

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇİNİ KURUTMASININ İNCELENMESİ

ALİŞAN GÖNÜL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. ÖZDEN AĞRA**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİNI KURUTMASININ İNCELENMESİ

Alişan GÖNÜL tarafından hazırlanan tez çalışması 30.06.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail TEKE

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU

İstanbul Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2013-06-01-YL04 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, Çini seramik hammaddelerinin kurutma kinetiği farklı kalınlık, sıcaklık, bağıl nem ve kurutma havası hızı değerlerine bağlı olarak konvektif bir kurutucuda deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen değerler ile literatürdeki matematiksel modellerin uygunluğu irdelenmiş, farklı kurutma havası şartlarına bağlı olarak difüzyon katsayıları belirlenmiştir. Aynı zamanda kurutmaya bağlı ısı-kütle transferi analitik olarak incelenmiştir.

Yıldız Teknik Üniversitesi'ne adım attığım ilk günden itibaren karşılaştığım sıkıntılarda ve tez çalışmam sürecinde her zaman yanımda olan danışman hocam Sn. Doç. Dr. Özden AĞRA'ya, tez çalışmasının şekillenmesinde engin tecrübeleri ve yardımları esirgemeyen başta Prof.Dr. İsmail TEKE hocam olmak üzere, Sn. Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Sn. Doç. Dr. Hakan DEMİR, Arş. Gör. Dr. M. Kemal SEVİNDİR hocalarıma ve deney tesisatı kurulumda her zaman desteğini gördüğüm değerli arkadaşım Sn. Mak. Yük. Müh. Kutay ÖRGÜNAL'a ayrı ayrı saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışma sırasında desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Nurullah KAYACI'ya, Arş. Gör. Yakup KARAKOYUN'a, Arş. Gör. H. Aydın DÖNMEZ'e, Arş. Gör. Ali ÇELEN'e, Arş. Gör. Abdulkerim OKBAZ'a ve Arş. Gör. M. Salih ÇELLEK'e teşekkür ederim.

Çalışma boyunca destekleri ve gösterdikleri sabır dolayısı ile değerli arkadaşlarım Sn. Ozan KARAKAŞ'a Sn. Mak. Müh. E. Mustafa AKDEMİR'e Sn. Mak. Müh. Süleyman ORHAN'a, Sn. Mak. Müh. Y. Cafer KARA'ya, Sn. Caner ENGÜZEL'e, Sn. Mustafa ÖZTÜRK'e ve Sn. Cem TURHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma sırasında kullanılan hammaddeyi tarafımıza sağlayan İznik Çini Vakfı yönetimine teşekkür ederiz.

Hayatımın her anında karşılıksız sevgi ve desteklerini sürekli yanımda hissettiğim başta bugün aramızda olmayan canım babam olmak üzere ailemin tüm fertlerini en içten duygularıyla saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

Haziran, 2014

Alişan GÖNÜL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
1.1.1 Seramik Kurutma Üzerine Yapılan Çalışmalar	3
1.1.2 Kurutma Üzerine Yapılan Sayısal ve Analitik Çalışmalar	9
1.2 Tezin Amacı	12
1.3 Hipotez	12
BÖLÜM 2	
ÇİNI ÜRÜNLERİ	13
2.1 Tarihçe	14
2.2 Çini Yapısı ve Üretimi	16
BÖLÜM 3	
KURUTMA	17
3.1 Kurutmanın Tanımı ve Mekanizması	17
3.2 Kurutma Yöntemleri.....	18
3.2.1 Taşınım ile Kurutma Yöntemi	19
3.2.2 İletimle Kurutma Yöntemi	20
3.2.3 Radyasyonla Kurutma Yöntemi	20
3.3 Kurutma Eğrileri	21
3.4 Difüzyon ve Türleri	25

BÖLÜM 4	
MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM	27
4.1 Materyal.....	27
4.2 Deney Düzenegi	27
4.3 Deneysel Çalışma	33
BÖLÜM 5	
HESAPLAMALAR ve SONUÇLAR	36
5.1 Deneysel Sonuçlar.....	36
5.1.1 Sıcaklığın Kuruma Davranışına Etkisi	37
5.1.2 Bağıl Nemin Kuruma Davranışına Etkisi.....	40
5.1.3 Hava Hızının Kuruma Davranışına Etkisi	42
5.1.4 Numune Kalınlığının Kurumadaki Etkisi.....	44
5.1.5 Farklı Isı Transfer Mekanizmalarının Kurumaya Etkisi.....	45
5.2 İnce Cisimlerin Modellemesinde Kullanılan Modeller İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	50
5.3 Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi	54
5.4 Isı ve Kütle Transferinin Birlikte İncelenmesi.....	56
5.5 Sonuçlar	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	72

SİMGE LİSTESİ

a	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
A_y	Deneyisel numunenin yüzey alanı (m^2)
b	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
B	Boyutsuz sayı
B_s	Boyutsuz sayı
Bi	Biot sayısı
Bi_m	Kütle geçişi için Biot sayısı
c	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
C	Konsantrasyon
C_p	Özgül ısı ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$C_{p,b}$	Su buharının özgül ısı ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$C_{p,h}$	Havanın özgül ısı ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_{AB}	Hava ile su buharı arasındaki difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_{eff}	Ürüne ait difüzyon katsayısı (m^2/s)
DR	Kuruma hızı ($g/cm^2 \cdot dk$)
dt	Zaman aralığı (sn)
E	Difüzyon katsayısının bulunmasını sağlayan eğim
h	Isı taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_m	Kütle taşınım katsayısı (W/m^2K)
h_R	Isı radyasyon katsayısı (W/m^2K)
h_{sb}	Suyun buharlaşma entalpisi (kJ/kg)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
k	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
k_0	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
k_1	Matematiksel modelde regresyona bağlı katsayı
k_h	Havanın ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_k	Deneyisel numunenin kuru haldeki ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
k_y	Deneyisel numunenin yaş haldeki ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot K$)
L_c	Karakteristik uzunluk (m)
Le	Lewis sayısı
M	Boyutsuz nem miktarı (kg_{sb}/kg_{km})
$M_{1,d}$	SHKP'den AHKP'na geçildiğindeki boyutsuz nem miktarı (kg_{sb}/kg_{km})

$M_{2,d}$	I. AHKP'den II. AHKP'na geçildiğindeki boyutsuz nem miktarı (kg _{sb} /kg _{km})
M_b	Su buharının mol kütlesi (kg/kmol)
$\dot{m}_{b,I}$	Sabit hızda kurutma periyodundaki nem hızı (kg/m ² sn)
$\dot{m}_{b,IIa}$	Azalan hızda kurutma periyodunun ilk kısmındaki kuruma hızı (kg/m ² sn)
$\dot{m}_{b,IIb}$	Azalan hızda kurutma periyodunun ikinci kısmındaki kuruma hızı (kg/m ² sn)
$\dot{m}_{b,IIb}$	Azalan hızda kurutma periyodunun ikinci kısmındaki kuruma hızı (kg/m ² sn)
$\dot{m}_{b,S}$	Sanal Kurutma sonu kuruma hızı (kg/m ² sn)
M_e	Boyutsuz denge nem içeriği (kg _{sb} /kg _{km})
M_h	Havanın mol kütlesi (kg/kmol)
M_i	Boyutsuz denge nem içeriği (kg _{sb} /kg _{km})
m_k	Numuneye kuru ağırlık (kg)
m_{ky}	Numuneye ait toplam ağırlık (kg)
MR	Boyutsuz nem oranı
MR_{kr}	SHKP'den AHKP'ye geçiş noktasını gösteren boyutsuz nem oranı
m_y	Numune içerisindeki nem miktarı (kg)
Nu_L	Nusselt sayısı
P	Atmosferik basınç (kPa)
$P_{b,S}$	Sanal kurutmaya bağlı numune alt yüzeyindeki su buharının kısmi basıncı (kPa)
$P_{b,y}$	Numune yüzeyindeki su buharının kısmi basıncı (kPa)
$P_{b,\infty}$	Kurutma havası içerisindeki su buharının kısmi basıncı (kPa)
Pr	Prandtl sayısı
Q	Verilen ısı enerjisi (kJ)
Q_b	Buharlaştırma ile oluşan ısı enerjisi (kJ)
\dot{Q}_b	Buharlaştırma ile oluşan ısı enerjisi (W)
$\dot{Q}_{b,S}$	Sanal kurutma sonuna buharlaştırma ile oluşan ısı enerjisi (W)
q_h	İletimle üretilen ısı enerjisi (W/m ²)
q_m	Nem uzaklaştırmak için üretilen ısı enerjisi (W/m ²)
Q_I	İletim ile oluşan ısı enerjisi (kJ)
\dot{Q}_I	İletim ile oluşan ısı enerjisi (W)
Q_R	Radyasyon ile oluşan ısı enerjisi (kJ)
\dot{Q}_R	Radyasyon ile oluşan ısı enerjisi (W)
Q_T	Taşınım ile oluşan ısı enerjisi (kJ)
\dot{Q}_T	Taşınım ile oluşan ısı enerjisi (W)
R^2	Belirlilik sayısı
Re	Re sayısı
R_b	Su buharının gaz sabiti (0.4615)(kJ/kgK)
t	Zaman (sn)
T	Sıcaklık (°C)
T_f	Film sıcaklığı (°C)
T_I	İletimle ısı transferi sırasındaki sıcaklık (°C)
T_R	Radyasyonla ısı transferi sırasındaki sıcaklık (°C)
T_S	Sanal kurutma sonundaki numune alt yüzey sıcaklığı sıcaklık (°C)
$T_{y,S}$	Sanal kurutma sonundaki numune üst yüzey sıcaklığı sıcaklık (°C)
T_y	Numune yüzey sıcaklığı (°C)

T_{∞}	Taşımla ısı transferi sırasındaki kurutma havası sıcaklığı (°C)
T_{∞}	Kurutma havası eşdeğer sıcaklığı (°C)
u	Kanal içerisindeki hava hızı (m/s)
x	Üç boyutlu koordinat sisteminde bir eksen
y	Üç boyutlu koordinat sisteminde bir eksen
z	Üç boyutlu koordinat sisteminde bir eksen
α	Isı yayılım katsayısı (m ² /s)
δ	Deneysel numune kalınlığı (m)
φ	Bağıl nem (%)
ν	Kinematik viskozite (m ² /s)
ε_1	Numunenin emisivite değeri
ε_2	Paslanmaz çeliğin emisivite değeri
ε_{12}	Yüzeyler arası emisivite değeri
ζ	Difüzyon direnç katsayısı
γ	Boyutsuz sayı
γ^*	Boyutsuz sayı
γ^{**}	Boyutsuz sayı
σ	Stefan Boltzman sabiti (5,670373×10 ⁻⁸)(W/m ² K)
ρ_h	Havanın yoğunluğu
$\rho_{b,y}$	Numune yüzeyindeki su buharının yoğunluğu
$\rho_{b,\infty}$	Hava içerisindeki su buharının yoğunluğu

KISALTMA LİSTESİ

AHKP	Azalan hızda kurutma periyodu
Ar-Ge	Araştırma – Geliştirme
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
M.Ö.	Milattan önce
SHKP	Sabit hızda kurutma periyodu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Konvektif kurutucu şematik resmi [10]..... 5
Şekil 1.2	Ölçüm işleminin şematik resmi [14]..... 6
Şekil 1.3	Deney tesisatının şematik gösterimi [15]..... 7
Şekil 1.4	Deney düzeneği [16] 8
Şekil 1.5	Deney düzeneği şematik resmi [18]..... 9
Şekil 1.6	Patatesin kuruma kinetiğini belirlemeye yönelik kurulan deney tesisatı [19]..... 10
Şekil 2.1	Duvar çinisine bir örnek 13
Şekil 2.2	Kullanım çinilerine örnekler 14
Şekil 3.1	Isı ve Kütle Transferinin Tek Yüzeyden Kurutmada Şematik Gösterimi..... 18
Şekil 3.2	Kuruma Hızı ile Ürün Nem İçeriğinin Değişimi 22
Şekil 3.3	Genel Kurutma Eğrileri 24
Şekil 4.1	a) Deney tesisatının tasarımı, b) Deney tesisatı şematik gösterimi..... 28
Şekil 4.2	Deney tesisatının fotoğrafı..... 29
Şekil 4.3	Deney tesisatında kullanılan santrifüj fanın resmi..... 30
Şekil 4.4	Deney tesisatında kullanılan elektrikli ısıtıcı fotoğrafı 30
Şekil 4.5	RTD ve bağıl nem sensörü 31
Şekil 4.6	Veri Toplama Ünitesi 31
Şekil 4.7	Pitot tüpü ve fark basınç ölçer 32
Şekil 4.8	Dijital terazi 32
Şekil 4.9	İnfrared termometre 33
Şekil 4.10	Rejim şartlarına ulaşıldığını gösteren ekran görüntüsü 34
Şekil 5.1	Deneylerin yapıldığı kalıpların fotoğrafı..... 37
Şekil 5.2	Yalıtımlı kalıp kullanılarak sıcaklığın kuruma süresiyle değişimi 38
Şekil 5.3	Sıcaklığın kuruma süresiyle değişimi..... 39
Şekil 5.4	Bağıl nemin kuruma süresiyle değişimi..... 40
Şekil 5.5	Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi..... 41
Şekil 5.6	Yüzey sıcaklığının değişik bağıl nem değerleri için kuruma süresiyle değişimi 42
Şekil 5.7	Kurutma için kanal içi hızın kuruma süresine etkisi 43
Şekil 5.8	Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine hızının etkisi 44
Şekil 5.9	Kurutulacak ürünün kalınlığının kuruma süresiyle değişimi 45
Şekil 5.10	Deneysel çalışmada kullanılan kalıplar 45
Şekil 5.11	Deneysel çalışmada taşınım ile ilgili deneyler için kullanılan kalıp..... 46

Şekil 5.12	0.5 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulmasının zamana göre değişimi.....	47
Şekil 5.13	1 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulmasının zamana göre değişimi.....	48
Şekil 5.14	Kuruma hızının (1 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulması) zamana göre değişimi	48
Şekil 5.15	Numunenin kurutma öncesi ve sonrasındaki durumu	49
Şekil 5.16	Difüzyon katsayısının belirlenmesinde kullanılan grafik.....	55
Şekil 5.17	Kurutma yapılacak ürün için enerji dengesi.....	56
Şekil 5.18	Sabit kurutma periyodundaki yüzey sıcaklığının belirlenmesi.....	60
Şekil 5.19	Modellemedeki yaklaşıma göre numune içerisindeki bir por içerisindeki nemin değişimi.....	61
Şekil 5.20	Kurutma sonu için enerji dengesi şematik gösterimi	62
Şekil 5.21	Kurutma sonu alt yüzey sıcaklığının belirlenmesi.....	64
Şekil 5.22	(a) Deneysel ile analitik hesaplamaya bağlı kuruma hızının karşılaştırılması, (b) Deneysel ile analitik hesaplamaya boyutsuz nem içeriğinin değişimi, (c) Deneysel olarak belirlenen yüzey sıcaklığının değişimi	65

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	İnce cisimlerin kurutma kinetiği için önerilen modeller 11
Çizelge 1.2	Kurutma Havasına Bağlı Kurutma Karakteristikleri ile Difüzyon Katsayısı11
Çizelge 4.1	Deney tesisatında bulunan malzemelerin listesi 28
Çizelge 5.1	Sıcaklıklara bağlı elde edilen model katsayıları..... 51
Çizelge 5.2	Bağıl neme bağlı elde edilen model katsayıları..... 52
Çizelge 5.3	Hızlara bağlı elde edilen model katsayıları..... 53
Çizelge 5.4	Yapılan deneysel çalışmalara ait difüzyon katsayıları 55

ÇİNI KURUTMASININ İNCELENMESİ

Alişan GÖNÜL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özden AĞRA

Bu çalışma kapsamında Çini üretim prosesinin en önemli aşamalarından biri olan kurutma incelenmiştir. Yaklaşık %30 oranında nem içeriğine sahip çini hammaddesinin kurutma davranışı konvektif bir kurutma fırında deneysel olarak incelenmiştir. Kurutmaya etki eden parametrelerin belirlenmesi için sıcaklık, bağıl nem ve kanal içi hava hızının değişiminin kurutma süresine ve kurutma davranışa etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada 10 cm x 10 cm x 1.2 cm, 10 cm x 10 cm x 1.0 cm ve 10 cm x 10 cm x 0.5 cm ölçülerinde hazırlanan kalıplar kullanılmıştır. Bu kalıplar ile ısı transferi tipinin kurutmaya etkisini belirlemek için üç farklı deneysel çalışma yapılmıştır. Bunlardan ilki yalnızca tek yüzeyden ısı transferi ve tek yüzeyden kütle transferinin incelenmesi için alt ve yan yüzeyi yalıtım malzemesinden yapılmış kalıptır. Bir diğeri, alt yüzeyi paslanmaz çelik saçtan yapılmış, üst yüzeyden taşınımla ısı transferi ve nem transferi olurken alt yüzeyden iletimle ısı transferinin incelendiği kalıptır. Sonuncusu ise her iki yüzeyden ısı ve kütle transferinin incelendiği kalıptır. Bu kalıplar vasıtasıyla aynı zamanda ürün kalınlığının kurutma süresine etkisi de incelenmiştir. Deneyler 45°C, 50°C ve 55°C sıcaklık, %30, %40 ve %50 bağıl nem ile 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.2 m/s, değerlerinde yapılmıştır. Elde edilen veriler literatürdeki matematiksel modeller ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda bu verilere bağlı olarak ürüne ait difüzyon katsayıları belirlenmiştir. Çalışmanın son kısmında ise ısı ve kütle transferi birlikte incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çini hammaddesi, kurutma, sıcaklık, bağıl nem, hız, kalınlık, ısı ve kütle transferi, matematiksel model, difüzyon katsayısı

EXAMINATION OF CINI TILES DRYING

Alişan GÖNÜL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Özden AĞRA

In this study, drying which is one of the most important stages of the Cini production process has been investigated. Drying kinetics of raw materials of Cini which contains moisture about 30% have been examined experimentally in a convective dryer. Effects of drying temperature, relative humidity and velocity on drying kinetics and drying times for raw materials were examined. Molds whose dimensions are 10 cm x 10 cm x 1.2 cm, 10 cm x 10 cm x 1 cm and 10 cm x 10 cm x 0.5 cm were used in the experimental study. Three different experiments were done with these molds in order to determine effects of heat transfer on drying characteristics of drying of raw materials. First, mold, whose bottom and side surfaces were insulated, was used to investigate heat and mass transfer from top surface only. Second, bottom surface was made of stainless steel and side surfaces were insulated mold was used to determine heat transfer with conduction along with the convection. The last one was used to determine both heat transfer and mass transfer from top and bottom surfaces. Also, the effect of thickness on drying time of raw material was investigated using these molds. Experiments carried out at temperatures of 45 ° C, 50 ° C and 55 ° C, at relative humidity of 30%, 40% and 50%, and velocities of 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s and 3.2 m/s. The data obtained from experimental studies has been compared with mathematical model in the literature. Also, diffusion coefficients have been determined according to data from experimental studies. In the last part of the study, simultaneous heat and mass transfer has been studied.

Keywords: Cini raw material, drying, temperature, relative humidity, velocity, thickness, heat and mass transfer, mathematical model, diffusion coefficient

GİRİŞ

Seramik endüstrisi dünyadaki her ülkenin en önemli sektörleri arasındadır. Ülkemizde seramik sektörünün dünyadaki öncü ülkelerinden biridir. Bugünkü anlamda seramik karo sanayii, 1956 yılında Çanakkale Seramik Fabrikaları'nın kurulmasıyla başlamıştır. 43 yıl içinde hızla büyüyen Seramik Kaplama Malzemesi Sektörü ile Türkiye, üretim bakımından 154 milyon m²/yıl ile dünyada 5., karo ihracatı bakımından 42 milyon m²/yıl ile dünyada 3. büyük ülke durumuna gelmiştir [1]. Her sektörde olduğu gibi seramik sektörü için de kaliteli ürünlere olan talep artmaktadır. Seramikler, kullanım alanlarına bağlı olarak temelde evsel kullanımda özellikle süs eşyası olarak kullanılan ve mimari uygulamalarda kullanılanlar olmak üzere ikiye ayrılabilir. Bu kapsamda özellikle mimari uygulamalarda karşılaştığımız ve "ince seramik" olarak ifade edilen seramikler yüksek kullanım oranları ile ön plana çıkmaktadır. Bu seramikler için son yıllarda malzeme kalitesi yönünden oldukça iyi gelişmelerin olduğu söylenebilmesine rağmen üretim yöntemlerinin halen eski üretim yöntemlerine paralel devam ettiği söylenebilir[2].

Seramik üretimi pek çok aşamadan oluşur. Bu aşamalardan pek çoğunda da kurutma işlemi uygulanır. Seramik ürünlerini uygulamada kullanım durumuna getirmek için öncelikle seramik yapısında kullanılan hammaddelerin belli oranda su ile karıştırılması, kurutulması ve kurutma yöntemine bağlı olarak tekrar tane küçültme yapılması ve istenen boyutları ayırtmak amacıyla özel delik boyutlarına sahip elekler kullanılarak elenmesi gerekir. İstenen boyutlara getirilen toz karışım tekrar bir miktar su ile karıştırılarak homojen bir yapı elde edilir. Elde edilen belli oranda nem içeriğine sahip ürün ekstrüzyon ile istenilen boyutlarda şekillendirilir. Bu işlem sonrasında elde

edilen ürün yarı mamul olarak tanımlanır. Bu şekillendirme sonucu elde edilen ürüne bisküvi adı verilir. Bu aşamada tekrar kurutmaya ihtiyaç duyulur. Aksi halde bu durumdaki ürünün doğrudan pişirme fırınına gönderilmesi sonucunda ürün içerisindeki nem direkt olarak buhara dönüşecektir ve içerisinde yüksek miktarda nem bulunan ürün iç ve dış yapısına oldukça zarar verecektir. Seramik üretiminde istenilmeyen bu durum ancak ürünün pişirme fırınına gönderilmesinden önce içerisindeki nem miktarının belli oranlara düşürülmesi ile sağlanır. Ürün kalitesini belirleyen en önemli aşama kurutmadır. Kurutma sonucunda ürün için büzülme meydana gelebilir. Bu durumu önlemenin en basit yöntemi kurutmanın mümkün olduğunca yavaş bir şekilde yapılmasıdır. Ancak bu yöntem ekonomiklik ve zaman açısından pek tercih edilmez. Hızlı kurutma için ise yüksek sıcaklıkların kullanılması gerekmektedir. Ancak bu seferde kurutulmuş ürünün yapısında kalıcı değişiklik, içyapıda oluşturduğu hatalar, renk değişimi gibi ürün kalitesini önemli miktarda azalttığı pek çok araştırmacı tarafından belirlenmiştir. Yapılan kontrollü bir kurutma işlemi ile seramiklerinin boyutsal değişimleri en asgari düzeye indirilir, ürün içerisinde homojen bir bağ yapısı oluşturulur ve dayanıklılığı arttırılır. Buna bağlı olarak üretim ve uygulama sonrası sıklıkla karşılaşılan çatlama problemi önemli miktarlarda azaltılır. Kontrollü kurutma yapılabilmesi için öncelikle ürünün kurutma davranışının belirlenmesi gerekmektedir.

Bir diğer önemli konuda kurutma proseslerinde enerjinin yoğun olarak kullanılmasıdır. Endüstride kullanılan enerjinin yaklaşık %15'ine yakını %25 ile %50 arasında ısı verimle kurutma proseslerinde kullanıldığı belirtilmektedir [3], [4]. Son yıllarda enerji kullanan tüm sektörlerin genel amacı, hem üretim maliyetini azaltmak hem de enerji tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının azaltarak çevresel etkilerin azaltılmasını sağlamaktır.

İçinde önemli miktarda nem bulunduran çini hammaddesi, yarı mamul ve mamullerin kurutulmasında; zaman, enerji, üretici firmaların rekabet ve marka değeri oldukça önemlidir. Bu tez çalışması kapsamında çini seramik hammaddelerinin kurutma karakteristikleri farklı kurutma şartlarına bağlı olarak incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Literatürdeki çalışmalar, farklı ürünler için kuruma kinetiğinin araştırılması, farklı kurutma yöntemleri, farklı kurutucu tipleri, kurutma fırınındaki hava akışının ve ısı transferinin CFD analizleri, kurutma için harcanan enerjinin azaltılmasına yönelik konularda yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların genel amacı, kurutulacak ürünün kurutma sonrası istenilen kalitedeki ürün özellikleri sağlayarak kuruma karakterinin belirlenmesi ve bu şartları sağlayacak kurutma sistemlerinin kullanılan enerjiyi göz önüne alarak maliyet ile enerji açısından optimizasyonları ve tasarımlarının yapılması şeklindedir [5]. Kurutma için yapılan çalışmalar kurutma prosesinin karmaşıklığı ve henüz geliştirilmiş bir matematiksel modelin olmaması dolayısıyla ağırlıklı olarak deneysel çalışmalar üzerine yoğunlaşmıştır. Deneysel çalışmaların genel amacı, ürünün kurutma verileri ve sorpsiyon kinetiğini belirlemek üzeredir. Literatürdeki çalışmalarının çoğu ince katmanlı sebze, meyve ve ağaç endüstrisine yönelik çalışmalardır. Seramik üzerine yapılan kurutma çalışmalarının diğer sektörlere nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise, seramik sektöründe bulunan firmaların genellikle küçük ölçekli firmalar olması ve Ar-Ge faaliyetlerini diğer sektörlere nazaran daha düşük seviyelerde tutmasıdır [2]. Literatür de seramik üzerine yapılan çalışmalar, kurutma kinetiği ve ürün içerisinde oluşan kurutma kaynaklı gerilmelerin incelenmesi şeklindedir.

