsen, 2014; Incropera ve DeWitt, 2007).

$$Re = \frac{Lv\rho}{\mu} \quad (3.41)$$

Burada L , küre için çap, düz yüzeyler için uzunluktur, v , m/s olarak akışkan hızı, μ , Ns/m^2 olarak dinamik vizkozite ve ρ , kg/m^3 olarak yoğunluktur.

Laminar akışta ısı transferi için ısı ve hız sınır tabakalarının bağıl büyüklüklerini Prandtl (Pr) sayısı belirlerken, kütle transferi için derişim ve hız sınır tabaka bağıl büyüklüklerini Schmidt (Sc) boyutsuz sayısı belirler (Çengel, 2011).

Isı taşınımında hız ve ısı sınır tabakalarda momentum ve ısı yayılımının bağlı büyüklükleri olarak tanımlanan Prandtl boyutsuz sayısı;

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.42)$$

Burada k , W/mK olarak akışın ısı iletkenliği, C_p , kJ/kgK olarak ısı kapasitedir.

Prandtl sayısı $0.48 < Pr < 16700$ aralığında yer alır (Cheng vd., 2014). Gazlar için tüm durumlarda Pr sayısı yaklaşık 0.7'dir (Eriksson ve Nielsen, 2014)

Hız ve derişim sınır tabakalarında sırasıyla moleküler momentum ile kütle yayılımının bağlı büyüklüklerini gösteren ve kütle taşınımında Prandtl karşılığı olan boyutsuz sayı olan Schmidt sayısı, yayılım için kayma bileşeninin (μ/ρ), kütle transferi için yayıma (D_{eff}) oranıdır, ve fiziksel olarak hidrodinamik tabaka ve kütle transferi sınır tabakasının kalınlığı ile ilgilidir (Geankoplis, 1993).

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{eff}} \quad (3.43)$$

burada D_{eff} , m^2/s olarak etkili nem yayılım katsayısıdır.

Yüzeyde kütle taşınımının etkinliğini gösteren Sherwood (Sh) sayısı;

$$Sh = k_c \frac{L}{D_{eff}} \quad (3.44)$$

burada k_c , m/s olarak kütle taşınım katsayısıdır.

Tarımsal ürünlerde su yayılımının meydana geldiği mekanizma, kimyasal içeriklerin ve ürünlerin fiziksel yapılarının çeşitliliği nedeniyle çok karmaşıktır. Su difüzyon olayını içeren kurutma hakkındaki literatürde, sadece ürünlerin karmaşıklığı nedeniyle değil, aynı zamanda farklı tahmin yöntemlerinin, malzeme türlerinin, nem içeriğinin, kurutma işleminin ve kullanılan

metodolojinin bir fonksiyonu olarak yayılım katsayılarında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Tarımsal ürünlerin etkili difüzyon katsayısının teorik olarak hesaplanması için, Fick'in ikinci yasası olarak bilinen sıvı yayılım teorisine dayanan birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar difüzyon katsayısı ile bir çözeltinin konsantrasyon gradyanı arasında bir ilişki kurar (Botelho vd., 2011).

Nanenin kurutulmasında gerçekleşen kütle transferini tanımlayan etkili nem yayılımını belirlemek için kullanılacak formül (Walde vd., 2006);

$$\frac{M_0 - M_t}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{h^2}\right) \quad (3.45)$$

Tekrar düzenlenirse;

$$-\ln\left(\frac{\pi^2 M_0 - M}{8 M_0 - M_e}\right) = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{b^2} \quad (3.46)$$

burada t, saniye olarak kuruma zamanı; b, metre olarak ürünün yarı kalınlığını göstermektedir.

Aktivasyon enerjisi (E_a), su moleküllerinin, numunelerden geçerken enerji engelini aşmalarındaki karşılaştırma kolaylığı sağlar. Arrhenius denklemi, sıcaklık değişiminin oran sabiti üzerindeki ve dolayısıyla reaksiyonun hızı üzerindeki etkisini göstermek için kullanılabilir. Dolayısıyla sıcaklık üzerindeki etkili nem yayılımına bağlılık, bir Arrhenius tipi denklem ile tanımlanabilir (Younis vd., 2018):

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.47)$$

Burada D_o , sonsuz sıcaklıkta difüziviteye eşdeğer bir sabittir.

Her iki tarafın doğal logaritması alındığında;

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_o) - \left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.48)$$

Aktivasyon enerjisinin (E_a) değerlerini elde etmek için, $\ln(D_{eff})$ değerinin mutlak sıcaklık olan $1/T$ 'ye karşı çizilen grafiğinden elde edilen düz çizginin eğimi olan $-E_a/R$ 'ya eşittir.

Isı transferini belirlemek için en esnek yöntem, ısı transfer katsayısının Nusselt (Nu) sayısından çözümüdür. Isı transfer katsayısı genellikle farklı uygulama ve geometrilere bağlı olarak teorik bağlantılarla belirlenir. Bu bağlantıların çoğu, Nu boyutsuz sayısı ile ifade edilir. Doğal konveksiyon için Nu sayısı genellikle Grashof ve Prandtl sayılarının fonksiyonu olarak belirtilir (Eriksson ve Nielsen, 2014);

$$Nu=f(Gr,Pr) \quad (3.49)$$

Zorlanmış konveksiyonda ise en yaygın kullanılan Nu sayısı ifadesi Reynolds ve Prandtl sayılarına bağlıdır;

$$Nu=f(Re,Pr) \quad (3.50)$$

Zorlanmış konveksiyonda Nu sayısı genel ifadesi şu şekildedir:

$$Nu = cRe^mPr^n \quad (3.51)$$

burada Re , Reynold sayısı, Nu , Nusselt sayısı, Pr , Prandtl sayısıdır. c, m ve n parametreleri geometri ve akışın özelliklerine bağlıdır.

Düz levha üzerinde laminar akış için ($0.6 \leq Pr \leq 50$) (Favre-Marinet ve Tardu, 2013);

$$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.52)$$

$$Nu = \frac{k_h L}{k} = \frac{q_{\text{taşınım}}}{q_{\text{iletim}}} \quad (3.53)$$

burada k_h , ısı taşınım katsayısıdır.

Teorik olarak laminar akışta deneysel kütle transfer hızına ihtiyaç yoktur, çünkü bu hız, momentum transferi ve yayılım eşitlikleri ile çözülebilir. Bununla birlikte çoğu gerçek durumdaki geometriler için laminar akışta matematiksel olarak tanımlama yapmak zordur. Bu sebeple kütle transfer hızı genellikle deneysel olarak elde edilir. Laminar akışta molekül yayılımı ile kütle transferinde kullanılan eşitlikler, laminar akışta iletim ile olan ısı transferine benzerdir. Sınır tabakasındaki serbest akışta bir plakadan geçerek akan akış için kütle transfer hızı şu şekilde hesaplanabilir (Geankoplis, 1993);

$$Sh = f(Re, Sc) \quad (3.54)$$

$$\frac{k_c L}{D_{eff}} = Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (3.55)$$

burada Re , Reynold sayısı, Sh , Sherwood sayısı, Sc , Schmidt sayısı, D_{eff} , yayılım katsayısı, k_c , kütle transfer hızıdır.

3.8. Matematiksel Modelleme

Kurutma, eşzamanlı bir kütle ve ısı kütle aktarma işlemini içeren kompleks bir olaydır. Bu nedenle, kurutma koşullarının bir fonksiyonu olarak işlem sırasında ortaya çıkan su transferinin kinetik simülasyonları için matematiksel denklemlerin kullanılması, tasarımı kontrol etmek için faydalıdır. Kurutulmuş ürünler ayrıca bir besin kaybına maruz kalmaktadır ve kurutma süresi boyunca sürekli değişen koşullar, işlem süresinin ve başarılı bir kurutma işlemi elde etmek için uygun çalışma değerinin tanımlanmasını zorlaştırmaktadır. Kısacası, ürün bileşiklerinde kayıpların en aza indirilmesi gerekir. Böylece, modelleme bir zorunluluk haline gelir (Saavedra vd., 2017).

Nanenin kurutma özelliklerini araştırmak için, kurutma davranışını doğru bir şekilde modellemek önemlidir (Dhanushkodi vd., 2017). En iyi kurutma modelini seçmek için, literatürdeki dört ince tabaka kurutma modeli deneysel nem oranı verileriyle karşılaştırılmıştır. Yaygın olarak kullanılan dört ince tabaka modelindeki literatür denklemleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. İnce tabaka kurutma model eşitlikleri

Model			
no	İsim	Eşitlik	Ref.
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Liu ve Bakker-Arkema (1997)
2	Wang and Singh	$MR=1+at + bt^2$	Wang ve Singh (1978)
3	Logarithmic	$MR= a*\exp(-kt) + c$	Toğrul ve Pehlivan (2002)
4	Tow term exponential	$MR= a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Younis vd. (2018)

Modellerin uygunluğu kök ortalama kare hatası (RMSE), çoklu korelasyon katsayısının karesi (R^2) ve azaltılmış ki-kare (X^2) ile nitelendirilir. Bu parametreler şu şekilde hesaplanabilir (Mitra vd., 2011; Avhad ve Marchetti, 2016; Jiang vd., 2017) :

$$R^2 = \frac{SSTotal - SSEerror}{SSTotal} \quad (3.56)$$

$$SSTotal = \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{avg})^2 \quad (3.57)$$

$$SSEerror = \sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2 \quad (3.58)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N}} \quad (3.59)$$

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{n-z} \quad (3.60)$$

burada MR_{exp} deneysel nem oranı ise, MR_{pred} öngörülen nem oranıdır, MR_{avg} nem oranının ortalama değeridir, n gözlem sayısıdır ve z modeldeki sabitlerin sayısıdır.

3.9. Hata Analizi

Deneysellerdeki hatalar ve belirsizlikler, cihaz seçimi, koşul, kalibrasyon, çevre, gözlem ve okuma ve test planlamasından kaynaklanabilir (Akpınar, 2006). Nananin dondurarak kurutulmasında kurutma kabine giren ve çıkan havanın ve ürünün sıcaklıkları, bağıl nem, ağırlık kayıpları ve harcanan elektrik enerjisi uygun cihazlarla ölçülmüştür.

Deneysel sonuçların hata analizi, Kline-McClintock tarafından geliştirilen hata belirsizlik analizi ile yapılmıştır. Bu yöntemde göre n adet bağımsız değişkeni olan bir ölçümde, ölçülecek boyut R_b , ölçümü etkileyen bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, değişkenlerle ilgili hata oranı $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ ise toplam hata oranı W_R (Kavak Akpınar, 2005; Dikmen vd., 2012);

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R_b}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R_b}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R_b}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.61)$$

Giren ve çıkan havanın enerjileri ayrı ayrı şu şekilde belirlenir:

$$Q = \sum mh = mTC_p + \omega h \quad (3.62)$$

Giren havanın kütlesi ve sıcaklığı ölçülmüştür. Giren ve çıkan havanın enerjisi için hata analizi şu şekilde hesaplanır:

$$W_Q = \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial m} W_{ha} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T} W_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.63)$$

Hata oranları;

W_{ha} =giren havanın ağırlığı (debi x yoğunluk x zaman)

W_T =sıcaklık sensörü

Kurutma sistemine giren iş, kompresör ve vakum pompasının kullandığı elektrik enerjisidir. Giren iş enerjisi için hata analizi şu şekilde hesaplanır:

$$W_W = \left[\left(\frac{\partial W_g}{\partial W_{komp}} W_e \right)^2 + \left(\frac{\partial W_g}{\partial W_{isitici}} W_e \right)^2 + \left(\frac{\partial W_g}{\partial W_{vakum}} W_e \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.64)$$

Hata oranları;

We=Elektrik güç metre (elektrik sayacı)

Çıkan ısı enerjisi olarak fırının içindeki havanın ilk ısıtılması enerjisi için hata analizi şu şekilde hesaplanır:

$$W_{Q_{firin}} = \left[\left(\frac{\partial Q_{firin}}{\partial \Delta T_{firin}} W_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.65)$$

Hata oranları;

