

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TANECİKLİ MALZEMELERİN KURUMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Hakkı TONYALI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsmail Yalçın URALCAN

EYLÜL 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TANECİKLİ MALZEMELERİN KURUMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İbrahim Hakkı TONYALI
(503111141)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İsmail Yalçın URALCAN

EYLÜL 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111141 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İbrahim Hakkı TONYALI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TANECİKLİ MALZEMELERİN KURUMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. İ. Yalçın URALCAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Ümran ERÇETİN**
Dumlupınar Üniversitesi

Teslim Tarihi : **24 Eylül 2013**
Savunma Tarihi : **25 Eylül 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Çalışmamın başlangıcından bitimine kadar, benden yardımlarını esirgemeyen birçok kişiye teşekkür borçluyum. Özellikle değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İ.Yalçın URALCAN'a bana ayırdığı değerli zaman, sağladığı destek ve sunduğu birlikte çalışma fırsatı için minnettarım.

Deney düzeneğinin yapım aşamasında her türlü teknik desteği sağlayan Isı Tekniği Laboratuvarı teknisyenlerinden Sayın Mehmet Ziya KUMCU ve Sayın Niyazi GÜVEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince bana karşı sonsuz desteklerinden ve sabırlarından ötürü aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eylül 2013

İbrahim Hakkı Tonyalı
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
2. KURUTMA.....	5
2.1 Kurutma.....	5
2.2 Kurutma Sistemleri	6
2.2.1 Kontakt Kurutma.....	6
2.2.2 Konvektif Kurutma	6
2.2.3 Işınım ile Kurutma	7
2.2.4 Dielektrik Kurutma	7
2.2.5 Dondurarak Kurutma	7
2.2.6 Ozmotik Kurutma	8
2.3 Kurutmanın Aşamaları ve Kinematiği	8
2.4 Kurutmayı Etkileyen Faktörler.....	10
2.4.1 Kurutma Havaının Sıcaklığı	11
2.4.2 Kurutma Havaının Bağlı Nemi.....	12
2.4.3 Kurutma Havaı Hızı	12
2.4.4 Ortam Buhar Basıncı.....	13
2.4.5 Malzemenin Kurutma Esnasında İstif Şekli.....	13
2.4.6 Malzemenin Cinsi, Boyutu Ve Gözenekliliği	13
2.4.7 Malzemedeki nem miktarı	14
2.4.8 Buharlaşma yüzey alanının büyüklüğü	16
2.4.9 Kurutucunun ısı yalıtımı	16
2.4.10 Kurutucunun Kapasitesi.....	16
3. MATEMATİK MODEL.....	17
3.1 Giriş.....	17
3.2 Kütle Dengeleri	17
3.2.1 Katı Kısımda Su İçin Kütle Dengesi	17
3.2.2 Hava Kısımında Su İçin Kütle Dengesi	19
3.3 Enerji Dengeleri	20
3.3.1 Katı Kısımda Su İçin Enerji Dengesi	21
3.3.2 Hava Kısımında Su İçin Enerji Dengesi	23
3.4 Arayüzey Özelliklerinin Belirlenmesi.....	25

3.4.1 Arayüzey Sıcaklığının Belirlenmesi.....	25
3.4.2 Su Aktivitesi.....	25
3.4.3 Arayüzeydeki Havanın Nem Oranı.....	26
3.4.4 Arayüzeydeki Katının Nem Oranı.....	27
3.5 Matematik Modelde Kullanılan Parametreler	27
3.5.1 Sabit Parametreler	27
3.5.2 Sıcaklığa Bağlı Parametreler	27
3.5.2.1 Havanın Yoğunluğu	28
3.5.2.2 Havanın Dinamik Viskozitesi ve Isı İletim Katsayısı	30
3.5.2.3 Özgül Isılar.....	30
3.5.2.4 Difüzyon Katsayıları	32
3.5.2.5 Suyun Doyma ve Kısmi Basıncı	32
3.5.2.6 Gizli Buharlaşma Isısı	33
3.5.2.7 Katı Kısımın Isı ve Kütle Geçiş Katsayıları.....	34
3.5.2.8 Hava Tarafının Isı ve Kütle Geçiş Katsayıları	35
3.6 Ayırıklaştırma.....	36
3.6.1 Kütle Dengesi Denklemlerinin Ayırıklaştırılması.....	36
3.6.2 Enerji Dengesi Denklemlerinin Ayırıklaştırılması.....	37
4. DENEYSEL ARAŞTIRMA.....	41
4.1 Amaç.....	41
4.2 Deney Düzenegi	41
4.2.1 Terazî.....	42
4.2.2 Fırın Ana Gövde.....	42
4.2.3 Isıtıcı.....	43
4.2.4 Davlumbaz	46
4.2.5 Kontrol Hacmi.....	48
4.3 Deneyi Etkileyen Parametreler ve Ölçümleri.....	49
4.3.1 Sıcaklık.....	49
4.3.2 Hız	50
4.3.2.1 Orifis.....	50
4.3.2.2 Basınç Kaybının Ölçümü	52
4.3.2.3 Orifis Kalibrasyonu	52
4.3.3 Nem Miktarı	53
4.3.3.1 Sensörün Bağlı Nem Kalibrasyonu	54
4.3.3.2 Sensörün Sıcaklık Kalibrasyonu	56
4.4 Deneyler	58
4.4.1 Metot	58
4.4.2 Deneyin Yapılışı.....	61
4.4.3 Analiz	63
4.4.4 Hesaplama	63
4.4.4.1 Nem içeriğinin belirlenmesi	63
4.4.4.2 Kuruma Hızı.....	64
4.4.5 Deneyden Elde Edilen Bulgular	64
4.4.6 Kuruma Eğrilerinin Matematik Modellerle Kıyaslanması.....	85
4.4.7 Deney Sonuçlarının Kıyaslanması ve Yorumlanması.....	87
4.4.7.1 Hava Hızının ve Nem İçeriğinin Kuruma Süresi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi.....	87
4.4.7.2 Hava Hızının ve Nem İçeriğinin Kuruma Hızı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi.....	89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91

KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

ERH : Denge Nemi
RMSE : Root Mean Square Error

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Kurutucuların sınıflandırılması	5
Çizelge 2.2 : Bazı maddelerin kritik nem içerikleri (Mujumdar, 2000).	10
Çizelge 2.3 : Bazı cisimlerin gözeneklilikleri.(Kaviany,1995)	14
Çizelge 3.1 : Havanın Yoğunluğunun Sıcaklıkla değişimi.....	29
Çizelge 3.2 : Suyun özgül ısısının çeşitli sıcaklıklardaki değerleri (Çengel,1996). ..	31
Çizelge 3.3 : Çeşitli sıcaklık değerlerine karşılık gelen buharlaşma ısısı değerleri. .	33
Çizelge 4.1 : Basınç kaybı ortalama hız.	52
Çizelge 4.2 : Ortam şartlarındaki kumun nem içeriği.	59
Çizelge 4.3 : Doymuş haldeki kumun nem miktarı ve nem içeriği.	59
Çizelge 4.4 : Basınç kabı ve hız.	61
Çizelge 4.5 : Deneydeki hava hızları ve numune nem oranları.	63
Çizelge 4.6 : Deney1-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı. 65	
Çizelge 4.7 : Deney2-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı. 67	
Çizelge 4.8 : Deney3-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı. 70	
Çizelge 4.9 : Deney4-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı. 72	
Çizelge 4.10 : Deney5-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.	75
Çizelge 4.11 : Deney6-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.	77
Çizelge 4.12 : Deney7-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.	80
Çizelge 4.13 : Deney8-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.	82
Çizelge 4.14 : Kurutma eğrisi modelleri.....	85
Çizelge 4.15 : Henderson-Pabis modeline göre denklemler ve katsayılar	86

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Dondurarak kurutma sistemi (Cemeroğlu, 2004).....	8
Şekil 2.2 : Ozmotik basınç farkına bağlı su hareketi (Yağcıoğlu, 1999).....	8
Şekil 2.3 : Kurutmanın Aşamaları(Dinçer,2010).....	9
Şekil 2.4 : Yaş ve kuru termometre sıcaklık farkının kuruma hızına etkisi (1:3 kg su/kg KM, 2:1,4 kg su/kg KM, 3:0,6 kg su/kg KM) (Güner, 1991).	11
Şekil 2.5 : Zamana bağlı nem oranı ve kuruma hızı değişimleri.	15
Şekil 3.1 : Birim elemandaki kütle alışverişi.	18
Şekil 3.2 : Birim elemandaki enerji alışverişi.....	21
Şekil 3.3 : Havanın yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi.	28
Şekil 3.4 : Suyun özgül ısısının katı sıcaklığına göre değişimi.	31
Şekil 3.5 : Buharlaşma ısısının katı sıcaklığıyla değişimi.	34
Şekil 4.1 : Kurutma Fırını.	41
Şekil 4.2 : Fırın Ana Gövde 43	43
Şekil 4.3 : Plakaların ısıtıcıdaki dağılımı.	45
Şekil 4.4 : Isıtıcı ve üzerindeki delikli amiyant.	46
Şekil 4.5 : Davlumbaz parçalarının teknik resimleri.	47
Şekil 4.6 : Davlumbaz genel görünüm.	47
Şekil 4.7 : Al çubuklar ve terazi üstündeki kefe.	48
Şekil 4.8 : Kontrol hacmi.	49
Şekil 4.9 : Kontrol hacmindeki termokupl yerleşimi.	49
Şekil 4.10 : Hava akışını sağlayan motor ve hız ayarlama 50	50
Şekil 4.11 : Orifis (Url-1).	51
Şekil 4.12 : Orifisin bulunduğu borudaki basınç prizleri.	52
Şekil 4.13 : Basınç kaybı ve ortalama hız arasındaki ilişki.	53
Şekil 4.14 : Sensörlerin bağıl nem kalibrasyon eğrileri.....	55
Şekil 4.15 : Sensörlerin sıcaklık kalibrasyon eğrileri.	57
Şekil 4.16 : Fırın.	58
Şekil 4.17 : Deney düzeneği genel görünüm.	60
Şekil 4.18 : Basınç kaybı ve kaldırma etkisi arasındaki ilişki.	62
Şekil 4.19 : Deney1-Kuruma grafikleri.	66
Şekil 4.20 : Deney1 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	67
Şekil 4.21 : Deney2-Kuruma grafikleri.	68
Şekil 4.22 : Deney2 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	69
Şekil 4.23 : Deney3-Kuruma grafikleri.	71
Şekil 4.24 : Deney3 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	72
Şekil 4.25 : Deney4-Kuruma grafikleri.	73
Şekil 4.26 : Deney4 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	74