1.1.1 Seramik Kurutma Üzerine Yapılan Çalışmalar

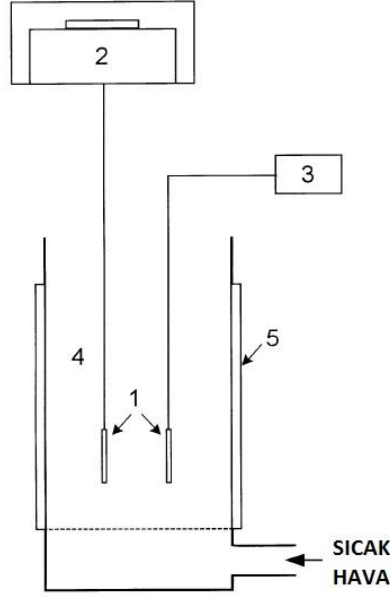
Briscoe vd. su bazlı seramiklerin yarı mamul sonrasında yapılan kuruma karakteristiklerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar kapsamında 25, 40, 55 ve 70 °C sıcaklık değerlerinde farklı oranlarda Al_2O_3 , bağlayıcı madde ve seyreltici madde karışımlarının kuruma kinetiğini incelemişlerdir. Deneyler sırasında ayrıca farklı numune kalınlıklarının, %40, %65 ve %90 oranındaki bağıl nem değerlerinin, hava debilerinin kurutma kinetiğine etkilerini irdelemişlerdir. Yarı mamul seramiklerin kurutmaya bağlı nem içeriklerindeki azalmanın büyük ölçüde doğrusal davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca bağlayıcı ve diğer maddelerin kurutma üzerine fazla bir etkisinin olmadığı ve kurutma boyunca tamamen su gibi davrandığı belirtilmiştir. Ayrıca difüzyon katsayısını belirlemişlerdir [6].

Ghosal vd. ileri seramik malzemelerin üretimde en yeni üretim şekillerinden biri olan jel döküm prosesiyle elde edilen numunelerinin kuruma kinetiğini incelemişlerdir. 10 cm çapında ve farklı kalınlıklarda oluşturulan deneysel numunelerin %45 sabit bağıl nem değerinde, dört farklı (40, 50, 70, 80 °C) sıcaklık değerleri için deneyler yapmışlardır. Deneyler her bir sıcaklık değeri için farklı numune kalınlıklarında (0.3, 0.5, 1.0 ve 1.7 cm) tekrarlanmıştır. Sonuç olarak kurutma kinetiğini üç aşamaya ayırmışlardır. Her aşama için ayrı ayrı bir boyutlu matematiksel modeller oluşturmuşlar ve deneysel sonuçlar ile mukayese etmişlerdir. Analitik çalışma ile deneysel çalışmaların oldukça yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [7].

Chemkhi vd. üç farklı sıcaklıkta (40, 50 ve 60 °C) üç farklı kil numunesinin desorpsiyon izotermlerini deneysel olarak belirlemişler ve GAB sorpsiyon modeline göre irdelenmişlerdir. Ayrıca farklı nem içeriklerinde killerin termodinamik fonksiyonlarını, ısı sorpsiyonlarını belirlemişlerdir [8].

Chemki ve Zagrouba üç farklı tipteki 15x12x1.5 cm boyutlarına sahip kil numunelerin kurutma kinetiğini konvansiyonel bir kurutucuda deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma, 2 m/s hava hızında 40, 50 ve 60 °C sıcaklığı ve %40 ile %60 bağıl nem şartları için yapılmıştır. Deneysel çalışmadan alınan sonuçlar ile difüzyon katsayılarını belirlemiştir ve deneysel veriler esas alınarak killerin sorpsiyon izotermlerini de belirlemişlerdir [9].

Sander vd. kilden üretilen kiremit levhaların konvansiyonel kurutmadaki kuruma kinetiklerini Fick eşitliği, Page, Tomas ve Skanski matematiksel modelleri ile ısı transferini ise Fourier yasalarına göre yaklaşık olarak belirlemişlerdir.



Şekil 1.1 Konvektif kurutucu şematik resmi [10]

(1. Deneysel numuneler, 2. Dijital tartı, 3. Dijital termometre, 4. Kurutma ünitesi, 5. Yalıtım)

Deneysel çalışmalar, Şekil 1.1'deki deney düzeneğinde yapılmıştır. Deneylerde başlangıç nem oranı %18-%22 arasında değişen 65x55x2 mm ebatlarındaki kuvars, kaolin, feldspat ve demir hidroksit içeren killer ile çalışmalar yapılmıştır. Kurutma sırasında büzülme etkisi de dikkate alınmış ve yaklaşık %7-8 lik bir büzülmenin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 60 °C nin altındaki sıcaklıklarda sabit bir kuruma periyodunun oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu sıcaklık değerinin üzerine çıktığı takdirde maksimum kurutma oranına 3-6 dakika gibi kısa bir sürede çıktığı için sabit kuruma oranının ortadan kalktığı belirtilmiştir [10].

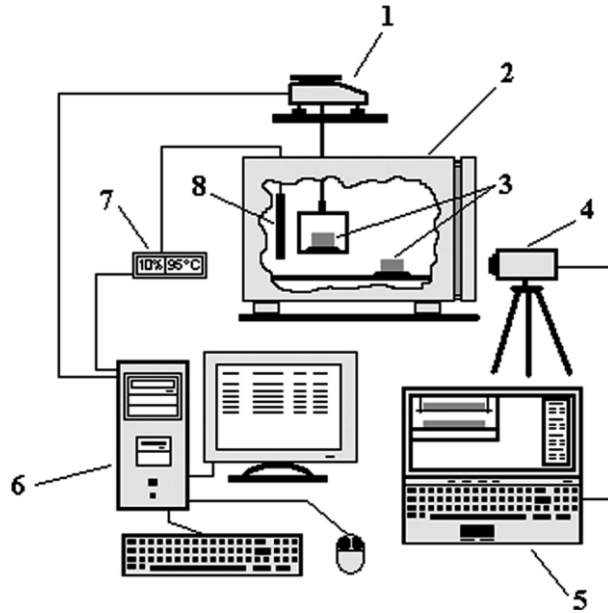
Silva vd. beş farklı sıcaklık değerinde(50, 60, 70, 80 ve 90 °C) başlangıç nem içeriği 0.23 olan yaklaşık boyutları 77x25x6 mm boyutlarındaki numunelerin difüzyonu belirlemek amacıyla üç boyutlu difüzyon denklemlerini uygulamışlardır. Difüzyon katsayısının yerel nem içeriğinin ve kurutma havası sıcaklığının fonksiyonu olarak ifadeler elde etmişlerdir [11].

Silva vd. konvektif kurutucu vasıtasıyla başlangıç nem içeriği 0.11 olan tuğla ve kiremit yapımında kullanılan kırmızı killerin referans alındığı ürünlerin kurutma kinetiğini incelemişlerdir. Deneyler 50 ve 90°C için yapılmış ve elde edilen deneysel veriler ile iki boyutlu difüzyon eşitliklerinin sayısal çözümleri karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışma için

sabit ve değişken etkin kütle transferi olmak üzere iki ayrı model önerilmiştir. Yapılan hata analizi sonucunda değişken etkin kütle transferinin sabit kütle transferine göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Sayısal çalışma sonucunda yerel nem içeriğine bağlı olarak etkin kütle transferini belirlemiştir. Ayrıca iki boyutlu difüzyon eşitlikleri ile üç boyutlu difüzyon eşitliklerinin yaklaşık aynı sonuçları verdiğini de çalışmada belirtilmiştir [12].

Utlu vd. örnek bir tesiste seramik üretimini enerji yönünden irdelemişlerdir. İncelenen üretim mekanizmasında öncelikle sprey kurutucu vasıtasıyla çamur halindeki ürün kurularak masse haline getirilmiş ve daha sonra dikey tip bir kurutucunun içerisine alınan %5-6 nem içeriğine sahip ürünün nem içeriği, yaklaşık % 1 civarına indirilmiştir. Seramik üretiminin son aşamasında ise yüzey işlemlerinin yapıldığı işlemler vardır. Her üç aşama için enerji-ekserji eşitlikleri yardımıyla sistemin performans analizi ve değerlendirmesi yapılmıştır [13].

Musielak ve Mierzwa başlangıç nemi %17 ile %37 arasında değişen belirli oranlarda karıştırılan kaolin ve kilden oluşan iki ayrı örnek için kurutma işlemini Şekil 1.2'deki kurutucuda incelemişler.



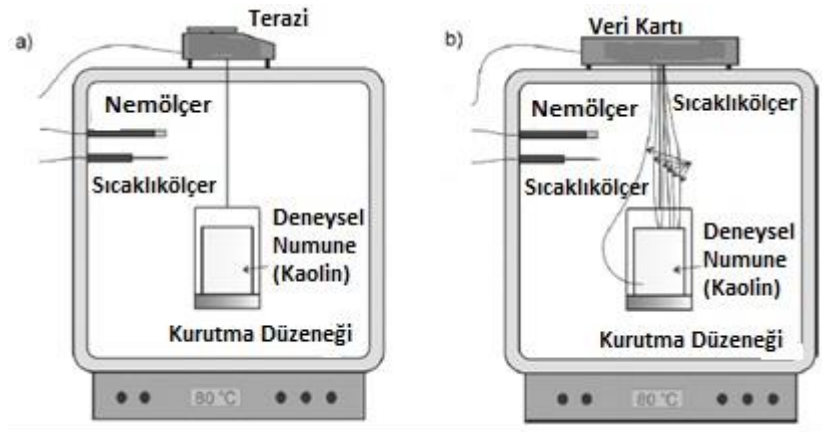
Şekil 1.2 Ölçüm işleminin şematik resmi [14]

(1.Dijital tartı, 2.Kurutma Sistemi, 3. Numuneler, 4.Kamera, 5.Veritoplayıcı, 6.Bilgisayar, 7. Dijital sıcaklık ve nem göstergesi, 8. Sıcaklık ve nem sensörü)

120x20x15 mm boyutlarında hazırlanan deneysel numunelerin, üç farklı konumda kuruma ve buna bağlı deformasyonlarını kamera yardımıyla incelenmişlerdir(Şekil 1.2).

(a) konumunda iki taraflı taşınımın olduğu, (b) konumunda ürünün alt kısmında kısmi yalıtımın yapıldığı, (c) konumda ise ürünün alt kısmının tamamıyla yalıtılmış durumudur. Tüm örneklerin kurumanın başlangıcında kenarlardan hızlı kurumaya bağlı olarak U şeklini aldığını belirtmişlerdir. Genel olarak tüm konumlarda kuruma eğrisinin benzer davranış gösterdiğini yani yalıtımın konvektif kurutma üzerine pek bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca beklendiği üzere kurutmaya bağlı büzülmeyle ürünün kısalacağını da ifade etmişlerdir. Daha sonra kurutma sonrası malzemede oluşan gerilmelerde incelemişlerdir [14].

Kowalski vd. hem sabit şartlarda hem de değişen kurutma şartlarında silindirik olarak şekillendirilmiş kaolin ürünlerinin kurutma sırasındaki ısı ve kütle transferleri için matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Modelden aldıkları veriler ile Şekil 1.3'de gösterilen deney düzeneğinde yapılan deneysel çalışmaları karşılaştırmışlardır. Deneysel numuneler, 0.03 m yarıçapında ve 0.06 m yüksekliğinde hazırlanmış ve üç farklı sıcaklıkta (50, 60, 80 °C) deneyler yapılmıştır.

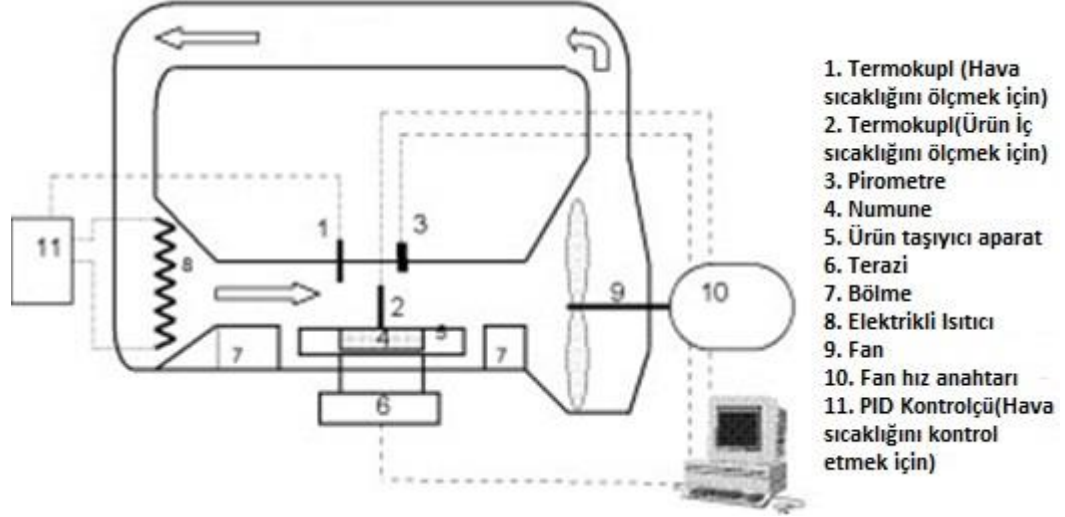


Şekil 1.3 Deney tesisatının şematik gösterimi [15]

a) düzeneğinde örnek numunelerin kuruma kinetiği belirlenirken, b) düzeneğinde kaolin ürünü içerisindeki sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ile önerilen modelin uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir [15].

Derdour vd. alçıdan yapılmış düz numunelerin kurutmaya bağlı ürün iç yüzeyindeki değişimini, ısı ve kütle transferi bakımından incelemişlerdir. Yaptıkları sorpsiyon

deneyleri sonucunda ürünlerin hidroskopik yapıya sahip olmadıklarını belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında farklı sıcaklık ve hava hızlarıyla Şekil 1.4'te görülen test düzeneği vasıtasıyla deneyler yapmışlardır.

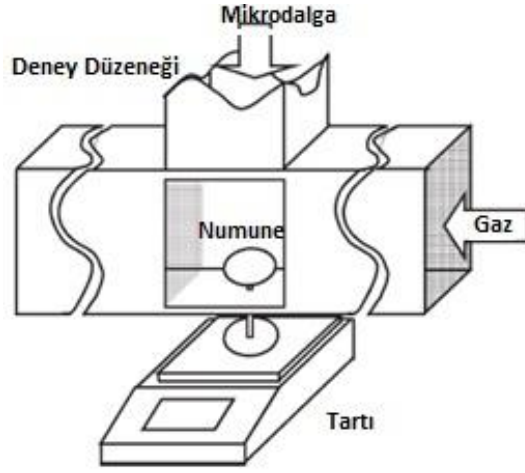


Şekil 1.4 Deney düzeneği [16]

Ürün içerisindeki nem içeriğinin değişimi üzerine bir model önermişler ve bu model ile deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve önerilen model ile deneysel çalışmaların uygun sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir [16].

Harun vd. 227x104x32 mm ölçülerindeki seramik numuneleri üzerinden konvektif kurutmaya bağlı olarak ısı ve kütle transferini belirlemeye yönelik çalışmalar yapmışlardır [17].

Itaya vd. 100 ila 1000 W arasında değişen ısı gücü aralığında 60x60x10 mm boyutlarındaki seramik plakaların numunelerinin mikrodalga kurutmadaki karakteristiklerini incelemişlerdir.



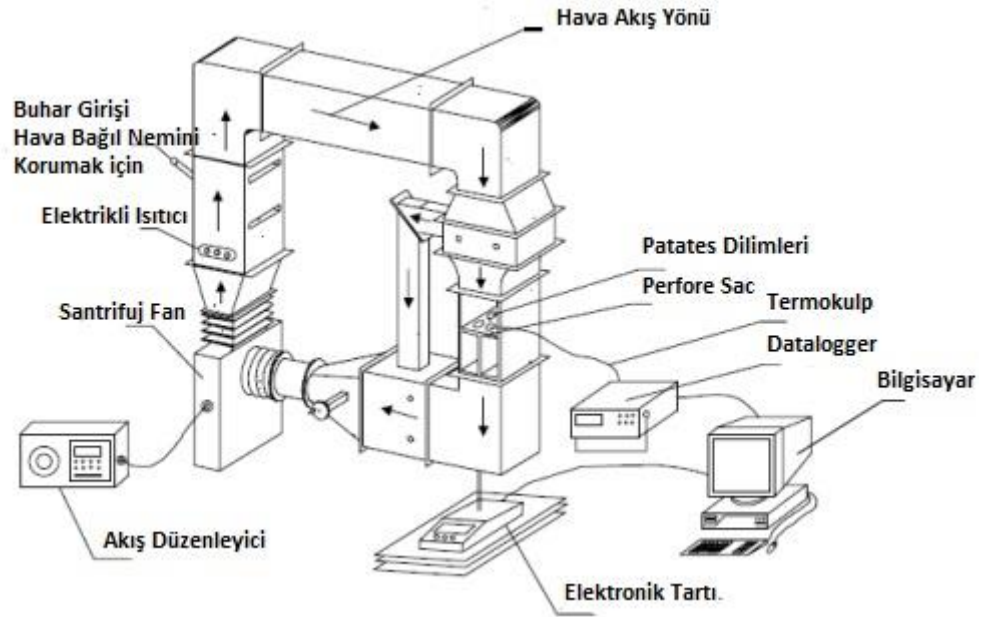
Şekil 1.5 Deney düzeneği şematik resmi [18]

Yaklaşık 100 °C sıcaklığa kadar mikrodalga ile kurutma sonucunda oluşan çatlakların az seviyede olduğu, bu sıcaklık seviyesine kadar yapılan kurutmanın gayet başarılı olduğunu belirtmişlerdir [18].

1.1.2 Kurutma Üzerine Yapılan Sayısal ve Analitik Çalışmalar

Literatürde, kurutmaya bağlı ürün içindeki nem içeriğini ve sıcaklık dağılımını bulmaya yönelik deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal ve analitik çözüme yönelik pek çok çalışma vardır. Bunlardan bazıları,

Hassini vd. patatesin nem difüzyonunu ve büzülmenin kurumaya etkisini bulmaya yönelik deneysel, sayısal ve analitik çalışmalar yapmışlardır. 45x20x10 mm boyutlarında hazırlanan numunelerin Şekil 1.6'da görülen deney tesisatında, farklı iki hava hızı(0.5 ve 1.0 m/s) ve dört ayrı sıcaklık değeri (40, 55, 70 ve 85 °C) için deneyleri yapılmıştır. Deneysel veriler, Fick difüzyon metodu, kütle dengesine ve büzülmeye bağlı oluşturulan sayısal metotla karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.6 Patatesin kuruma kinetiğini belirlemeye yönelik kurulan deney tesisatı [19]

Çalışma sonucunda sebze ve meyvelerin büzülme etkisinin dikkate alınmasının önemli olduğunu belirtmişler ve difüzyon katsayısının belirlenmesine yönelik bir matematiksel model önermişlerdir [19].

Wang ve Brenan patates ürünleri referans alınarak düz şekildeki cisimlerin sıcaklık ve nem değerlerinin kurutma sırasındaki değişimini tahmin etmek için Crank ve Nicolson [20] tarafından önerilen sonlu elemanlar esasında oluşturulmuş bir matematiksel model önermişlerdir. Elde edilen deneysel veriler ile sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir [21].

Kechaou ve Maâlej tarafından Tunus hurması için ideal kurutma şartlarını belirlemek amacıyla sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Silindirik şekildeki numunelerden aldıkları deneysel verilerle oluşturulan eğriler ile sıcaklık ve bağıl neme dayalı nem difüzyonunu belirlemek amacıyla Fick's difüzyon modeli temelinde büzülmeyi de dikkate alan matematiksel model önermişlerdir [22].

Bu çalışmalara ek olarak literatürde kurutma çalışmalarında sıklıkla nem içeriğinin zamanla değişimini modellemeye yönelik olarak kullanılan amprik ve yarı amprik matematiksel modeller bulunmaktadır. Özellikle ince kalınlıktaki ürünlerin zamana bağlı nem değişimini belirlemede kullanılırlar. Bu modellerden bazıları Çizelge 1.1'de görülmektedir.

Çizelge 1.1 İnce cisimlerin kurutma kinetiği için önerilen modeller

No	Model Adı	Eşitlik	Referans No
1	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[23]
2	Henderson ve Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[24]
3	Logaritmik	$MR = a \exp(-kt) + c$	[25]
4	İki Terimli Model	$MR = a_1 \exp(-k_1t) + a_2 \exp(-k_2t)$	[26]
5	Midilli vd.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	[27]

Ayrıca benzer şekilde ürünlerin difüzyon katsayısını bulmaya yönelik çalışmalarda bulunmaktadır. Difüzyon katsayısının bulunmasında yönelik prosedür Bölüm 5.3'de açıklanmıştır. Çizelge 1.2'de farklı literatürde karşılaşılan kurutma havası şartlarına bağlı bazı ürünlerin difüzyon katsayıları görülmektedir.

Çizelge 1.2 Kurutma Havaına Bağlı Kurutma Karakteristikleri ile Difüzyon Katsayısı

Ürün	T(°C)	ϕ (%)	u (m/s)	D_{eff} (m ² /s)	Referans
Kil	40-60	30-60	-	$2 \times 10^{-7} - 3 \times 10^{-9}$	[9]
Kil	40-70	40-70	1-1,5-3	$10^{-7} - 10^{-12}$	[28]
Üzüm	20-45	60-80	0,6	$10^{-10} - 10^{-16}$	[29]
Zeytin Posası	50-90	-	-	$1.71 \times 10^{-9} - 2.03 \times 10^{-9}$	[30]
Şeftali	45-55	-	0,8	$3.04 \times 10^{-9} - 4.01 \times 10^{-9}$	[31]
Hurma	50-70	-	2	$2.34 \times 10^{-10} - 7.05 \times 10^{-11}$	[32]
Dut	50-80	-	1	$2.23 \times 10^{-10} - 6.91 \times 10^{-10}$	[33]
Kiraz	60-75	-	2	$5.68 \times 10^{-10} - 1.54 \times 10^{-9}$	[34]
Vişne	50-65	-	2	$1.42 \times 10^{-10} - 6.42 \times 10^{-9}$	[35]
Domates	40-80	-	0.4-0.8	$1.82 \times 10^{-10} - 9.122 \times 10^{-10}$	[36]
Domates	55-70	-	2	$5.65 \times 10^{-10} - 7.63 \times 10^{-10}$	[37]
Kivi	30-90	-	2	$3.0 \times 10^{-10} - 1.72 \times 10^{-10}$	[38]
Brokoli	90	-	2.7	2.27×10^{-9}	[39]
Elma	40-60	-	0.5	$2.27 \times 10^{-10} - 9.67 \times 10^{-10}$	[40]
Havuç	35-55	-	0.2-0.4	$1.26 \times 10^{-9} - 2.20 \times 10^{-9}$	[41]
Ayva	35-55	-	0.2-0.4	$0.65 \times 10^{-10} - 6.32 \times 10^{-10}$	[42]
Balkabağı	50-60	25-35	1	$3.88 \times 10^{-10} - 9.38 \times 10^{-10}$	[43]
Siyah çay	80-120	-	0.25-0.65	$1.14 \times 10^{-11} - 2.99 \times 10^{-11}$	[44]

Dinçer boyutsuz nem içeriğinin zamana bağlı değişim grafikleri üzerinden doğrusal olmayan regresyon analizi yaparak oluşan matematiksel ifadeye bağlı olarak ürünlerin difüzyon katsayısını ve kütleli taşınım katsayısını belirlemeye yönelik korelasyonlar

önermiştir. Bu kapsamda literatürden alınan küresel, silindirik, düz ve düzensiz şekle sahip katı ürünlerin verileri üzerinden difüzyon katsayısını ve taşınım ile kurutmaya bağlı olarak oluşan kütle taşıma katsayısını belirlemişlerdir [45], [46], [47], [48].