W_T=sıcaklık sensörü

Çıkan ısı enerjisi olarak nane ve içindeki suyun ısıtılması enerjisi için hata analizi şu şekilde hesaplanır:

$$W_{Q_{ürün}} = \left[\left(\frac{\partial Q_{ürün}}{\partial MR_{ürün}} W_{m_k} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{ürün}}{\partial m_{yaşürün}} W_{m_k} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{ürün}}{\partial T_{ürün}} W_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.66)$$

Hata oranları;

W_T=sıcaklık sensörü

W_{m_k}=nem sensörü

Çıkan ısı enerjisi olarak vakum pompasından buharlaşacak suyun ısıtılması enerjisi için hata analizi şu şekilde hesaplanır:

$$W_{Q_{vakum}} = \left[\left(\frac{\partial Q_{vakum}}{\partial m} W_{m_k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.67)$$

Hata oranları;

W_{m_k} =nem sensörü

Sistemde kullanılan cihazların hata oranları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Cihazların hata oranları

Sensörler	Birim	Hata
Nem sensörü (W_{m_k})	%	± 0.05
Elektrik güç metre (W_e)	kJ	± 12.0
Sıcaklık sensörü (W_t)	°C	± 0.5

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Gıda kurutma endüstrisinde genellikle kullanılan yöntem, sıcak havayla kurutma yöntemidir. Bu yöntemle gıda ürünleri kurutulduğunda istenilen kalitede kurutulmuş ürün elde edilemez. Hedef kalitedeki kuru ürüne ulaşmak için gıda/zirai ürünlerde düşük sıcaklıkta, yoğunlaştırma ve ısı pompalı kurutucular yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip kurutucularda yatırım ve işletme maliyetleri yüksek olmasına rağmen ürün üzerine ılık kurutma havası uygulandığından yüksek sıcaklığa duyarlı besin içeriğine sahip ürünlerde ürün kalitesi artmaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak son yıllarda endüstriye aktarılmasına yönelik olarak çalışmaların yoğunlaştığı yöntem “dondurarak kurutma tekniği”dir. Bu çalışmada dondurarak kurutma sisteminin en büyük dezavantajı olan yatırım ve işletme maliyetlerini minimuma indirebilmek için sistem detaylı olarak incelenmektedir. Bu amaçla mevsimsel olarak uygun olan nane yaprakları farklı sıcaklık ve basınçlarda dondurarak kurutulmuştur.

4.1. Kurutma Davranışları

Ürünlerin kurutma kinetikleri, kurutucuların dizaynı ve simülasyonu için çok önemli verilerdir. Bu bölümde nanenin farklı basınç ve sıcaklıklarda dondurarak kurutulmasındaki kurutma davranışları incelenmiştir.

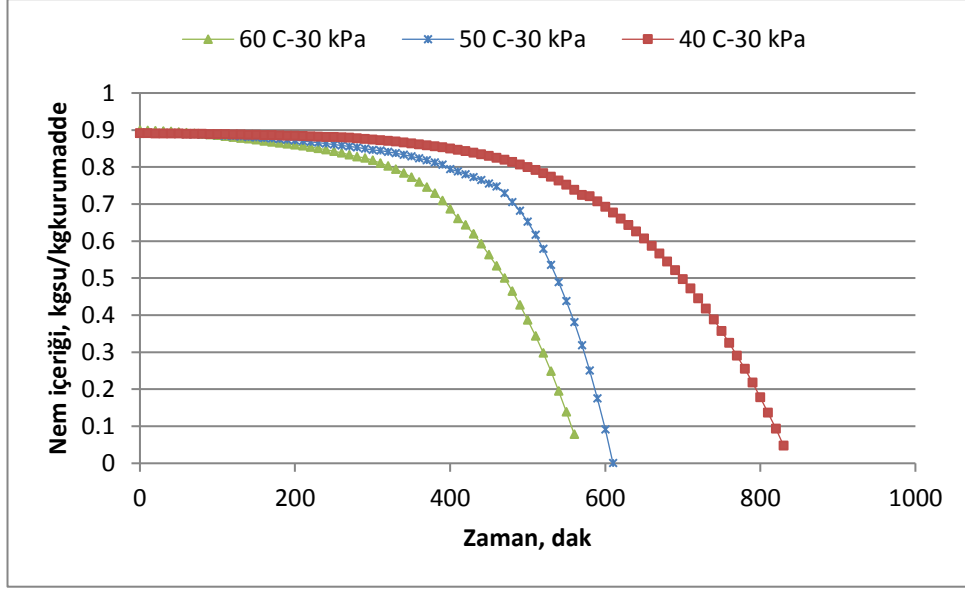
Nanenin dondurarak kurutulmasında, numuneler önce -15°C donma sıcaklığında dondurulmuştur. Ürünlerin katılaşmasından sonra kurutma kabini, 30, 50 ve 80 kPa basınçlarda çalıştırılmıştır. Süblimasyon enerjisi sağlamak için 40, 50 ve 60°C olmak üzere üç farklı kabin sıcaklığında deneme yapılmıştır. Bu şekilde buzun süblimasyonu ile suyun uzaklaştırıldığı birincil kurutma aşaması tamamlanmıştır. Genel olarak yüksek ürün sıcaklıklarında nanelerin kurutma süreleri kısalmıştır, fakat kuru numuneler incelendiğinde 60°C kurutma sıcaklığında fiziksel deformasyona uğradıkları belirlenmiştir. Bu nedenle nanelerin vakumlu dondurarak kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı için maksimum kritik sıcaklık 50°C olarak belirlenmiştir.

Birincil kurutma aşamasında nanelerden uzaklaştırılmayan dondurarak yoğunlaştırılmış su, desorpsiyonla ikincil kurutma aşamasında uzaklaştırılmıştır. Bunu sağlamak için vakumlu kabindeki raf sıcaklığı kademeli olarak yükseltilmiştir. Son ürünlerdeki nem içeriği yaklaşık %10 oluncaya kadar işlem devam etmiştir. Denemelerde ölçülen değerler kaydedilmiştir. Nanelerin kurutulmasında birincil periyodun kuruma süreleri daha uzunken, ikincil periyodun kurutma süreleri daha kısa olmuştur. Farklı sıcaklık ve basınçlarda kurutmada elde edilen nem içerikleri ve kurutma süreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Nanelerin dondurarak kuruma karakteristikleri

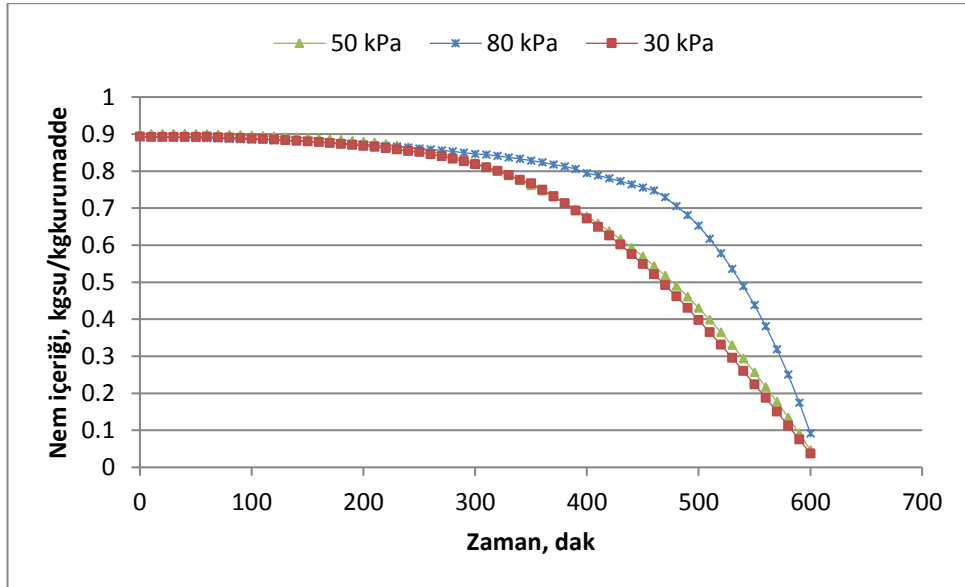
Kabin basıncı (kPa)	Kabin sıcaklığı (°C)	Vakum basıncı (kPa)	Nem içeriği, %d.b.		Kuruma süresi (dak)		
			Başlangıç	Son	Birincil	İkincil	Toplam
30	40	20-40	89.08	15.80	540	120	660
	50	20-40	89.24	8.02	420	150	570
	60	20-40	90.00	7.83	450	90	540
50	40	20-40	89.92	22.76	450	330	780
	50	20-40	89.26	7.49	420	270	690
	60	20-40	89.25	2.76	540	90	630
80	40	20-40	89.10	17.11	600	240	840
	50	20-40	90.10	8.02	720	40	760
	60	20-40	89.91	5.36	540	120	660

Nanelerin farklı basınç ve sıcaklıklardaki kuruma eğrileri incelendiğinde, ürünlerdeki nem içeriğinin doğrusal olmayan biçimde zamanla azaldığı görülmektedir. Kuruma eğrilerindeki çizimlerin doğrusallığındaki görülen bu sapma, başlangıçtaki nem içeriğinin düzgün bir şekilde dağılmaması, kurutma sırasındaki ürün sıcaklığının değişmesi, nem içeriğindeki nem difüzyonundaki değişiklik ve ürünün büzülmesi gibi çeşitli nedenlerden dolayı olabilir. Nanelerden nemin uzaklaştırılması kuruma süresi uzadıkça zorlaşmaktadır. Benzer sonuçlar Jafar ve Farid (2003) çalışmalarında da belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Nanenin 30 kPa basınçta farklı sıcaklıklarda kuruma eğrileri

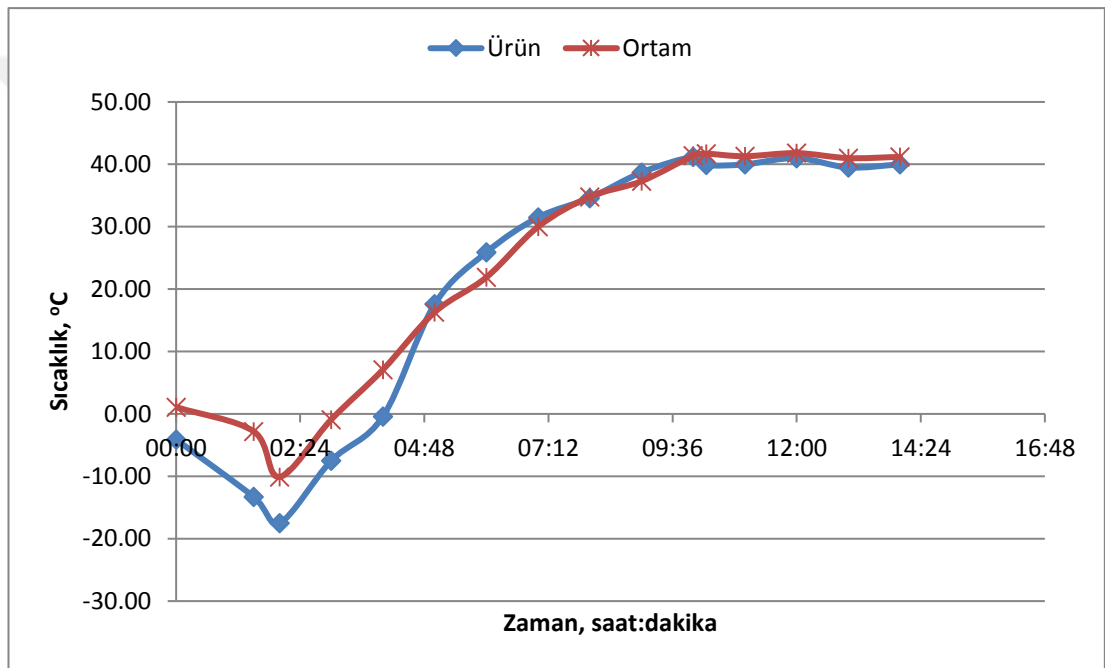
Şekil 4.1’de 30 kPa kabin basınında 40, 50 ve 60°C kurutma sıcaklığında zamanla nem içeriğinin değişimi görülmektedir. Sabit basınçta sıcaklıktaki artış kurumanın ilk başlarında çok büyük farklılıklar oluşturmasa da ilerleyen kuruma sürelerinde sıcaklıkla pozitif yönlü etkisi görülmektedir. Sabit basınçta 20°C’lik kurutma sıcaklığındaki artış, kuruma süresini yaklaşık %18 kısaltmıştır.