Şekil 4.27 : Deney5-Kuruma grafikleri.	76
Şekil 4.28 : Deney5 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	77
Şekil 4.29 : Deney6 Kuruma grafikleri.....	78
Şekil 4.30 : Deney6 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	79
Şekil 4.31 : Deney7 Kuruma grafikleri.....	81
Şekil 4.32 : Deney7 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	82
Şekil 4.33 : Deney8 Kuruma grafikleri.....	83
Şekil 4.34 : Deney8 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	84
Şekil 4.35 : Henderson-Pabis modeli katsayılarının hava hızı ile değişimi.....	86
Şekil 4.36 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma üzerindeki etkisi.	88
Şekil 4.37 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma hızı üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 4.38 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma hızı-nem içeriği ilişkisi üzerindeki etkisi.	90

SEMBOL LİSTESİ

a_v	: Özgöl alan [m^2/m^3]
A_{cev}	: Yanal Alan [m^2]
a_w	: Su aktivitesi
$C_{p,h}$	: Havanın özgül ısısı [J/kgK]
$C_{p,k}$	: Katının özgül ısısı [J/kgK]
$C_{p,s}$	: Suyun özgül ısısı [J/kgK]
$C_{p, sb}$	: Su buharının özgül ısısı [J/kgK]
d	: Boru çapı [m]
d_k	: Tanecik çapı [m]
D_0	: Referans difüzyon katsayısı [m^2/s]
D_{sh}	: Su-hava difüzyon katsayısı [m^2/s]
D_{sk}	: Su-katı difüzyon katsayısı [m^2/s]
E_a	: Aktivasyon enerjisi [J/mol]
h_h	: Havanın entalpisi [J/kgK]
h_k	: Katının entalpisi [J/kgK]
h_{sb}	: Gizli buharlaşma ısısı [J/kgK]
$\hat{h}_{cev}$	: Çevreye olan ısı geçiş katsayısı [W/m^2K]
$\hat{h}_h$	: Havanın ısı geçiş (taşınım) katsayısı [W/m^2K]
$\hat{h}_k$	: Katının ısı geçiş katsayısı [W/m^2K]
k_h	: Havanın ısı iletim katsayısı [W/mK]
k_k	: Katının ısı iletim katsayısı [W/mK]
kc_h	: Havanın kütle geçiş katsayısı [m/s]
kc_k	: Katının kütle geçiş katsayısı [m/s]
L_d	: Difüzyon uzunluğu [m]
L_k	: Karakteristik uzunluk [m]
M_h	: Havanın mol kütlesi [$kg/kmol$]
M_s	: Suyun mol kütlesi [$kg/kmol$]
$\dot{m}_h$	: Havanın debisi [kg/s]
P	: Havanın basıncı [kPa]
P_{bar}	: Havanın basıncı [bar]
P_d	: Suyun donma basıncı [kPa]
P_s	: Suyun kısmi basıncı [kPa]
R_u	: Universal gaz sabiti [$J/molK$]
S	: Kesit alanı [m^2]
T_a	: Ara yüzey sıcaklığı [K]
T_h	: Havanın sıcaklığı [K]
T_k	: Katının sıcaklığı [K]
X	: Katının nem oranı [kgH_2O/kg kurumadde]
X_a	: Arayüzeyin katı kısmının nem oranı [kgH_2O/kg kuru madde]
Y	: Havanın nem oranı [kgH_2O/kg kuru hava]
Y_a	: Arayüzeyin hava kısmının nem oranı [kgH_2O/kg kuru madde]
Vol	: Hacim [m^3]

Z	: Yatak yüksekliği [m]
Δt	: Zaman adımı [s]
Δz	: Dilim yüksekliği [m]
ε	: Gözeneklilik [gaz hacmi/yatak hacmi]
μ_h	: Havanın dinamik viskozitesi [kg/ms]
φ	: Havanın bağıl nemi
ρ_h	: Havanın yoğunluğu [kg/m ³]
ρ_k	: Katının yoğunluğu [kg/m ³]

TANECİKLİ MALZEMELERİN KURUMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Doğal ya da yapay olsun tanecikli malzemeler genellikle nem içeren, buharlaşabilen maddelerdir ve daha fazla kullanım için önemli ölçüde nemin atılması gerekebilir. Gözenekli yapıya sahip malzemedeki nemin, ısı ve kütle geçişi yardımıyla kurutucu akışkana(hava veya gaz) taşınması olayına kurutma denir. Kurutma gıda endüstrisindeki en önemli temel işlemlerden biridir. Gıdaların kurutularak muhafaza yöntemi ilk çağlardan beri uygulanmakta olan en eski muhafaza yöntemi ise de işlemin endüstriyel boyuta taşınması 18. yüzyılda gerçekleşmiştir. Kurutma işleminin; ekonomik değeri olan yeni ürünlerin elde edilmesi, ürün atıklarının yeni bir alanda değerlendirilmesine olanak sağlaması, ürünlerdeki su içeriğini azaltarak mikrobik bozulma ve istenmeyen reaksiyonları minimize etmek için uygun bir yol sunması, ürünün bozulmadan uzun süre dayanması, ürünlerin erken hasat edilmesine olanak vermesi gibi birçok amacı vardır. Enerji yoğun bir işlem olan kurutmanın daha iyi anlaşılabilmesi için ürün kalitesinin ve işlemin etkinliğinin optimize edilmesi önemlidir.

Son zamanlara kadar, kurutma işlemini yöneten fiziksel prensiplerin anlaşılması düşük seviyelerde kalmıştır. Gerçekçi koşullar altında kinetik veri elde etmek için ekipman ve teknik donanım alanında bazı yetersizlikler olsa da, kurutma konusunda yapılan ve süregelen çalışmalar kurutmanın altında yatan mekanizmanın anlaşılması için önemli gelişmeler ve ilerlemeler olmaktadır.

Sabit yataklarda taşınım ile kurutma hava ve su arasında kütle ve enerji transferinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği kompleks bir işlemdir. Bu kurutma işleminin anlaşılmasındaki temel amaçlardan biri sabit yatakta bulunan malzemedeki sıcaklık ve nem dağılımlarını tahmin edebilmektir. Sabit yatakta kurutma süresince gerçekleşen ısı ve kütle geçişi işlemlerini tanımlayabilmek için bazı modeller formülize edilmiştir.

Bu çalışmada, kurutma hakkında genel bir bilgi verildikten sonra nümerik çözümler için bir matematik model geliştirilmiştir. Sonrasında sabit yataklı kurutucunun tasarımı hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmada ise 1mm çapındaki kum taneciklerinden oluşan kontrol hacminde iki farklı bağıl nem miktarında ve dört farklı kurutma havası hızında tanecikli malzemedeki kuruma davranışının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Kurutma havası elektrikli ısıtıcı yardımıyla ısıtılmış ve giriş havası sıcaklığı tüm deneylerde 80 ± 1 °C civarında olacak şekilde ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyler bu şartlar altında gerçekleştirilmiş ve sonrasında elde edilen bulgular Henderson-Pabis modeliyle karşılaştırılmıştır. Sonuç kısmında da kurutma havası hızının kurutma üzerindeki etkisi ve kurutma modelindeki katsayıların hava hızıyla değişimi hakkındaki düşünce ve yorumlar paylaşılmıştır.

THE ANALYSING OF DRYING BEHAVIOUR OF PARTICULATE MATERIALS

SUMMARY

Particulate materials, whether natural or synthetic, usually contain moisture, that is, evaporable substances, which must often be removed to a considerable extent before the material is suitable for further use. Reduction of this moisture also saves weight, rendering transport easier and less costly in the case of finished products. With materials of biological origin, dehydration also inhibits microbial and other degradative damage, thus allowing long term storage.

By the help of heat and mass transfer, moving the moisture from porous material to desiccant liquid (air or gas) is called drying. When a humid solid is subjected to thermal drying, two processes carry out simultaneously: first, transfer of energy (generally as heat) from the surrounding ambient to evaporate the surface moisture, and second process is the transfer of internal moisture to the surface of the solid and its subsequent evaporation due to the first process. Drying is one of the most important unit operations in the food process engineering. Although drying of foods is the oldest preservation method that has been practiced since ancient times, drying process reached industrial scale in the 18th. century. Drying represents a feasible way in order to extend the shelf life of foods with high moisture contents, especially fruits and vegetables, by reducing their water content to an extension at which the microbial spoilage and undesirable reactions are minimized. As well as food industry, drying process plays an important role in a number of industries such as agriculture, medicine.

Drying is a sophisticated and energy intensive operation involving simultaneous heat, mass, and momentum transfer phenomena. A better understanding of the drying mechanisms is important to optimize both the quality of the product and the efficiency of the process and effective models are necessary for process design, optimization, energy integration, and control.

There are number of methods for removing moisture from a material. Some methods of desiccation involve forcing moisture out of a body by pressure or by heat without vaporization of the moisture. These methods are usually described as dewatering. On the other hand, drying is the process whereby the moisture is vaporized and is swept away from the surface, sometimes vacuum but normally by means of a carrier gas which passes through or over the moist material.

The development of mathematical models to describe drying processes has been a topic of many research studies for several decades. Until recently, our understanding of the physical principles that govern these drying operations was rudimentary. While there are still some inadequacies in the realm of equipment modeling and techniques for obtaining kinetic data under realistic conditions, there have been considerable advances toward addressing these deficiencies. Undoubtedly, the

observed progress has limited empiricism to a large extent. However, the design of dryers is still a mixture of science and practical experience.

The convective batch drying of substances in fixed beds is a complex process which involves the simultaneous heat and mass transfer between the air and product. One of the main objectives of understanding this drying process is to be able to predict the distributions of moisture content and temperature within the packed bed of the substances. Several models have been formulated to describe the heat and mass transfer processes during fixed bed drying.

In this study, we aimed to examine the drying behaviour of particulate materials. We started by sharing general information about drying process and giving literature abstract in the first chapter.