Literatürde kurutma üzerine gıdadan tekstile, ilaçtan keresteye kadar pek çok çalışma yapıldığı görülmektedir. Diğer çalışmalara nazaran daha az olmakla birlikte seramik üzerine de pek çok çalışma olmasına rağmen çini seramiklerinin kurutma karakteristiklerinin incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

1.2 Tezin Amacı

Kurutma, katı ortamlardan eş zamanlı oluşan ısı, kütle ve momentum ilişkileri açıklamada kullanılan matematiksel ifadelerin yetersizliği ve zorluğu dolayısıyla en az anlaşılan ve en karmaşık işlemlerden birisidir [48]. Bu yapıyla birçok bilim insanının yıllardır ilgisini çekmiş ve hala da çekmeye devam etmektedir. Öncelikle deneysel çalışmalar için kullanılacak olan konvektif kurutma sisteminde istenilen kurutma havasının sıcaklık ve bağıl neminin belirlenmesi ve buna göre atmosferik havanın şartlandırılması gerekmektedir. Şartlandırılmış havanın proses boyunca sürekli istenen değerlerde tutulması ürünün homojen kuruması açısından oldukça önemlidir. Atmosferik havanın şartlandırılması, sıcaklığının arttırılması, azaltılması ve bağıl nem değerinin değiştirilmesi için nem alınması veya verilmesi işlemleri ile sirkülasyon havasının hız değerlerinin değiştirilmesini kapsar. Sabit değerlerde farklı hava şartlarında yapılan kurutma işlemi ile elde edilen kurutma eğrileri, ürün kalitesini değerlendirmede ve tasarlanacak kurutma sistemlerinin enerji, maliyet vb. parametrelere göre analiz edilmesi yönünden önemlidirler.

1.3 Hipotez

Bu çalışma ile ülkemizin tarihinde ve seramik sektöründe önemli bir yer tutan çini seramiklerin kuruma karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenerek ürün kalitesinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir, kullanılacak kurutma sisteminin enerji, zaman ve maliyet açısından optimum tasarlanması sağlanabilir.

BÖLÜM 2

ÇİNİ ÜRÜNLERİ

Çini sanatı; içi, dışı veya tek yüzü sırlı, sır altı boylarıyla dekore edilerek geleneksel motiflerle süslenmiş, mimariye bağlı olarak gelişen bir sanat türüdür [49]. Çini seramiği, yüksek oranda kuvars, bir miktar kil, felspat, kaolin madenlerinin birbiri ile iyice karıştırıldığı sonrasında ısıtma işlemlerinin uygulanarak şekillendirildiği ve üzerine özel desenlerin işlendiği seramik türüdür. Çiniler genel olarak ikiye ayrılır.

- Batılıların Tile-art dedikleri, eskilerimizin ise kaşi olarak adlandırdıkları duvar çinileri,



Şekil 2.7 Duvar çinisine bir örnek

- Evani denilen tabak, vazo, sürahi, süs eşyaları gibi ürünleri kapsayan ve kullanım çinileri şeklinde ifade edilen çinilerdir.



Şekil 2.8 Kullanım çinilerine örnekler
(a) Tabak (b) Vazo

Çini ortaya koyduğu çok renkli geniş yüzey alanlarını kaplama özelliği ve kalıcılığı ile Türk süsleme sanatının en önemli unsuru ve malzemesi olmuştur. Çini süslemenin önemi, üç ana özelliği ile açıklanmaktadır:

- ❖ Çok renklilik: Çini süsleme ile renk unsuru çok renkli olarak mimari ifadeye katılan bir boyuttur.
- ❖ Geniş yüzey alanlarını kaplama özelliği: Genellikle kare levhalar halinde yapılan çiniler süsleme materyalini vermektedir. Birkaç metrelik panolar halinde hazırlanan düzenlemeler yanında özellikle tekrarlanan süslemenin yer aldığı geniş yüzey alanı kaplamıştır.
- ❖ Kalıcılık: 900° dolaylarında bir ısıda fırınlarda pişirilen çini levhalar, çiniyi süslemenin en kalıcı unsuru haline getirmiştir. Çini üzerinde yer alan süsleme desen olarak sonsuzluğa uzanan bir süreklilik kazanmaktadır [49].

2.1 Tarihçe

Seramik kullanımının, yapılan kazı çalışmaları sonucunda M.Ö. 3000'e kadar uzadığı belirlenmiştir. Çinicilik ise çok daha eski tarihlere, Asurlular zamanına kadar dayanan bir doğu sanatıdır [49]. Antik çağda Mısır, Mezopotamya, İran ve Girit kültürlerinde

mimari bezeme ögesi olarak çini kullanılmıştır. Orta Asya'da bulunan Kaşan şehri sebebiyle Kaşi diye adlandırılan çinilere ilişkin bu şehirde, Turfan, Aşkar ve Koça bölgelerinde yapılan kazılarda bulunan fırın artıkları ve parça çiniler, Türklerin çok eski devirlerde, 8. yüzyıldan önce çiniyi bir sanat dalı olarak ele aldıklarını gösteren verileri barındırmaktadır. Bu tarihler itibariyle Türk tarihindeki ilk örnekleri Uygurlar döneminde olduğu düşünülmektedir. Sonraki dönemlerde ise ilk Müslüman devleti Karahanlılar 10. yüzyılda mabetlerinde çini ürünlerini sıklıkla uygulamaya başlamışlardır. Selçukluların Bizanslıları yenerek Anadolu'ya yerleşmesi ile bu topraklar artık hem Selçukluların hem de çininin ana vatanı haline gelmiştir. Bu topraklardaki çini sanatı, 13. yüzyılda Selçuklu mimarisinin doruğa ulaştığı dönemde gelişmiş ve buna bağlı olarak da pek çok camii, medrese, türbe ve saray duvarları çinilerle bezenmiştir. Başlıca turkuaz, kobalt ve mor renklerin kullanıldığı geometrik desenli çini ve çini mozaikler iç mekânlarda tercih edilirken, dışta da sırlı veya sırsız tuğlalar kullanılmıştır. Figürlü sanat eserlerini kullanmaktan çekinmeyen Selçuklu sanatkarlar özellikle hayvan tasvirlerinde çok başarılı olmuşlardır. Anadolu Selçukluları ile çok yaygın ve çeşitli tipteki mimari yapıtlar üzerinde büyük bir gelişme göstererek varlığını günümüze kadar sürdüren çini süslemesinde, her dönem, bir önceki dönemin teknik üstünlüğünü sürdürmekle birlikte yeni teknik buluş ve renklerle bu sanatı zenginleştirmiştir. Örneğin Selçuklu çinileri kare, dikdörtgen veya altıgen şekillerinde hazırlanıp, yüzlerinde mavi lacivert, toprak sarısı, turkuaz, siyah, kahverengi gibi sırla karıştırılmış renklerle boyanıp pişirilmiş olup, alçı veya horasan harç üzerinde applike edilmiş, mozaik şeklinde yapılmış süslemelerdir. 14. yüzyıl itibariyle Osmanlı döneminde de bu gelenek zenginleşerek devam etmiştir. 15. ve 17. yüzyıllarda İznik bölgesi çiniciliğin ve seramik üretiminin merkezi durumuna geçmiştir.

Çini uygulamaların Türk tarihinde önemli örnekler arasında,

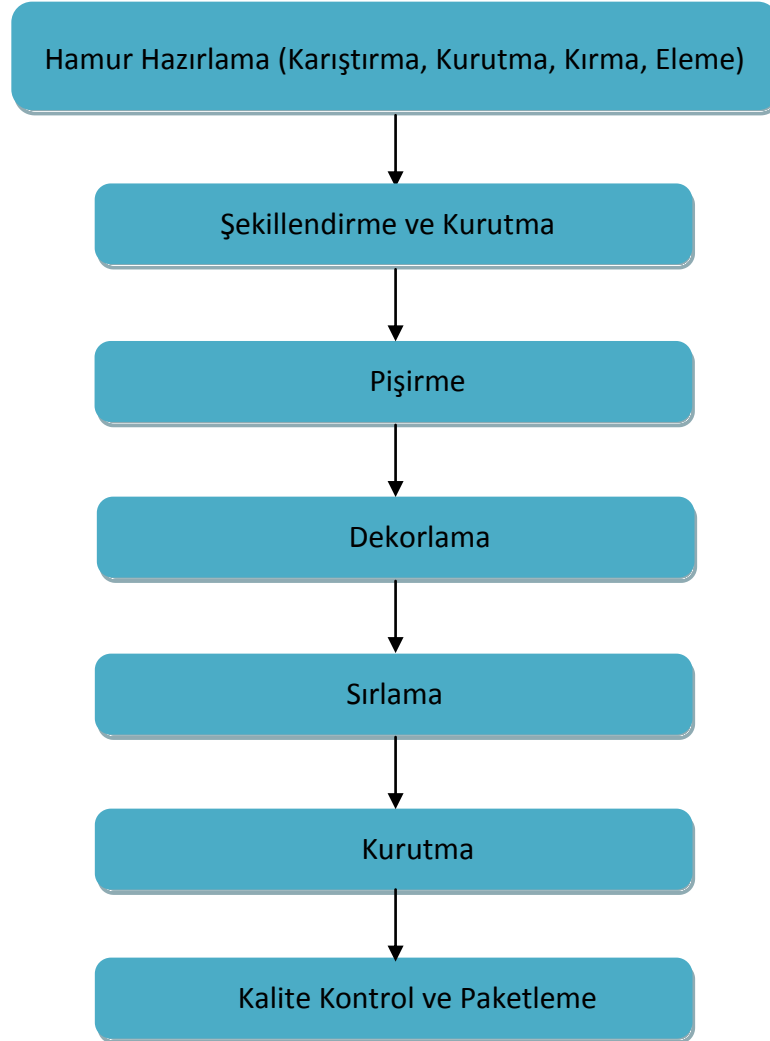
- İzzeddin Keykavus Türbesi (Sivas)
- Gök Medrese (Sivas)
- Ulu Camii (Malatya)
- Alaaddin Camii (Konya)
- Karatay Medresesi (Konya)
- İznik Yeşil Camii (Bursa)

- Yeşil Cami ve Türbesi (Bursa)
- Muradiye Camii (Edirne)
- Mahmut Paşa Türbesi (İstanbul)
- Çinili Köşk (İstanbul) gösterilebilir.

Günümüzde ise özellikle İznik ve Kütahya merkezli olarak üretimi yapılmaktadır. Ayrıca diğer seramik fabrikaları Bilecik, Eskişehir, Çanakkale, İzmir, Uşak, Manisa gibi Batı Anadolu bölgesinde ve hammadde yataklarına yakın yerlerde kurulmuştur [49]. Ürünler metro istasyonlarından evsel kullanıma, camilerden otellere değin çok geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır.

2.2 Çini Yapısı ve Üretimi

Çiniyi diğer seramiklerden ayıran en büyük hamurunun çok yoğun kuars-kuarsit içermesidir. Çinin genel olarak hazırlanış prosedürü,



3.1 Kurutmanın Tanımı ve Mekanizması

Kurutma; ısı işlemler uygulanarak katı, sıvı ve gazlardan sıvı maddelerin(özellikle su) istenilen oranlara ulaşıncaya kadar uzaklaştırılması işlemi olarak tanımlanabilir. Kurutma terimi en fazla katı maddelerin sahip olduğu nemin uzaklaştırıldığı proseslerde karşımıza çıkmaktadır.

Kurutma, ısı ve kütle transferinin eş zamanlı meydana geldiği kompleks bir prosesdir. Bu proses iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada iletim, taşınım, ışınım, elektromagnetik alan veya bunların birlikte kullanıldığı kombinasyonlar ile elde edilen enerji(özellikle ısı enerjisi) ürün yüzeyine ulaşır. Öncelikle ürün yüzeyinden bulunan nem uzaklaştırılır. Daha sonra ürünün iç kısımlarında bulunan nemin difüzyon ile kontrasyon farkına bağlı olarak yüzeye doğru hareketi oluşur. Böylelikle yüzeye ulaşan nem ilk aşamadaki şekilde üründen uzaklaştırılır. Isı iletim, taşınım ve/veya ışınım ile ürüne ulaşır ise ürün içerisindeki sıcaklık gradyeni yüzeyden ürün iç kısımlarına doğru artarak devam eder. Ancak elektromagnetik alan ile sağlanan ısıya bağlı sıcaklık ürün içerisinde ürün yüzeyine doğru artmaktadır.



Şekil 3.1 Isı ve Kütle Transferinin Tek Yüzeyden Kurutmada Şematik Gösterimi

Kurutma prosesine etki eden faktörler iç ve dış olmak üzere iki gruba ayrılabilir: iç faktörler; kurutulan ürüne ait özellikler olup, ürünün termofiziksel özellikleri, parçacık boyutu, katının gözenekliliği, kuruma sırasında ürün yüzeyinin sertleşmesi, ürünün başlangıç nem içeriği, su aktivitesi ve difüzyon katsayısını kapsar. Dış etkenler ise; sadece kurutma havasıyla ilgilidir. Kurutma işleminde uzun yıllardan beri süregelen temel araştırma alanı; ürünün kuruma karakteristiği, kurutma havası koşulları, kurutucu tipleri, enerji maliyeti ve ürünün kalitesini etkileyen parametrelerin belirlenmesi olmuştur [52].

3.2 Kurutma Yöntemleri

Bilinen en eski kurutma yöntemi güneş altında kurutma işlemidir. Zaman içerisinde kurutulan ürün kalitesi göz önüne alınmaya başlandığında bu yöntem ile yapılan kurutmanın pek çok dezavantajının olduğu belirlenmiştir. Bunların arasında,

- ✓ Kurutulan ürünlere toz, kir, çöp, böcek gibi istenmeyen partiküllerin karışması,
- ✓ Değişken hava şartlarına bağlı homojen kurumanın sağlanamaması,
- ✓ Kuruma süresinin yüksek olması,
- ✓ Kurutma havasının bölgesel ve mevsimsel olarak farklılık göstermesi,
- ✓ Belirli sıcaklık değerlerinin üzerine çıkılamaması ve bağlı nem değerlerinin istenen değerlerde tutulamaması gösterilebilir.

Bu sebepler dolayısıyla kurutma amacıyla farklı yöntemler geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Bunlardan özellikle seramik endüstrisinde yaygın olarak kullanılanlarından bazıları,

- Tünel Tip Kurutucular,
- Döner Tip Kurutucular,
- Akışkan Yataklı Kurutucular,
- Mikrodalga Kurutucular,
- Sprey Kurutucular,
- Flaş(Alev) Tip Kurutucular,
- Yüksek Frekanslı Kurutucular,
- Isı Pompalı Kurutucular,

şeklinde ifade edilebilir.

3.2.1 Taşınım ile Kurutma Yöntemi

Kurutma işlemi, ürün yüzeyinden geçirilen belli bir sıcaklığa ulaşmış hava tarafından sağlanır. Sıcak akışkanın kurutulacak ürün yüzeyindeki neminin buharlaştırılarak kurutma ortamından uzaklaştırılması prensibine dayanır. Bu tarz kurutma yönteminde hava, N₂ benzeri inert gazlar, yanma sonu oluşan gazlar, aşırı kızdırılmış buhar sıcak akışkan olarak kullanılabilir.

Kurutma, ürün nem içeriği, porozitesi gibi içyapı özellikleri ve kurutma havasına bağlı ürün dışı parametrelerine bağlı olarak iki kısımda incelenebilir. Genel olarak taşınım ile yapılan kurutma prosesinde kurutma performansını etkileyen önemli parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Proses havası değişkenleri;

- Hava debisi,
- Hava sıcaklığı,
- Havanın bağıl nem değeri,

Ürün değişkenleri;

- Ürün başlangıç ve son nem içeriği,
- Ürün boyutları ve yapısı,

Boyutsal değişkenler;

- Kurutucunun genişliği ve yüksekliği,
- Kurutucunun boyu ve geçiş sayısı,

- Kurutucu konfigürasyonu,

Taşınım ile yapılan kurutma, endüstrinin pek çok alanında sıklıkla kullanılan en eski ve en yaygın kurutma yöntemlerinden biridir. Tünel tip kurutucular, sprey kurutucular, akışkan yataklı kurutucular gibi kurutucular bu yöntem temelinde çalışmaktadır. Dondurarak kurutmada taşınım ile yapılan özel bir kurutma şeklidir. Yapılan bu tez kapsamında da uygulama kolaylığı, işletme masraflarının düşüklüğü vb. sebepler dolayısıyla sıklıkla kullanılan ve kurutma proseslerinde en çok karşılaşılan kurutma yöntemi olan taşınım ile kurutmaya bağlı deneyler yapılmıştır.

3.2.2 İletimle Kurutma Yöntemi

İletim ile yapılan kurutma yöntemidir. Bir diğer tabirle indirekt kurutma yöntemi olarak da adlandırılır. Genellikle ince kalınlıklara (özellikle kâğıt endüstrisi) sahip ürünlerin kurutulmasında kullanılır. Ürün içeriğinden nemin uzaklaştırılması amacıyla gerekli olan ısı belli bir sıcaklığa sahip bir yüzeyden sağlanır. Bu yüzey ile kurutulacak ürün yüzeyinin temasına bağlı olarak ürün içerisinde sıcaklık gradyeni oluşturulur. Bu sıcaklık gradyeni dolayısıyla ürün içerisindeki nem yüzeye doğru hareket eder. Kurutmanın başlangıcında yüzeyde bulunan ve sıcaklık gradyenine bağlı olarak yüzeye çıkmaya zorlanan nem gaz akımı veya vakumla kurutucu yüzeyinden uzaklaştırılır. Burada dikkat çeken vakumla kurutma yöntemi düşük basınçlarda ve sıcaklıklarda ısıya duyarlı ürünlerin kurutulmasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Döner tip kurutucular ileletim ile kurutmanın tipik örnekleri arasındadır.

İletim ile kurutmada; yüksek kurutma hızı ve sabit bir ısı ve kütle transferi koşulları sağlanamaz, ağ boyunca zayıf bir nem profili oluşur, sistem istenildiği gibi kontrol edilemez, işletilmesi genelde pahalıdır, makina etrafında istenmeyen çalışma koşulları oluşur [53].

3.2.3 Radyasyonla Kurutma Yöntemi

Bu tür kurutma proseslerinde ısı, kızıl ötesi lambalar, elektrikli ısıtıcılar, buhar ısıtmalı kaynaklar gibi sistemler aracılığıyla oluşturulur [53]. Mikrodalga ile kurutma en tipik örneğidir. Bu mekanizma ile yapılan kurutmada ısı malzeme yüzeyine yakın kısımları ısıttığından ince katmanlı ürünlerin kurutulmasında tercih edilmelidir.

3.3 Kurutma Eğrileri

Bir kurutma prosesinde kurutulan ürünün nem içeriğiyle kuruma süresine bağlı ilişkiler kurutma eğrileri vasıtasıyla sağlanır. Genelleştirilmiş kurutma eğrileri modelinde, kurutma koşullarından, partikül geometrisinden ve kurutulmuş olan gıda ürününden bağımsız kurutma parametreleri olarak gösterilmektedir ve sadece ürünün nem içeriğinin bir fonksiyonudur. Deneysel olarak elde edilen parametreler, kurutma işlemi boyunca ürünün nem içeriğini belirlememizi sağlar [54].

Şekil 1.1 de konvektif kurutmayı karakterize eden kurutma eğrileri görülmektedir. Taşınım ile gerçekleştirilen kurutmada kurutmanın dört evrede gerçekleştiği görülür.

A¹-A aralığı, ürün yüzey sıcaklığıyla kurutma havasının dengeye geldiği aralık olarak tanımlanabilir. Bu bölgede kuruma hızı ve ürün yüzey sıcaklığının hızlı bir şekilde artışı gözlemlenir. Kurutmanın birinci evresi olarak nitelendirilir. Bu bölge kurutmada süre olarak en hızlı geçilen bölgedir. Kurutma için verilen ısı enerjisi yüzeyde bulunan nemin buharlaştırılmasında kullanıldığı için ürün sıcaklığında kayda değer bir artış gözlenmez. A¹-B aralığı genellikle A-B şeklinde doğrusallaştırılarak B-C bölgesine katılır. Böylelikle teorik çalışmalar sırasında hesaplamalara tek bir bölge olarak katılır.

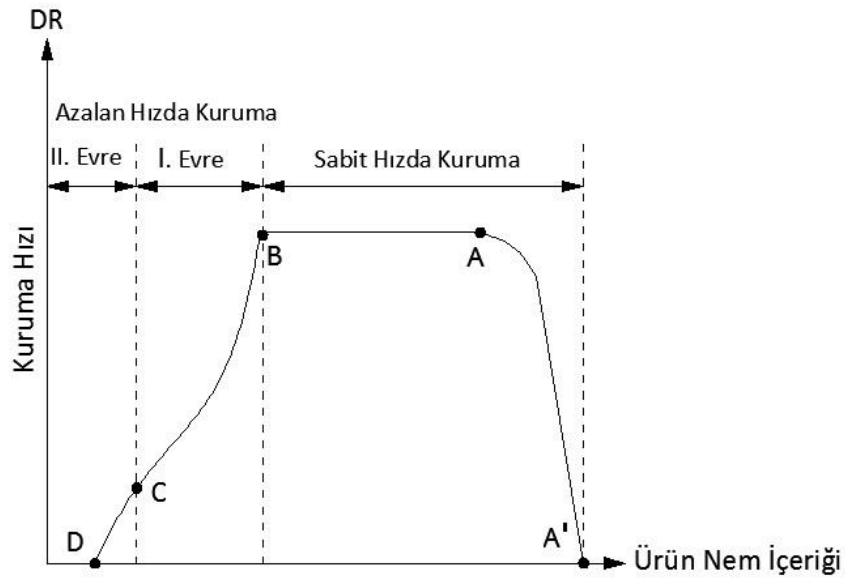
A-B aralığı, sabit hızda kurutmanın gerçekleştiği bölgedir. Kurutma prosesinde en kolay ve en hızlı uzaklaştırılan nem yüzey ve yüzeye yakın bölgelerden gerçekleşir. Bu süreçte ürün içerisindeki difüzyonun dikkate alınmaz ve bu aralıkta kurumanın tamamen dış hava şartlarına bağlı olduğu düşünülür. Katının iç kısımlarındaki suyun hareketi katının yüzeyini su buharı ile doymun hale getirmek için yeterli derecede hızlıdır. Bu durumda kuruma hızı katı yüzeyine yapılan ısı transferi ile kontrol edilmiş olur. Böylece kuruma işlemi, katı maddenin yüzeyindeki buharlaşan su buharının sabit bir hava filmi içerisinde geçerek difüzyonla transferi gerçekleşir [54].

B-C aralığı, ürün yüzeyindeki nemin, ürün yapısı ve kurutma havası şartlarına bağlı olarak bitmesi ile başlayan aralıktır. Bu sürecin başladığı C ile gösterilen noktadaki nem miktarına **kritik nem** adı verilir. Bu nokta sabit hızda kurutmanın bittiği azalan hızda kurumaya geçildiğini gösteren bölgedir. Ürün yüzeyindeki nemin bitmesine bağlı olarak sıcaklık gradyeni ürünün iç kısımlarına doğru oluşmaya başlar. Ürün sıcaklığının artması ile oluşan konsantrasyon farkı ürün içerisindeki nemin konsantrasyonun daha düşük olduğu yüzeye doğru hareket etmeye zorlar. Katı ortamda difüzyon etkisinin görülmeye

başlandığı bölgedir. Bu aşamadan itibaren yüzey sıcaklığının sürekli arttığı gözlenir. Bu aralıkta ürünün kuruma hızını belirleyen faktörler porozite, kılcal kanallar gibi ürün yapısına bağlı olarak ortaya çıkan kuvvetlerdir.

C-D aralığı, ise azalan hızda kurumanın son aşamasıdır. Bu aralıkta kurumada kurutma havasının etkisi çok düşüktür. Ürün içindeki nemin yüzeye olan difüzyonu oldukça yavaş şekilde gerçekleşir. Bu aşamada ürün ile kurutma havası bir dengeye ulaşır. Bu andan itibaren ürün etrafındaki kurutma havasının parametreleri sabit tutulduğu sürece ürün nem içeriğinde bir değişim gözlenmez. Bu şartlar altındaki ürün nemine 'ürün denge nemi', hava nemine de 'denge bağıl nemi' adı verilir. Bir ürünün denge nemleri deneysel olarak belirlenir [55].

Genel olarak kurutma eğrileri ifade edilecek olursa A¹-B aralığı sabit hızda kurutmanın gözlemlendiği ve kurutmanın ağırlıklı olarak kurutma havası parametrelerine bağlı olduğu aralıktır. B-D aralığında ise kurutmanın hızının azaldığı ve kurutmanın ürün yapısına bağlı olarak gerçekleştiği bölgedir.



Şekil 3.2 Kuruma Hızı ile Ürün Nem İçeriğinin Değişimi

Bu eğrileri oluşturmak için öncelikle ürünün kütlesinin hesaplanması gerekmektedir. Bu kapsamda karşımıza nem miktarının yaş veya kuru madde miktarına göre hesaplanması gerekmektedir. Toplam kütle

$$m_{ky} = m_y + m_k \quad (3.1)$$

(3.1)'deki gibi ifade edilirse, kuru duruma göre nem içeriği (3.2) eşitliği gibi ifade edilebilir.

$$M = \frac{m_y}{m_k} \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliği yaş duruma göre düzenlenirse nem oranı

$$1 + M = \frac{m_{ky}}{m_k} \quad (3.3)$$

şeklinde matematiksel olarak ifade edilir.