Şekil 4.2. Nanenin 50°C sıcaklıktaki farklı basınçlarda kuruma eğrileri

Şekil 4.2’de kurutma sıcaklığı 50°C’de sabit tutulmuş, kabin basıncı 30, 50 ve 80 kPa olarak ayarlanması sonucu elde edilen kuruma eğrileri görülmektedir. Beklendiği gibi basınçtaki artışla kuruma süresi azalmıştır. Kabin basıncındaki 50 kPa’lık düşüş kuruma süresinde %25’lik artışa neden olmuştur.

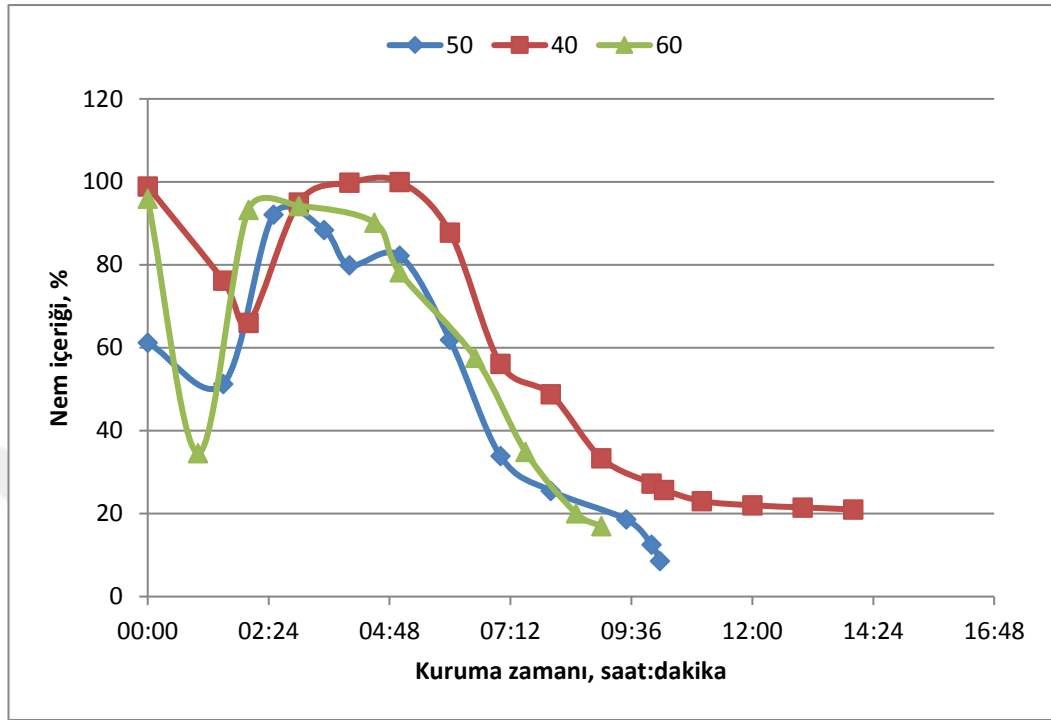
Belirlenen basınç ve sıcaklıklarda nane yapraklarının dondurarak kurutulmasında fiziksel deformasyona sebep olmayan ve enerji gereksinimini minimum tutan kurutma şartları 30 kPa kabin basıncı ve 50°C kurutma sıcaklığı olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Nananın dondurarak kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı ve 50°C kurutma sıcaklığında ölçülen ürün ve ortam sıcaklık eğrileri

Kurutma süresince numunelerin sıcaklıkları ile kabin içindeki ortam sıcaklığı Şekil 4.3’te karşılaştırılmıştır. Ortam sıcaklığının kurutulmuş materyalin sıcaklığından genel olarak 1.5–4°C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu kontrol edilebilen faktörler, materyalin kendinden çok onu çevreleyen dış karakteristik kurutma şartlarıdır. Aynı koşullar altında kurutmada kullanılan daha düşük sıcaklık, daha iyi kalitede ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Sıcaklıktaki bir artış, bazı kimyasal reaksiyonların hızının ve orijinal bileşim ve özelliklerinin

değişimini arttırmaktadır. Benzer sonuçlar Hui (2006) çalışmasında da bulunmuştur.



Şekil 4.4. Nanenin 30 kPa basınçta farklı sıcaklıklarda kurutulmasında ortam neminin değişimi

30 kPa basınçta kurutma kabinin iç ortamındaki havanın yüzde olarak nem içeriğinin kurutma sürecindeki değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafiğin ilk kısmında donma aşamasında ortam sıcaklığının zamanla azalması sonucu ortam nemi azalmış sonra artmıştır. Yaklaşık 3 saat sonunda kurutma aşamasına geçildiğinde kuruma süresi arttıkça, ortam sıcaklığı artışı ile ortam nemi azalmaya devam etmiştir.

4.2. Matematiksel Modelleme

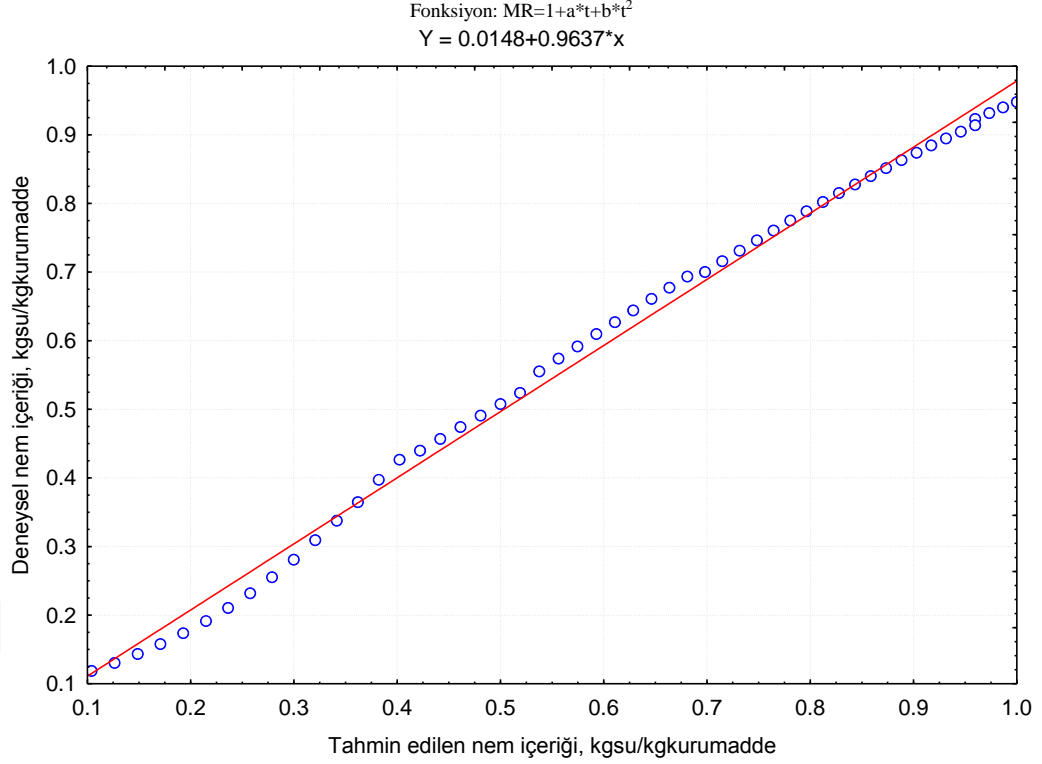
Bu bölümde farklı sıcaklık ve basınç koşullarında yapılan dokuz denemeden en ideal olan 50°C kurutma sıcaklığı ve 30 kPa vakum basıncı için elde edilen kurutma değerleri üzerine matematiksel modelleme yapılmıştır.

Bu amaçla ince tabaka kurutma modelleri için literatürde yaygın olarak kullanılan Newton, Wang and Singh, Two term exponential ve Logaritmik modeller kullanılmıştır. Deneme sonuçlarına uygulanan yarı teorik matematiksel modellerin istatistiksel sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Nananin ampirik sabitleri ve istatistiksel sonuçları
(T = 50°C, P=30 kPa)

Model	Constant	R²	RMSE	X²
Newton	k= 0.00248	0.86474	0.08572	0.00171
Wang and Singh	a=-0.00132 b= -9.41096	0.99687	0.02185	0.00044
Tow term exponential	k= 1.56199 a= 0.00158	0.86259	0.08596	0.00175
Logarithmic	a= 19.18078 k= 0.00009 c= -18.16456	0.99523	0.03596	0.00074

Sonuçlar genel olarak tüm modellerin öngördüğü tahminlerin nane numunelerinin deneysel verileriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. En yüksek belirleme katsayısına (R²) ve en düşük kök ortalama kare hatasına (RMSE) sahip olan Wang and Singh ince tabaka kurutma modelinin sabitleri ve katsayıları, diğer modellere göre daha iyi uyum sağlamıştır (R² = 0.99687, RMSE = 0.02185, X² = 0.00044). Şekil 4.5’te görüldüğü gibi bu model ile tahmin edilen değerler ile gözlemlenen değerler 45°’lik bir eğim açısına sahiptir.

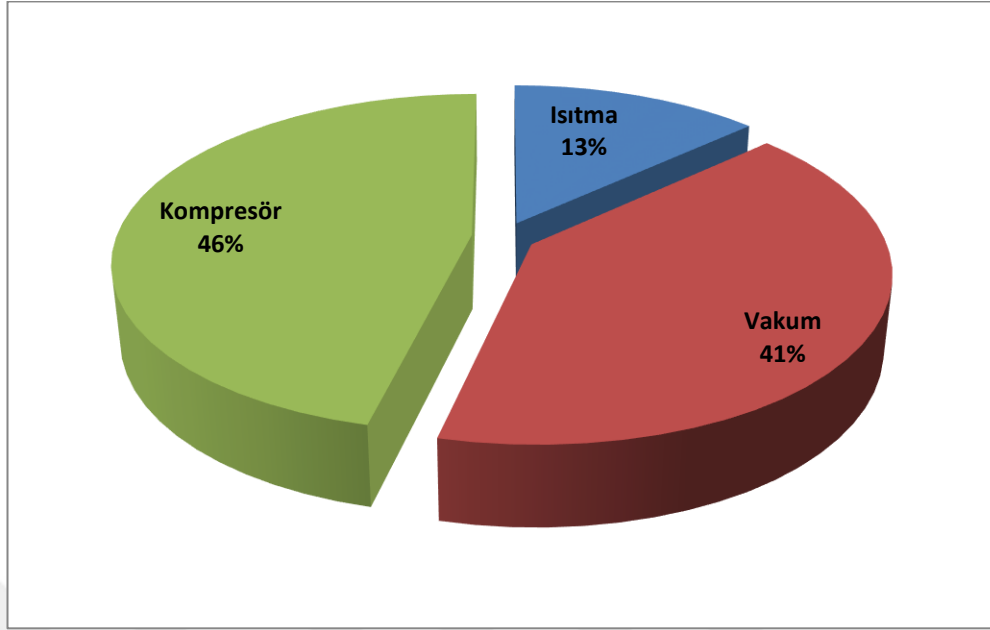


Şekil 4.5. Wang and Singh model için nanenin deneysel ve tahminlenen nem oranlarının karşılaştırılması