In the second part, drying, dryer types and drying systems was defined. Then drying systems; such as contact, convective, radiation, dielectric, osmotic and freeze dryings was explained basically. After drying kinetics and stages was told. Drying kinetics is depended on the changes of average material moisture content and average temperature with time, which identifies changes in temperature and moisture profiles through the drying body. Drying kinetics provides opportunity the amount of moisture evaporated, drying time, energy consumption, etc., to be computed and detected to a dramatically by the physico-chemical properties of the material. End of the chapter, parameters; air velocity, temperature, relative humidity, material temperature, moisture content, porosity, specific area, dryer capacity, ambient vapour pressure etc. effects on drying was clearly explained.

The mathematical modeling of the drying processes and equipment is one of the most important aspect of drying technology. Its aim is to allow to choose the most convenient working circumstances and then sizing the drying equipment and drying chamber accordingly to meet desired. In the third part, a mathematical model was generated. Firstly mass and energy balances was extracted step by step in the solid and gas phase for water. Entrance, exit, generation and storage terms was written for all balance equations. After calculations equivalences was obtained for solid phase, gas phase and interface. Finally, last versions of equations were discretized to provide numerical analysis.

In the fourth part, the experimental setup was explained gradually. Initially how we designed the experimental system was told briefly and some pictures were shared to facilitate understanding of system. After experiment parameters like temperature, velocity, moisture content and measurements of these parameters was clarified briefly. Measurement devices were introduced and how they could calibrated was explained simply. Then construction of experiments was told. Control volume consists by particulates of 1mm diameter. Experiments was carried out in two different moisture contents and four different air velocities at fixed bed dryer designed by us. Weight, temperature and relative humidity data were collected at regular intervals during experiment with computer programs and watched continuously. Temperature and humidity data were gathered by thermocouples and humidity sensors from entrance of control volume to exit of control volume at different points. For all experiments moisture content-time, drying rate-time, drying rate-moisture content, moisture ratio-time, temperature-time and relative humidity-time graphics were plotted. These graphics provided the possibility of interpretation about different moisture contents and air velocities effects on drying. To explain relations between drying rate-time, moisture ratio-time, RMSE and $\bar{X}^2$. Results

obtained experiments was commented and compared with Henderson-Pabis drying model. How model coefficients effected from changing air velocity and moisture content was tried to determined. To explain the relation between

End of the study, some ideas and comments were shared about drying behaviour of paticulate materials.

1. GİRİŞ

Kurutma işlemi gazlardan, sıvılardan veya katılardan su veya diğer sıvıların uzaklaştırılmasıdır. Bununla beraber kurutma teriminin en yaygın kullanım yeri katı maddelerden ısı yöntemlerle su veya uçucu diğer maddelerin uzaklaştırılması işlemini tanımlamaktadır (Güngör ve Özbalta, 1997).

Bir maddeden nemin çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılması işleminin genel ismidir. Gözenekli yapıya sahip maddedeki nemin, ısı ve kütle transferi yardımıyla alınması ve kurutucu akışkana (gaz veya hava) taşınması olayına kurutma denir.

Kurutma ısı ve kütle transferinin eş zamanlı olarak gerçekleştiği karmaşık bir işlemdir. Kurutulan malzemenin cinsine göre bu karmaşıklığın derecesi değişmektedir. Arzu edilen son ürünü elde edebilmek için kurutma işlemi uygun koşullar altında gerçekleştirilmelidir. Bu yüzden kurutma boyunca birçok parametrenin hesaba katılması gerekmektedir.

Kurutma gıda endüstrisindeki en önemli temel işlemlerden biridir ve yüksek nem miktarlarıyla gıdaların raf ömrünün uzatılmasında, meyveler ve sebzelerde su içeriğini azaltarak mikrobik bozulma ve istenmeyen reaksiyonları minimize etmek için uygun bir yol sunar.

Kurutma prosesi, gıda endüstrisi haricinde kimya, biyoteknoloji, seramik ,eczacılık, kağıt, maden ve ağaç gibi çeşitli endüstrilerde uygulanan temel bir işlem olmakla birlikte birçok alanda da enerji prosesleri için çok önemli bir ara procestir. Çoğu zaman endüstriyel bir ürünün işlenebilmesi için belirli kurulukta olması istenir. Örneğin seramik üretimi, seramik sinterlemeden önce kurutulmalıdır. Aksi takdirde nem daha sonraki yüksek sıcaklıklarda buharlaşır ve ürünü parçalar. Ayrıca; ekonomik değeri olan yeni ürünlerin elde edilmesi, ürün atıklarının yeni bir alanda değerlendirilmesine olanak vermesi, ürünün bozulmadan uzun süre dayanması, ürünlerin erken hasat edilmelerine olanak verilmesi için kurutma yapılır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada belirli bir çaptaki kum taneciklerinden, farklı miktarlarda nem içeren çeşitli kontrol hacimleri oluşturarak, kuruma boyunca davranışlarının incelenmesi sonrasında kum taneciklerinden oluşturduğumuz, gözenekliliğini ve nem miktarlarını bildiğimiz kontrol hacminden yola çıkarak tanecikli maddelerde kuruma davranışının analiz edilmesi ve altında yatan mekanizmanın algılanması amaçlanmıştır. Oluşturduğumuz matematik model yardımıyla ve belirlediğimiz sınır şartlar çerçevesinde tanecikli maddelerin kurumasının nümerik olarak çözülmesi ve elde edilen nümerik çözümlerin deneysel verilerle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

İlk olarak kurutma hakkında genel bilgi verildikten sonra, sabit yatakta kurutma için kütle ve enerji dengesi yazılmış ve matematik model oluşturulmuştur. Daha sonra deney düzeneğinin tasarımı ve sistemi oluşturan elemanlar tanıtılmış, deneyin nasıl yapıldığı anlatılmış deneyden alınan verilere grafikler yardımıyla görselleştirilmiştir. Sonrasında ise farklı hız ve nem içeriği değerlerinde tanecikli maddenin kuruma davranışı hakkında bil edinmek amacıyla deney sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Kurutma birçok alanda ihtiyaç duyulan bir işlem olduğundan dolayı bu konu hakkında yapılan birçok çalışma mevcuttur. Literatüre bakıldığında akışkan yatak konusunda yapılan araştırmaların çok fazla olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra mikrodalga enerjisi ile kurutmada revaçta olan konulardan bir tanesidir.

Bu çalışmada ise sabit yatakta tanecikli maddelerin kuruma davranışı incelenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmaların çoğu gıda maddeleri ile alakalı olduğu için silisyum kumunun sabit yatakta kurutulması ve hassas kütle ölçümü yaparak incelenmesi ile ilgili çalışmalara rastlanmamıştır.

Ratti ve Mujumdar (1993), sabit yatakta daralan higroskopik malzemelerdeki beklemeli kurutma için tasarım denklemlerini zamanla değişen giriş hava debisi için sayısal olarak çözmüşler. Önerdikleri model zamanla değişen kurutma şartları için önemli ölçüde esneklik sunmaktadır. Kurutma hava akış hızı azaldığında kurutma için toplam hava tüketiminde, kütle transferi prosesinin kontrolünden ve hava akış

hızındaki azalmadan bağımsız olarak azalma olduğunu teorik ve nümerik olarak göstermişler.

Ratti ve Mujumdar (1995), sabit yatakta kesikli kurutma için malzemelerin büzülme etkisinin de hesaba katıldığı bir model geliştirmişlerdi. Bu çalışmalarında ise ters hava akımının etkilerini de hesaba katacak şekilde modellerini genişletmişler. Sabit giriş havası şartları için simülasyon sonuçları ile silindir şeklindeki havuçların kurutulması süresince elde edilen deneysel verileri karşılaştırmışlar. Ters hava akımının ortalama kurutma eğrileri, nem içeriği ve bölgesel sıcaklıklar üzerindeki etkilerini analiz etmişler. Sonuçlar ortalama kuruma eğrilerinin hemen hemen aynı iken kurutma işlemine ters hava akımı uygulandığı zaman, yatakta nem ve sıcaklık profillerinin daha düz olduğunu göstermiş.

Herman-Lara ve arkadaşları (2001), çapraz hava akımı ile sabit yataklı kurutmada, kurutma işlemini özellikle de arafaz koşullarını simüle etmek için bir matematiksel model elde etmişler. Cebirsel ve kısmi diferansiyel denklemleri nümerik olarak sonlu farklar ve Runge-Kutta metodlarıyla çözmüşler. Simülasyon sonuçlarını, 50-60 °C kurutma havası sıcaklıklarında 1.0 ve 0.1 cm kalınlıklarında havuç plakalarının kurutulmasından elde ettikleri deneysel verilerle karşılaştırmışlar. Simülasyonda kalınlığı 1cm olan plakalarda su aktarımının iç difüzyonla kontrol edildiği bu yüzden de ara yüzey koşullarının kararlı durum olarak kabul edilebileceğini, bununla birlikte 0.1 cm kalınlığındaki plakalarda ise taşınımın baskın olduğu ve bundan dolayı da ara yüzey koşullarının zaman ve konuma bağlı olduğunu öngörmüşler.

Herman-Lara (2005), gıdaların sabit yatakta kesikli kurutulması simülasyonlarını, hava tapa akışı ve tam karışmış hava varsayımları yapılarak sapmaların ideal davranışının etkisini incelemek için geliştirmişler. Kurutma için hava, ürün ve ara yüzeydeki ısı ve kütle transferi ile birlikte suyun termodinamik dengesini de hesaba katan genel bir matematiksel model uygulamışlar. Sabit yatakta kurutma deneyini 1 cm kalınlığındaki manyok plakalar ile gerçekleştirmişler. Sonuçlara göre kurutma iç difüzyonla kontrol edildiği zaman tapa akışı ve tam karışım varsayımları arasında bir fark olmadığını tespit etmişler. Bununla birlikte proses iç difüzyon tarafından kontrol edilmediğinde ise bazı farklılıklar görmüşler. Simülasyon sonuçları ise hava çıkış sıcaklığı ölçümünün hava tapa(fış) akış davranışından olan sapmaları gösteren bir yol olduğunu göstermiş.