Ürün nem içeriğinin değişimi literatürde,

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_i - M_e} \quad (3.4)$$

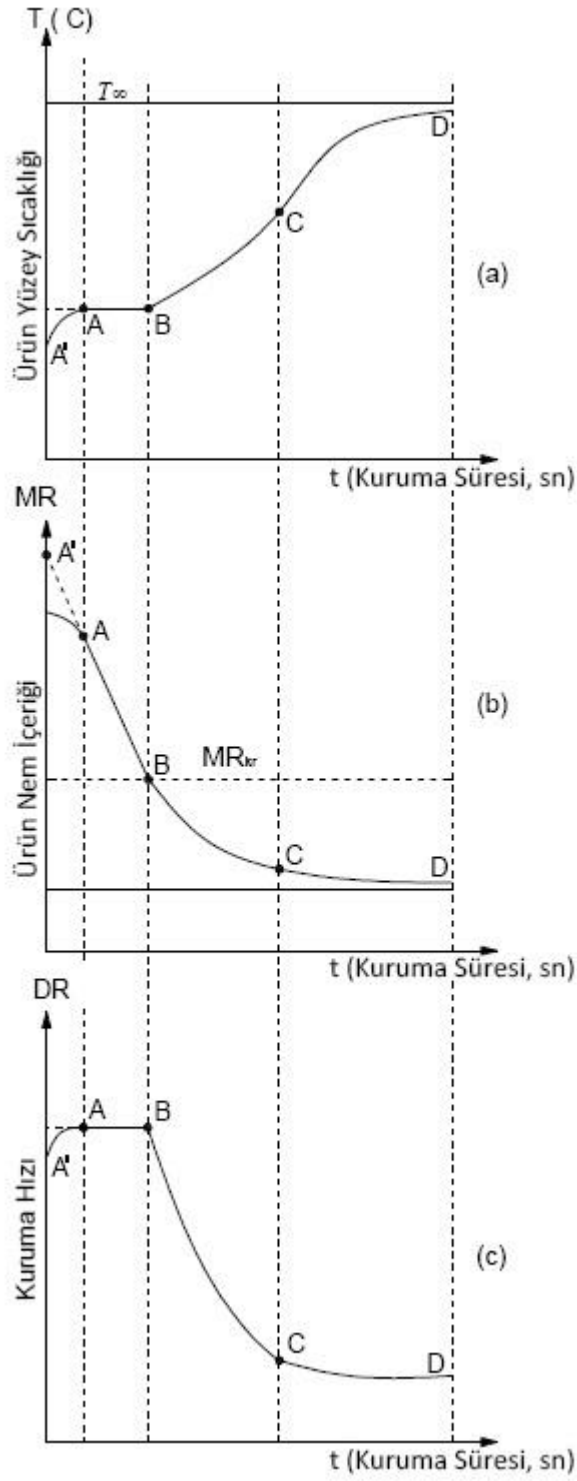
şeklinde boyutsuz olarak sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Ancak hidroskopik olmayan kil gibi maddelerin kurutulmasında ve denge nem içeriğinin düşük olduğu ürünlerde sıklıkla eşitlik (3.4) eşitlik (3.5)'e dönüştürülebilir [27].

$$MR = \frac{M(t)}{M_i} \quad (3.5)$$

Kuruma hızı,

$$DR = -\frac{1}{A_y} \frac{m_{t+dt} - m_t}{dt} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kuruma hızı, 15'er dk ara ile alınan numunenin nem miktarının değişimine bağlı olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.3 Genel Kurutma Eğrileri

3.4 Difüzyon ve Türleri

Difüzyon, konsantrasyon farkına bağlı olarak moleküllerin kinetik enerjileri dolayısıyla gelişigüzel hareket etmesi olarak tanımlanır [50], [56].

Isı tranferi ile kütle transferi ifadeleri eşitlik (3.7) ile (3.8) ve (3.9) ile (3.10) arasındaki gibi birbirine matematiksel açıdan benzerler. Ancak yön olarak ısı transferini ile kütle transferi genellikle ters yönde hareket sergilerler. Isı transferi sıcaklık gradyeni ile sağlanırken kütle transferi konsantrasyon gradyeni ile sağlanır [50], [56].

$$q_h = -k\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \quad (3.8)$$

$$q_m = -D\left(\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right) \quad (3.10)$$

Kurutmada difüzyon azalan hızda kurutmanın olduğu süreçte kurutma süresini belirleyici etkiye sahiptir. Bu süreçte difüzyon üç farklı şekilde gerçekleşir. Bu difüzyon şekilleri

- Sıvı Difüzyonu,
- Gaz (Buhar) Difüzyonu,
- Kılcal Sıvı hareketi,

olarak ifade edilebilir [52].

Burada bahsedilen sıvı difüzyonu, ürün içerisindeki sıvının kılcal kanallar vasıtasıyla yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye taşınması prensibine dayanır. Bu yöntem sıklıkla kurutulduktan sonra bulunduğu ortam ile nem alışverişi yapan ve **hidroskopik** diye adlandırılan ürünlerin kurutulmasında sıklıkla karşımıza çıkmaktadır.

Buhar difüzyonu ise gözenekli maddelerden nem difüzyonuna bağlı olarak gerçekleşir. Difüzyonu belirleyen en temel etmen buhar basıncıdır.

Kılcal sıvı hareketinde katı ile sıvı molekülleri arasındaki etkileşim sonucu boşluklar (gözenekler) içindeki sıvının yüzeye doğru hareketi olarak tanımlanmaktadır. Sıvı molekülleri ile katı arasındaki bu etkileşimden kaynaklanan kuvvetlere *adhezyon kuvvetleri* denir. Adhezyon kuvvetleri, sıvının yüksek konsantrasyonlu olduğu yerden düşük konsantrasyonlu olduğu bölgeye doğru bir mini kanal içinde hareket etmesini sağlar [52], [57].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

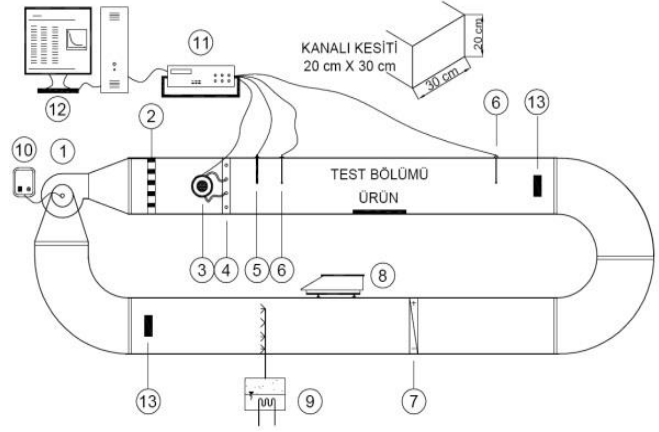
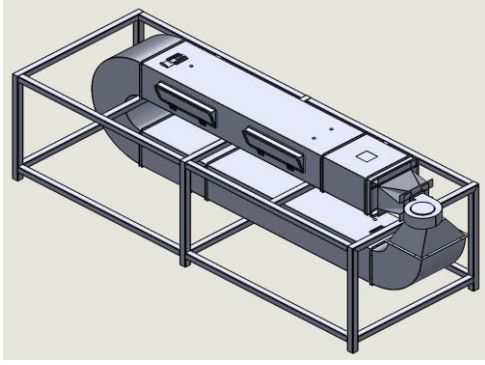
Bu bölümde, tez çalışması kapsamında çini kurutulmasına yönelik tasarlanan prototip deney tesisatı detaylı olarak anlatılmış, deney koşulları ve ölçüm yöntemi açıklanmıştır. Deneyler Makine Fakültesi Termodinamik ve Isı Tekniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

4.1 Materyal

Deneyler sırasında kullanılan hammadde Bursa ili İznik ilçesinde bulunan İznik Çini Vakfı tarafından sağlanmıştır. Kullanılan malzeme içerisinde yüksek oranda kuvars, kaolin, fiespat ve kil bulundurmaktadır.

4.2 Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında kurulan deney tesisatının Solidworks® paket programında tasarlanmış hali ve şematik hali Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 a) Deney tesisatının tasarımı, b) Deney tesisatı şematik gösterimi

Çizelge 4.1 Deney tesisatında bulunan malzemelerin listesi

SIRA NO	MALZEME ADI	MARKA	MODEL	ADET	HASSASİYET
1	SANTRİFUJ FAN	BAHÇIVAN MOTOR	BDRS 160/60	1	-
2	AKIŞ DÜZENLEYİCİ	TUBUS BAUER	-	1	-
3	BASINÇ TRANSMİTTERİ	DWYER	MS-121	1	± %1
4	PİTOT TÜPÜ	TETİSAN	-	1	-
5	NEM ÖLÇER	DWYER	657/1	1	± %2
6	RTD	WATLOW	-	2	± %0.06
7	ELEKTRİKLİ ISITICI	REZTAŞ	-	1	-
8	HASSAS TARTI	SARTORIUS	LE6202S	1	0.01 gr
9	NEMLENDİRİCİ	-	-	1	-
10	FAN HIZ ANAHTARI	BAHÇIVAN MOTORqqqqQQqqQq	BSC/2	1	-
11	DATALOGGER	AGILENT	34970a	1	-
12	BİLGİSAYAR	-	-	1	-
13	TAZE HAVA KAPAĞI	-	-	2	-



Şekil 4.2 Deney tesisatının fotoğrafı

Kurutma işlemi için tasarlanan prototip fırının iç kesiti 20x30 cm ölçülerindedir. İç kısmı paslanmaz 0.8 mm çelik sac, dış yüzey ise 0.6 mm kalınlığında galvaniz sac malzemeden imal edilmiştir. Sac levhalar ile fırın malzemesi arasında ısı yalıtım malzemesi olarak 5.0 cm kalınlığında taş yünü kullanılmıştır. Düzeneğinin test bölmesi yan yüzeyine hava sızdırmaz özellikte 15x30 cm² ölçülerinde yalıtımlı iki adet kapak yerleştirilmiştir. Deney düzeneği hem kapalı devre hem de taze hava ile ortam havasının karışımını sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Düzenek en genel şekilde, hız anahtarı ile kontrol edilen radyal santrifüj fan, elektrikli ısıtıcı, kanal içi hızı ölçmek amacıyla kullanılan pitot tüpü, sıcaklık ve bağıl nem sensörleri ile kabin dışına yerleştirilmiş olan ürün nem içeriğindeki değişimleri görmek amacıyla kullanılan elektronik teraziden oluşmaktadır. Sistemde hava sirkülasyonunun sağlanması için 750 m³/h debili bahçivan motor BDRS160/60 model radyal fan kullanılmıştır.



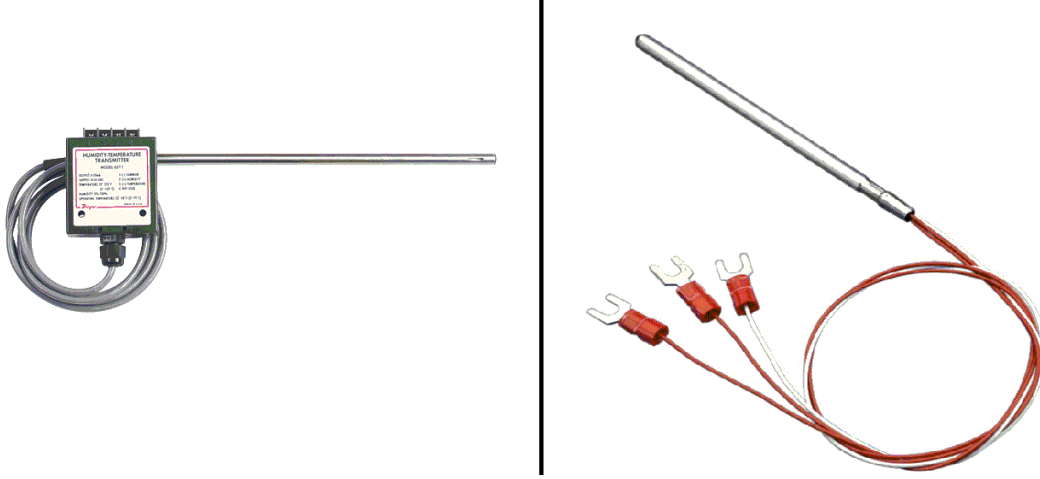
Şekil 4.3 Deney tesisatında kullanılan santrifüj fanın resmi

Sistemde ihtiyaç duyulan ek ısının temininde kurutma havasının tekrar ısıtılması amacı ile 1000 Watt gücünde elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Isıtıcı kanal içerisine monte edilmiş olup elektrikli ısıtıcının devreye girip çıkması, sistem içerisinde kurutma havası sıcaklığını algılayan sensor ve kontrol aracılığı ile gerçekleşmiştir.



Şekil 4.4 Deney tesisatında kullanılan elektrikli ısıtıcı fotoğrafı

Kurutma fırınının çalışması esnasında fırın içerisindeki sıcaklık, nem ve hava hızı değişimlerini izleyebilmek için fırın üzerinde gerekli noktalara sensörlar yerleştirilmiştir. Fırın üzerinde, 2 tane RTD ile sıcaklık ölçümü ve kurutma havasının bağıl neminin belirlenmesi için Dwyer firmasının $\pm\%2$ hassasiyetli 657/1 modelindeki sensörü kullanılmıştır.



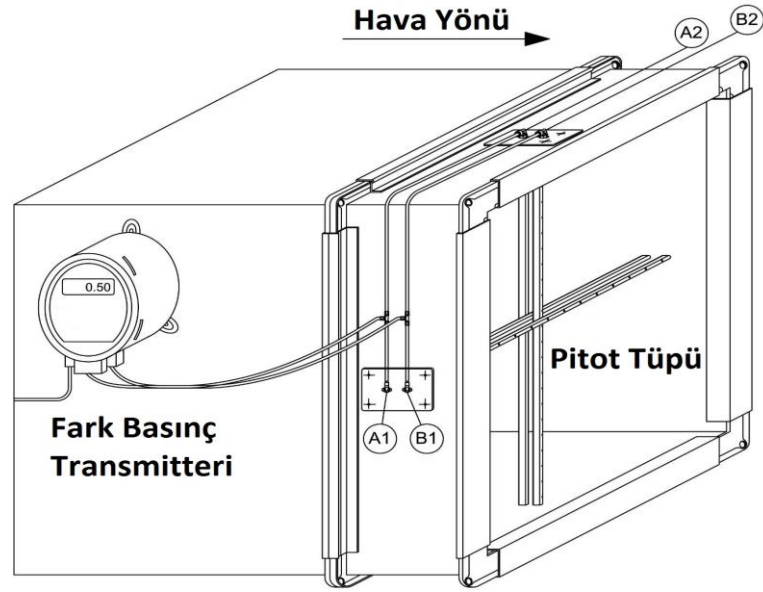
Şekil 4.5 RTD ve bağıl nem sensörü

Tesisattaki ölçüm aletlerinden alınan sıcaklık, basınç ve hız ölçümleri yazılım programı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Veri toplama ünitesi olarak “HP Agilent 34970A” model veri toplama ünitesi kullanıldı. “HP Agilent 34970A”nın fotoğrafı Şekil 4.65’de görülmektedir.



Şekil 4.6 Veri Toplama Ünitesi

Kanal içindeki hava hızı Şekil 4.7’de görülen pitot tüpü ile ölçülmüş şekildeki gibi bağlantısı yapılan Dwyer marka fark basınç transmitteri ile anlık olarak bilgisayar ortamından da izlenmiştir. Akışın homojen olması kanal kesiti boyutlarında hazırlanan Tubus Bauer marka bal peteği santrifüj fanın önüne yerleştirilmesi ile sağlanmıştır.



Şekil 4.7 Pitot tüpü ve fark basınç ölçer

Numuneden buharlaşan suyun miktarının belirlenmesi için ağırlık yöntemi uygulanmıştır. Satorius marka 0,01 gr hassasiyete sahip LE6202S tipinde ve maksimum kapasitesi 4200 g olan dijital terazi kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Dijital terazi

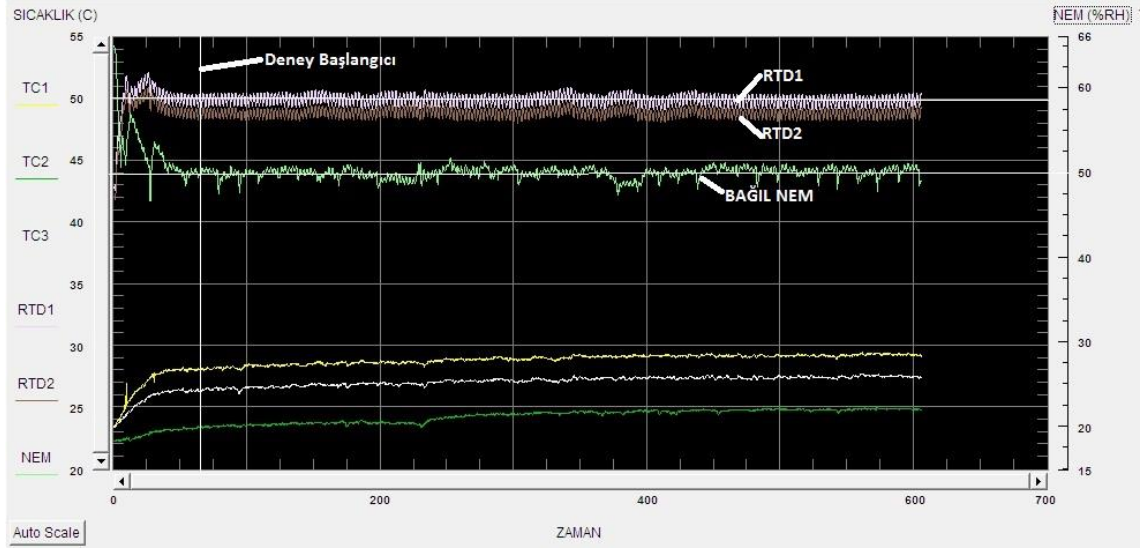
Deney sırasında ağırlık ölçümü yapılan numunenin yüzey sıcaklığı da Testo marka infrared termometre ile tespit edilmiştir.



Şekil 4.9 İnfrared termometre

4.3 Deneysel Çalışma

Çini hammaddesinin kurutma karakteristiğinin belirlenebilmesi amacıyla kurulan deney tesisatında pek çok deney yapılmıştır. Bu deneyler doğruluk ve hassasiyet açısından iki kez tekrarlanmıştır. Deneysel çalışma, ilk olarak havanın kanal içerisinde dolaşmasını sağlayacak olan fan ve fanın bağlı olduğu varyağa güç verilerek başlar. Daha sonra kanal içerisine yerleştirilmiş olan elektrikli ısıtıcı çalıştırılır. Verilerin anlık toplanması ve deney sırasında verilerin kontrolü için datalogger ve bilgisayar çalıştırılır. Sistem içerisindeki numune üzerinde dolaştırılan hava, elektrikli ısıtıcı üzerinden geçtikten sonra sıcaklığı artmakta ve bağıl nemi düşmektedir. Sıcaklığı yüksek ve bağıl nemi düşük olan hava, kurutulacak numune üzerinden geçerken numune üzerindeki nemi alır kanal içerisinde hareketine devam eder. Nemli hava ısıtıcı üzerinden geçerken içine aldığı nemi kaybeder ve sıcaklığı yükselmiş olarak tekrar çevrime devam eder. Bu esnada sistemde sıcaklık, bağıl nem ve hava hızı gibi değişkenler anlık olarak ölçülmüş ve bilgisayar ekranından izlendi. Belirlenen şartlarda deneyin yapılması için deney tesisatı rejim şartlarına yaklaşık 1-1.5 saat gibi bir sürede ulaştı. Şekil 4.10'da deney tesisatının rejim şartlarına ulaştığını gösteren ekran görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.10 Rejim şartlarına ulaşıldığını gösteren ekran görüntüsü

Bu süre içerisinde istenen sıcaklık değerleri test bölümü öncesi ve sonrasında bulunan RTD sensorları tarafından alınan sıcaklık verilerine bağlı olarak elektrikli ısıtıcı üzerinde bulunan Dimmer aracılığı ile ayarlanmıştır. İstenen rejim şartları sağlandığında deney tesisatının iyi şekilde yalıtılmış olması ve paslanmaz çelik kütlesi dolayısıyla kurutma havası sıcaklık değerlerinin ± 1 °C aralığında kalmasını sağlamıştır. Gerekli durumlarda dimmer üzerinden küçük ayarlar ile sıcaklık ayarlanmıştır.

Bağıl nem, deney tesisatı içerisine yerleştirilen üst yüzeyi açık su kapları sayesinde ayarlanmıştır. İstenen nem değerini sağlamak için düzenek içerisine gerekli sayıda kap deneyin rejime ulaştığı süreç içerisinde konulmuş ve taze hava kapaklarında küçük oynamalar ile nem deney boyunca dengelenmiştir. İstenen bağıl nem değeri \pm %1 değerinde tutulmaya çalışılmıştır. Bu amaç için ise deney düzeneği üzerinde bulunan 10×5 cm² ölçülerinde sürgülü kapaklar ile gerekli açıklıklar sağlanarak deneyler yapılmıştır.

Hız değeri ise, deney tesisatı içerisine yerleştirilen pitot tüpü ile ölçülmüştür. Pitot tüpü bir fark basınç transmitterine bağlanmış ve veriler bu transmitter aracılığı ile bilgisayar programına aktarılmıştır. Aynı zamanda hız değeri laboratuvarında bulunan Testo marka hızölçer ile kontrol edilmiştir. Sıcak havanın numune üzerinden nemi çekmesi ile yani numune kurudukça, numunede ağırlık azalması meydana gelir. Numunede meydana gelen ağırlık azalması 15 dakikalık periyotlar ile hassas terazide tartılarak tespit edildi.

Kurutulacak hammadde çamuru hazırlanması ve kurutulması sırasında izlenen işlem sırası;

- ✓ Karışım için kullanılacak karıştırma kabının ağırlığı terazi yardımı ile ölçülür.
- ✓ Daha sonra bir miktar hammadde ağırlığı önceden ölçülen bir karıştırma kabına konular ve yeniden tartılır.
- ✓ Hammadde üzerine ağırlığının %29-31 arasında değişen oranlarda su eklenir. Bu işlem sonrasında bir çubuk vasıtası ile hammadde ve su yaklaşık 5-10 dk boyunca iyice karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir.
- ✓ Yapılacak deneyin amacına göre şekil 4.10'da görülen kalıplarından ilgili olanı seçilir ve ağırlığı belirlenir.
- ✓ Elde edilen karışım bu kalıplara dökülerek kalıba iyi şekilde dağıtılır ve ağırlığı ölçülür.
- ✓ Kurutma fırını içerisinde istenen sıcaklık değeri ısıtıcı üzerinde bulunan dimmer ile sağlanır.
- ✓ Deney sırasında istenen bağıl nem değeri ise kurutma fırını içerisine yerleştirilen su dolu, üstü açık bardaklar ile sağlanır.
- ✓ Yapılacak deneyin rejim şartları sağlandıktan sonra ürün kurutma düzeneği test bölümüne konular.
- ✓ 15 dk aralıklarda numune hızlı bir şekilde test bölümünden çıkarılarak tartılır ve düzenek içerisindeki yerine tekrar konular.
- ✓ Aynı zamanda ürün yüzey sıcaklığı el tipi temassız lazer tip sıcaklık ölçer ile ölçülmüştür.
- ✓ Kalıba konulan karışım deney tesisatına yerleştirilmeden önce hazırlanan karışım üzerinden alınan ve ağırlığı 1.5 - 2.5 g aralığında değişen miktardaki ürün, ağırlığı önceden ölçülmüş bir metal üzerine konularak tartılır.
- ✓ Bu numune, ürünün kuru ağırlığını bulmak için 105 °C'ye ayarlanmış etüve konularak 24 saat süre ile kurutulur.

HESAPLAMALAR ve SONUÇLAR

5.1 Deneysel Sonuçlar

Çini çamurunun kurutulmasına ait kurutma karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik yapılan tez çalışması sırasında deneyler beş değişkene göre gerçekleştirildi. Bunlar;

- Sıcaklığın etkisi
- Bağıl nemin etkisi,
- Numune kalınlığının etkisi,
- Hava hızının etkisi
- Farklı ısı transfer mekanizmalarına bağlı kurutma karakteristiklerin

Deneysel çalışmada kurutulacak çini hammaddesi için 100*100mm boyutlarındaki kalıplar hazırlandı. Bu kalıplar Şekil 5.1’de görüldüğü gibi,

- a) Alt ve yan yüzeyleri Xps yalıtım malzemesinden yapılmış kurumanın sadece üst yüzeyden olmasını sağlayan yalıtımlı kalıp,
- b) Alt yüzeyinde metal bir plaka ve yan yüzeyleri yalıtılmış kalıp,
- c) Alt yüzeyi delikli saçtan yapılmış, yan yüzeyleri yalıtımlı kalıp olmak üzere üç farklı tipten oluşmaktadır.