4.3. Termodinamik Analiz

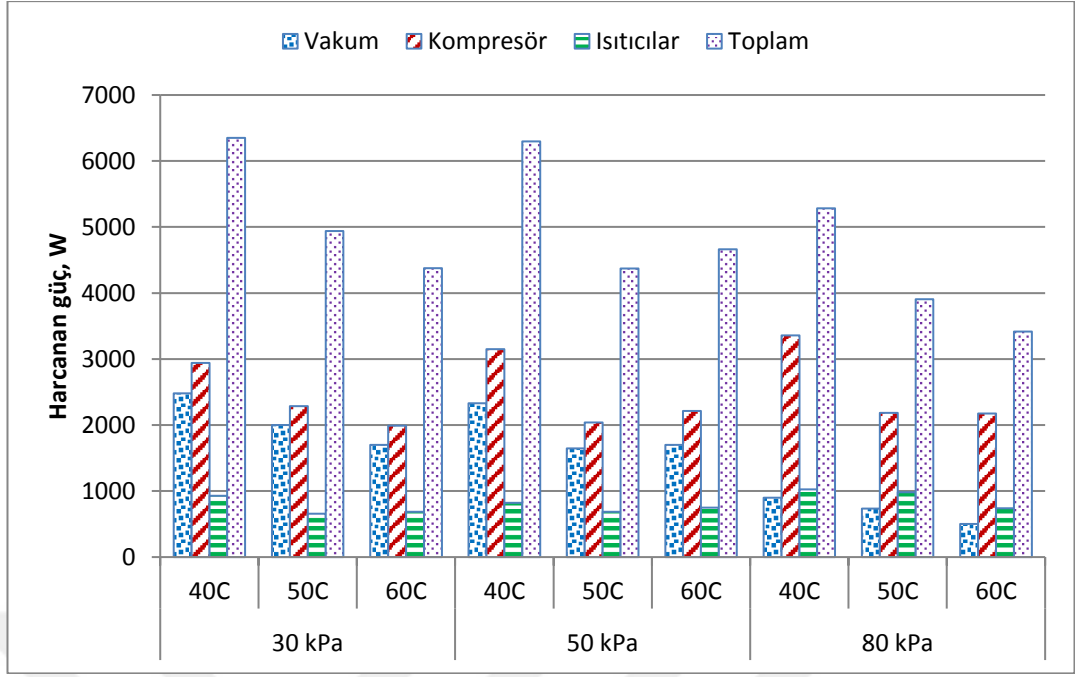
Bu bölümde nanenin dondurarak kurutulması işleminin aşamalarını ayrıntılı olarak elde edebilmek, verimsizlik kaynaklarını belirlemek, enerji tüketiminin kalitesini ayırt etmek, optimum kurutma koşullarını belirleyebilmek ve kurutma sisteminin çevre etkilerini azaltmak amacıyla dondurarak kurutma sisteminin farklı sıcaklık ve basınçlarda enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Kurutucu için sürekli akış kabulü yapılmış ve sistemin enerji ve ekserji değişimi ilgili denklemler kullanılmıştır. Bu çalışma için yapılan hesaplamalarda kullanılan naneler %89 başlangıç nem içeriğine sahiptir ve 100 gr'lık numuneler halinde tepsilere yerleştirilmiştir.

Dondurarak kurutma işleminde sistemden ölçülen enerji tüketim değerleri yüzdeleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Dondurarak kurutmada en fazla enerji tüketimi kompresör ve vakumda meydana gelmektedir. Isıtmada harcanan enerji çok daha azdır.



Şekil 4.6. Dondurarak kurutma sisteminin enerji tüketimleri

Deneysel olarak imal edilen vakumlu dondurarak kurutma sisteminde enerji tüketimlerini daha detaylı incelemek için her bir sıcaklık ve basınçta kompresörde, ısıtıcılarda ve vakum pompasında ölçülen enerji tüketimlerinin dağılımı Şekil 4.7’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde en fazla tüketimin donma aşamasında kompresörde gerçekleştiği görülmektedir. Daha sonrasında ise enerji tüketimini vakum pompası ve ısıtıcılar izlemektedir. Genel olarak daha yüksek sıcaklıklarda kurutma yapıldığında vakum pompasının, kompresörün ve ısıtıcıların tükettikleri enerji azalmıştır. Kabin basıncının yükselmesiyle vakumda harcanan güç azalmıştır. Toplam tüketilen enerji basıncın ve sıcaklığın artmasıyla azalmıştır.



Şekil 4.7. Dondurarak kurutma sisteminde sıcaklık ve basınca bağlı enerji tüketimleri

Dondurarak kurutma sisteminin genel performansı çeşitli kriterler ile karakterize edilebilir. Bunların arasında, performans katsayısı (COP) ve spesifik nem çekme oranı (SMER) önemli kriterlerdir. Sistemin donma aşamasında COP değeri Engineering Equation Solver (EES) programı yardımıyla belirlenmiştir (Çizelge 4.3). SMER, MER ve SPC değerlerinin hesaplanması daha önceki bölümlerde belirtilen eşitlikler yardımıyla bulunmuştur. Hesaplamalar için sistemin 40-60°C aralığındaki kurutma sıcaklıkları için ortalama kurutma süresi olarak 700 dakika olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.3. Dondurarak kurutma sisteminin performansı

	COP	SMER, kgsu/kWh	MER, kgsu/h	SPC, kWh/kgsu	Ortalama kurutma süresi, dak	Kurutma sıcaklığı (°C)
Nane	4.8	0.018	0.0077	53.88	600-800	40-60

Dondurarak kurutma sisteminin $COP_{soğutma}$ değeri 4.8 olarak belirlenmiştir. Özgül nem çekme oranı ise 0.018 olarak belirlenmiştir.

Sistemi daha detaylı inceleyebilmek için dondurarak kurutma sisteminin ekserji analizi yapılmıştır. Nananin dondurarak kurutulmasındaki ekserji analizi donma ve kurutma kısımları olarak ayrı ayrı incelenmiştir.

Kurutmadaki donma aşamasında ekserji kayıplarını azaltmanın en etkili yollarından biri, sistemin malzeme özellikleri gözönüne alınarak, bir soğutma kaynağının optimum bir sıcaklığa ayarlanmasıdır. Bu optimum sıcaklığın ayarlanması için ekserji analizine ihtiyaç vardır.

Sistemin donma aşamasındaki ekserji analizinin belirlenmesinde %95 su içeriği için özgül ısı değerleri ASHRAE standartlarında sırasıyla donma noktası üstü için 4.02 kJ/kgK, donma noktası altı için 2.04 kJ/kgK, füzyon gizli ısısı 317 kJ/kg, donma noktası ise -0.2°C olarak belirtilmiştir (Çengel ve Boles, 2012). T_o değeri 30°C olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı sıcaklık ve basınçlarda donma aşamasında ekserji analizi

P, kPa	$T_{kurutma}$, °C	$Ex_{T_o \rightarrow T_{phc}}$	$Ex_{T_{phc}}$	$Ex_{T_{phc} \rightarrow T_{spds}}$	Toplam ekserji kaybı
	40	3.222	0.110	-1.029	2.302
30	50	3.310	0.076	-0.819	2.566
	60	3.285	0.087	-1.394	1.978
50	40	3.272	0.092	-0.922	2.442
	50	3.151	0.131	-0.662	2.619
	60	3.251	0.100	-1.343	2.008
80	40	3.302	0.079	-1.359	2.023
	50	3.064	0.152	-0.334	2.882
	60	3.313	0.074	-0.737	2.651

Çizelge 4.4'te, farklı sıcaklık ve basınçta yapılan denemelerin ekserji kayıpları, ekserji girişi ve verim değerleri, donma ve kurutma aşamaları için sunulmuştur. Donma aşamasında ekserji değerlerini en fazla etkileyen değer, T_o 'dan T_{phc} sıcaklığına kadar olan işlemde meydana gelmektedir.

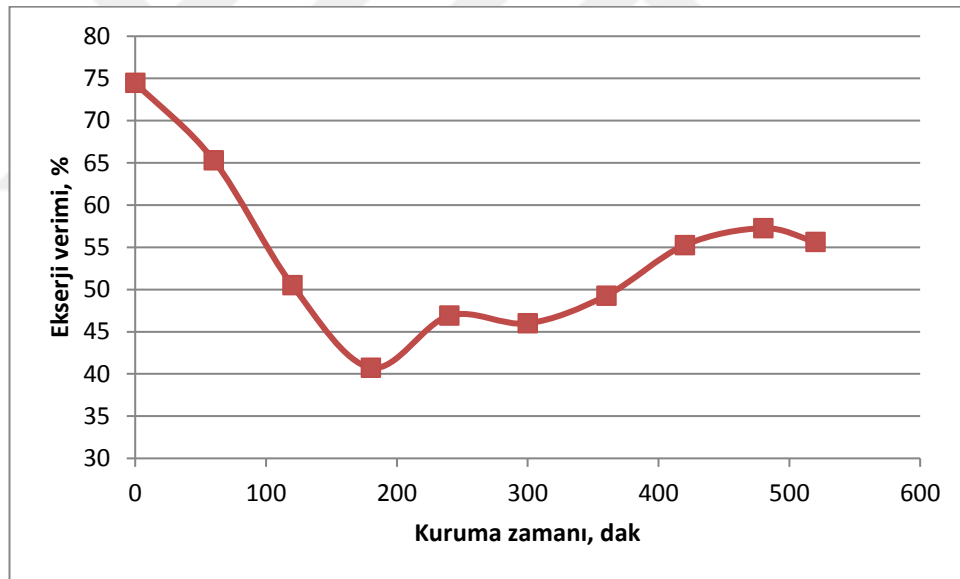
Çizelge 4.5. Farklı sıcaklık basınçlarda kurutulan nane için ortalama giren ekserji, kayıp ekserji ve ekserji verimi değerleri

Basınç (kPa)	Sıcaklık (°C)		Donma	Kurutma	Toplam
30	40	Ex_g (kJ)	7.526024	0.374266	7.900290
		Ex_{kyp} (kJ)	2.302098	0.176199	2.478297
		η (%)	0.694115	0.530648	0.686303
	50	Ex_g (kJ)	8.392163	0.598579	8.990742
		Ex_{kyp} (kJ)	2.566095	0.262907	2.829002
		η (%)	0.694227	0.578231	0.685343
	60	Ex_g (kJ)	7.511983	0.860967	8.372950
		Ex_{kyp} (kJ)	1.977579	0.397313	2.874892
		η (%)	0.736743	0.520444	0.656361
50	40	Ex_g (kJ)	7.975277	0.385047	8.360324
		Ex_{kyp} (kJ)	2.442209	0.162686	2.604895
		η (%)	0.693778	0.549759	0.688422
	50	Ex_g (kJ)	7.620465	0.449955	8.070420
		Ex_{kyp} (kJ)	2.619448	0.22184	2.841288
		η (%)	0.656261	0.458718	0.647938
	60	Ex_g (kJ)	7.346626	0.535457	7.882083
		Ex_{kyp} (kJ)	2.008476	0.26362	2.282096
		η (%)	0.726612	0.489494	0.710739
80	40	Ex_g (kJ)	7.681646	0.345056	8.026702
		Ex_{kyp} (kJ)	2.022856	0.163477	2.686333
		η (%)	0.736664	0.505861	0.667618

Çizelge 4.5-devamı

50	E_{Xg} (kJ)	7.712066	0.487737	8.199803
	E_{Xkyp} (kJ)	2.881757	0.222267	3.104024
	η (%)	0.626331	0.505212	0.621451
60	E_{Xg} (kJ)	8.536607	0.858158	9.394765
	E_{Xkyp} (kJ)	2.650638	0.388246	3.138884
	η (%)	0.689497	0.549235	0.666534

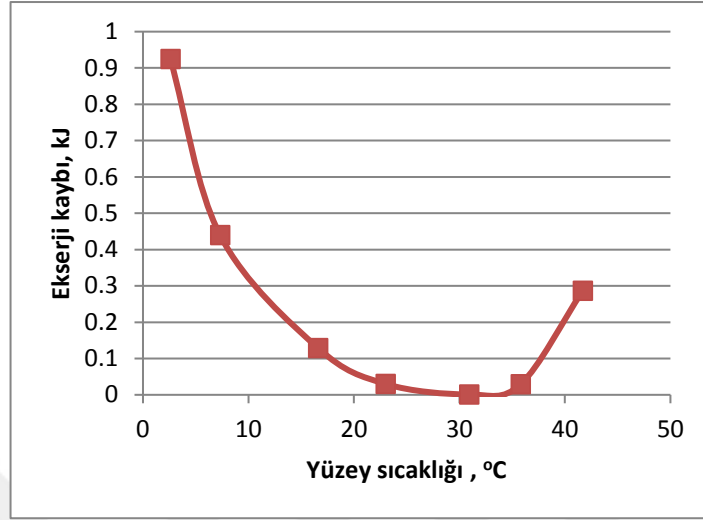
Ekserji analizi, enerji kullanımındaki etkinliği açıklamak için etkili olabilir. Nananin dondurarak kurutma işlemi için eksantrik kayıpları, düşük kabin basıncı değerleri ve yüksek ısıtma sıcaklığı değerleri göz önüne alındığında en aza indirgenir: 30 kPa ve 50°C, basit bir çevrim istendiğinde (en yakın) optimum çalışma koşullarıdır (Çizelge 4.5).