Ruiz-Lopez ve arkadaşları(2008) sabit yatakta gıdaların kurutulması işlemini periyodik ters hava akımlı ya da ter hava akımsız simule etmek için hava ve ürün arasındaki ısı ve kütle transferi mekanizmalarına dayanan matematik model geliştirmişler. İki farklı tanecik kalınlığı/yatak yüksekliği değeri için 50 ve 70 °C hava sıcaklıklarında ve 2 m/s hava hızında kurutma deneyini gerçekleştirmişler. Deneysel ve tahmin edilen veriler birbiriyle uyum göstermiş. Dahası sonuçlar, sabit yataklı gıda kuruması için önerilen modelin nem içeriği ve sıcaklık dağılımlarını tahmin edebildiğini ve daha yüksek frekanslı ters akış uygulamalarında daha kısa kurutma zamanı ve daha iyi nem ve sıcaklık profillerinin olduğunu göstermiştir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalardan matematik modelin kurulması için yararlanılmıştır. Deney düzeneğinin tasarımı tarafımızca yapılmış ve üretilmiştir. Deney sonuçları ise literatürden yararlanılarak grafik haline getirilmiştir.

2. KURUTMA

Bu bölümde kurutmanın tanımı yapılmış ardından aşamalarından ve kurutmaya etki eden faktörlerden bahsedilmiştir. Kurutmanın temel mekanizması hakkında bilgi verilmiştir.

2.1 Kurutma

Kurutma ısı, kütle ve momentum geçişlerini de kapsayan karmaşık bir işlemdir (Kouris,2006). Kurutma esnasında kristalleşme, büzülme ve şişme gibi fiziksel değişiklikler ve renk, yapı ve koku değişimi gibi kimyasal değişiklikler meydana gelebilir ve bunlar ısı ve kütle geçişini etkileyebilir. (Çalışkan,2006). Bu yüzden kurutma amaçlı temin edilen nemli maddenin ve kuru halinin fiziksel ve kimyasal durumu en başta ele alınması gereken bir özelliktir. Çünkü bu özellikler kurutucu seçimini, kurutma tipini ve birçok kurutma şartlarını etkilemektedir. Bu özelliklerin yanı sıra ürün boyutu, gözeneklilik, kurutma süresi, kurutma kapasitesi, işletme basıncı ve kurutma için gerekli ısı enerjisinin aktarım şekli gibi özelliklerde kurutma ve kurutucular için belirleyici özelliklerdir.

Çizelge 2.1 : Kurutucuların sınıflandırılması

Kriter	Kurutucu Tipleri
Çalışma Şekli	Yığın, Sürekli
Isı Enerjisi Girişi	Taşıyım,İletim Işınım, Yüksek Frekans
Kurutucudaki Ürünün Durumu	Hareketsiz, Hareketli, Titreşimli
Çalışma Şekli	Vakum, Atmosferik
Kurutma Ortamı	Hava, Kızgın Buhar

Kurutma işleminde, nemli madde içerisindeki sıvının buharlaşabilmesi için gerekli enerjinin sağlanması gerekmektedir. Nem geçişi işlemi aşağıdaki mekanizmalardan biri ya da birkaçı ile meydana gelir.

- Sıvı difüzyonu
- Buhar difüzyonu
- Knudsen difüzyonu (dondurarak kurutmada)
- Basınç farkı nedeniyle nem geçişi

2.2 Kurutma Sistemleri

Kurutma sırasında kullanılan kurutucular, ürünün özelliklerine uygun olmasının yanı sıra, kurutma işleminden beklenen özellikleri de sağlayacak yetenekte olmak zorundadır. Bu nedenle, birbirinden önemli farklılıklar gösteren çok çeşitli tiplerde kurutucular geliştirilmiştir. Tarım ürünlerinin kurutulması için, bu işleme gerek duyulan ilk günlerden günümüze kadar geçen süre içinde, güneş ışınlarının altına sermekten, dielektrik kurutma tekniklerine kadar kadar geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır (Yağcıoğlu, 1999).

Maddenin susuzlaştırılması kurutmanın yanında mekanik yöntemlerle de yani presleme, filtrasyon, santrifüjlenme işlemlerine tabi tutularak da yapılabilir. Kurutma tekniğinde maddede bulunan nem ısıl işlem yöntemiyle alınmaktadır. Bazı çok uygulanan temel kurutma yöntemleri aşağıda belirtilen şekilde sıralanabilir.

2.2.1 Kontakt Kurutma

Bu yöntemde, kurutma için gerekli ısı enerjisi, kurutulacak materyale, ısıtılmış yüzeylerden kondüksiyon yoluyla iletilir. Kurutulan ürüne iletilen ısı, sıcak yüzeye değen yaş materyalin ısıl kondüktivitesine ve sıcak yüzeyin ısı iletim katsayısına bağlıdır (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.2 Konvektif Kurutma

Bu yöntemde ısı, kurutucu ortamdan (genellikle sıcak hava kullanılır) yaş materyale konveksiyon yoluyla iletilir. Sıcak hava, kurutulan ürün tabakasının üzerinden, ya da içinden geçirilir. Bu yöntemin ısıl etkinliği kontakt kurutmaya göre daha düşüktür (Yağcıoğlu, 1999).

2.2.3 Işınım ile Kurutma

Bu yöntemde kurutma için gerekli ısı enerjisi, yaş materyale, kırmızı ötesi bölgesinde yer alan ışınlarla iletilir. Bu ışınlar, içinden geçtikleri ortamı ısıtmaz; kendilerini absorbe eden cisimleri ısıtırlar. Kızılötesi ışınların, yaş materyalin yüzeyinden itibaren etkilediği derinlik oldukça az olduğundan, bu yöntem ince film şeklinde serili tabakaların kurutulmasında kullanılır (Yağcıoğlu, 1999).

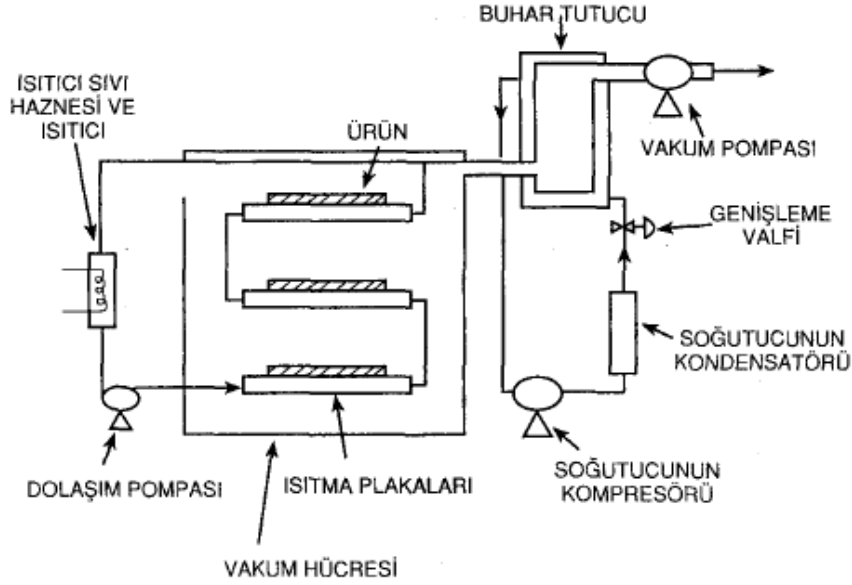
2.2.4 Dielektrik Kurutma

Nemli malzeme yüksek frekanslı elektrostatik alana yerleştirilirse, malzeme içinde ısı üretilir. Nemli bölgelerde kuru bölgelere göre daha fazla ısı üretilir. Bu şekilde malzeme içinde nem profili otomatik düzenlenir. Su, malzeme aşırı derece ısıtılmaksızın buharlaşır (Güngör ve Özbalta, 1997).

Bu kurutma yönteminde kurutulacak ürüne dışarıdan ısı transferi yapılmamaktadır. Yaş malzemesinin yüksek frekanslı alternatif akıma bağlı iki kondansatör levhası arasından geçirilmesi ile kurutma işlemi yapılmaktadır. Bu durumda yüksek frekanslı alternatif akımdan ötürü kondansatör levhalarının yükü sürekli olarak değiştiğinden, mamül içindeki su moleküllerinin de yeri sürekli değişmektedir. Bunun sonucunda su moleküllerinin sürtünmeleri nedeniyle meydana gelen ısı, ürün üzerindeki suyun buharlaşmasını sağlamaktadır. Dielektrik kurutma (10-100 MHz) ve mikrodalga kurutma (1000-3000 MHz) olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır . Bu tip kurutucular, homojen ve hızlı bir kurutma sağlamaları ve aşırı kurutma riskinin bulunmaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır(Url-2).

2.2.5 Dondurarak Kurutma

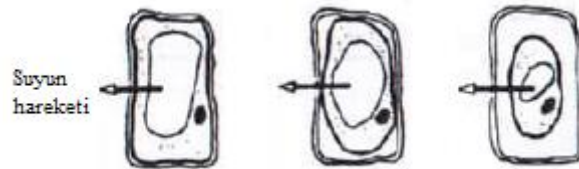
Dondurarak kurutma farmakolojik ürünler, serumlar, bakteri kültürleri, meyve suları, sebze, kahve ve çay özlerinin eldesinde, et ve süt üretiminde uygulanabilir. Malzeme önce dondurulur. Ardından kimyasal nem alıcı veya düşük sıcaklık yoğunlaştırucusu ile bağlantılı yüksek vakum uygulanan hacme alınır. Dondurulan malzemeye iletim veya kızılötesi radyasyon ile ısı geçişi sağlanır. Bu esnada uçucu element genellikle su süblimleşir ve yoğunlaşır, ya da nem alıcı madde tarafından absorplanır. Dondurarak kurutma genellikle -10 °C ile -40 °C arasında uygulanır. Dondurarak kurutma pahalı ve yavaş yürüyen bir işlemdir, ısıya duyarlı malzemeler için uygundur (Güngör ve Özbalta, 1997).



Şekil 2.1 : Dondurarak kurutma sistemi (Cemeroğlu, 2004).