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.1 Deneilerin yapıldığı kalıpların fotoğrafı

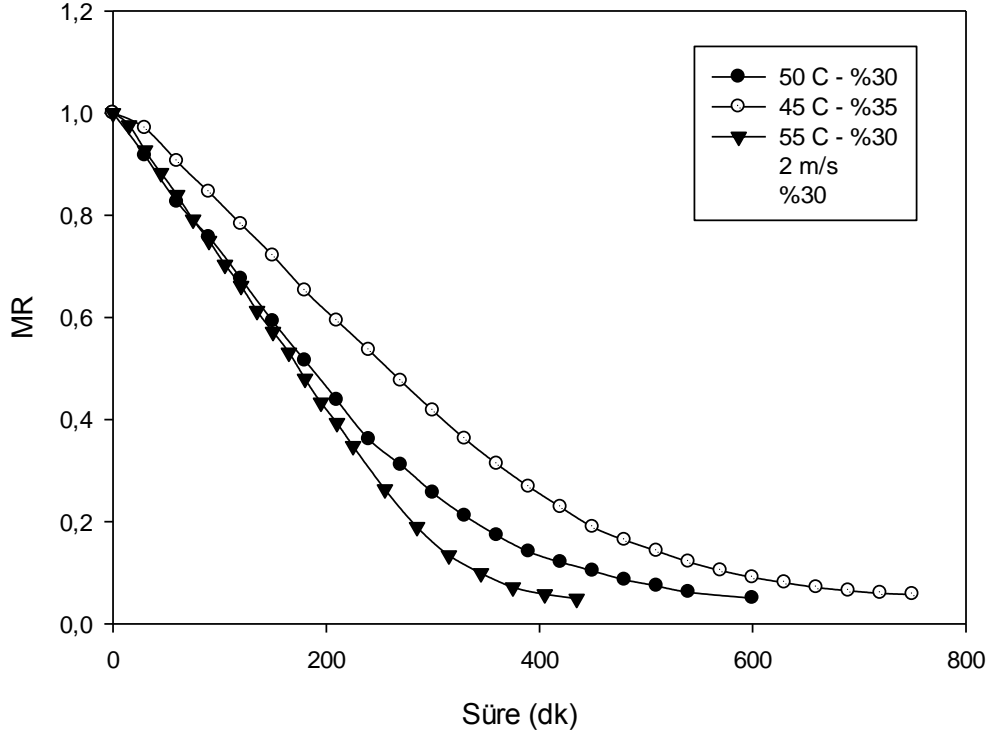
Elde edilen deneysel sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

5.1.1 Sıcaklığın Kuruma Davranışına Etkisi

Değişen sıcaklıklara bağlı kurutma karakteristiklerini belirlemeye yönelik yapılan deneyler 45, 50 ve 55 °C sıcaklık değerleri için yapılmış ve sıcaklığının kuruma karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Deneylerde kanal içi hava hızı değeri 2.0 ± 0.1 m/s ve bağıl nem değeri $\%30 \pm 1$ değer aralığında tutulmuştur. Deneylerde 5 mm kalınlığındaki kalıplar kullanılmıştır.

Önce alt ve yan yüzeyleri XPS yalıtım malzemesinden yapılmış kurumanın sadece üst yüzeyden olmasını sağlayan yalıtımlı kalıp ile deneyler yapıldı. Deneylerde bu kalıp kullanılarak kuruma davranışının belirlenmesi yalnızca üst yüzeyden taşınım ile ısı ve kütle transferinin olması hali için yapılmıştır. Bu kalıbın alt yüzeyi 6 cm kalınlığındaki XPS yalıtım malzemesinden yapılmıştır.

Kurutma havası sıcaklığı artması, hem ürün nem içeriğini azaltmakta hem de ürün içindeki nemin yüzeye hareketini hızlandırmaktadır. Bu durumda kurutma süresi oldukça kısalmaktadır. Kurutma havası sıcaklığı, kurutma işlemindeki en önemli parametredir. Artan kurutma havası sıcaklığıyla, hem ısı ve kütle taşınım katsayıları, hem de difüzyon katsayısı artmaktadır. Kurutma havasının 45 °C'den 55 °C'ye çıkarıldığında, toplam kurutma süresinin yaklaşık %45 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu oranda azalma, zaman tasarrufu açısından son derece önemlidir.

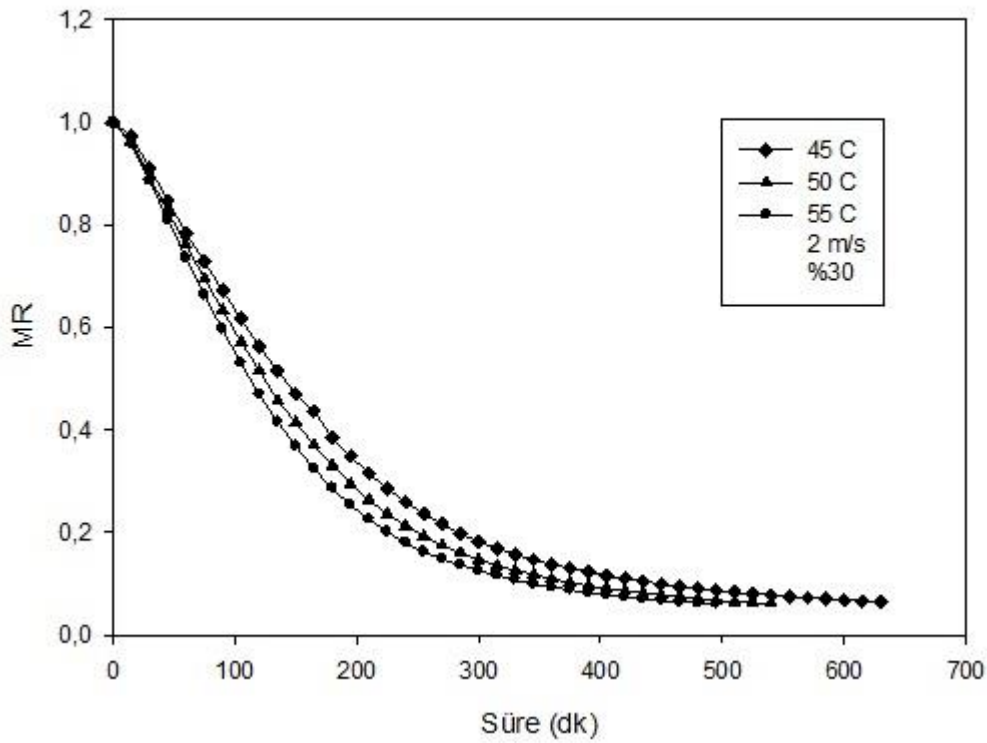


Şekil 5.2 Yalıtımlı kalıp kullanılarak sıcaklığın kuruma süresiyle değişimi

Yalnızca tek yüzeyden ısı ve kütle transferinin olduğu kurutma deneylerinde, uzun sabit kuruma döneminde gerçekleştiği gözlenmiştir. Sabit kurutma döneminde ürün yüzeyinde bulunan serbest nem zamana bağlı olarak benzer oranlarda yüzeylerden uzaklaşmaktadır. Yüzeydeki nem, kurutma havası sıcaklığı ve bağıl nem değerine bağlı olarak yaş termometre sıcaklığındadır ve nem bu sıcaklığa bağlı olarak yüzeyden sirkülasyon havası ile uzaklaştırılır. Artan sıcaklıklara bağlı yaş termometre sıcaklığı da artmakta ve buna bağlı olarakta uzaklaştırılan nem miktarı da artmaktadır. Bu süreç içerisinde ürün içerisindeki nem miktarı azalan kurutmanın başladığı kritik nem içeriğine düşünceye kadar kılcallarda bulunan nemin yüzeye ulaştığı ve sabit kurutma dönemini devam ettirdiği söylenebilir. Ürünün yüzeyindeki nem uzaklaştırıldıktan sonra ürün yüzeyinden iç yüzeylere doğru ortam sıcaklığına bağlı sıcaklık gradyeni oluşmaktadır. Bu gradyene karşılık nem transferi devam etmektedir. Bu süreç içerisinde yüzey sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir.

Ürün kuruma üzerindeki sıcaklığın etkisini belirlemek için bir diğer deneysel çalışmada alt tarafına metal plaka yerleştirilen ve yan yüzeyleri yalıtımlı kalıp kullanıldı. Bu kalıpla yapılan deneylerle kurumada iletimin etkisinde nasıl olduğu tespit edilmesi

amaçlanmıştır. Şekil 5.3’de görüleceği üzere sıcaklık artıkcı kuruma süreside azalmaktadır. Deneysel çalışmada tespit edilen bir diğers sonuç ise alt tarafı yalıtımlı kalıpla yapılan deneysel çalışmaları mukayese edildiğinde kalıbın altı metal plaka olan kalıpla yapılan kurumanın daha kısa sürede gerçekleştiğidir.

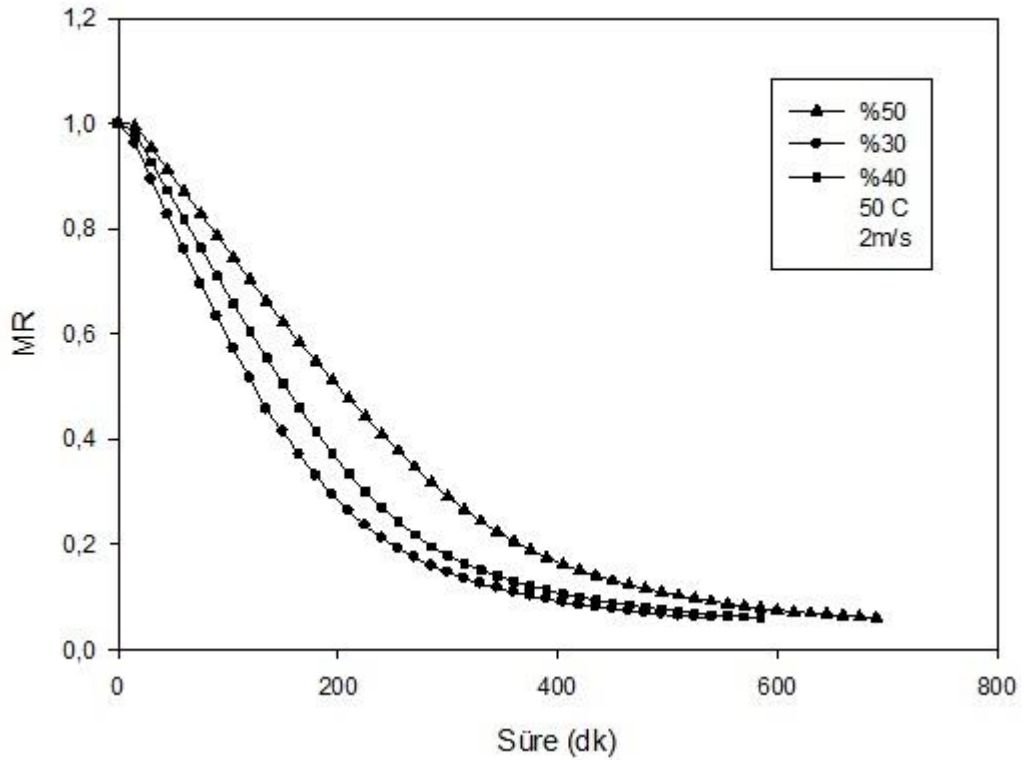


Şekil 5.3 Sıcaklığın kuruma süresiyle değişimi

Bir diğers sonuç ise, tek yüzeyden ısı ve kütle transferinin farklı sıcaklıklar için incelendiği deneylerde gözlemlenen sabit kurutma aşamasının aynı koşullarda yapılan ve iletimin de kurutmaya etkisinin incelendiği deneylerde gözlenmemiş olmasıdır. Bu durumun genel sebebi ise ürünün üst yüzeyinden taşınım ile ısı transferi olurken ve alt yüzeyinden iletim ile ısı transferi olmaktadır. Başlangıçta yüzeyde bulunan nemin yalıtımlı kalıplarda yapılan deneylere benzer şekilde yaş termometre sıcaklığında olduğu gözlenmiştir. Bu neme ek olarak iletimle oluşan ısı transferinin ürün içerisindeki sıcaklık gradyenini arttırdığı ve buna bağlı olarak kılcallarda bulunan nemin sıcaklığa bağlı azalan yoğunluğu dolayısıyla ile yüzeye daha kolay ulaştığı düşünülmektedir.

5.1.2 Bağıl Nemin Kuruma Davranışına Etkisi

Bağıl nemin çini çamurunun kurutulması sırasında nemin kurutulan ürünün kurutma karakteristiklerine etkisinin belirlenmesine yönelik yapılan deneyler, %30, %40 ve %50 bağıl nem değerleri için yapılmıştır. Deneyler sırasında kanal içi hava hızı değeri 2.0 ± 0.1 m/s ve sıcaklıkta 50 ± 1.0 °C'de sabit tutulmuştur. Deneysel çalışma alt yüzeyi metal plaka olan kalıp ile gerçekleştirilmiştir.

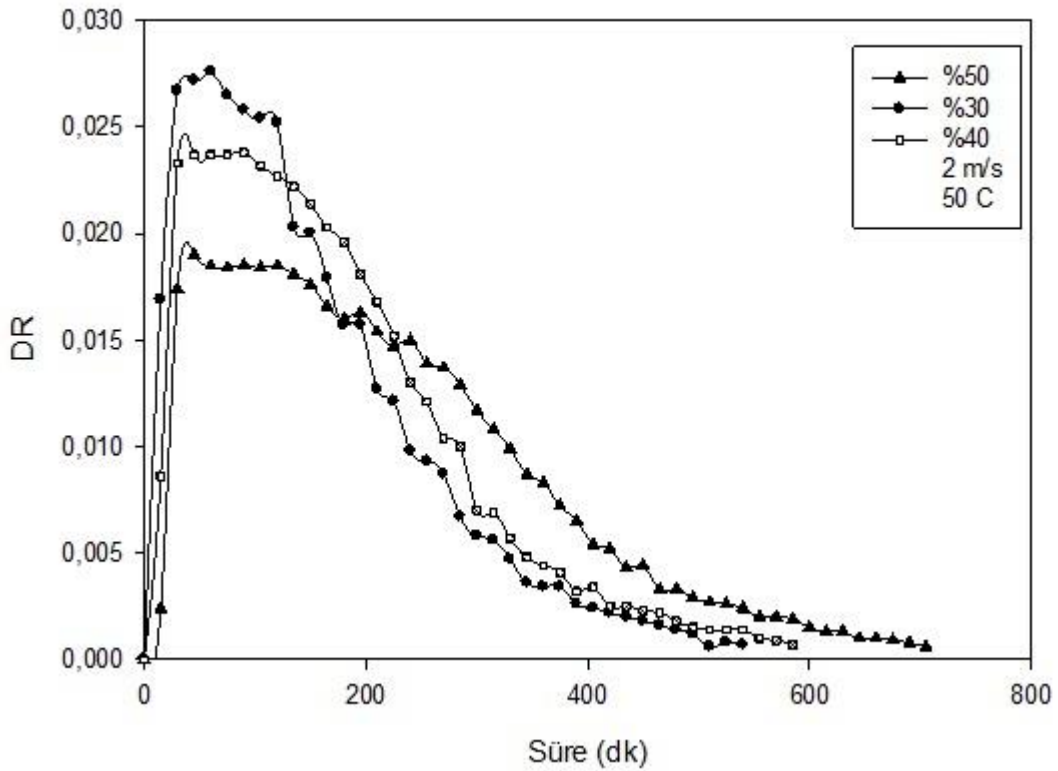


Şekil 5.4 Bağıl nemin kuruma süresiyle değişimi

Kurutma havası içinde bulunan bağıl nemin azalması ile Şekil 5.4'de görüldüğü gibi kurutma süresi azalmaktadır. Bağıl nem değerinin % 50'den % 30'a indirilmesiyle, toplam kuruma süresinin % 15 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Isı transferi için gerekli parametre sıcaklık farkı iken, kütle transferinde konsantrasyon farkıdır. Bağıl nemin yüksek olduğu ortamlarda, ürün yüzeyi ile ortam arasındaki konsantrasyon farkının az olması, ürün ile ortam arasındaki kütle transferini önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Kütle transferinin yavaş olması, merkezdeki su moleküllerinin ürün yüzeyine difüzyonunu da yavaşlatmaktadır. Dolayısı ile bağıl nemin yüksek olması

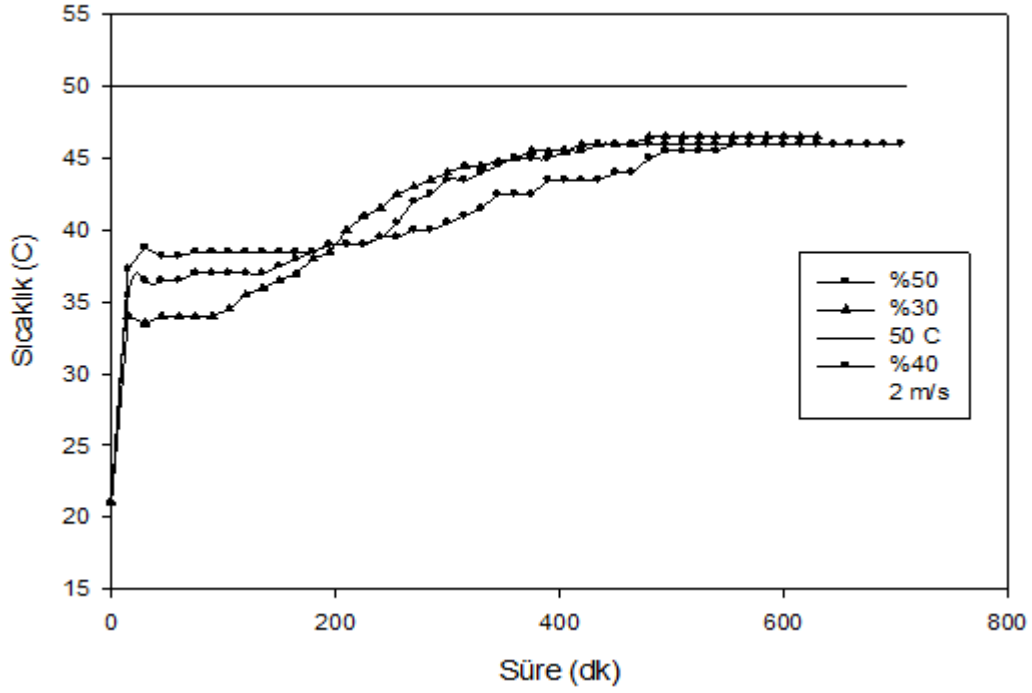
difüzyon katsayısını etkilemekte ve ürün denge nem içeriğini de arttırmaktadır. Bütün bunlar üründen nem transferini azaltmakta ve kuruma süresini de uzatmaktadır. Birim zamanda üründen transfer edilen nem miktarı, o ürünün kuruma hızı (DR) olarak tanımlanır. Şekil 5.5’de bağıl nemin ürün kuruma hızına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine bağıl nemin etkisi

Şekilden de görüleceği üzere kurutma havası içindeki bağıl nem değeri arttıkça, sabit hızda kuruma periyodunun süresi azalmaktadır. Kuruma süresinin artması ile ürün nem içeriği azalır ve artık üründen nem transferi olmadığı durumda kuruma hızı sıfır olur. Bağıl nem kuruma hızını kontrol eden önemli parametrelerden birisidir.

Bağıl nemin artması sırasında ürün yüzey sıcaklığındaki değişiminde nasıl olduğu deneysel çalışmada tespit edilmiştir. Numunenin deneysel çalışmada her 15 dakika da sahip olduğu ağırlık değeri tartılmış ve aynı zamanda infrared termometre ile de yüzey sıcaklığı ölçülmüştür. Kanaldaki ürünün kurutma havasının sıcaklığının 50 °C’de sabit tutulduğu deneysel çalışmada ürün yüzey sıcaklığının bağıl neme bağlı değişimi şekil 5.6’da görülmektedir.

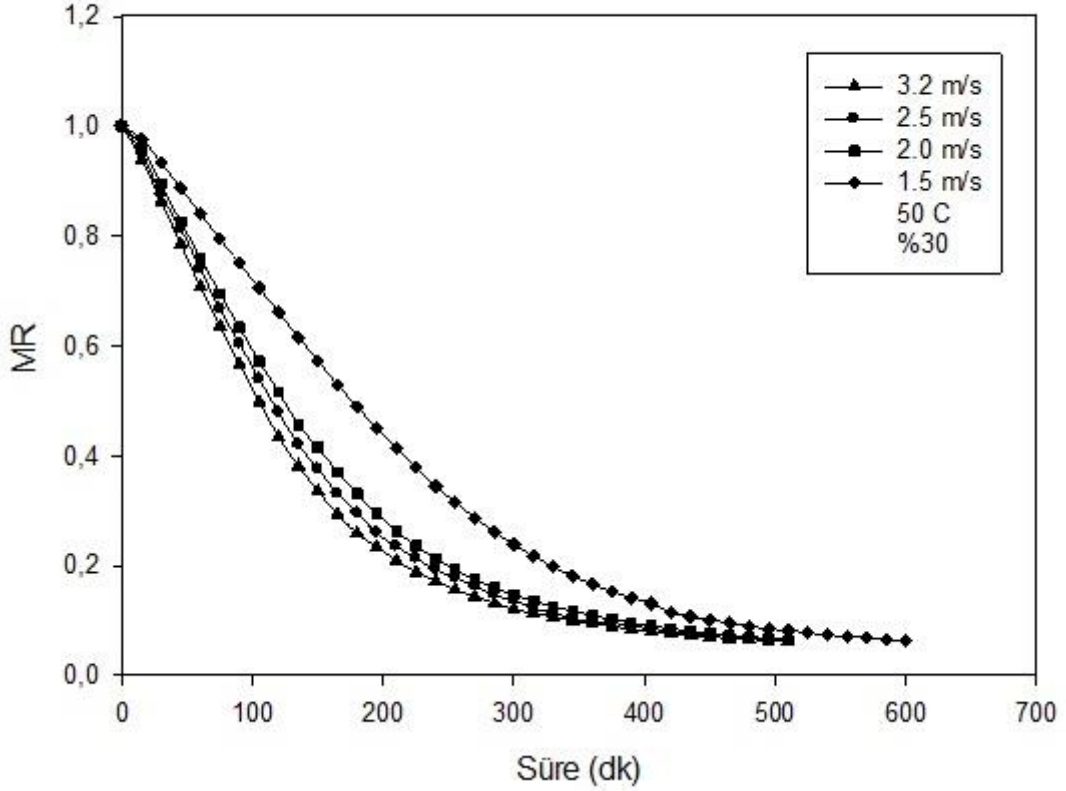


Şekil 5.6 Yüzey sıcaklığının değişik bağıl nem değerleri için kuruma süresiyle değişimi. Başlangıçta ortam sıcaklığında bulunan numuneler deney düzeneği içerisinde istenen kurutma havası şartları sağlandığında test bölmesine yerleştirilmektedir. Yaklaşık 10-15 dk arasında ortam bağıl nem ve ortam sıcaklığına bağlı olarak yüzey yaş termometre sıcaklığına ulaşmaktadır. Bu süreç yaklaşık sabit kurutma periyodu boyunca devam etmektedir. Şekil 5.6'da görüldüğü üzere bu süreçten sonra yüzey sıcaklığı artmaya başlamaktadır. Bu andan itibaren yüzey ile kurutma havası sıcaklığını farkı dolayısı ile yüzey sıcaklığı hızla artmaktadır. Düşük bağıl neme bağlı olarak ürün neminin hızla uzaklaşması sonucunda oluşan sıcaklık gradyeni yüzey sıcaklığının düşük bağıl nemlerde daha hızlı artmasını sağlamıştır. Kurutmanın sonlarına doğru ortam ve yüzey belli bir sıcaklık farkı ile dengeye gelmektedir.