Şekil 4.8. Nane için kurutma kabinindeki kuruma zamanının bir fonksiyonu olarak ekserji verimindeki değişimi

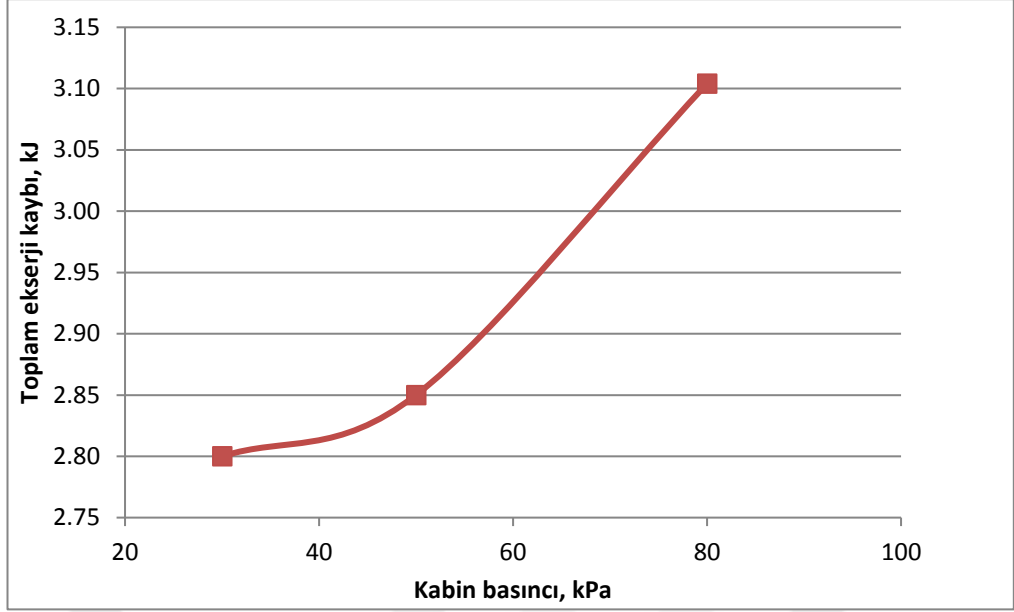
Kurutma süresine göre ekserji veriminin değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Kurutma işleminin başlangıcında, ekserji verimi, ekserji kaybına bağlı olarak azalmıştır. Bu nedenle, kurutma işleminin başlangıcında düşük olan ekserji verimliliği, kurutma işlemi devam ettikçe artmıştır. Kurutma kabininde enerji

kullanımı nanenin nem içeriği azaldıkça azalmış ve ekserji verimliliği artmıştır. Benzer sonuçlar Ceylan (2009) çalışmasında da bulunmuştur.



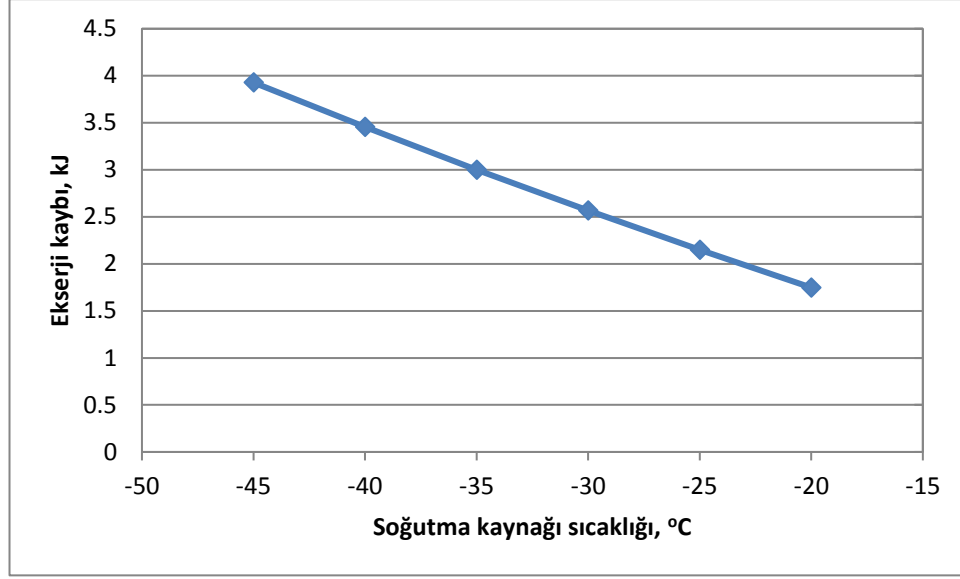
Şekil 4.9. Kurutma döngüsü boyunca 30 kPa ve 50°C kurutma sıcaklığında kabin yüzey sıcaklığı ile ekserji kaybının karşılaştırılması

Şekil 4.9, sistemin toplam ekserji kayıpları ile kabin yüzey sıcaklığı arasındaki korelasyonu göstermektedir. Isıtma sıcaklığı 0-50°C arasında değiştirilmiştir. 50°C kurutma sıcaklığı, nane için kavrulma sıcaklığını aşmıştır. Yüzey sıcaklığı 30°C'nin altında olduğunda kurutma sırasında toplam ekserji kayıplarını hafifçe azaltır. Bununla birlikte, sıcaklığın daha da arttırılması, toplam ekserji kaybını önemli ölçüde arttırmıştır. Bu sistemin çalışmasında 30°C olan toplam ekserji kayıplarını minimum yapan yüzey sıcaklığı, kurutulan malzemenin özelliklerine ve kurutucunun çalışma parametrelerine bağlıdır. Benzer sonuçlar Liu vd. (2008) çalışmasında da elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Kurutma çevrimi süresince kabin basıncı ile toplam ekserji kaybının değişimi, 50°C kurutma sıcaklığı için

Kabin basıncı, malzemenin kurutulmuş katmanındaki hem ısı transferini hem de kütle transferini etkiler. Kurutulmuş tabakadaki kabin transfer basıncının arttırılmasının bir sonucu olarak meydana gelen ısı transferi artışı, sıcaklık derecesinin düşmesine neden olmaktadır. Böylece ekserji kayıpları azalır. Diğer taraftan, kabin basıncındaki artış, basınç gradyanında bir artışa neden olur. Bu şekilde kütle transferinden kaynaklanan ekserji kayıpları artar. Sonuç olarak, 30 kPa ile 80 kPa arasında değişen kabin basıncında, toplam ekserji kayıpları, Şekil 4.10'da de gösterildiği gibi kabin basıncı arttıkça artar. Benzer sonuçlar Liu vd. (2008) çalışmasında da elde edilmiştir.



Şekil 4.11. 30 kPa ve 50°C için soğutma kaynağı sıcaklığına bağlı olarak donma ekserji kaybı değişimi

Kurutmada donma aşamasında enerji tasarrufu sağlamak için soğutma kaynağı sıcaklığı (T_{cs}) değeri etkili parametrelerden biridir. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi soğutma kaynağı sıcaklığı ile ekserji kaybı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Donma aşamasındaki ekserji kayıpları hem malzemedeki sıcaklık değişimine hem de donma süresine bağlıdır. Soğutma kaynağının sıcaklığının düşmesi, malzeme içindeki sıcaklık gradyanında bir artışa ve donma süresinde kısalmaya yol açar. Bu şekilde ısı transferi artar. Bu nedenle, ekserji kayıpları, soğutma kaynağının sıcaklığının azalmasıyla artar. Benzer sonuçlar Bruttini vd. (2007) ve Liu vd. (2008) çalışmalarında da elde edilmiştir.

Ekserji analizi sistemdeki tersinmezlikleri azaltır ve böylece sistemin ekserji verimini artırır (Dincer ve Rosen, 2012). Ekserji veriminin artması, birçok alandaki enerji ihtiyacını azaltacaktır. Yüksek sıcaklıkta kurutma, vakumla kuruma süresinin kısalmasını sağlarken, ürünlerdeki fiziksel ve kimyasal yapının bozulmasını arttırmaktadır. Enerji ve ekserji analizinin yanında kurutma sonrası alınan ürünün renk ve ürün görşelliği de değerlendirildiğinde nanenin dondurarak kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı ve 50°C kurutma sıcaklığı önerilmektedir.

4.4. Isı ve Kütle Transferi

4.4.1. Etkili nem yayılımı ve aktivasyon enerjisi

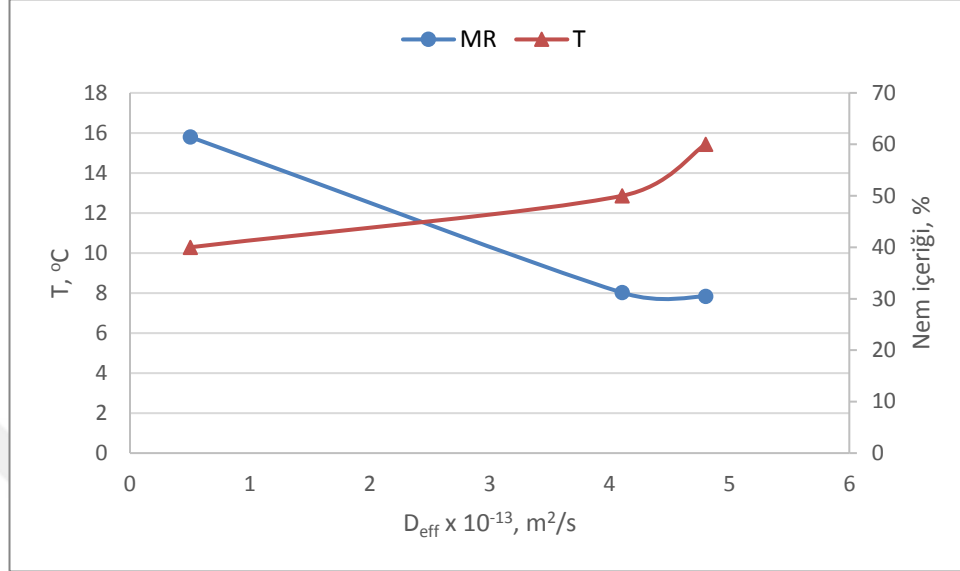
Nane yapraklarının dondurarak kurutulması boyunca numunelerin farklı sıcaklıklardaki aritmetik ortalaması, ortalama etkili nem difüzyon hızının hesaplanan verileri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Fick'in difüzyon denklemi kullanılarak elde edilen etkili nem yayılım katsayısı (D_{eff}) ortalama değerleri, 30 kPa basınç değerinde sıcaklık değişimiyle 5.017×10^{-14} ile 4.8×10^{-13} değerleri arasında değişmektedir. Bu, kuruma süresini önemli ölçüde azalmaktadır. Sıcaklık artışı nane yapraklarındaki nem difüzyonunu hızlandırmıştır. Benzer şekilde Therdthai ve Zhou (2009), nane yapraklarının etkili nem yayılımını 8.0 W/g, 9.6 W/g and 11.2 W/g'de vakumlu mikrodalga kurutmada, 60 °C ve 70°C sıcak hava ile kurutmada sırasıyla 4.6999×10^{-11} , 7.2620×10^{-11} , 9.7838×10^{-11} , 0.9648×10^{-11} and 1.1900×10^{-11} m²/s olarak belirlemiştir. Benzer sonuçlar Doymaz (2018) çalışmasında da belirlenmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı sıcaklıklarda 30 kPa basınçta dondurarak kurutma koşullarında ortalama etkili nem yayılım değerleri

Sıcaklık, °C	$D_{eff\ ort}$, m ² /s
40	5.01758E-14
50	4.07176E-13
60	4.80008E-13

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi D_{eff} değerleri, nem içeriği azaldıkça artmaktadır. Etkili nem yayılma gücünün nem içeriğine bağımlılığı, kurutma işlemi boyunca nemin hareketine neden olan çeşitli kinetiklere bağlı olabilir. Kurutma işleminin başlangıcında, numuneler yüksek miktarda neme sahip olduklarında, nem hareketi esas olarak sıvı difüzyondur. Kurutma işleminin ilerlemesi sırasında ve numune yüzeyi daha kuru hale geldiğinde, geçirgen bir yapı şekillenir ve nem aktarımı buhar difüzyonundan kaynaklanabilir. Nane yapraklarının yüzeyindeki gözenekler, içindeki su buharı basıncı arttıkça büyür. Benzer şekilde Park vd. (2002), 30, 40 ve 50 °C kurutma sıcaklıkları ve 0.5 ve 1 m/s kurutma hızları için

etkili yayınının sıcaklık ve hava hızı artışı ile arttığını ve 4.765×10^{-13} ile 2.945×10^{-12} m^2/s değerleri arasında değiştiğini bildirmiştir. Benzer sonuçlar Younis vd. (2018) çalışmasında da elde edilmiştir.