2.2.6 Ozmotik Kurutma

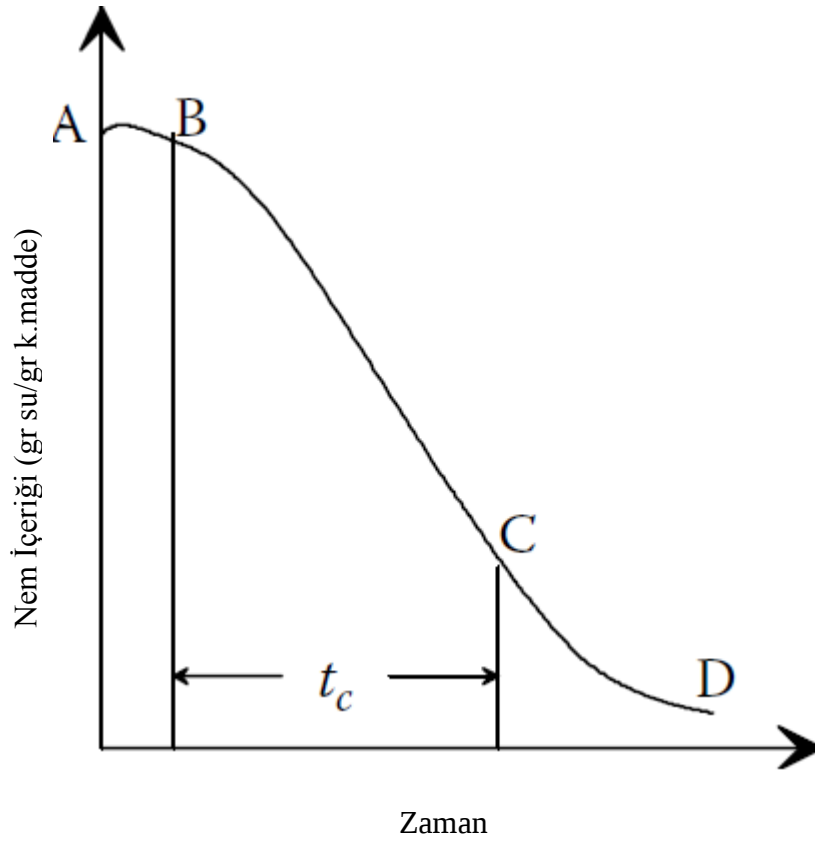
Meyve ve sebze dilimleri gibi gıdaların hipertonik bir çözelti içinde bekletilmesiyle su oranının düşürülmesi uygulamasına “ozmotik kurutma” denir. Burada suyun uzaklaştırılmasında buharlaşma değil ozmoz olayı rol oynamaktadır (Cemeroğlu, 2004).



Şekil 2.2 : Ozmotik basınç farkına bağlı su hareketi (Yağcıoğlu, 1999).

2.3 Kurutmanın Aşamaları ve Kinematiki

Kurutma işlemi su ve kurutulacak madde arasındaki bağ kuvvetlerinin çözümü ile başlar. Bunun içinde belirli bir enerjiye gereksinim vardır. Bu enerji, ısı enerjisi olarak kurutulacak maddeye sürekli olarak verilmelidir. Bu ısı katının yüzeyinde ve gözeneklerinde bulunan nemin havaya buharlaşmasını sağlar. Kurutma işlemi bu anlamda bir ısı ve kütle aktarım işlemidir (Yaşartekin, 1991).



Şekil 2.3 : Kurutmanın Aşamaları(Dinçer,2010)

Şekil 2.3'de gözenekli maddelere ait genel kuruma eğrisi verilmiştir. A-B arası maddenin sıcaklığının arttığı bölümdür. Bu bölümde kurutulacak maddenin yüzey sıcaklığı kurutma havası ile dengeye gelmektedir.

B-C arası kurumanın sabit hızda gerçekleştiği bölümdür. Bu aşamada kurutulan maddenin yüzeyi sıvıya doymuş haldedir. Diğer bir ifadeyle katının içinden yüzeye gelen sıvı miktarı buharlaşmayla yüzeyden ayrılan sıvı miktarı dengededir ve kurutma kurutulan yüzeyden olan ısı geçişine bağlıdır. Isı geçişi ile buharlaşan nem miktarı maddenin iç kısmından yüzeye olan sıvı akışı ile dengelenmektedir. Böylece kurutulan yüzey doymuş halde bulunmaktadır.

Kurutma işlemi devam ettikçe öyle bir noktaya ulaşılırki; artık kurutulan maddenin iç kısmından yüzeye ulaşan nem, buharlaşan nem miktarını karşılayamaz ve maddenin yüzeyi kurumaya başlar. C noktasında kuruma hızı azalmaya başlar ve kuruma azalan hızda devam eder. Bu noktadaki maddenin içerdiği nem "kritik nem içeriği" olarak adlandırılır. Bu noktadan sonra kurutma işlemi devam ettikçe kuruyan yüzeyin sıcaklığı artmaktadır. Azalan hızda kuruma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci

bölümde yüzey kurumakta ve kuruma hızı düşmeye başlamaktadır. İkinci bölümde ise buharlaşma yüzeyi katının içine doğru ilerlemekte ve kuruma hızı daha da azalmaktadır. Azalan hızda kuruma bölgesinde kuruma hızını en çok buharın katı içindeki hareketi ve hava etkilemektedir. Aşağıda bazı maddeler için kritik nem içerikleri verilmiştir.(Çalışkan,2002)

Çizelge 2.2 : Bazı maddelerin kritik nem içerikleri (Mujumdar, 2000).

Madde	Kritik Nem İçeriği X_c (kg su / kg kuru madde)
Tuz kristalleri, kaya tuzu, kum	0.05 - 0.10
Tuğla(kil), kaolin, mıcır	0.10 - 0.20
Kağıt, Toprak, Yün Kumaş	0.20 - 0.40
Çeşitli Besinler, Çamur	0.40 - 0.80
Jelatin Jel, Sebze, Meyve	> 0.80

2.4 Kurutmayı Etkileyen Faktörler

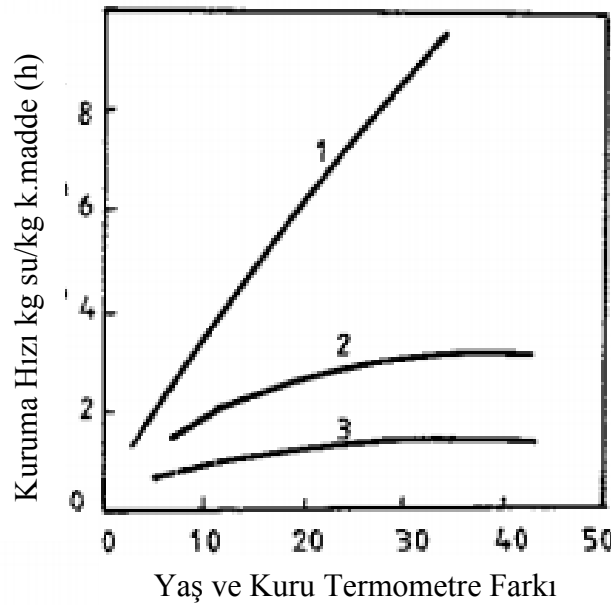
Kurutmada, kurutma gazı olarak genellikle hava kullanılır. Kurutma havası hızının ya da sıcaklığının artması; kullanılan enerji miktarının artmasına neden olur. Ürün içerisindeki nemin buharlaştırılması için verilmesi gereken enerjinin daha kısa sürede kurutma sistemine verilmesi ise, kurutma süresini azaltır. Kurutma havasının sıcaklığı nemi, ürün içerisindeki nem ise, kuruma hızını belirler. Kurutma havasının neminin azaltılması da bu kurutma hızını artırarak kurutma süresini kısaltır (Ersöz ve Doğan, 2003).

Kurutmayı etkileyen faktörleri incelerken, kurutma ortamındaki hava ile ilgili olarak havanın sıcaklığı, bağıl nemi, havanın hızı ve yönü dikkate alınmalıdır. Malzeme ile ilgili olarak malzemenin başlangıç ve sonuç nem miktarları, malzeme sıcaklığı, malzeme boyutu ve miktarı, gözeneklilik, buharlaşma yüzey alanı önemli parametrelerdir. Kurutma ve donanımın alakalı olarak da yapı malzemesinin türü ve özgül ısısı, kurutma cihazının ısı yalıtım durumu, kapasitesi ve boyutları, kurutma yöntemi, çevre iklim şartları dikkat edilmesi gereken hususlardır.

2.4.1 Kurutma Havasının Sıcaklığı

Havanın sıcaklığı kuruma hızını etkileyen faktörlerden biridir. Hava sıcaklığının artmasıyla birlikte maddenin yüzey sıcaklığıyla arasındaki fark artacağı için ısı geçişinde artmaktadır. Malzeme kurudukça malzeme sıcaklığı ile hava sıcaklığı arasındaki fark zamanla azalacak böylece ısı geçişinde de azalma görülecektir.

Yaş ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça kuruma hızı da artar. Bu doğru orantılı etki, kuruma başlangıcında çok belirginse de, kuruma ilerledikçe yaş ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark arttıkça kuruma hızının aynı oranda artmadığı görülür (Güner, 1991). Şekil 2.4.'de yaş ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki farkın kuruma hızı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Yaş ve kuru termometre sıcaklık farkının kuruma hızına etkisi (1:3 kg su/kg KM, 2:1,4 kg su/kg KM, 3:0,6 kg su/kg KM) (Güner, 1991).

Kurutma havasının sıcaklığının artması ile havanın içerisinde su buharı tutma özelliği ve malzemenin içerisindeki sıvının viskozitesi artmaktadır. İç kısımlardan yüzeylere doğru olan ısı geçişi de hızlanmaktadır. Böylece yüksek buharlaşma hızı oluşmakta ve kurutmanın süresi kısalmaktadır.

Kurutma sıcaklığının çıkabileceği maksimum değer malzemeye bağlıdır. Maksimum sıcaklık değeri aşıldığında malzemelerde büzüşme, çatlama, renk değiştirme ve

kabuk oluşumu gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilmekte bu da kurutmanın kalitesini düşürmektedir.

Malzeme düşük bir kurutma sıcaklığında kurutulduğunda ise, kurutulan malzemenin kalitesi yükselmekte, fakat kurutma süresi gerekenden fazla uzatılmış olmaktadır. Bu yüzden yapılan kurutma işlemlerinde kurutma süresi ve kurutma kalitesi dikkate alınarak en uygun sıcaklıkta kurutma yapılmalıdır.

2.4.2 Kurutma Havasının Bağlı Nemi

Teknik kurutmada malzemenin cinsi, kalınlığı ve nemine göre kurutmanın çeşitli kademelerinde kurutma ortamını oluşturan havanın belli nem miktarlarını içermesi koruyucu bir kurutmanın uygulanabilmesi bakımından önemlidir. Çeşitli kurutma kademeleri için yetersiz nem ihtiva eden hava içerisinde malzeme yüzeyleri çok hızlı bir şekilde kuruyarak, kurutmada önemli bir kusur olan dış sertleşme hali ve buna bağlı olarak diğer kusurlar ortaya çıkmaktadır. Teknik kurutmada bu şekilde meydana gelecek kusurlara engel olunması ve iç tabakalardan yüzeylere doğru uygun bir nem farkının oluşması ve devamlı nem akısının sağlanması için kurutmanın her kademesinde kurutma havasının yeterli miktarda nem içermesi gerekmektedir. Aksi durum ise yani bir kurutma işleminde kurutma fırını içerisinde kurutucu havanın nem miktarının fazla olması, kurutma süresinin gereksiz yere uzamasına, bu da kurutmada enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır (Biçer, 2009).