5.1.3 Hava Hızının Kuruma Davranışına Etkisi

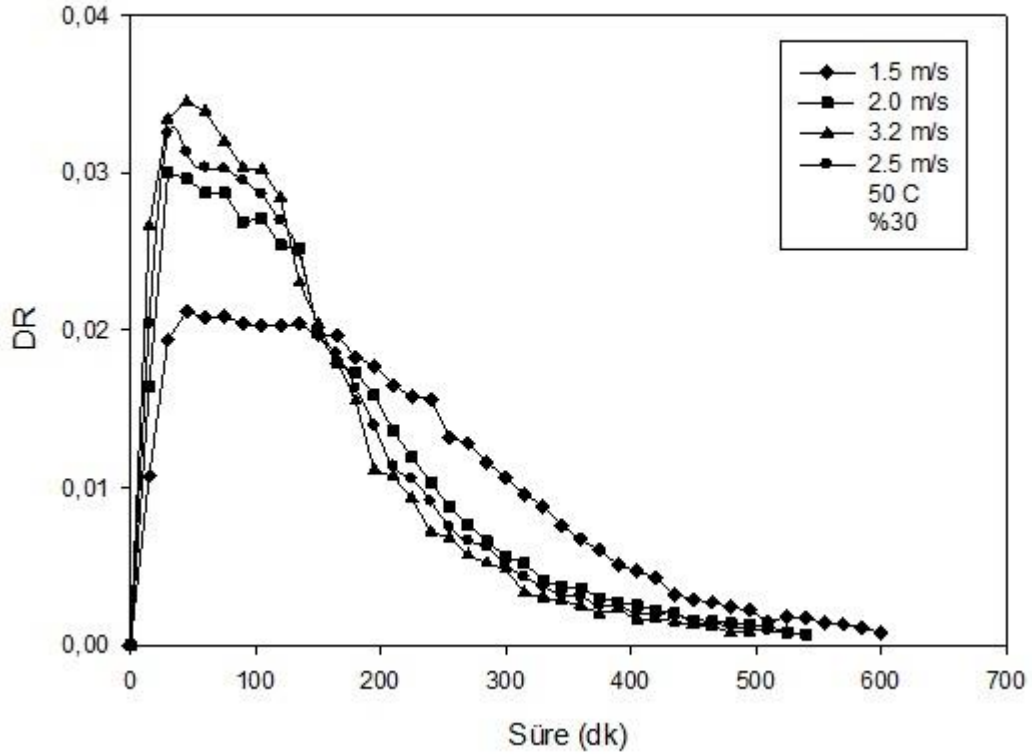
Değişik hava hızlarındaki kuruma karakteristiklerini belirlemek için kuruma havasının bağıl nemi $\%30 \pm 1.0$ ve sıcaklığı 50 ± 1.0 °C değerlerinde sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Deneyler alt tarafı metal plaka ve yan yüzeyleri yalıtımlı kalıp kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, kuruma havasının 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.2 ± 0.1 m/s değerleri için

yapılmış ve sonuçları Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Kurutma havası hızı genel olarak taşınım katsayısını etkileyen bir parametredir. Artan hızlara bağlı olarak taşınım katsayısı, buna bağlı olarakta kütle taşınım katsayısı artmaktadır. Artan kütle taşınım katsayısı ise üründen nemin uzaklaştırılmasını hızlandırmaktadır. Bu durum özellikle sabit kurutma döneminde etkili olmaktadır.



Şekil 5.7 Kurutma için kanal içi hızın kuruma süresine etkisi

Yüksek hıza bağlı olarak yüksek taşınım katsayısı ürün içerisindeki nemi büyük oranda uzaklaştırmaktadır. Sonrasında iç yüzeylerde bulunan nemin uzaklaştırılması ürün iç yapısına bağlı olarak şekillenmektedir. Özellikle II. azalan kuruma periyoduna geçildikten sonra numune içerisindeki nemin difüzyon direncine bağlı olarak yüzeye ulaşması oldukça zorlaşmaktadır.

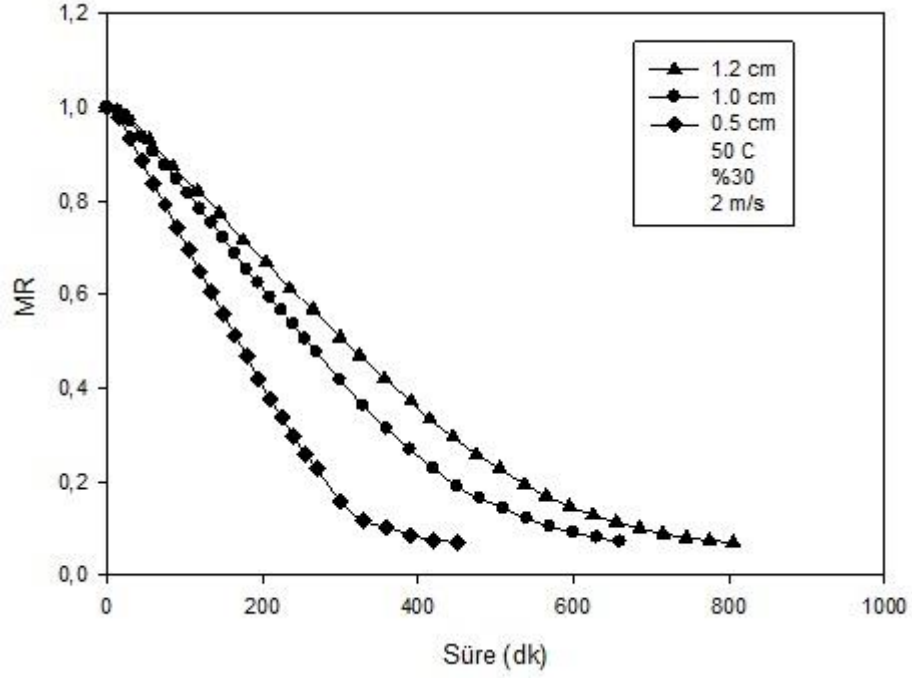


Şekil 5.8 Kuruma hızının kurutma süresiyle değişimine hızının etkisi

Şekilden de görüleceği üzere kurutma havasının hızının artması ile sabit hızda kuruma periyodunun süresi azalmaktadır. 1.5 m/s hızına bağlı olarak yapılan deneylerde sabit kurutma dönemi gözlenmektedir. Diğer hızlarda ise kuruma hızı birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Kurutmanın yaklaşık 170 dk boyunca artan hızlara bağlı olarak kurutma hızında arttığı gözlenmiştir. Bu süreden itibaren kuruma hızı değeri hız ile ters orantılı olarak devam etmiştir. Bu durumun sebebi ürün içerisindeki nem miktarlarının başlangıçta yüksek hızlarda hızla azalması daha sonra ise ürün içerisindeki kalan nemin azalan kurutma periyodunda uzaklaştırılmasının zor olması dolayısıyladır.

5.1.4 Numune Kalınlığının Kurumadaki Etkisi

Numune kalınlığının kuruma karakteristiğine etkisini belirlemek için yapılan deneyler kanal sıcaklığının 50 ± 1.0 °C, bağıl nemin 30 ± 1.0 hava hızının 2.0 ± 0.1 m/s değerlerin için yapılmıştır. Deneyler alt ve yan yüzeyleri yalıtımlı XPS malzemesinden yapılan 1.2 cm, 1.0 cm ve 0.5 cm kalınlıklardaki kalıplar kullanılarak yapılmıştır. Böylelikle farklı kalınlıklardaki ürünlerin kurutma karakteristikleri ve kuruma süreleri belirlenmiştir.

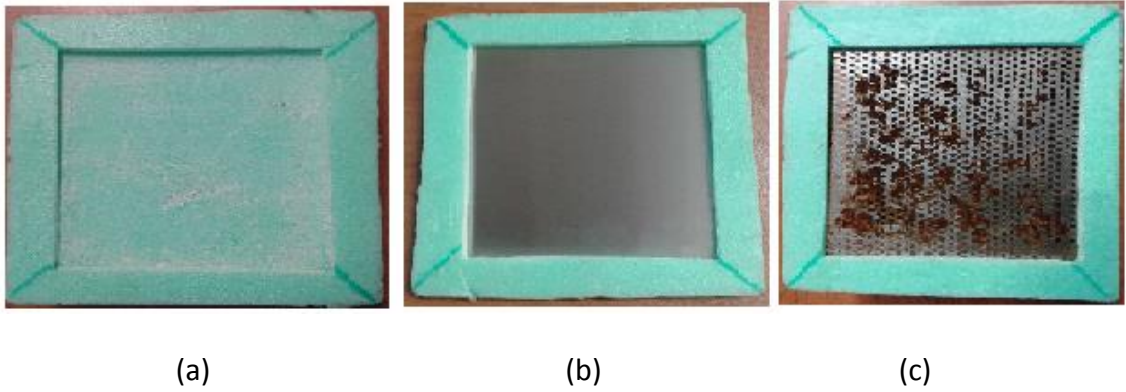


Şekil 5.9 Kurutulacak ürünün kalınlığının kuruma süresiyle değişimi

Şekil 5.9'dan görüleceği üzere kurutulacak ürünün kalınlığı arttıkça kuruma süreside artmaktadır. 1.2 cm kalınlığındaki numunenin kuruma süresi yaklaşık 800 dakika iken 0.5 cm kalınlığındaki ürünün kuruma süresi yaklaşık olarak %50 daha kısa zamanda yaklaşık 420 dakikada tamamlanmıştır.

5.1.5 Farklı Isı Transfer Mekanizmalarının Kurumaya Etkisi

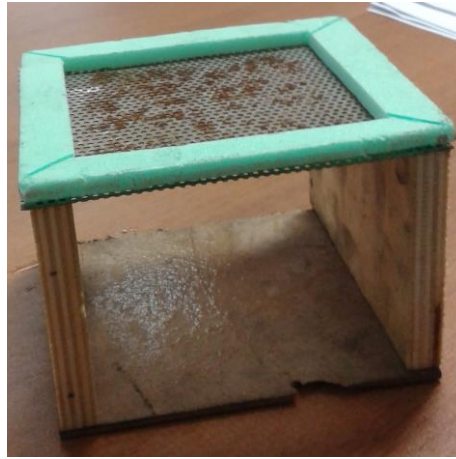
Tez kapsamında incelenen çini hamurunun kurutulmasına yönelik deneysel çalışmada farklı ısı transfer mekanizmalarının kurumaya etkilerini belirlemek için deneyler yapıldı.



Şekil 5.10 Deneysel çalışmada kullanılan kalıplar

Bu deneyler için 100*100*5mm ve 100*100*10mm boyutlarında hazırlanan kalıplar kullanılarak deneyler yapıldı. Şekil 5.10(a)'de görülen kalıp ile ürüne ısı yalnızca üst yüzeyden taşınım ile numuneye ulaşırken numune içerisindeki nemin de yalnızca üst yüzeyden uzaklaştığı durumdaki kuruma incelenmiştir. Bu kalıbın alt yüzeyi ve yan yüzeyleri XPS yalıtım malzemesinden yapılmıştır. Şekil 10(b)'de görülen kalıp ile kurutma için gerekli ısı ürün üst yüzeyine taşınım ile sağlanırken, aynı zamanda kalıbın alt yüzeyinde bulunan 0.6 mm kalınlığındaki paslanmaz çelikten ürüne iletim ile ısı transferini gerçekleştirmektedir. Ürün içerisindeki nemin yalnızca üst yüzeyden uzaklaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 10(c)' de görülen kalıpta yan yüzeyler Xps yalıtım malzemesinden yapılmıştır. Alt yüzey ise 0.5 mm kalınlıkta delikli paslanmaz çelik saçtan imal edilmiştir. %29 ila %33 arasında nem içeriğine sahip Çini hammaddesinden yapılan çamur yoğun viskozitesi nedeni ile kalıp üzerinde bulunan deliklerden aşağı doğru akmamıştır. Tasarlanan bu kalıp ile kurutulacak ürünün hem alt hem de üst yüzeyinden kütle ve ısı transferinin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

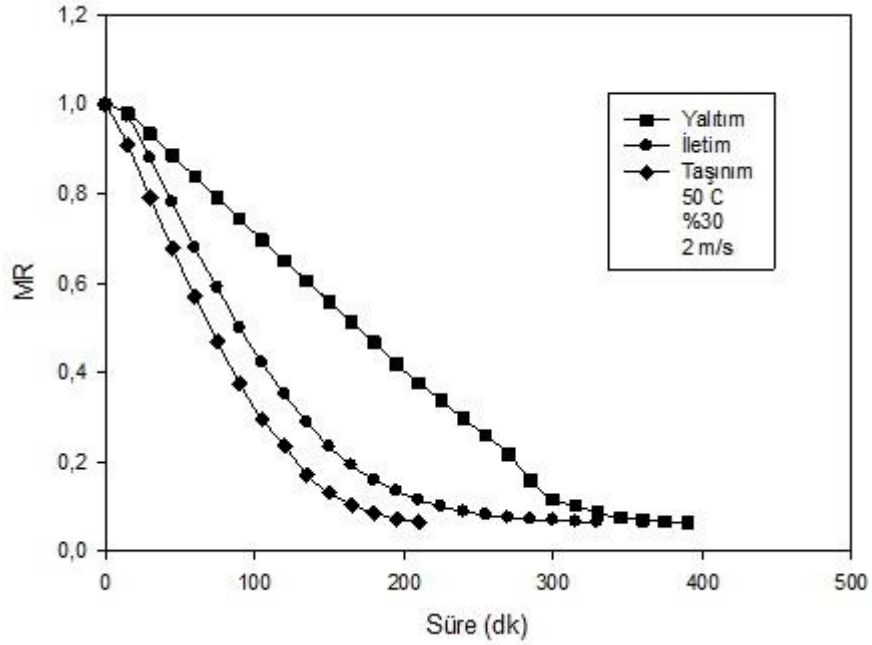


Şekil 5.11 Deneysel çalışmada taşınım ile ilgili deneyler için kullanılan kalıp

Şekil 5.11'de görülen bu kalıbın yüksekliği 10 cm olarak yapılmış olup buradaki amaç, 20x30 cm boyutlarına sahip hava kanalı içerisinde dolaşan havanın, ürünün alt ve üst yüzeylerinden eşit miktarda geçirilmesi sağlamaktır.

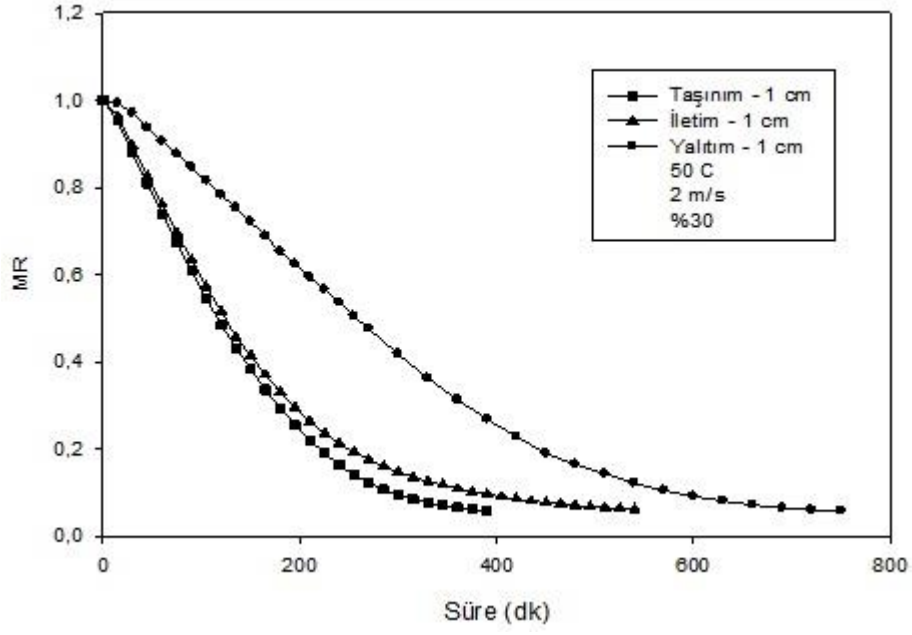
Deneyler kurutma havasının 2.0 ± 0.1 m/s hızında, bağıl nemim %30 ± 1.0 ve hava sıcaklığının 50 ± 1.0 °C değerleri için yapılmıştır. İki farklı kalınlık ve üç farklı ısı transfer

mekanizmasının göz önüne alınmasıyla yapılan deneylerin sonuçları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere 0.5 cm kalınlığındaki ürünün kuruması esnasında en uzun kuruma süresi yalıtımlı kalıbın kullanılması yani sadece kurumanın üst yüzeyden yapılmasına izin verilen durumda gerçekleşmektedir. Daha sonra tabandan iletimle ısı transferine izin veren kalıp ve en kısa kuruma süresi ise ürünün her iki yüzeyinden ısı ve kütle transferine izin veren durum da gerçekleşmektedir. Alt ve yan yüzeyleri yalıtımlı kalıp kullanıldığında elde edilen kuruma süresi, her iki yüzden ısı ve kütle transferinin olması durumuna göre yaklaşık 2 kat daha fazla zaman gerektirmektedir. Bu da daha fazla enerji tüketimi anlamına gelmektedir.

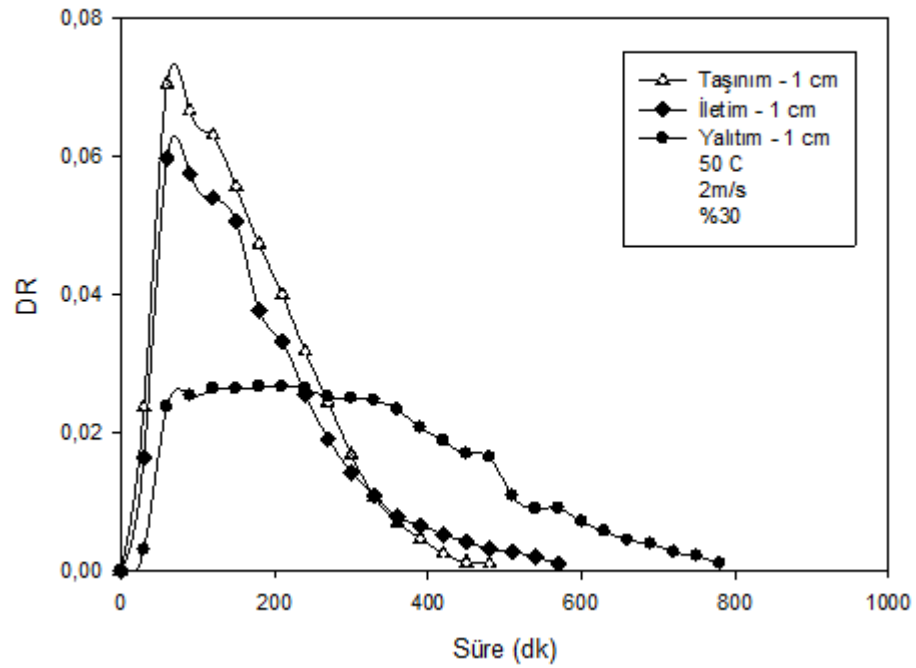


Şekil 5.12 0.5 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulmasının zamana göre değişimi

Şekil 5.13’e bakıldığında ısı transfer mekanizmasına bağlı olarak sıralama şekil 5.12’de görülenlere benzer olmakla beraber kurutulacak olan ürünün kalınlığına bağlı olarak kuruma süreleri daha uzamaktadır.



Şekil 5.13 1 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulmasının zamana göre değişimi

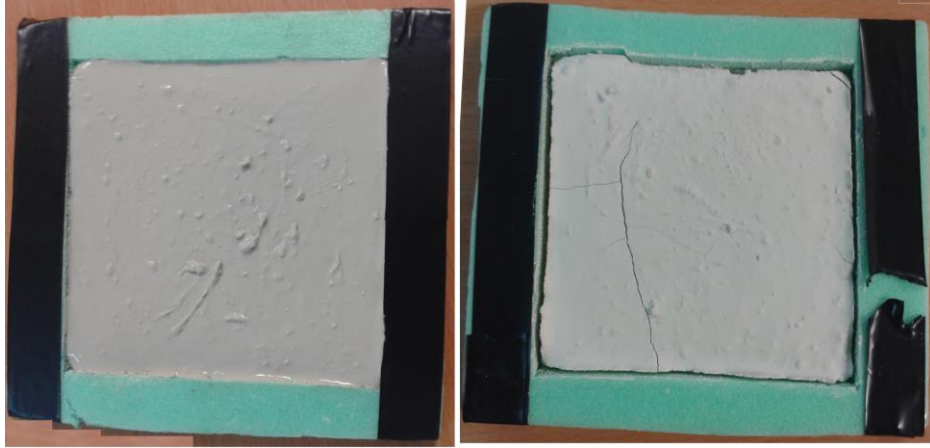


Şekil 5.14 Kuruma hızının (1 cm kalınlığındaki ürünün farklı ısı transfer mekanizmaları ile kurutulması) zamana göre değişimi

Şekil 5.14'de ise kuruma hızının ısı transferi mekanizmasına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Bu grafikteki veriler 30'ar dk aralıktaki nem değişimine göre çizilmiştir. Yalıtımlı kalıp kullanıldığında yani tek yüzeyden ısı transferi ile kurumaya izin

verildiğinde sabit kuruma bölgesi hayli uzunken, her iki yüzeyden ısı transferine izin verildiğinde sabit kuruma bölgesi oldukça kısa gerçekleşmektedir ve kuruma hızı yalıtımlı kalıbın kullanıldığında elde edilen kuruma süresine göre çok daha kısa zamanda kurumayı gerçekleştirerek sıfıra ulaşır.

Deneyler için numunenin kurutma öncesi ve sonrasındaki görüntüsü Şekil 5.15'te görülmektedir. Genel olarak hammadde kuru ağırlığının 30 ± 1 'i kadar su ile iyice karıştırılmıştır. Numune deney tesisatına konulduktan kısa bir süre sonra (yaklaşık 10-15 dk) ortam sıcaklığı ve bağıl nem değerine bağlı olarak numune yüzeyinin yaş termometre sıcaklığına ulaştığı gözlenmiştir. Kurutmanın başlangıç evresinde yüzeyden bulunan serbest nem aktarılan ısıya bağlı olarak yüzeyden sirkülasyon havası uzaklaştırılır. Ürün nem içeriği belli bir değere düştüğünde sıcak havanın ilk temas ettiği yüzeyden ürün arka yüzeyine doğru yavaş yavaş yüzeyde kuruma görülmeye başlanmıştır. Bu aşamada aynı zamanda küçük çatlakların oluştuğu görülmüştür. Bu çatlaklar kurutmanın sonralarına doğru numune kalınlığı boyunca çatlaklara dönüşmüştür. Artan kalınlıklara bağlı olarak çatlak ve kırık sayısında önemli miktarda azalmalar gözlenmiştir. Oluşan kırıkların veya çatlakların ürünün kurutma davranışında önemli bir değişikliğe sebep olmadığı da bir başka sonuç olarak gösterilebilir.



Şekil 5.15 Numunenin kurutma öncesi ve sonrasındaki durumu

5.2 İnce Cisimlerin Modellemesinde Kullanılan Modeller İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Literatürde, kurutma eğrilerini üründen bağımsız olarak yalnızca kurutma havası parametrelerine bağlı olarak bulmaya yönelik pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar deneysel verilere dayalı oluşturulan matematiksel modellere dayanır. Bu kapsamda sıklıkla karşılaşılan modellerden bazıları Bölüm 1’de literatür özeti kısmında Çizelge 1.1’de gösterilmiştir. Bu modellere bağlı olarak Matlab Curve Fittings Toolbox® ile doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmış ve model katsayıları bulunmuştur. Regresyon analizi, iletimle ısı transferinin etkisinin incelendiği kalıpların kullanıldığı deneysel sonuçlara bağlı olarak bulunmuştur. Bu kapsamda değişik sıcaklık, bağıl nem ve hıza bağlı kurutma parametreleri bulunmuştur.