Şekil 4.12. Nananın 30 kPa ve 50°C sıcaklık ve basınçta kurutulmasında nem içeriği ile etkili nem yayını (D_{eff}) değişimi

Nemin uzaklaştırılması için gerekli enerjinin bir göstergesi olan aktivasyon enerjisi değeri (E_a), nane yaprakları için $\ln(D_{eff})$ ile $1/T$ eğiminden hesaplanmıştır. 50°C kurutma sıcaklığı ve 30 kPa kabin basıncı için elde edilen 78.38 kJ/mol değeri literatür değerleri ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.7'de verilmiştir. Aktivasyon enerjisi değerleri, moleküllerin ortalama enerjisindeki artıştan dolayı düşer. Denemelerde 30 kPa basınç için 40, 50 ve 60°C sıcaklıklar için aktivasyon enerjileri sırasıyla 79.07, 78.32 ve 76.44 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Dondurarak kurutma teknolojisinde daha küçük E_a değerleri ürünün daha büyük D_{eff} değerlerini gösterir. Benzer sonuçlar Younis vd. (2018) çalışmasında da elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Aktivasyon enerjisinin literatür değerleri ile karşılaştırılması

Materyal	Yöntem	Aktivasyon enerjisi, kJ/mol	Referans
Nane	Dondurarak kurutma	78.32	Mevcut çalışma
Nane	Sıcak hava ile kurutma	62.96	Doymaz (2006)
Nane	Sıcak hava ile kurutma	82.93	Park vd. (2002)
Sarımsak dilimleri	Kızılötesi radyasyon ile kurutma	3.05 - 45.13	Younis vd. (2018)

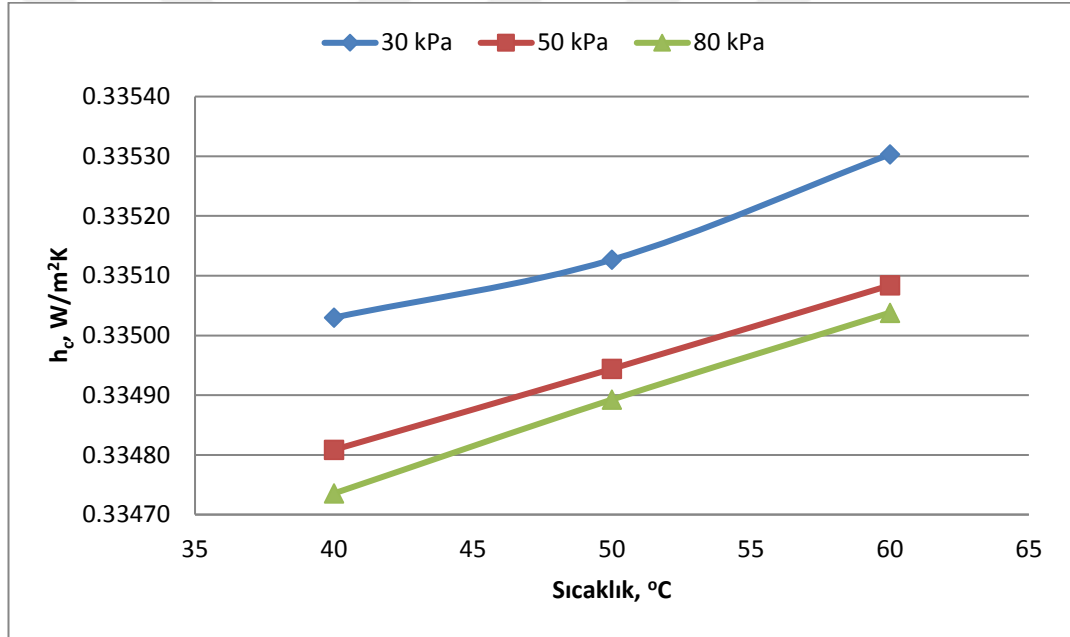
4.4.2. Isı transfer katsayısı ve kütle transfer hızı

Isı transfer katsayısı, kurutma hızını simüle etmek için önemli bir parametredir, çünkü hava ve ürün arasındaki sıcaklık farkı bu katsayı ile değişmektedir. Isı ve kütle transferinin tahminden önce Re sayısını belirlemek gerekir. Re sayısı genellikle farklı akış durumlarında akış türünü tahmin etmek için kabul görmüştür. Bu çalışmada hesaplanan Re sayısı 200 ile 250 arasındadır. Bu sayı $5 \cdot 10^5$ değerinden küçük olduğu için akış türü laminar akış olarak belirlenmiştir.

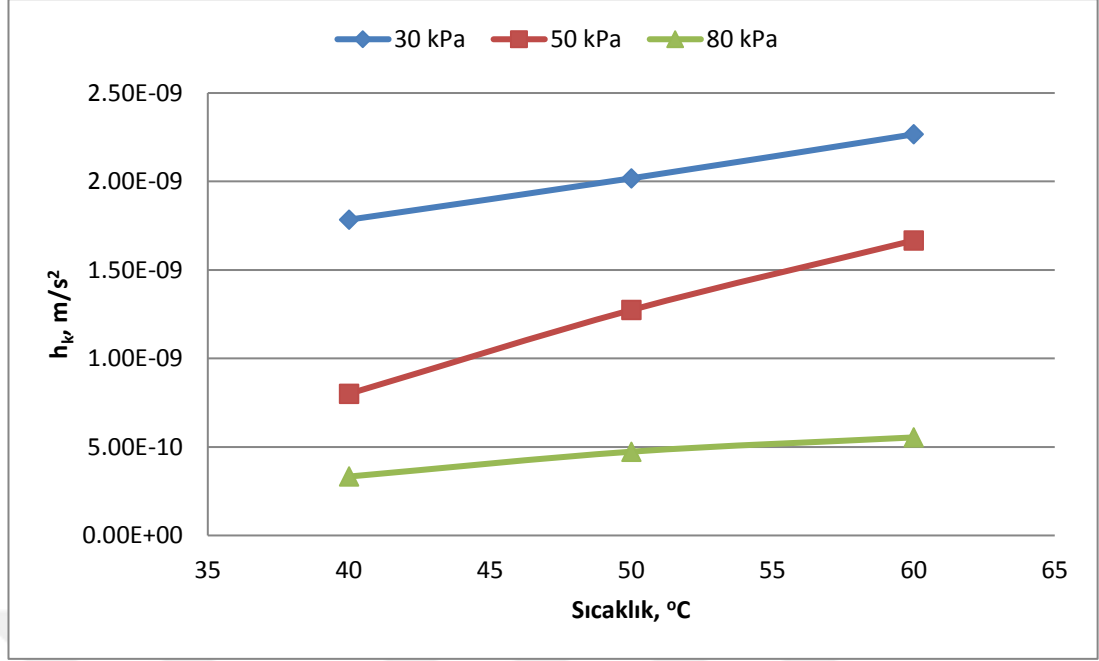
Çizelge 4.8. Farklı sıcaklık ve basınçlarda ortalama ısı transfer katsayıları ve kütle transfer hızları

Basınç (kPa)	Sıcaklık (°C)	k_h (W/m²K)	k_c (m/s)
30	40	0.33503	1.78E-09
	50	0.33513	2.02E-09
	60	0.33530	2.27E-09
50	40	0.33481	8.01E-10
	50	0.33494	1.27E-09
	60	0.33508	1.67E-09
80	40	0.33474	3.33E-10
	50	0.33489	4.73E-10
	60	0.33504	5.54E-10

Nane için farklı sıcaklık ve basınçlarda elde edilen ortalama kütle transfer hızları ve ısı transfer katsayıları Çizelge 4.8’de verilmiştir. Isı transfer katsayısı için elde edilen değerler 0.33474 ile 0.33530 arasında değişmektedir. Kütle transfer hız değerleri, bazı sıcaklıklar için kuruma hızının değişimini açıklamak için önemlidir. Çalışmada elde edilen kütle transfer hızları $3,33 \times 10^{-10}$ ile $2,27 \times 10^{-9}$ arasında değişmektedir. Goyal ve Tiwari (1998) çalışmalarında, doğrusal regresyon yoluyla, sıcak hava ile kurutulmuş buğday ve nohut için ısı transferi katsayısı değerini sırasıyla 12.68 ve 9.62 olarak bulmuşlardır. Baptestini vd. (2017) çalışmasında ısı tranfer katsayıları ve kütle transfer hızları, farklı olgunlaşma aşamalarında, sıcaklık aralığı için sırasıyla 46.84 ila 70.54 W/m²K ve 0.040 ila 0.0632 m/s arasında değişmiştir.



Şekil 4.13. Farklı kurutma sıcaklıkları ve basınçlarda nane için ortalama ısı transfer katsayısı



Şekil 4.14. Farklı kurutma sıcaklıkları ve basınçlarda nane için ortalama kütle transfer hızı

Nanenin dondurarak kurutulmasında ısı ve kütle transfer katsayıları, 30, 50 ve 80 kPa kabin basınçları ve 40, 50 ve 60°C kurutma sıcaklıkları için karşılaştırılmalı olarak Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi hem ısı transfer katsayıları hem de kütle transfer hızları sıcaklığın yükselmesinden önemli derecede etkilenmiş ve artış göstermiştir. Kabin basıncının ısı transfer katsayıları ve kütle transfer hızları üzerindeki etkisi ise ters yönde olmuştur. Kabin basıncındaki artış, ısı transfer katsayılarında ve kütle transfer hızlarında azalmaya neden olmuştur. Benzer sonuçlar Botelho vd. (2011); Srinivasan vd. (2019) ve Pisano vd. (2011) çalışmalarında da elde edilmiştir.

4.5. Hata Analizi

Deneysel çalışmalarda ölçülen değerlerin doğruluğunun belirlenmesi için hata analizi yapılmıştır. 50°C ve 30 kPa basınçta yapılan deneylerin enerji analizlerine hata analizi uygulanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Hata analizi sonuçları

Paremetreler	Hesaplanan değerler (kJ)	Hata değerleri (kJ)	Hata miktarı (%)
Giren havanın enerjisi	571	20	3.5
Çıkan havanın enerjisi	616	27	4.5
Giren işin enerjisi	4.85	0.14	3
Fırın içindeki havayı ısıtma enerjisi	9.4	0.15	1.6
Ürünün ısıtılması	10.5	0.36	3.5
Yoğuşmada harcanan enerji	19	0.6	3

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, deneysel olarak dondurarak kurutma sistemi kurulmuştur. Sistemin denenmesi için ürün olarak nane yaprakları kullanılmıştır. Nane yaprakları üç farklı basınç (30, 50 ve 80 kPa) ve üç farklı kurutma sıcaklığında (40, 50 ve 60°C) kurutulmuştur. Numunelerin donma sıcaklığı -15°C olarak belirlenmiştir. Numuneler 100 gr olarak tepsilere yerleştirilmiştir. Nanelerin başlangıç nem içeriği 0.89 kgsu/kgkurumadde olarak belirlenmiştir.