2.4.3 Kurutma Hava Hızı

Islak yüzeyden buharlaşma hızı, suya, ısı akışına ve nemli yüzeydeki düzgün tabaka yoluyla yayılan buhar miktarına bağlıdır. Yüzey üzerinden geçen yüksek akış hızına sahip hava akımı, bu düzgün tabakanın kalınlığını azaltıcı yönde etki eder. Isı transferinin ve aynı zamanda buharlaşma hızının artmasını sağlar. Hem su yüzeyinin hem de hava akımının türbülanslı olması buharlaşma miktarını artırır (UETM, 1997).

Kurutma hava hızının fazla olması durumunda iç kısımlarda meydana gelen hızlı kurumadan dolayı dış yüzeye doğru olan nem akışı bozulmaktadır. Bu nedenle çatlama ve sertleşmeler görülmektedir. Kurutma hava hızının düşük olması durumunda ise malzeme yüzeyinde nemi uzaklaştıramamaktadır. Bu nedenle

kurutma havası hızının belli sınırlar arasında tutulması kurutmanın kalitesi bakımından önemlidir(Bayhan,2011).

2.4.4 Ortam Buhar Basıncı

Ortamın buhar basıncı kuruma hızını etkileyen faktörlerden biridir. Kurutulacak malzemenin iç kısımlarındaki nemin yüzeye ulaşabilmesi için cisimdeki buhar basıncının ortamın buhar basıncından daha yüksek olması gerekmektedir. Ortamın buhar basıncının yüksek olması durumunda bu farkın sağlanabilmesi için cisme daha fazla ısı verilerek cisimdeki buhar fazının sıcaklığının artırılması gerekmektedir(Çalışkan,2002).

2.4.5 Malzemenin Kurutma Esnasında İstif Şekli

Malzemenin kurutucu içindeki istif şekli kullanılan kurutma tekniğine uygun ve kurutma havasının malzemeye tam temas etmesi sağlanacak şekilde olmalıdır. Düzgün bir hava dolaşımının sağlanması kurutma süresini azaltacaktır.Sıkı bir şekilde istif edilmiş, yerleştirilmiş numunede havanın temas yüzeyi azalmakta bu da kurutmadaki bir çok parametreyi etkilemektedir.

2.4.6 Malzemenin Cinsi, Boyutu Ve Gözenekliliği

Gözeneklilik katı yapıdaki boşluk oranı olarak ifade edilmektedir ve katı içindeki akışı etkilediği için kuruma hızını belirleyen faktörlerdendir. ε ile gösterilen gözeneklilik gaz hacminin yatak hacmine oranıdır.

$$\varepsilon = V_{\text{gaz}}/V_{\text{toplam}} \quad (2.1)$$

Kurutma sırasında gözenekli cisimlerin içinde buhar akışı iki mekanizma ile oluşmaktadır. Birincisi basınç farkı nedeniyle olan buhar akışıdır. İkincisi ise buhar difüzyonuyla olan akıştır. Buharın difüzyonu ile meydana gelen kütle geçişinin saptanabilmesi için buhar ve hava arasındaki difüzyon katsayısını da bilmek gerekmektedir. Bu katsayıda malzemenin gözeneklilik miktarına göre değişmektedir. Çizelge 2.3.'de bazı maddelerin gözeneklilikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Bazı cisimlerin gözeneklilikleri.(Kavany,1995)

Madde	Gözeneklilik
Poliüretan köpük	0,98
Fiberglas	0,88 - 0,93
Silis taneleri	0,65
Kara barut tozu	0,57 - 0,66
Deri	0,56 - 0,59
Taneli katalizör	0,45
Öğütülmüş taneli taş	0,44 - 0,45
Toprak	0,43 - 0,54
Kum	0,37 - 0,50
Silis tozu	0,37 - 0,49
Tuğla	0,12 - 0,34
Kum taşı (petrollü kum)	0,09 - 0,38
Kireç Taşı	0,04 - 0,10
Kömür	0,02 - 0,12

Malzemenin cinsine ve kalınlığına bağlı olarak kuruma sıcaklığı ve nem değerleri belirlenmektedir. Malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kurutma üzerindeki etkisi yadsınamayacak bir gerçektir. Bu yüzden kurutma koşullarının belirlenmesinde, malzemenin cinsine ve boyutlarına bağlı olarak sınırlar belirlendikten sonra kurutma havasının sıcaklığı, havanın nem oranı vb özellikler uygun olarak seçilmesi önemlidir. İdeal bir kurutma işlemi için dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir.

2.4.7 Malzemedeki nem miktarı

Kurutma havası veya kurutulacak malzeme nem miktarları genellikle mutlak birimlerde (kg nem / kg kuru madde) veya ağırlıkça kuru maddeye göre yüzde cinsinden ifade edilmektedir.

Ürünün içerdiği su kütlesinin ürünün kütlesine oranına nem oranı adı verilmektedir.

Nem oranı kuru ve yaş bazdaki nem oranı olarak ifade edilebilir.

Kuru baza göre nem oranı (X_{kb}), üründeki su kütlesinin, ürünün kuru kütlesine oranı olarak tanımlanır:

$$X_{kb} = \frac{m_{top}-m_k}{m_k} = \frac{m_s}{m_k} \quad (2.2)$$

Yaş baza göre nem oranı ise üründeki su kütlesinin ürünün toplam kütlesine oranıdır:

$$X_{yb} = \frac{m_s}{m_{top}} \quad (2.2)$$

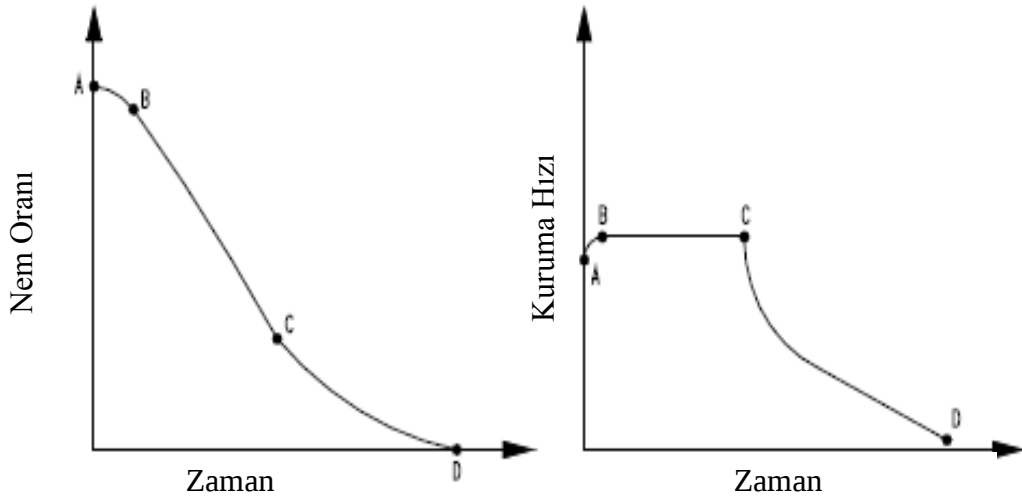
Burada m_s ürünün içerdiği su kütlesini, m_k ürünün içerdiği kuru kütlesini ve m_{top} maddenin toplam kütlesini ifade etmektedir.

Kuru ve yaş baza göre nem oranları aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla birbirine çevirilebilir:

$$X_{kb} = \frac{X_{yb}}{1 - X_{yb}} \quad (2.3)$$

Maddeyi çevreleyen havadaki su buharı ile madde içerisindeki nemin denge durumuna gelmesi ile teorik olarak maddenin kurutulması sona erer. Bu nem oranına denge nemi adı verilir.

Şekil 2.5’de bir maddenin kurutulması sırasında zamana göre nem oranı ve kuruma hızı değerlerindeki genel değişim görülmektedir.



Şekil 2.5 : Zamana bağlı nem oranı ve kuruma hızı değişimleri.

Şekil 2.5.’den izleneceği üzere, kurutma sürecinde; A-B ısınma süreci, B-C sabit kurutma hızı süreci ve C-D ise azalan hız süreci olarak adlandırılır. C, kritik nokta olarak nitelendirilir. Sabit kuruma koşullarında havanın sıcaklığı, nemi, hızı ve havanın akış yönü sabittir. Bu süreçte maddeden birim zamanda uzaklaşan su miktarı sabittir. Maddedeki su miktarı zamanla belirli bir düzeye indiğinde sabit kuruma hızı süreci sona ererek, “azalan kuruma hızı” süreci başlar. (Isaeva,2007).

2.4.8 Buharlaşma yüzey alanının büyüklüğü

Kurutma havasının malzemeyle temas ettiği yüzey alanının artması buharlaşma hızını artırmakta ve kurutma süresini de azaltmaktadır.

2.4.9 Kurutucunun ısı yalıtımı

Kurutma fırınının içerisindeki sıcaklık ve nemin muhafaza edilmesi ve dışarıya ısı kaçaklarının engellenmesi için iyi bir yalıtım yapılması gerekmektedir.

2.4.10 Kurutucunun Kapasitesi

Kurutucu kapasitesi ısı tüketimini etkilemektedir. Küçük ve normal kapasiteli kurutucuların enerji ihtiyaı büyük kapasiteli (50 m³ ten büyük) kurutuculara göre daha fazla olmaktadır (Kantay ve Bozkurt, 1980).

3. MATEMATİK MODEL

3.1 Giriş

Bu bölümde sabit yatakta kurutma işleminin matematik modelinin nasıl oluşturulduğundan bahsedilmiştir. Hangi kabullerin yapıldığı, kontrol hacmindeki hava ve katı kısımlarının kütle ve enerji dengelerinin çıkarılması ve özgül ısı, viskozite, entalpi, yoğunluk, ısı iletim katsayısı difüzyon katsayısı vb. Matematik model içerisinde kullanılan parametrelerin sıcaklığa bağlı olarak ifade edilişi gösterilmiştir.