Çizelge 5.1 Sıcaklıklara bağlı elde edilen model katsayıları

(a)

MODEL	k	a	b	c	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.003296	...	...	...	...	...	1.131	0.9948
Henderson ve Pabis	0.00692	1.064	...	...	...	...	...	0.9946
Logaritmik	0.007144	1.058	...	0.01115	...	...	...	...
İki Terimli	...	1.069	0.0002339	...	0.007027	-0.1468	-	0.9956
Midilli vd.	0.001901	1.009	...	0.0001222	...	...	1.260	0.9997

(b)

MODEL	k	a	b	c	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.003027	...	...	...	...	...	1.126	0.9951
Henderson ve Pabis	0.006262	1.062	...	...	...	...	...	0.9949
Logaritmik	0.00646	1.057	...	0.01087	...	...	...	0.9951
İki Terimli	...	1.068	0.0002048	...	0.006358	-0.01369	...	0.9959
Midilli vd.	0.001713	1.007	...	0.0001114	...	...	1.256	0.9998

(c)

MODEL	k	a	b	c	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.003067	...	...	...	...	...	1.097	0.9936
Henderson ve Pabis	0.005472	1.058	...	...	...	...	...	0.9945
Logaritmik	0.005863	1.048	...	0.02323	...	...	...	0.9954
İki Terimli	...	1.067	0.0001789	-	0.005622	0.008675	-	0.9964
Midilli vd.	0.00166	1.011	...	0.0001048	...	...	1.234	0.9996

Çizelge 5.1'de 2.0 m/s hız ve %30 bağıl nem koşulları altında 55 °C, 50 °C ve 45 °C sıcaklık değerlerine bağlı model parametreleri görülmektedir. Çizelge 5.1 (a) 55 °C bağıl nem değerine bağlı model parametrelerini, Çizelge 5.1 (b) 50 °C bağıl nem değerine bağlı model parametrelerini, Çizelge 5.1 (c) 45 °C bağıl nem değerine bağlı model parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 5.2 Bağıl neme bağlı elde edilen model katsayıları

(a)

MODEL	k	a	B	C	k_0	k_1	N	R^2
Page	0.003026	...	...	...	...	...	1.126	0.9951
Henderson ve Pabis	0.006262	1.062	...	...	...	...	...	0.9949
Logaritmik	0.00646	1.057	...	0.01087	...	...	...	0.9951
İki Terimli	...	1.068	0.0002048	...	0.006358	-0.01369	...	0.9959
Midilli vd.	0.001714	1.007	...	0.0001114	...	...	1.256	0.9998

(b)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	N	R^2
Page	0.001429	...	...	...	...	...	1.232	0.9956
Henderson ve Pabis	0.005485	1.092	...	...	...	...	...	0.9918
Logaritmik	0.005233	1.102	...	-0.01823	...	...	...	0.9921
İki Terimli	...	1.094	0.00002178	...	0.005513	0.02359	...	0.9920
Midilli vd.	0.0007304	1.002	...	0.0001034	...	...	1.377	0.9998

(c)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	N	R^2
Page	0.0007539	...	...	...	...	...	1.290	0.9978
Henderson ve Pabis	0.004301	1.106	...	...	...	...	...	0.9905
Logaritmik	0.003752	1.142	...	-0.0671	...	...	...	0.9929
İki Terimli	...	0.4339	1.435	...	0.01536	0.005184	...	0.9989
Midilli vd.	0.0004401	1.000	...	0.0006956	...	...	1.401	0.9998

Çizelge 5.2'de 2.0 m/s hız ve 50 °C sıcaklık koşulları altında %30, %40 ve %50 bağıl nem değerlerine bağlı model parametreleri görülmektedir. Çizelge 5.2 (a) %30 bağıl nem değerine bağlı model parametrelerini, Çizelge 5.2 (b) %40 değerine bağlı model parametrelerini ve Çizelge 5.2 (c) %50 değerine bağlı model parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 5.3 Hızlara bağlı elde edilen model katsayıları

(a)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.0009641	...	...	...	...	...	1.274	0.9985
Henderson ve Pabis	0.004807	1.094	...	...	...	...	...	0.9907
Logaritmik	0.004118	1.137	...	-0.0671	...	...	...	0.9948
İki Terimli	...	0.4627	1.459	...	0.01604	0.005868	...	0.9991
Midilli vd.	0.0005512	0.9931	...	0.000736	...	...	1.388	0.9999

(b)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.003027	...	...	...	...	...	1.126	0.9951
Henderson ve Pabis	0.006262	1.062	...	...	...	...	...	0.9949
Logaritmik	0.006460	1.057	...	0.01087	...	...	...	0.9951
İki Terimli	...	1.068	0.0002048	...	0.006358	0.01369	...	0.9959
Midilli vd.	0.001713	1.007	...	0.0001114	...	...	1.256	0.9998

(c)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.00374	...	...	...	...	...	1.153	0.9942
Henderson ve Pabis	0.006421	1.054	...	...	...	...	...	0.9945
Logaritmik	0.007035	1.045	...	0.01861	...	...	...	0.9951
İki Terimli	...	1.061	0.01208	...	0.000607	0.005269	...	0.9960
Midilli vd.	0.002013	1.006	...	0.000126	...	...	1.243	0.9996

(d)

MODEL	k	a	b	C	k_0	k_1	n	R^2
Page	0.005055	...	...	...	...	...	1.059	0.9925
Henderson ve Pabis	0.007127	1.042	...	...	...	...	...	0.9934
Logaritmik	0.007856	1.029	...	0.03124	...	...	...	0.9954
İki Terimli	...	1.054	0.0007855	...	0.007419	-0.008037	...	0.9964
Midilli vd.	0.002644	1.007	...	0.000736	...	...	1.209	0.9994

Çizelge 5.3'de %30 bağıl nem ve 50 °C sıcaklık koşulları altında 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.2 m/s hız değerlerine bağlı model parametreleri görülmektedir. Çizelge 5.3 (a)

1.5 m/s hız değerine bağlı model parametrelerini, Çizelge 5.3 (b) 2.0 m/s hız değerine bağlı model parametrelerini, Çizelge 5.3 (a) 2.5 m/s hız değerine bağlı model parametrelerini ve Çizelge 5.3 (a) 3.2 m/s hız değerine bağlı model parametrelerini, göstermektedir. Deneysel sonuçlar üzerinden yapılan regresyon analizine bağlı modellerin R^2 değerine bakıldığında seçilen tüm modeller ile deneysel sonuçların oldukça başarılı uyumluluk gösterdiği görülmüştür. Genel olarak en uygun sonuçlar Midilli vd. tarafından önerilen model olarak belirlenmiştir.

5.3 Difüzyon Katsayısının Belirlenmesi

Ürünün kurumaya bağlı difüzyon katsayıları Crank[20] tarafından önerilen ve literatürde sıklıkla kullanılan aşağıdaki model ile bulunmaktadır. Eşitlik (5.1)'de $n=0$ düz cisimler, $n=1$ silindirik şekildeki ürünler için ve $n=2$ olduğu durum ise küre şeklindeki cisimlerin kurutulmasında kullanılan eşitlikleri temsil etmektedir.

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4\delta^2}\right) \quad (5.1)$$

Uzun kurutma sürelerinde, eşitlik (5.1)'nin ilk teriminin açılması yeterlidir.

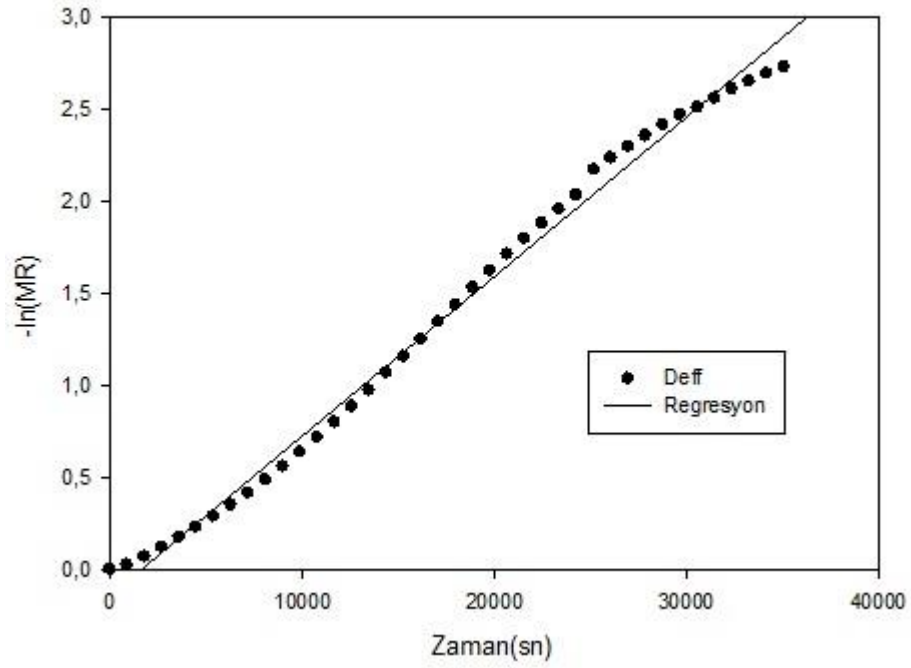
$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4\delta^2}\right) \quad (5.2)$$

Bu modele göre eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alınır;

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 \delta^2}\right) \quad (5.3)$$

Bu eşitliğe göre $-\ln(MR)$, zamana göre grafiğinin eğiminden D_{eff} bulunur. Eşitliğe ait eğim eşitlik (5.4)'te gösterilmiştir [32].

$$E = \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4 \delta^2} \quad (5.4)$$



Şekil 5.16 Difüzyon katsayısının belirlenmesinde kullanılan grafik

Çizelge 5.4’de yapılan deneylere bağlı olarak elde edilen difüzyon katsayılarının değişimi görülmektedir.

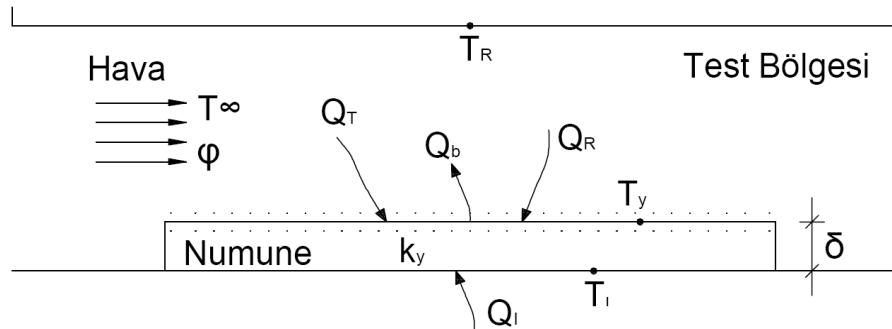
Çizelge 5.4 Yapılan deneysel çalışmalara ait difüzyon katsayıları

ISI TRANSFERİ TİPİ	SICAKLIK (°C)	KALINLIK (cm)	HIZ (m/s)	BAĞIL NEM (%)	DİFÜZYON KATSAYISI	R ²
YALITIM	55	1,2	2,0	20	4,669E-09	0,9865
YALITIM	50	1,2	2,0	20	4,085E-09	0,9896
YALITIM	45	1,0	2,0	35	8,106E-10	0,9967
YALITIM	50	1,0	2,0	30	2,837E-09	0,9875
YALITIM	50	0,5	2,0	30	1,013E-09	0,9775
YALITIM	50	0,5	2,0	50	8,106E-10	0,9745
İLETİM	55	1,0	2,0	30	4,281E-09	0,9886
İLETİM	50	1,0	2,0	30	3,802E-09	0,9872
İLETİM	45	1,0	2,0	30	7,929E-10	0,9732
İLETİM	50	1,0	2,0	40	3,648E-09	0,9863
İLETİM	50	1,0	2,0	50	2,837E-09	0,9909
İLETİM	50	1,0	1,5	30	3,648E-09	0,9934
İLETİM	50	1,0	2,5	30	3,9353E-09	0,9881
İLETİM	50	1,0	3,2	30	3,960E-09	0,9649
İLETİM	50	0,5	2,0	30	2,026E-09	0,9874
TAŞINIM	50	0,5	2,0	30	5,066E-10	0,9849
TAŞINIM	50	1,0	2,0	30	7,929E-10	0,9905

Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere Çini hammaddesine ait difüzyon katsayısı 4,669E-09 ile 8,106E-10 arasında değişmiştir. Çizelge 5.4 incelendiğinde difüzyon katsayısı aynı deney koşulları altında ısı transfer tipine bağlı olarak taşınımın incelendiği deneyler için en küçük değere sahip iken, yalıtımlı deney kalıpları ile yapılan deneyler için en yüksek değere ulaşılmıştır.

5.4 Isı ve Kütle Transferinin Birlikte İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümde ısı ve kütle transferi birlikte matematiksel olarak incelenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki model de yalnızca üst yüzeyden ısı ve kütle transferinin olduğu 1 cm kalınlığındaki kalıpların kullanıldığı deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır. Kurutma havası şartları ise 50 °C sıcaklık, 2.0 m/s hız ve %30 bağıl nem değerindedir. Matematiksel model, deneysel çalışmada gözlenen sabit ve azalan kurutma periyodları için ayrı ayrı iki aşamada incelenmiştir. Kuruma sırasında gözlemlenen büzülme etkisi gözönüne alınmamıştır.



Şekil 5.17 Kurutma yapılacak ürün için enerji dengesi

Şekil 5.17'de sistem sınırı olarak yüzeyin seçildiği durumdaki enerji dengesinin şematik gösterimi Şekil 5.17'de görülmektedir. Bu durumdaki enerji dengesi birim zaman için en genel halde eşitlik (5.5)'deki gibi yazılabilir.

$$\dot{Q}_T + \dot{Q}_R + \dot{Q}_I = \dot{Q}_b \quad (5.5)$$

Taşınım ile olan ısı geçişi eşitlik (5.6)'ye göre bulunur.

$$\dot{Q}_T = h.A_y.(T_\infty - T_y) \quad (5.6)$$

Öncelikle yüzey sıcaklığı için ortamın bağıl nemi ve sıcaklığına bağlı olarak bir yaklaşık bir değer belirlenir. Bu değer ne kadar doğru olduğu eşitlik (5.13) çözülerek bulunur. Bulunan değer üzerinden yapılan tüm işlemler tekrarlanır. Eşitlik (5.6) içerisindeki taşınım katsayısı, ürün yüzeyine etkiyen ortalama taşınım katsayısı olarak alınmıştır. Hava ile ilgili değerler yüzey sıcaklığı ile kurutma havası sıcaklığının ortalamasına göre bulunan film sıcaklığına (T_f) bağlı olarak alınmıştır. Ortalama taşınım katsayısını bulmak için öncelikle ürün yüzeyindeki akışın tipini belirlemek gerekmektedir. Akış tipinin belirlenmesi için ise Re sayısının bulunmalıdır [50,56].

$$T_f = \frac{T_\infty + T_y}{2} \quad (5.7)$$

$$Re = \frac{u \cdot L_c}{\nu} \quad (5.8)$$

Yapılan hesaplama sonucunda Re sayısının plaka yüzeyinde $4-6 \cdot 10^5$ değerinden küçük olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile akışın laminar akış olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma bağlı olarak taşınım katsayısının bulunması için ilgili Nu bağıntısı eşitlik (5.9)'daki gibi olmalıdır [50], [56].

$$Nu_L = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (5.9)$$

h değeri Nu sayısına bağlı olarak

$$h = \frac{Nu_L \cdot k_h}{L_c} \quad (5.10)$$

şeklinde bulunur.

Radyasyon ile aktarılan enerji ise eşitlik (5.11)'e göre bulunur.

$$\dot{Q}_R = h_R \cdot A_y \cdot (T_R - T_y) \quad (5.11)$$

Burada radyasyonla ısı transferi katsayısı eşitlik (5.12)'ye göre ifade edilebilir [58].

$$h_R = \varepsilon_{12} \cdot \sigma \cdot (T_R^2 + T_y^2) \cdot (T_R + T_y) \quad (5.12)$$

Eşitlik (5.12) içerisindeki ε_{12} olarak ifade edilen emisivite değeri kanal içerisindeki paslanmaz çelik sac ile ürün yüzeyi arasındaki emisivite değeridir ve eşitlik (5.13)'e göre

hesaplanır [58]. Ürüne ait emisivite değeri 0.93 ve suyun emisivite değeri 0.95 olarak alınmıştır. Paslanmaz çeliğin emisivite değeri ise 0.66 olarak alınmıştır [59].

$$\varepsilon_{12} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \right) \quad (5.13)$$

iletim ile olan ısı transferi ise eşitlik (5.14)'e görülmektedir. Burada göz önüne alınması gereken durum ürünün iletim katsayısının yaş duruma göre alınması gerektiğidir.

$$\dot{Q}_I = k_y \cdot A_y \cdot \frac{(T_I - T_y)}{\delta} \quad (5.14)$$

Tüm bu değerlere bağlı olarak ürün havası için eşdeğer hava sıcaklığının belirlenmesi gereklidir. Eşdeğer hava sıcaklığı eşitlik (5.9)'un çözülmesi ile eşitlik (5.15)'e göre hesaplanabilir.

$$T_{\infty,e} = \frac{h \cdot T_{\infty} + h_R \cdot T_R + \frac{k_y}{\delta} \cdot T_I}{h + h_R + \frac{k_y}{\delta}} \quad (5.15)$$

Yapılan hesaplamalar yalıtımlı durum için irdelendiğinden eşitlik (5.15), eşitlik (5.16) şeklinde yazılarak eşdeğer hava sıcaklığı belirlenebilir.

$$T_{\infty,e} = \frac{h \cdot T_{\infty} + h_R \cdot T_R}{h + h_R} \quad (5.16)$$

Daha sonra yüzey sıcaklığının belirlenmesi gerekmektedir. Yüzey sıcaklığı eşitlik (5.17)'deki eşitliğin sağ ve sol tarafının yüzey sıcaklığına bağlı olarak ayrı ayrı çizilen eğrilerin kesim noktası ile bulunur [58]. Şekil 5.22'de %30 bağıl nem ve 50 °C sıcaklık için bulunan sıcaklık değeri görülmektedir.

$$T_{\infty,e} - T_y = \frac{h_{sb}}{C_{p,b}} \left[(1 + B)^{\gamma^*} - 1 \right] \quad (5.17)$$

Eşitlik (5.17) içerisindeki B ve γ^* değerleri boyutsuz sayılardır ve eşitlik (5.18) ile eşitlik (5.19)'a göre bulunurlar [58].

$$B = \frac{P_{b,y} - P_{b,\infty}}{P - P_{b,y}} \quad (5.18)$$

$$\gamma^* = \gamma \cdot \frac{Bi}{1 + Bi} \cdot \frac{h}{h + h_R} \quad (5.19)$$

Eşitlik (5.19) içerisindeki γ değerleri eşitlik (5.20)'ye göre bulunur. Bu eşitlik içerisindeki Le sayısı ısı yayılım ve kütle yayılım katsayılarının oranıdır. Le sayısı bulunurken film sıcaklığına bağlı hava değerleri gözönüne alınmıştır [58].

$$\gamma = \frac{M_b}{M_h} \cdot \frac{C_{p,b}}{C_{p,h}} \cdot Le^{-2/3} \quad (5.20)$$

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (5.21)$$

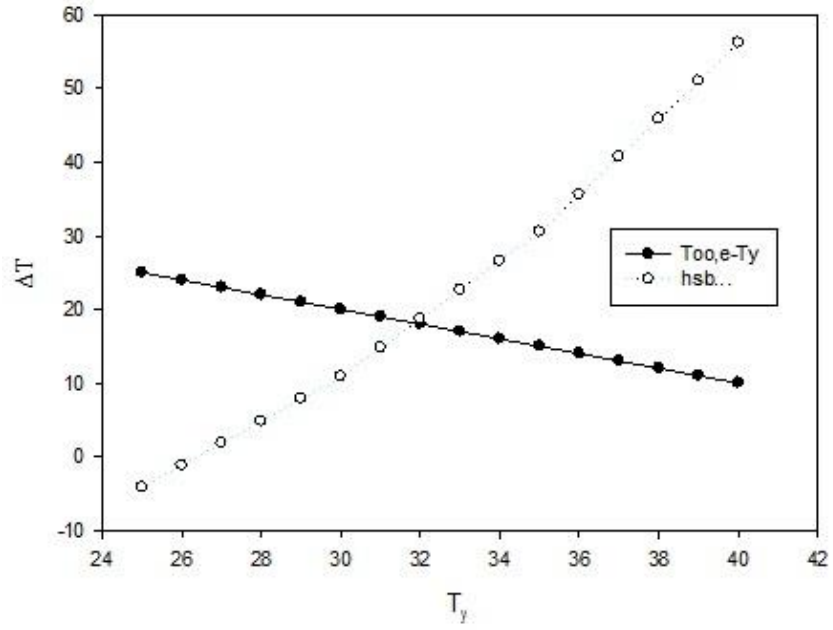
Eşitlik (5.19)'daki Bi sayısı bir maddeki iç ısı direncin sınır tabaka ısı direncine oranı olarak bilinmektedir. Bi sayısı ise en genel hal için eşitlik (5.22)'deki gibi yazılabilir.

$$Bi = \frac{(h + h_R) \cdot \delta}{k_y} \quad (5.22)$$

İletim ile ısı transferi olmadığı durumda $Bi = \infty$ değerini alır. Böylece eşitlik (5.19), eşitlik (5.23)'deki gibi ifade edilebilir [58].

$$\gamma^* = \gamma \cdot \frac{h}{h + h_R} \quad (5.23)$$

Bu değerler belirlendikten sonra yüzey sıcaklığı ilgili grafik çizdirilerek bulunur. Deneysel çalışmada ilgili yüzey sıcaklığı Şekil 5.18'deki görüldüğü üzere 31.6 °C olarak belirlenmiştir. Hesaplama sonucunda da yüzey sıcaklığının bu değere oldukça yakın olduğu grafik üzerinden görülmektedir.



Şekil 5.18 Sabit kurutma periyodundaki yüzey sıcaklığının belirlenmesi

Yüzeyden buharlaşma yoluyla ısı transferi eşitlik (5.24)'de gösterildiği gibi bulunur.

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_{b,l} \cdot h_{sb} \quad (5.24)$$

Sabit kurutma döneminde numuneden uzaklaşan nem değeri yaklaşık sabittir ve değeri sınır tabaka yüzeyindeki enerji dengesine bağlı olarak eşitlik (5.25)'e göre bulunabilir.

$$\dot{m}_{b,l} = h_m \cdot A_y \cdot (\rho_{b,y}(T_y) - \rho_{b,\infty}(T_{\infty,e})) \quad (5.25)$$

Ortam havasındaki ve yüzeydeki suyun doyma basınç değerleri oldukça küçük olduğundan bu durumda su buharı ideal gaz olarak alınabilir. Böylece eşitlik (5.25), eşitlik (5.26)'ya dönüşür [58].

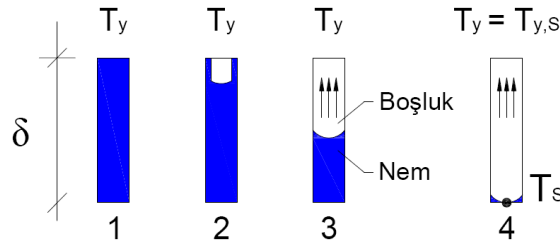
$$\dot{m}_{b,l} = h_m \cdot A_y \cdot \frac{(P_{b,y} - P_{b,\infty,e})}{R_b \cdot T} \quad (5.26)$$

Eşitlik (5.25) ve (5.26) içerisindeki h_m kütle taşınım katsayısı sınır tabaka davranışı bağlı olarak taşınım katsayısı ile arasında benzeşim kurulabilir. Böylece bu katsayılarından birinin bilinmesi ile diğeri kolaylıkla bulunabilir. Bu benzeşim eşitlik (5.27)'de gösterilmiştir [50], [56].

$$h_m = \frac{h}{\rho_h \cdot C_p \cdot Le^{2/3}} \quad (5.27)$$

Bu bölümün ikinci kısmında ise azalan kurutma dönemine ait hesaplamalar yapılmıştır. Azalan kurutma döneminde artık kurutma havası parametreleri yanısıra ürün iç yapısına bağlı olarak kurutma şekillenir.

Bu aşamada alt yüzeyin yalıtımlı olduğu modellemedeki zamana bağlı olarak bir poradaki nemin değişimi Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Şekildeki 1 durumu ürünün kurutucuya ilk yerleştirildiği anı ifade etmektedir. Kurutmanın ilerleyen zamanlarında 2 durumundaki gibi ürün içerisindeki nem ürün yüzeyine doğru kılcal hareket ile ilerlemektedir. Bu süreç belli bir süre sabit kurutma periyodunun devam etmesini sağlar. Ancak belli bir süre sonra ürün içerisindeki nem yüzeye ulaşamaz. Bu durumda 3'deki gibi nem yüzeyinde buharlaşan su yüzeye gaz difüzyonu ulaşır. Son durumda ise ürün içerisinde denge nem içeriğe bağlı olarak son nem transferinin olduğu an gösterilmiştir.



Şekil 5.19 Modellemedeki yaklaşıma göre numune içerisindeki bir por içerisindeki nemin değişimi

Şekilde gösterilen T_s değeri sanal kurutma sonu sıcaklığını temsil etmektedir. Azalan kurutmanın başladığı nem içeriği deneysel veriler üzerinden belirlenmiştir. Azalan kurutma periyodu literatürde de sıklıkla anlatıldığı gibi iki aşamada gerçekleşmiştir. Bu aşamaların ayrı ayrı kuruma hızları vardır. Bu döneme ait kuruma hızları eşitlik (5.28) ve (5.29)'da görülmektedir. Burada $m_{b,IIa}$ I. azalan kurutma periyodunu, $m_{b,IIb}$ II. azalan kurutma periyoduna bağlı kuruma hızlarını temsil etmektedir. Eşitlik içerisinde $M_{L,d}$ sabit kurutmadan azalan kurutma dönemine geçiş sırasındaki nem içeriğini ifade etmektedir [58].

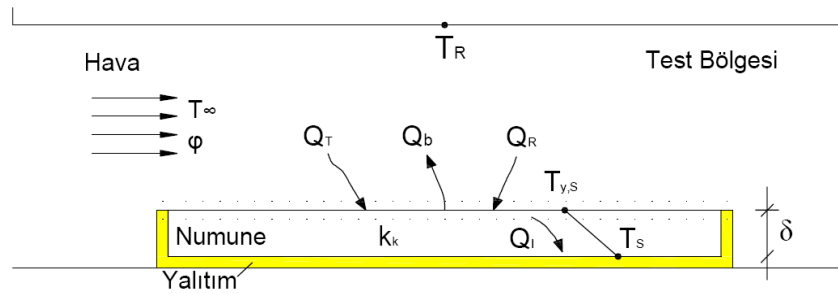
$$\dot{m}_{b,IIa} = (\dot{m}_{b,I} - \dot{m}_{b,S}) \left(\frac{M}{M_{1,d}} \right)^2 + \dot{m}_{b,S} \quad (5.28)$$

$$\dot{m}_{b,IIb} = (\dot{m}_{b,2d} - \dot{m}_{b,S}) \left(\frac{M}{M_{2,d}} \right)^2 + \dot{m}_{b,S} \quad (5.29)$$

II. azalan kurutma periyoduna ait nem içeriğinin dönüm noktası eşitlik (5.30)'a göre belirlenir [58]. Bu nem içeriğine ait kuruma hızı da eşitlik (5.31)'deki sabit kurutma dönemindeki kuruma hızı değeri yerine konulur. Denge nem içeriği ise deneysel çalışma sırasında kuru nem içeriğe bağlı olarak belirlenmiş ve kuru nem içerisine bağlı olarak yaklaşık 0.02 değerinde olduğu belirlenmiştir.

$$M_{2,d} = \frac{M_{1,d} + M_e}{2} \quad (5.30)$$

$m_{b,S}$ ise sanal kurutma sonu sıcaklığını ifade etmektedir. Bu değer bulunması için öncelikle kurutma sonundaki yüzey ve numune alt yüzey sıcaklığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerlerin bulunabilmesi için numune yüzeyinde enerji dengesi eşitlik (5.31)'deki gibi kurulur. İlgili denge için şematik resmi Şekil 5.20'de görülmektedir.