Nane yapraklarının dondurularak kurutulmasında, numunelerin kuruma davranışları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Zamanla nem içeriğinin değişiminin önce hızlı daha sonra azalan hızda azaldığı görülmektedir.
- Deneme sıcaklığının arttırılması kuruma süresini kısaltırken, 60°C kurutma sıcaklığı üründe görünüş olarak kusurlara neden olmuştur.
- Ortam sıcaklığının kurutulan materyalin sıcaklığından genel olarak 1.5 – 4°C daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Numunelerin kurutma aşamasında sıcaklık artışı ile ortam nemi azalmıştır.
- Nananin dondurarak kurutulmasında elde edilen deneysel sonuçların yardımı ile matematiksel model geliştirilmiştir. Literatürde yaygın olan ince tabaka kurutma modelleri içerisinde Wang and Singh kurutma modeli, 0.996 R² ve 0.00238 RMSE değerleri ile diğer modellere göre daha iyi uyum göstermiştir.

Nananin dondurarak kurutulması işleminin aşamalarını ayrıntılı olarak elde edebilmek, verimsizlik kaynaklarını belirlemek, enerji tüketiminin kalitesini ayırt etmek, optimum kurutma koşullarını belirleyebilmek ve kurutma sisteminin çevre etkilerini azaltmak amacıyla dondurarak kurutma sisteminin farklı sıcaklık ve basınçlarda enerji ve ekserji analizi karşılaştırılmalı olarak yapılmıştır.

- En fazla enerji tüketimi kompresör ve vakumda meydana gelmektedir. Isıtmada harcanan enerji çok daha azdır.

- Dondurarak kurutma sisteminin genel performansını değerlendirmek için belirlenen COP, SMER, MER ve SPC değerleri sırasıyla 4.8, 0.018 kgsu/kWh, 0.0077 kgsu/h ve 53.88 kWh/kgsu olarak belirlenmiştir.
- Donma aşamasında ekserji değerlerini en fazla etkileyen değer, T_o 'dan T_{phc} sıcaklığına kadar olan süreçte meydana gelmektedir.
- Kurutma kabininde enerji kullanımını nanenin nem içeriği azaldıkça azalmış ve ekserji verimliliği artmıştır.
- Bu sistemin çalışmasında toplam ekserji kayıplarını minimum yapan yüzey sıcaklığı 30°C'dir.
- 30 kPa ile 80 kPa arasında değişen kabin basıncında, toplam ekserji kayıpları, kabin basıncı arttıkça artar.
- Ekserji kayıpları, soğutma kaynağının sıcaklığının azalmasıyla artmıştır.

Sistemin ısı ve kütle analizi sonuçlarına göre;

- Etkili nem yayılım katsayısı (D_{eff}) ortalama değerleri, 50 kPa basınç değerinde sıcaklık değişimiyle 5.017×10^{-14} ile 4.8×10^{-13} değerleri arasında değişmektedir.
- Sıcaklık artışı nane yapraklarındaki nem difüzyonunu hızlandırmıştır.
- Nem içeriği azaldıkça D_{eff} artmaktadır.
- 30 kPa basınç için 40, 50 ve 60°C sıcaklıklar için aktivasyon enerjileri sırasıyla 79.07, 78.32 ve 76.44 kJ/mol olarak belirlenmiştir.
- Isı transfer katsayısı için elde edilen değerler 0.33474 ile 0.33530 arasında değişmektedir.
- Kütle transfer hızları ise 3.33×10^{-10} ile 2.27×10^{-9} arasında değişmektedir.
- Hem ısı transfer katsayıları hem de kütle transfer hızları sıcaklığın yükselmesiyle önemli derecede etkilenmiş ve artış göstermiştir.
- Kabin basıncındaki artış, ısı transfer katsayılarında ve kütle transfer hızlarında azalmaya neden olmuştur.

Sonuç olarak, enerji ve ekserji analizinin yanında kurutma sonrası alınan ürünün renk ve ürün görselliği de değerlendirildiğinde, nanenin kurutulmasında 30 kPa kabin basıncı 50°C kurutma sıcaklığı önerilmektedir. Kurutma işlemi, sanayi sektöründe en fazla enerji tüketimi olan alanlardan biridir. Dondurarak

kurutmanın enerji tüketimi ise kurutma sistemleri içinde oldukça yüksektir. Bu tezde tasarlanan sistem için yapılan analizlerin dondurarak kurutma sisteminde enerji tüketiminin azaltılmasıyla katkı yapması beklenmektedir.



KAYNAKLAR

- Aghbashlo, Mortaza, Mobli, Hossein, Rafiee, Shahin ve Madadlou, Ashkan, 2013. A Review on Exergy Analysis of Drying Processes and Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 1-22.
- Agrawal, Shailesh G. ve Methekar, Ravi N., 2017. Mathematical Model for Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Pumpkin, *Food and Bioproducts Processing*, 101, 68-73.
- Akpınar, E. Kavak, 2006. Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Process Under Open Sun of Some Aromatic Plants, *Journal of Food Engineering*, 77 (4), 864-870.
- Amami, E., Khezami, W., Mezrigui, S., Badwaik, L. S., Bejar, A. K., Perez, C. T. ve Kechaou, N., 2017. Effect of Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration Pretreatment on the Convective Drying of Strawberry, *Ultrason Sonochem*, 36, 286-300.
- Arévalo-Pinedo, Aroldo ve Xidieh Murr, Fernanda E., 2007. Influence of Pre-Treatments on the Drying Kinetics During Vacuum Drying of Carrot and Pumpkin, *Journal of Food Engineering*, 80 (1), 152-156.
- Babu, A. K., Kumaresan, G., Raj, V. Antony Aroul ve Velraj, R., 2018. Review of Leaf Drying: Mechanism and Influencing Parameters, *Drying Methods, Nutrient Preservation, and Mathematical Models*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 536-556.
- Baptestini, Fernanda Machado, Corrêa, Paulo Cesar, Oliveira, Gabriel Henrique Horta de, Botelho, Fernando Mendes ve Oliveira, Ana Paula Lelis Rodrigues de, 2017. Heat and Mass Transfer Coefficients and Modeling of Infrared Drying of Banana Slices, *Revista Ceres*, 64 (5), 457-464.
- Barresi, Antonello A., Pisano, Roberto, Rasetto, Valeria, Fissore, Davide ve Marchisio, Daniele L., 2010. Model-Based Monitoring and Control of Industrial Freeze-Drying Processes: Effect of Batch Non-Uniformity, *Drying Technology*, 28 (5), 577-590.
- Botelho, Fernando M, Corrêa, Paulo C, Goneli, André, Martins, Márcio A, Magalhães, Felipe EA ve Campos, Sílvia C, 2011. Periods of Constant and Falling-Rate for Infrared Drying of Carrot Slices, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15 (8), 845-852.
- Bourelès, Erwan, de Lannoy, Gael, Scutellà, Bernadette, Fonseca, Fernanda, Trelea, Ioan Cristian ve Passot, Stephanie, 2019. Scale-Up of Freeze-Drying Cycles, the Use of Process Analytical Technology (PAT), and Statistical Analysis, 215-240.
- Bruttini, R., Crosser, O. K. ve Liapis, A. I., 2007. Exergy Analysis for the Freezing Stage of the Freeze Drying Process, *Drying Technology*, 19 (9), 2303-2313.

- Cao, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Zhong, Q. ve Wang, Z., 2017. Effects of Ultrasonic Pretreatments on Quality, Energy Consumption and Sterilization of Barley Grass in Freeze Drying, *Ultrason Sonochem*, 40, 333-340.
- Ceylan, Ilhan, 2009. Energy Analysis of Pid Controlled Heat Pump Dryer, *Engineering*, 01 (03), 188-195.
- Chen, Xiao Dong ve Mujumdar, Arun S., 2008. *Drying Technologies in Food Processing*, Blackwell Publishing Ltd: 350.
- Cheng, Hong-Ping, Tsai, Shian-Min ve Cheng, Chin-Chi, 2014. Analysis of Heat Transfer Mechanism for Shelf Vacuum Freeze-Drying Equipment, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1-7.
- Chou, S. K. ve Chua, K. J., 2001. New Hybrid Drying Technologies for Heat Sensitive Foodstuff, *Trends in Food Science & Technology*, 12, 359–369.
- Ciurzyńska, Agnieszka ve Lenart, Andrzej 2011. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences] Freeze-Drying - Application in Food Processing and Biotechnology - A Review, *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, 61 (3), 165-171.
- Colucci, D., Fissore, D., Rossello, C. ve Carcel, J. A., 2018. On the Effect of Ultrasound-Assisted Atmospheric Freeze-Drying on the Antioxidant Properties of Eggplant, *Food Res Int*, 106, 580-588.
- Coskun, C., Bayraktar, M., Oktay, Z. ve Dincer, I., 2009. Energy and Exergy Analyses of an Industrial Wood Chips Drying Process, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 4 (4), 224-229.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 2012. *Thermodynamics An Engineering Approach*. p.
- Çengel, YA, 2011. *Isı ve Kütle Transferine Pratik Bir Yaklaşım*, 3, Basım, Güven Kitabevi, İzmir.
- Dhanushkodi, S., Wilson, Vincent H. ve Sudhakar, K., 2017. Mathematical Modeling of Drying Behavior of Cashew in a Solar Biomass Hybrid Dryer, *Resource-Efficient Technologies*.
- Díaz-Maroto, M Consuelo, Pérez-Coello, M Soledad ve Cabezudo, M Dolores, 2002. Effect of Drying Method on the Volatiles in Bay Leaf (*Laurus nobilis* L.), *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (16), 4520-4524.
- Dikmen, E., Yakut, A.K. ve A., Şencan Şahin, 2012. Energy and Exergy Analyses of Vacuum Drying Process of Pine Timbers, *Int. J. Exergy*, 11 (2).
- Dikmen, E., Boyar, S. ve Bayhan, K.A., 2014. Modeling of Heat Pump Assisted Heating-Drying System. The 18th World Congress of CIGR. China.

- Dincer, Ibrahim ve Rosen, Marc A, 2012. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Newnesp.
- Doymaz, İbrahim, 2006. Thin-Layer Drying Behaviour of Mint Leaves, Journal of Food Engineering, 74 (3), 370-375.
- Doymaz, İbrahim, 2018. Patlıcan Dilimlerinin Kurutma ve Rehidrasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2018 (2018).
- Dziki, Dariusz, Polak, Renata, Rudy, Stanisław, Krzykowski, Andrzej, Gawlik-Dziki, Urszula, Różyło, Renata, Miś, Antoni ve Combrzyński, Maciej, 2018. Simulation of the Process Kinetics and Analysis of Physicochemical Properties in the Freeze Drying of Kale, International Agrophysics, 32 (1), 49-56.
- Eriksson, Lars ve Nielsen, Lars, 2014. Modeling and Control of Engines and Drivelines. John Wiley & Sons.
- EÜAŞ (2016). Elektrik Üretim Sektör Raporu. Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, İstatistik ve Araştırma Müdürlüğü.
- Favre-Marinet, Michel ve Tardu, Sedat, 2013. Convective Heat Transfer: Solved Problems. John Wiley & Sons.
- Fissore, Davide, Pisano, Roberto ve Barresi, Antonello A., 2014. Applying Quality-by-Design to Develop a Coffee Freeze-Drying Process, Journal of Food Engineering, 123, 179-187.
- Geankoplis, Christie J., 1993. Transport Process and Unit Operations. Prentice-Hall International, Inc.
- George, James P ve Datta, AK, 2002. Development and Validation of Heat and Mass Transfer Models for Freeze-Drying of Vegetable Slices, Journal of Food Engineering, 52 (1), 89-93.
- Ghasemi Pirbalouti, Abdollah, Oraie, Mehdi, Pouriamehr, Mehdi ve Babadi, Ezatollah Solaymani, 2013. Effects of Drying Methods on Qualitative and Quantitative of the Essential Oil of Bakhtiari Savory (Satureja bachtiarica Bunge.), Industrial Crops and Products, 46, 324-327.
- Goyal, R. K. ve Tiwari, G. N., 1998. Heat and Mass Transfer Relations for Crop Drying, Drying Technology, 16 (8), 1741-1754.
- Gungor, Aysegul, Tsatsaronis, George, Gunerhan, Huseyin ve Hepbasli, Arif, 2015. Advanced Exergoeconomic Analysis of a Gas Engine Heat Pump (GEHP) for Food Drying Processes, Energy Conversion and Management, 91, 132-139.
- Hossain, M. B., Barry-Ryan, C., Martin-Diana, A. B. ve Brunton, N. P., 2010. Effect of Drying Method on the Antioxidant Capacity of Six Lamiaceae Herbs, Food Chem, 123 (1), 85-91.