Matematik model oluşturulurken Ratti(1993) nin kullanmış olduğu matematik model ve varsayımlarından yola çıkılmıştır. Bu model ve bundan yola çıkılarak geliştirilmiş modeller incelenmiş ve bunlar ışığında matematik model geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken şu varsayımlar yapılmıştır;

- Bir boyutlu ısı ve kütle geçişi
- Kurutucu içinde uniform hava hızı dağılımı
- Sadece taşınım ile ısı geçişi
- Yatakta tanecikler arasında iletimle ısı transferi ve temas difüzyonunun ihmal edilmesi

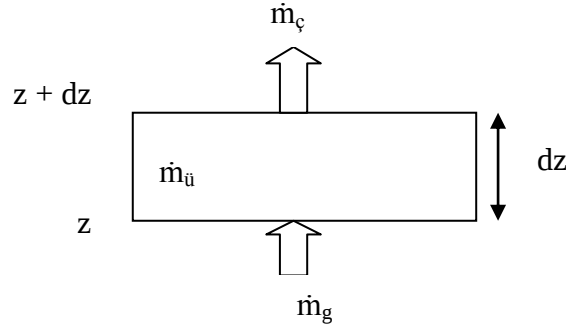
3.2 Kütle Dengeleri

Katı ve hava olmak üzere iki kısımda incelenen kurutulacak malzemenin bu iki kısımdaki su için kütle dengelerinin çıkarılması aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1 Katı Kısımda Su İçin Kütle Dengesi

Katı kısımdaki kütle alışverişinden yola çıkarak kütle dengesi çıkarılmıştır. Şekil 3.1 de gösterilen yüksekliği dz olan birim elemana giren, çıkan ve üretilen kütledebileri kullanarak birim zamanda depolanan kütleyi veren ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Birim elemandaki kütle alışverişi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\dot{m}_g - \dot{m}_\varphi + \dot{m}_\ddot{u} = \frac{dm_d}{dt} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 : Birim elemandaki kütle alışverişi.

Katı kısıma giren kütleli debi;

$$\dot{m}_g = 0 \quad (3.2)$$

Katı kısımdan çıkan kütleli debi;

$$\dot{m}_\varphi = 0 \quad (3.3)$$

Birim zamanda yokedilen suyun kütleli debisi;

$$\dot{m}_\ddot{u} = m'''_k \cdot S \cdot dz \quad (3.4)$$

Birim zamanda birim hacimden yokedilen kütle olarak ifade edilen m'''_k ise kütle akısı ile yatak hacmindeki tanecik yüzey alanının çarpımında elde edilmektedir.

$$m'''_k = -N_k \cdot a_v \quad (3.5)$$

Katı kısımda buharlaşan akı ise;

$$N_k = \rho_k \cdot k_{C_k} \cdot (X - X_a) \quad (3.6)$$

Birim zamanda yokedilen suyun kütleli debisi denklem (3.5) ve (3.6) den aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{m}_{\ddot{u}} = - \rho_k \cdot k c_k \cdot (X - X_a) \cdot a_v \cdot S \cdot dz \quad (3.7)$$

Katı kısımda depolanan su kütlesi, katı kısmın hacminin toplam hacme oranını ifade eden $(1-\varepsilon)$ ile yatak hacminin çarpımından elde edilen katı kısmın hacminin katının yoğunluğu ve nem içeriği ile çarpımından bulunmaktadır.

$$m_d = \rho_k \cdot (1 - \varepsilon) \cdot S \cdot dz \cdot X \quad (3.8)$$

Yukarıdaki ifadeler (3.1) de yerine konulduğunda katı kısımdaki su için kütle dengesini, diğer bir ifadeyle birim zamandaki katının nem içeriğinde olan değişimi veren ifade denklem (3.9) deki şekilde ifade edilmektedir.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-k c_k \cdot a_v \cdot (X - X_a)}{(1 - \varepsilon)} \quad (3.9)$$

3.2.2 Hava Kısımında Su İçin Kütle Dengesi

Şekil 3.1' deki birim elemanın katı kısmındaki gibi hava tarafı için de kütle dengesi denklem (3.1) deki gibidir. Katı kısmın aksine hava tarafında giren ve çıkan hava kütlesi mevcut olduğu için hesaba bunların da ilave edilmesi gerekmektedir.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_h \cdot Y_z \quad (3.10)$$

Hava kısmında çıkan kütleli debi;

$$\dot{m}_{\dot{c}} = \dot{m}_h \cdot Y_{z+dz} \quad (3.11)$$

Giren ve çıkan hava debilerinin farkı (3.10) ve (3.11) yardımıyla aşağıdaki (3.12) deki gibi ifade edilmiştir.

$$\dot{m}_g - \dot{m}_{\dot{c}} = - \dot{m}_h \cdot \frac{dY}{dz} \cdot dz \quad (3.12)$$

Üretim terimi ise birim hacimden birim zamanda üretilen kütle ile hacmin çarpımı sonrası (3.13) deki gibi elde edilmektedir.

$$\dot{m}_u = m'''_h \cdot S \cdot dz \quad (3.13)$$

Birim hacimden birim zamanda üretilen kütle ve kütle akısı ise aşağıdaki gibidir.

$$m'''_h = -N_h \cdot a_v \quad (3.14)$$

Hava tarafındaki

$$N_h = \rho_h \cdot k_{c_h} \cdot (Y_a - Y) \quad (3.15)$$

Birim zamanda üretilen suyun kütleli debisi ise denklem (3.14) ve (3.15) yerine konulduğunda (3.14) deki hale gelmektedir.

$$\dot{m}_u = -\rho_h \cdot k_{c_h} \cdot (Y_a - Y) \cdot a_v \cdot S \cdot dz \quad (3.16)$$

Hava tarafındaki depolama terimi ise havanın yoğunluğunun, gözeneklilik olarak da ifade edilen gaz hacminin yatak hacmine oranının ile yatak hacmi çarpımı sonucunda hesaplanan gaz/hava hacmiyle ve havanın nem içeriğiyle çarpımından elde edilmektedir.

$$m_d = \rho_h \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dz \cdot Y \quad (3.17)$$

Giren, çıkan, üretilen ve depolanan terimleri (3.1) deki denge ifadesindeki yerini aldığı anda hava tarafında su için kütle dengesi (3.18) daki hale gelmektedir.

$$\frac{dY}{dt} = \frac{k_{c_h} \cdot a_v \cdot (Y_a - Y)}{\varepsilon} - \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot S} \frac{dY}{dz} \quad (3.18)$$

Diğer bir deyişle (3.18) birim zamanda havadaki nem oranında olan değişim olarak da ifade edilebilir.

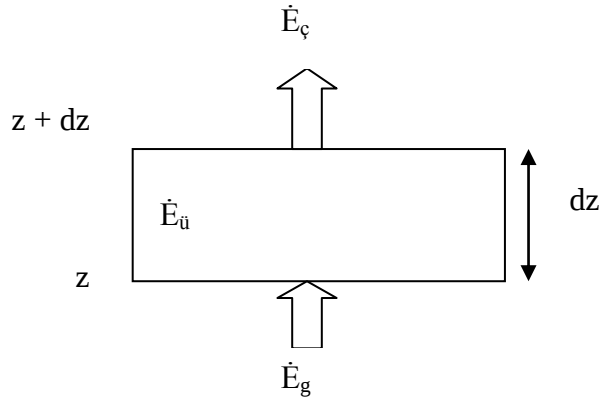
3.3 Enerji Dengeleri

Kurutulan malzemenin katı ve hava kısımlarındaki su için enerji dengelerinin çıkarılışı aşağıda açıklanmıştır.

3.3.1 Katı Kısımda Su İçin Enerji Dengesi

Katı kısımdaki enerji alışverişinden yola çıkarak enerji dengesi çıkarılmıştır. Şekil 3.2' de gösterilen yüksekliği dz olan birim elemana giren, çıkan ve üretilen enerjiler kullanılarak birim zamanda depolanan enerjiyi veren ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Birim elemandaki enerji alışverişi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\dot{E}_g - \dot{E}_\varphi + \dot{E}_u = \frac{dE_d}{dt} \quad (3.19)$$



Şekil 3.2 : Birim elemandaki enerji alışverişi.

Katı kısıma herhangi bir kütle giriş çıkışı olmadığından dolayı katı kısıma giren ve çıkan enerji de yoktur. Bu yüzden;

Giren enerji;

$$\dot{E}_g = 0 \quad (3.20)$$

Çıkan enerji;

$$\dot{E}_\varphi = 0 \quad (3.21)$$

Üretilen enerji ise birim hacimden birim zamanda üretilen ısı (q_k''')'nın kesit alanı ile birim elemanın yüksekliğinin çarpımından elde edilen hacmin çarpılmasıyla elde edilir.

$$\dot{E}_u = q_k''' \cdot S \cdot dz \quad (3.22)$$

Birim hacimden birim zamanda üretilen ısı, ısı akısı **(3.24)** ve tanecik yüzey alanının yatak hacmine oranı olan a_v ile çarpımından elde edilmektedir.

$$q_k''' = q_k \cdot a_v \quad (3.23)$$

$$q_k = \hat{h}_k \cdot (T_a - T_k) \quad (3.24)$$

Birim zamanda üretilen enerji **(3.23)** ve **(3.24)** denklemlerinin **(3.22)** de yerine konması ile aşağıdaki şekilde bulunmaktadır.

$$\dot{E}_u = \hat{h}_k \cdot (T_a - T_k) \cdot a_v \cdot S \cdot dz \quad (3.25)$$

Katı kısımda depolanan enerji, katı kısmın hacminin toplam hacme oranını ifade eden $(1-\epsilon)$ ile yatak hacminin çarpımından elde edilen katı kısmın hacminin, katının yoğunluğu ve entalipisi ile çarpımından bulunmaktadır.

$$E_d = \rho_k \cdot (1 - \epsilon) \cdot S \cdot dz \cdot h_k \quad (3.26)$$

Depolanan enerji için gerekli olan entalpi terimi katının özgül ısısıyla, suyun özgül ısısının katı içerisindeki nem içeriğiyle çarpımının toplamının katının sıcaklığıyla çarpılması sonucu elde edildiği **(3.27)** de gösterilmiştir.

$$h_k = (Cp_k + Cp_s \cdot X) \cdot T_k \quad (3.27)$$

Giren **(3.20)**, çıkan **(3.21)**, üretilen **(3.25)** ve depolanan **(3.26)** enerji terimleri **(3.19)** da yerine koyulduğu zaman katı kısmın enerji dengesini ifade eden **(3.28)** elde edilmektedir.