Şekil 5.20 Kurutma sonu için enerji dengesi şematik gösterimi

$$\dot{Q}_T + \dot{Q}_R = \dot{Q}_I \quad (5.31)$$

Yüzeyden iç kısımlara iletim, taşınım ve radyasyon ile olan ısı transferi son durum için aşağıdaki eşitliklere göre bulunabilir.

$$\dot{Q}_I = k_k \cdot A_y \cdot \frac{(T_{y,S} - T_S)}{\delta} \quad (5.32)$$

$$\dot{Q}_T = h.A_y.(T_\infty - T_{y,S}) \quad (5.33)$$

$$\dot{Q}_R = h_R.A_y.(T_R - T_{y,S}) \quad (5.34)$$

Bu eşitliklerde sabit kurutma periyodunda yapılan hesaplarında kullanılan sıcaklıklar son durumda ölçülen sıcaklık değeri ile ortam sıcaklığının ortalaması alınarak bulunan değere göre alınmıştır. Bu duruma bağlı olarak ilgili sayıları bu bölüm için tekrar hesaplanmıştır.

eşitlik (5.31)'nin çözülmesi ile son durumdaki yüzey sıcaklığı bulunabilir.

$$T_{y,S} = \frac{h.T_\infty + h_R.T_R + \frac{k_k}{\delta}.T_S}{h + h_R + \frac{k_k}{\delta}} \quad (5.35)$$

Ortam eşdeğer sıcaklığı ise son durum için aşağıdaki eşitliğe göre bulunur.

$$T_{\infty,e} = \frac{h.T_\infty + h_R.T_R}{h + h_R} \quad (5.36)$$

Aynı zamanda son andaki iletim ile olan ısı transferi buharlaşma ile olan ısı transferine eşit olarak alınabilir.

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_{b,S} \quad (5.37)$$

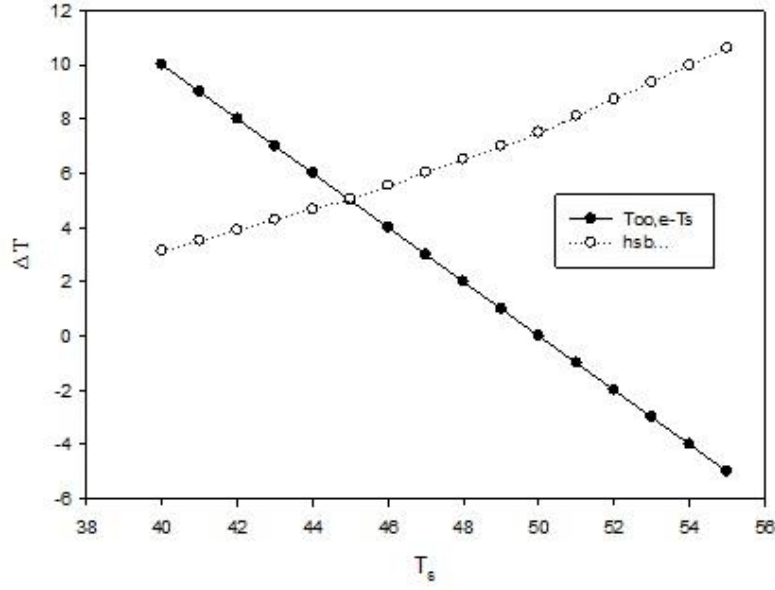
Sanal kurutma sonundaki alt yüzeydeki sıcaklık eşitlik (5.38)'e göre belirlenir [58].

$$T_{\infty,e} - T_S = \frac{h_{sb}(T_S)}{C_{p,b}} \left[(1 + B_S)^{\gamma^{**}} - 1 \right] \quad (5.38)$$

Bu eşitlik içerisindeki B_S ve γ^{**} değerleri boyutsuz sayılardır ve eşitlik (5.39) ve eşitlik (5.40)'a göre belirlenirler [58].

$$\gamma^{**} = \gamma \cdot \frac{1 + Bi}{1 + Bi_m} \cdot \frac{h}{h + h_R} \quad (5.39)$$

$$B_S = \frac{P_{b,S} - P_{b,\infty}}{P - P_{b,S}} \quad (5.40)$$



Şekil 5. 21 Kurutma sonu alt yüzey sıcaklığının belirlenmesi

Eşitlik (5.39) içerisindeki Bi sayısında son durumda numunenin kuru durumdaki ısı iletim katsayısı kullanılır. Bi_m sayısı iç madde yayılım direnci ile sınır tabaka madde geçişi direnci arasındaki orandır ve eşitlik (5.42) ile gösterilmektedir [58].

$$Bi = \frac{(h + h_R) \cdot \delta}{k_k} \quad (5.41)$$

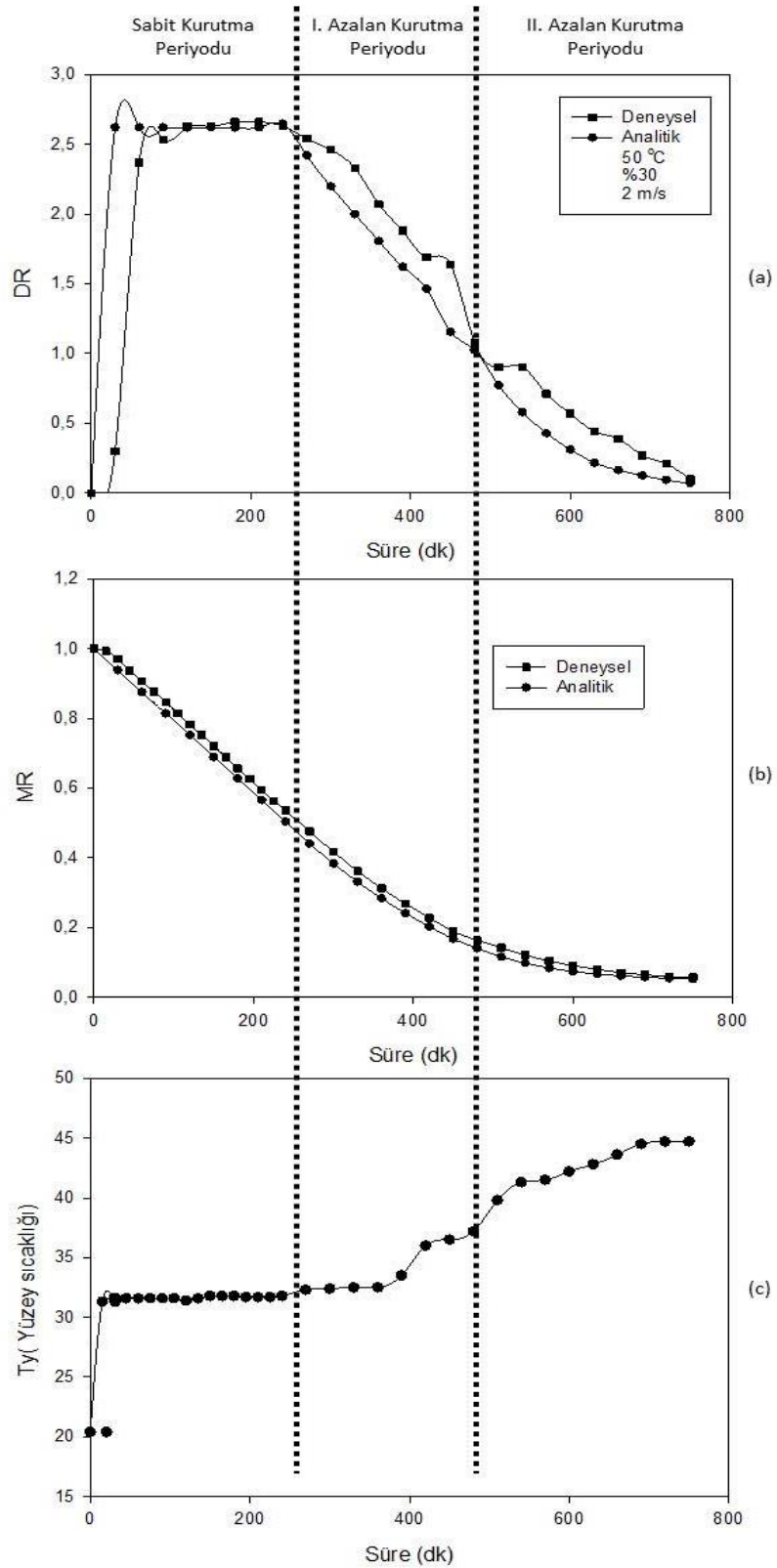
$$Bi_m = \frac{h_m \cdot \delta \cdot \xi}{D_{AB}} \quad (5.42)$$

Eşitlik (5.42) içerisindeki ξ değeri difüzyon direnç katsayısıdır ve deneysel olarak belirlenir.

$$\xi = \frac{(1/D)_{cisim}}{(1/D)_{AB}} \quad (5.43)$$

Bu değerler belirlendikten sonra sanal kurutma sonundaki kurutma hızı ve sıcaklık değerleri belirlenebilir [58].

$$\dot{m}_{b,S} = \frac{h_m \cdot P}{R_b \cdot T} \cdot \frac{1}{1 + Bi_m} \cdot B_S \quad (5.44)$$



5.5 Sonuçlar

Bu alışma da ini üretim prosesinin en önemli aşamalarından biri olan ini hammaddesinin kurutulması incelenmiştir. Kurutma havası sıcaklığı, bağlı nem, kalınlık ve kanal içi hava hızının değişiminin kurutma süresine ve kurutma davranışa etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Deneelerde rn içerisindeki nem miktarının kuru madde başına % 31±1 değerinden %2±0.5 değerine kadar kuruduğu bu değerlerden sonra nem transferinin çok zor olduğu gözlemiştir.
- Kuruma havası sıcaklığının kuruma süresini çok etkilediği belirlenmiştir. Artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak hem kütle taşınım katsayısının hem de efektif difüzyon katsayısının oldukça arttığı gözlenmiştir. Bu durumlara bağlı olarakta kuruma süresi oldukça kısalmaktadır.
- Kuruma havası içinde bulunan bağlı nemin azalması ile ürün yüzeyi ve hava arasındaki konsantrasyon farkına bağlı olarak kurutma daha hızlı gerçekleşmekte ve kurutma süresi azalmaktadır. İletimin incelendiği kalıpların kullanıldığı deneelerde bağlı nem değerinin % 50'den % 30'a indirilmesiyle, toplam kuruma süresinin % 15 oranında azaldığı belirlenmiştir.
- Kurutma havası hızı arttığa taşınım katsayısı artmakta, buna bağlı olarakta kütle taşınım katsayısı artmaktadır. Artan kütle taşınım katsayısı ise üründen nemin uzaklaştırılmasını hızlandırmaktadır. Genel olarak yaklaşık 2.0 m/s hız değerine kadar hızın artmasının kuruma süresini nispeten azaltığı görülmüştür. Ancak 2.0 m/s hız değerinden sonra artan hızlarda kurutma sresinde bir değişiklik olmadığı saptanmiştir.
- Kurutulacak ürünün kalınlığı arttığa kuruma süresi de artmaktadır. 1.2 cm kalınlığındaki numunenin kuruma süresi 800 dakika iken 0.5 cm kalınlığındaki ürünün kuruma süresi yaklaşık olarak %50 daha kısa zamanda, 420 dakikada tamamlanmiştir.

- Farklı ısı transfer mekanizmalarının kurumaya etkisinde ise; en uzun kuruma süresi yalıtımlı kalıbın kullanıldığı durumda gözlenmiştir. Bu deneylerde ısı ve kütle transferi yalnızca tek yüzeyden olduğu durumdaki kurutma davranışı ve kurutma süresi incelenmiştir. Daha sonra iki yüzeyden ısı transferinin ve tek yüzeyden kütle transferinin olması durumu incelenmiştir. Son olarakta iki yüzeyden her iki yüzeyinden ısı ve kütle transferine izin veren durum incelenmiştir. Sonuç olarak 1 cm kalınlığındaki numunenin incelendiği yalıtımlı kalıp ile yapılan deneyler sonucunda kurutma süresi yaklaşık 720 dk, iletimin etkisinin görüldüğü kalıplar için kurutma süresi 560 dk ve her iki yüzeyden kütle transferinin incelendiği deneyler için kurutma süresi yaklaşık 390 dk olarak gerçekleşmektedir.
- Çalışmada ayrıca ısı ve kütle transferi teorik olarak incelenmiştir. Teorik çalışma sonucunda bulunan yüzey sıcaklığının, kurutma davranışı ve kuruma süresi deneysel olarak belirlenen yüzey sıcaklığının, kurutma davranışı ve kuruma süresi ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.
- Deneysel sonuçlara bağlı olarak ince cisimler için literatürde sıklıkla kullanılan matematiksel modellerden bazılarının doğrusal olmayan regresyon analizi yapılmış ve deneysel verilere uyumlulukları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hemen hemen bütün modeller uygun sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak en uygun değerleri Page ve Midilli vd. tarafından önerilen modellerin sağladığı gözlenmiştir.
- Çalışmada ürüne ait efektif difüzyon katsayıları yapılan deneylere bağlı olarak Crank modeline bağlı olarak bulunmuştur. Çini hammaddesine ait difüzyon katsayısının $4,669E-09$ ile $8,106E-10$ arasında değiştiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] DPT, (2001). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Yayın No: DPT: 2552 – ÖİK: 568, Ankara.
- [2] Mujumdar, A. S., (2007). Handbook of Industrial Drying, Third Edition, CRC press, Boca Raton.
- [3] Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A., Chou, S.K. ve Ho, J.C., (2001). “Convective Drying of Agricultural Products. Effect of Continuous and Stepwise Change in Drying Air Temperature”, Drying Technology, 19:1949-1960.
- [4] Mujumdar, A.S. ve Passos, M.L., (2000). “Innovation in Drying Technologies. In Drying Tec”, Drying Technology, 19:1949-1960.
- [5] Kaya, A., (2008). Kurutmada Isı ve Kütle Transferinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [6] Briscoe, B. J., Biundo, G. L. ve Özkan, N., (1998). “Drying Kinetics of Water-Based Ceramic Suspensions for Tape Casting”, Ceramic International, 24:347-357.
- [7] Ghosal, S., Naeini, A. E., Harn, Y. P., Draskovich, B. S. ve Pollinger, J. P., (2004). “A Physical Model for Drying of Gelcast Ceramics”, Journal of the American Ceramic Society, 82:513-520.
- [8] Chemki, S., Zagrouba, F. ve Bellagi, A., (2004). “Thermodynamics of water sorption in clay”, Desalination, 166:393-399.
- [9] Chemki, S. ve Zagrouba, F., (2005). “Water diffusion coefficient in clay material from drying data”, Desalination, 185:491-498.
- [10] Sander, A., Skansi, D. ve Bolf, N., (2003). “Heat and mass transfer models in convection drying of clay slabs”, Ceramics International, 29:641-653.
- [11] Silva, W. P., Silva, L. D., Farias, V. S. O. ve Silva, C. M. D. P. S., (2013). “Water migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach”, Ceramics International, 39:4017-4030.

- [12] Silva, W. P., Silva, C. M. D. P. S., Silva, L. D. ve Farias, V. S. O., (2013). "Drying of clay slabs: Experimental determination and prediction by two-dimensional diffusion models", *Ceramics International*, 39:7911-7919.
- [13] Utlu, Z., Hepbasli, A. ve Turan, M., (2011). "Performance Analysis and Assesment of an Industrial Dryer in Ceramic Production", *Drying Technology*, 29:1792-1813.
- [14] Musielak, G. ve Mierzwa, D., (2009). "Permanent Strains in Clay-Like Material During Drying", *Drying Technology*, 27:894-902.
- [15] Kowalski, S. J., Musielak, G. ve Banaszak, J., (2007). "Experimental Validation of the Heat and Mass Transfer Model for Convective Drying", *Drying Technology*, 25:107-121.
- [16] Dedour, L. ve Desmorieux, M., (2007). "An analytical model for internal moisture content during the decreasing drying rate period", *AIChE Journal*, 54:475-486.
- [17] Harun, Z., Gethin, D. T. ve Lewis, R. W., (2009). "Combined heat and mass transfer or drying ceramic (shell) body", *International Journal of Multiphysics*, 2:1-19.
- [18] Itaya, Y., Uchiyama, S., Hatano, S. ve Mori, S., (2007). "Drying Enhancement of Clay Slab by Microwave Heating", *Drying Tecnology: An International Journal*, 23:1243-1255.
- [19] Hassini, L., Azzouz, S., Peczalski, R. ve Belghith, A., (2007). "Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correction for shrinkage", *Journal of Food Engineering*, 79:47-56.
- [20] Crank, J., (1975). *The Mathematics of Diffusion*, Second Edition, Oxford University Press, Londra.
- [21] Wang, N. ve Brennan, J.G., (1995). "A mathematical model of simultaneous heat and moistue transfer during drying of potato", *Journal of Food Engineering*, 24:47-60.
- [22] Kechaou, N. ve Maâlej, M., (2007). "A simplified model for determination of moisture diffusivity of date from experimental drying curves", *Journal of Food Engineering*, 79:47-56.
- [23] Page, G., (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layer, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, Purdue Üniversitesi, Doğu Lafayette, Amerika.
- [24] Henderson, S.M. ve Pabis, S., (1961). "Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6:169-174.
- [25] Sacilik, K., Elicin, A.K. ve Unal, G., (2006). "Drying kinetics of uryani plum in a convective hot-air dryer", *Journal of Food Engineering*, 76(3):362-368.
- [26] Aktaş, M. ve Ceyhan, İ., (2009). "Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer", *Desalination*, 239:266-275.

- [27] Midilli, A., Kucuk, H. ve Yapar, Z., (2009). "A new model for single layer drying", *Desalination*, 20(7):1503-1513.
- [28] Vasić, M., Grbavčić, Z. ve Radojević, Z., (2014). "Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying", *Chemical Engineering and Processing*, 76:33-44.
- [29] Ramos, I.N., Miranda, M.R.M., Brandão, T.R.S. ve Silva, C.L.M., (2010). "Estimation of water diffusivity parameters on grape dynamic drying", *Journal of Food Engineering*, 97:519-525.
- [30] Vega-Galvez, A., Miranda, M., Díaz, L.P. ve Lopez, L., (2010). "Effective moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake", *Bioresource Technology*, 101:7265-7270.
- [31] Kingsly, R.P., Goyal, R.K., Manikantan, M.R. ve Ilyas, S.M., (2007). "Effects of Preatreatments and Drying Air Temperature on Drying Behaviour of peach slice", *International Journal Food Science*, 42:65-69.
- [32] Doymaz, İ., (2012). "Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (*Diospyros kaki* L.)", *Energy Conversion and Management*, 56:199-205.
- [33] Doymaz, İ., (2004). "Drying Kinetics of White Mulberry", *Journal of Food Engineering*, 61:341-346.
- [34] Doymaz, İ. ve İsmail, O., (2011). "Drying Characteristic of Sweet Cherry", *Food and Bioproduct Processing*, 89:31-38.
- [35] Doymaz, İ., (2008). "Convective Drying Kinetics of White Strawberry", *Chemical Engineering and Processing*, 47:914-918.
- [36] Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S. ve Teng, A.B.W., (1991). "Drying Characteristics of Tomatoes", *Journal of Food Engineering*, 78:1291-1297.
- [37] Doymaz, İ., (2007a). "Air-drying Characteristics of Tomatoes", *Journal of Food Engineering*, 78:1291-1297.
- [38] Simal, S., Femenia, A., Garau ve M.C. Rossello, C., (1998). "A Use of Exponential, Page's and Diffusional Models to Simulate The Drying Kinetics of Kiwi Fruit", *Journal of Food Engineering*, 66:323-328.
- [39] Simal, S., Rosello, C., Berna, A. ve Mulet, A., (1998). "Drying of Shrinking Cylinder-Shaped Bodies", *Journal of Food Engineering*, 37:423-435.
- [40] Sacilik, K. ve Elicin, A.K., (2006). "The Thin Layer Drying Characteristic Of Organic Apple Slices", *Journal of Food Engineering*, 78:1291-1297.
- [41] Kaya, A., Aydın, O. ve Demirtaş, C., (2009). "Experimental and Theoretical Analysis of Drying Carrots", *Desalination*, 237:285-295.
- [42] Kaya, A., Aydın, O., Demirtas, C. ve Akgün, M., (2007). "An Experimental Study on the Drying Kinetics of Quince", *Desalination*, 212:328-343.
- [43] Doymaz, İ., (2007b). "The Kinetics of Forced Convective Air-Drying of Pumpkin Slices", *Journal of Food Engineering*, 79:243-248.

- [44] Panchariya, P.C., Popovic, D. ve Sharma, A.L., (2002). "Thin-Layer Modelling of Black Tea Drying Process", Journal of Food Engineering, 52:349-357.
- [45] Dincer, I. ve Dost, S., (1996). "A modelling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of solid objects", International Journal of Energy Research, 20:531-539.
- [46] Dincer, I., Hussain, M.M., Sahin, A.Z. ve Yilbas, B.S., (2002). "Development of a new moisture transfer (Bi-Re) correlation for food drying applications", International Journal of Heat and Mass Transfer, 45:1749-1755.
- [47] Dincer, I. ve Hussain, M.M., (2002). "Development of a new Bi-Di correlation for solid drying", International Journal of Heat and Mass Transfer, 45:3065-3069.
- [48] Dincer, I. ve Hussain, M.M., (2004). "Development of a new Biot number and lag factor correlation for drying applications", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47:653-658.
- [49] İTO, (2006). Çini Araştırması, İstanbul.
- [50] Çengel, Y. A. ve Ghajar, A.J., (2011). Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.
- [51] İnce, R., (2008). Bazı Yağlı Tohumların Isısal Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [52] Kaya, A., (2008). Kurutmada ısı ve kütle transferinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [53] Günerhan, H., (2009). "Endüstriyel Kurutma Sistemleri", Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Sayı:13
- [54] Chou, S.K., Hawlader, M.N.A. ve Chua, K.J., (1999). "Identification of the Receding Evaporation Front in Convective Food Drying", Drying Technology: An International Journal, 15:1553-1576.
- [55] Kuzgunkaya, H. E., (2006). Güneş Enerjisi Destekli Toprak Kaynaklı(Jeotermal) Isı Pompalı Bir Kurutucunun Enerji ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [56] Incropera, F. P. ve DeWitt, D. P., (2010). Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Altıncı Basım, Literatür Yayınları, İstanbul.
- [57] Roberts, J.S., (1999). Understanding The Heat and Mass Transfer of Hygroscopic Porous Materials, Doktora Tezi, The State University of New Jersey, Food Science, New Jersey.
- [58] Onat, K., Kurutma Tekniği Ders Notları
- [59] omega.com, Table of Emissivity Values, <http://www.ib.cnea.gov.ar/~experim2/Cosas/omega/emisivity.htm>, 10 Mayıs 2014.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Alişan GÖNÜL
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.01.1988 – Arguvan
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : agonul@yildiz.edu.tr, alisangonul@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	İnönü Üniversitesi	2009
Lise	Sayısal	Arguvan Ç. P. L.	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009	ASG Müh. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti.	Proje Mühendisi, Şantiye Şefi
2012	Alsan Mühendislik	Proje Mühendisi, Şantiye Şefi

2012 Siirt Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Araştırma Görevlisi
Fakültesi Makine Mühendisliği

2012 Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Araştırma Görevlisi
Fakültesi Makine Mühendisliği

YAYINLARI

Bildiri

1. Examination Of Velocity Effect On Drying Of Slurred Ceramic Raw Materials Including High Density Quartz
2. Comparative Economical Analysis of Air and Ground Source Heat Pumps for Different Climatic Regions of Turkey
3. A Comparison In Terms Of COP Values of Refrigerants Used In HVAC
4. The Recent Developments Of Refrigerants, A Review

Proje

1. Çini Kurutmasının İncelenmesi [YTÜ BAP Projesi (Yülap)]

ÖDÜLLERİ

1. Arguvan Çok Lise Birincisi
Programlı Lisesi
2. İnönü Makine Mühendisliği Bölüm İkincisi, B aşarı Belgesi
Üniversitesi