- Huang, Lue-lue, Zhang, Min, Mujumdar, Arun S. ve Lim, Rui-xin, 2011. Comparison of Four Drying Methods for Re-Structured Mixed Potato with Apple Chips, *Journal of Food Engineering*, 103 (3), 279-284.
- Hui, Y. H., 2006. *Handbook of Fruits and Fruit Processing*, Blackwell Publishing: 668.
- Incropera, F.P. ve DeWitt, D.P., 2007. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. Literatür Yayıncılık.
- Jafar, Farial ve Farid, Mohammed, 2003. Analysis of Heat and Mass Transfer in Freeze Drying, *Drying Technology*, 21 (2), 249-263.
- Jangam, Sachin V., Law, Chung-Lim ve Mujumdar, Arun S., 2010. Drying of Foods Vegetables and Fruits Jangam, S. V., Law, C.-L. ve Mujumdar, A. S. 1/3p.
- Karagüzel, İ., Topuz, A. ve Tekin, E., 2011. Akışkan Yataklı Kurutma Prosesinin Enerji ve Ekserji Analizi. ULIBTK'11 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi. Zonguldak.
- Kavak Akpınar, E., 2005. Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylerindeki Hata Analizi, *Mühendis ve Makina*, 46 (540), 41-48.
- Kovacı, Tuğba, Dikmen, Erkan ve Şahin, Arzu Şencan, 2018. Kurutma Sistemleri, Enerji Tüketimleri ve Ürün Kalitesine Etkileri ve Örnek Sistem Tasarımı, *Journal of Technical Sciences*, 8 (2), 25-39.
- Lewis, W.K., 1921. The Rate of Drying of Solid Material, *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13 (5), 427-432.
- Liu, Qiang ve Bakker-Arkema, F.W., 1997. Stochastic Modelling of Grain Drying : Part 2 . Model Development, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, 275-280.
- Liu, Yongzhong, Zhao, Yanfei ve Feng, Xiao, 2008. Exergy Analysis for a Freeze-Drying Process, *Applied Thermal Engineering*, 28 (7), 675-690.
- Monteiro, Ricardo L., Link, Jade V., Tribuzi, Giustino, Carciofi, Bruno A. M. ve Laurindo, João B., 2018. Microwave Vacuum Drying and Multi-Flash Drying of Pumpkin Slices, *Journal of Food Engineering*, 232, 1-10.
- Mujumdar, Arun S., 2006. *Handbook of Industrial Drying*, Taylor & Francis Group, LLC: 1279.
- Mujumdar, Arun S, 2014. *Handbook of Industrial Drying*. CRC press.
- Muliterno, Marina Martins, Rodrigues, Daniele, de Lima, Fernando Sanches, Ida, Elza Iouko ve Kurozawa, Louise Emy, 2017. Conversion/Degradation of Isoflavones and Color Alterations During the Drying of Okara, *LWT - Food Science and Technology*, 75, 512-519.

- Nireesha, GR, Divya, L, Sowmya, C, Venkateshan, N, Babu, M Niranjan ve Lavakumar, V, 2013. Lyophilization/Freeze Drying-An Review, *International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences*, 3 (4).
- Özcan, Musa, Arslan, Derya ve Ünver, Ahmet, 2005. Effect of Drying Methods on the Mineral Content of Basil (*Ocimum Basilicum L.*), *Journal of Food Engineering*, 69 (3), 375-379.
- Özgener, L. ve Hepbaşı, A., 2003. HVAC Sistemlerinde Ekserji Analizinin Gerekliliği ve Uygulamaları. VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi.
- Park, Kil Jin, Vohnikova, Zdenka ve Brod, Fernando Pedro Reis, 2002. Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves (*Mentha Crispa L.*), *Journal of Food Engineering*, 51 (3), 193-199.
- Pisano, Roberto, Fissore, Davide ve Barresi, Antonello A, 2011. Heat Transfer in Freeze-Drying Apparatus. *Developments in Heat Transfer*. InTechOpen.
- Prommas, Ratthasak, Rattanadecho, Phadungsak ve Cholaseuk, Dulyachot, 2010. Energy and Exergy Analyses in Drying Process of Porous Media Using Hot Air, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (4), 372-378.
- Ratti, C., 2001. Hot air and Freeze Drying of High-Value Foods : A Review, *Journal of Food Engineering*, 49, 311-319.
- Roser, Bruce, 1991. Trehalose, A New Approach to Premium Dried Foods, *Trends in Food Science & Technology*, 2, 166-169.
- Saavedra, Jorge, Córdova, Andrés, Navarro, Rosa, Díaz-Calderón, Paulo, Fuentealba, Claudia, Astudillo-Castro, Carolina, Toledo, Lea, Enrione, Javier ve Galvez, Lena, 2017. Industrial Avocado Waste: Functional Compounds Preservation by Convective Drying Process, *Journal of Food Engineering*, 198, 81-90.
- Sablani, Shyam S. ve Rahman, M. Shafiur, 2007. Pore Formation in Selected Foods as a Function of Shelf Temperature during Freeze Drying, *Drying Technology*, 20 (7), 1379-1391.
- Sarker, Md Sazzat Hossain, Ibrahim, Mohd Nordin, Abdul Aziz, Norashikin ve Punan, Mohd Salleh, 2015. Energy and Exergy Analysis of Industrial Fluidized Bed Drying of Paddy, *Energy*, 84, 131-138.
- Shofian, N. M., Hamid, A. A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Dek, M. S. ve Hairuddin, M. R., 2011. Effect of Freeze-Drying on the Antioxidant Compounds and Antioxidant Activity of Selected Tropical Fruits, *Int J Mol Sci*, 12 (7), 4678-4692.

- Silva, Vítor, Costa, José J., Figueiredo, A. Rui, Nunes, João, Nunes, Catarina, Ribeiro, Tânia I. B. ve Pereira, Bruno, 2016. Study of Three-Stage Intermittent Drying of Pears Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient, *Journal of Food Engineering*, 180, 77-86.
- Sonmete, Mehmet Hakan, Mengeş, Hakan Okyay, Ertekin, Can ve Özcan, Mehmet Musa, 2016. Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Carrot Slices by Forced Convection, *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11 (2), 629-638.
- Srinivasan, G., Muneeshwaran, M. ve Raja, B., 2019. Numerical Investigation of Heat and Mass Transfer Behavior of Freeze Drying of Milk in Vial, *Heat and Mass Transfer*.
- Szadzinska, J., Lechtanska, J., Kowalski, S. J. ve Stasiak, M., 2017. The Effect of High Power Airborne Ultrasound and Microwaves on Convective Drying Effectiveness and Quality of Green Pepper, *Ultrason Sonochem*, 34, 531-539.
- Tambunan, A. H., Yudistira, Kisdiyani ve Hernani, 2001. Freeze Drying Characteristics of Medicinal Herbs, *Drying Technology*, 19 (2), 325-331.
- Therdthai, Nantawan ve Zhou, Weibiao, 2009. Characterization of Microwave Vacuum Drying and Hot Air Drying of Mint Leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen), *Journal of Food Engineering*, 91 (3), 482-489.
- Toğrul, İnci Türk ve Pehlivan, Dursun, 2002. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, *Journal of Food Engineering*, 55, 209–216.
- Türkiye Petrolleri, TP (2016). Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu
- Walde, S. G., Velu, V., Jyothirmayi, T. ve Math, R. G., 2006. Effects of Pretreatments and Drying Methods on Dehydration of Mushroom, *Journal of Food Engineering*, 74 (1), 108-115.
- Wang, CY ve Singh, R Paul, 1978. Use of Variable Equilibrium Moisture Content in Modeling Rice Drying, *Paper-American Society of Agricultural Engineers*.
- Wang, Rui, Zhang, Min ve Mujumdar, Arun S., 2010. Effects of Vacuum and Microwave Freeze Drying on Microstructure and Quality of Potato Slices, *Journal of Food Engineering*, 101 (2), 131-139.
- Wang, Wei, Wang, Shihao, Pan, Yanqiu, Yang, Jing, Zhang, Shuo ve Chen, Guohua, 2019. Porous Frozen Material Approach to Freeze-Drying of Instant Coffee, *Drying Technology*, 1-11.
- Wilhelm, Luther R., Dwayne, A. Suter ve Gerald, H. Bruswitz, 2004. Drying and Dehydration. *Food & Process Engineering Technology*.
- Xu, Wanxiu, Song, Chunfang, Li, Zhenfeng, Song, Feihu, Hu, Shaogang, Li, Jing, Zhu, Guanyu ve Vijaya Raghavan, G. S., 2018. Temperature Gradient Control

During Microwave Combined With Hot Air Drying, *Biosystems Engineering*, 169, 175-187.

Younis, M., Abdelkarim, D. ve Zein El-Abdein, A., 2018. Kinetics and Mathematical Modeling of Infrared Thin-Layer Drying of Garlic Slices, *Saudi J Biol Sci*, 25 (2), 332-338.

Yousif, AN, Durance, TD, Scaman, CH ve Girard, B, 2000. Headspace Volatiles and Physical Characteristics of Vacuum-Microwave, Air, and Freeze-Dried Oregano (*Lippia Berlandieri* Schauer), *Journal of food science*, 65 (6), 926-930.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğba KOVACI
Doğum Yeri ve Yılı : Antalya, 1981
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tugbakovaci@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Antalya Muratpaşa Lisesi
Lisans : Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü,
Y.Lisans : Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü

Mesleki Deneyim

Akdeniz Üniversitesi, Tarım Makinaları

Yayınlar

- Kovacı, T., Dikmen, E., & Şahin, A. Ş. (2018). Kurutma Sistemleri, Enerji Tüketimleri ve Ürün Kalitesine Etkileri ve Örnek Sistem Tasarımı. *Journal of Technical Sciences*, 8(2), 25-39.
- Dikmen, E., Ayaz, M., Kovacı, T., & Şencan Şahin, A. (2018). Mathematical modelling of drying characteristics of medical plants in a vacuum heat pump dryer. *International Journal of Ambient Energy*, 1-8.
- Kovacı, T., & Şahin, A. Ş. (2018). Energy and exergy analysis of a double-effect LiBr-H₂O absorption refrigeration system. *International Journal of Energy and Environment*, 9(1), 37-48.
- Kovacı, T., Şahin, A. Ş., Dikmen, E., & Şavklı, H. B. (2017). Performance Estimation of Organic Rankine Cycle by Using Soft Computing Technics. *International Journal Of Engineering & Applied Sciences*, 9(3), 1-10.
- Kovacı, T., Şencan Şahin, A., Dikmen, E., 2017. R134a'ya Alternatif R1234yf ve R1234ze'nin Kullanıldığı Bir İklimlendirme Sisteminin Termodinamik Analizinde Gep Modeli Yaklaşımı, İklim 2017 (Antalya İklimlendirme

Semp. 15-16 Aralık 2017), TMMOB Antalya Şubesi, Sayfa 83-90. ISBN: 978-605-01-1119-4.

T. Kovacı, A. Şencan Şahin, E. Dikmen, R. Yıldırım, LiBr-H₂O Ve LiCl-H₂O Akışkan Çiftiyle Çalışan Absorbsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Enerji ve Ekserji Analizi, ULIBTK'17 21. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi Hitit Üniversitesi 13-16 Eylül 2017, ÇORUM

Kovacı, T., Şencan Şahin, A., Kumaş, K., Dikmen, E., 2017. Thermodynamic analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in single stage vapor compression refrigeration system, IATS'17 (8th International Advanced Technologies Symposium. 19-22 October 2017), Sayfa 2340-2346. Fırat University.