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\hat{h}_k \cdot (T_a - T_k) \cdot a_v}{\rho_k \cdot (1 - \epsilon) \cdot (Cp_k + Cp_s \cdot X)} - \frac{Cp_s \cdot T_k}{(Cp_k + Cp_s \cdot X)} \frac{dX}{dt} \quad (3.28)$$

Katının zamana bağlı sıcaklık değişimini de ifade etmekte olan **(3.28)**' deki $\frac{dX}{dt}$ yerine **(3.9)** ifadesi konulabilir.

3.3.2 Hava Kısımında Su İçin Enerji Dengesi

Şekil 3.2' deki birim elemanın katı kısmındaki gibi hava tarafı için de enerji dengesi (3.19) daki gibidir. Katı kısmın aksine hava tarafında giren ve çıkan hava kütlesi mevcut olduğu için hesaba giren ve çıkan enerjilerin ilave edilmesi gerekmektedir.

Giren enerji;

$$\dot{E}_g = \dot{m}_h \cdot h_z \quad (3.29)$$

Çıkan enerji;

$$\dot{E}_\phi = \dot{m}_h \cdot h_{z+dz} \quad (3.30)$$

Giren ve çıkan enerjilerin farkı (3.29) ve (3.30) yardımıyla aşağıdaki (3.31) daki gibi ifade edilmiştir.

$$\dot{E}_g - \dot{E}_\phi = - \dot{m}_h \cdot \frac{dh}{dz} \cdot dz \quad (3.31)$$

Üretim terimi (3.32) ise havadan katıya taşınım ile olan ısı geçişi (3.33), çevreye taşınım ile olan ısı geçişi (3.34) ve gizli buharlaşma ısısından dolayı açığa çıkan enerjiden (3.35) oluşmaktadır.

$$\dot{E}_u = \dot{q}_h + \dot{q}_{\phi} + \dot{H}_b \quad (3.32)$$

Havadan ara yüzeye taşınım ile geçen ısı;

$$\dot{q}_h = -\hat{h}_h \cdot A_k \cdot (T_h - T_a) \quad (3.33)$$

Çevreye olan ısı geçişi;

$$\dot{q}_{\phi} = -\hat{h}_{\phi} \cdot A_{\phi} \cdot (T_h - T_{\phi}) \quad (3.34)$$

Gizli buharlaşma ısısı nedeniyle olan ısı geçişi;

$$\dot{H}_b = k_{c,k} \cdot A_k \cdot \rho_k \cdot (X - X_a) \cdot h_{sb} \quad (3.35)$$

Bu ifadeler (3.32)'de yerine konulduğu zaman üretim terimi elde edilir.

Birim elemanda depolanan enerji (3.36) ise havanın yoğunluğunun, havanın entalpisiyle ve yatak içerisindeki havanın hacmiyle çarpımından bulunmaktadır.

$$E_d = \rho_h \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dz \cdot h_h \quad (3.36)$$

Havanın entalpisi ise (3.37)'de ifade edildiği üzere havanın özgül ısısına, gizli buharlaşma ısısına, su buharının özgül ısısına, havanın nem içeriğine ve havanın sıcaklığına bağlıdır.

$$h_h = C_{p_h} \cdot T_h + (h_{sb} + C_{p_{sb}} \cdot T_h) \cdot Y \quad (3.37)$$

Havanın entalpisinin hem depolanan teriminde zamana (t'ye) hemde giren ve çıkan enerjinin farkı teriminde konuma (z'ye) bağlı olarak birinci dereceden türevlerine (3.19)'da ihtiyaç duyulmaktadır.

Enerji dengesini veren (3.19)' a, giren, çıkan, üretim ve depolama terimleri ile entalpinin türevleri, yukarıdaki denklemlerden faydalanılarak eklendiğinde hava kısmındaki enerji dengesi (3.38) haline gelmektedir.

$$\begin{aligned} \frac{dT_h}{dt} = & \frac{1}{(C_{p_h} + C_{p_{sb}} \cdot Y)} \cdot \left\{ \left[-(h_{sb} + C_{p_{sb}} \cdot T_h) \cdot \frac{dY}{dt} \right] \right. \\ & + \left[\frac{kC_k \cdot a_v \cdot \rho_k \cdot h_{sb} \cdot (X - X_a)}{\rho_h \cdot \varepsilon} \right] \\ & - \left[\frac{\hat{h}_h \cdot a_v \cdot (T_h - T_a)}{\rho_h \cdot \varepsilon} \right] - \left[\frac{\hat{h}_{\text{cev}} \cdot A_{\text{cev}} \cdot (T_h - T_{\text{cev}})}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot \text{Vol}} \right] \\ & \left. - \left[\frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot S} \cdot \frac{dh_h}{dz} \right] \right\} \quad (3.38) \end{aligned}$$

Hava kısmındaki enerji dengesini veren (3.38)'de bulunan havanın nem içeriğinin zamana göre değişimi olan $\frac{dY}{dt}$ için (3.18) 'den yararlanılmaktadır.

3.4 Arayüzey Özelliklerinin Belirlenmesi

Katı ve hava kısmındaki su için enerji ve kütle dengelerinin hesabında a altındisi ile gösterilen arayüzey özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Arayüzey sıcaklığı (T_a), arayüzeydeki havanın nem oranı (Y_a) ve katı taradındaki nem oranına (X_a) hesaplamalarda ihtiyaç duyulacağı için bu özellikler belirlenmek zorundadır.

3.4.1 Arayüzey Sıcaklığının Belirlenmesi

Arayüzeydeki sıcaklık değerini belirlemek için buradaki enerji dengesinin yazılması gerekmektedir. Hava tarafından arayüzeye taşınım ile olan ısı geçişi, katı tarafından arayüzeye olan ısı geçişi ile gizli buharlaşma ısısından kaynaklanan ısı geçişinin toplamına eşittir.

$$\dot{q}_h = \dot{q}_k + h_{sb} \cdot N_k \quad (3.39)$$

(3.24) ve (3.33) ' den arayüzeydeki enerji dengesi aşağıdaki hale gelir;

$$\hat{h}_h \cdot A_k \cdot (T_h - T_a) = \hat{h}_k \cdot (T_a - T_k) + h_{sb} \cdot \rho_k \cdot kc_k \cdot (X - X_a) \quad (3.40)$$

Buradan T_a değeri çekildiğinde arayüzey sıcaklığı (3.41)' deki hale gelmektedir.

$$T_a = \frac{\hat{h}_h \cdot T_h + \hat{h}_k \cdot T_k - h_{sb} \cdot \rho_k \cdot kc_k \cdot (X - X_a)}{(\hat{h}_h - \hat{h}_k)} \quad (3.41)$$

3.4.2 Su Aktivitesi

Bir gıdanın su aktivitesi, o gıdadaki suyun mikroorganizmalar için yararlanabilirlik ölçüsüdür. Gıdaların ve diğer doğal ürünlerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde de su aktivitesi etkilidir.

Su aktivitesi, gıdanın su buharı basıncının (gıdadaki suyun buhar basıncının) aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranıdır.

Su aktivitesi a_w ile gösterilmektedir. (3.42) deki formül ile ifade edilmektedir.

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\text{Bağıl nem (ERH)}}{100} \quad (3.42)$$

P : Gıdanın su buharı basıncı (mm Hg ya da Pa)

P₀ : Gıda ile aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncı (mm Hg ya da Pa)

Kurutulacak maddenin cinsine göre çeşitli su aktivitesi korelasyonları bulunmaktadır. Kum için su aktivitesi değerini hesaplamak için denge nemini (ERH) hesaplamak gerekmektedir. Modified-Chung-Pfost denklemini (3.43) kullanarak denge nemi hesaplanabilmektedir. Bu denklemde bulunan S₁, S₂ ve S₃ sabit katsayıları ise Tadesse(2011) tarafından kullanılmış olan nem içerğini veren denklemden belirlenmiştir.

$$RH = \exp \left[- \frac{S_1}{T + S_2} \cdot \exp(-S_3 \cdot MC) \right] \quad (3.43)$$

Sabitler;

$$S_1 = -312,292$$

$$S_2 = 30,205$$

$$S_3 = 16,958$$

Modified-Chung-Pfost denkleminin sabitleri yerine koyulduğu zaman denge nemi (3.44) deki gibi olmaktadır.

$$ERH = \exp \left[- \frac{-312,292}{T + 30,205} \cdot \exp(-16,958 \cdot MC) \right] \quad (3.44)$$

3.4.3 Arayüzeydeki Havanın Nem Oranı

Arayüzeydeki havanın nem oranı nem oranı Y_a sembolüyle gösterilmektedir ve (3.45) de görüldüğü üzere su aktivitesi, su buharı kısmi basıncının su buharı toplam basıncına oranına ve suyun mol kütlelerinin havanın mol kütlelerine oranına bağlıdır.

$$Y_a = \frac{a_w \cdot \frac{P_s}{P}}{1 - a_w \cdot \frac{P_s}{P}} \cdot \frac{M_s}{M_h} \quad (3.45)$$

3.4.4 Arayüzeydeki Katının Nem Oranı

Arayüzeydeki kütle dengesi yazılarak X_a ile gösterilen arayüzeydeki katının nem oranı (3.48) deki gibi ifade edilmektedir.

Ara yüzeydeki kütle dengesi;

$$N_k = N_h \quad (3.46)$$

Kütle dengesinin açık ifadesi;

$$\rho_k \cdot kc_k \cdot (X - X_a) = \rho_h \cdot kc_h \cdot (Y - Y_a) \quad (3.47)$$

Ara yüzeydeki nem içeriğini veren ifade;

$$X_a = \left[\frac{\rho_h kc_h}{\rho_k kc_k} \cdot (Y - Y_a) \right] + X \quad (3.48)$$

3.5 Matematik Modelde Kullanılan Parametreler

Matematik model içerisinde sıcaklık, ısı iletim katsayısı, taşınım katsayısı, kütle geçiş katsayısı, viskozite, özgül ısı vb. birçok parametre kullanılmaktadır. Bu parametrelerin bazıları sıcaklığa bağlı olarak değişmekte iken bazıları ise sabit değerlerdir. Aşağıda bu parametrelerle alakalı bilgi ve bağıntılar verilmiştir.

3.5.1 Sabit Parametreler

Katı taneciğin yoğunluğu, özgül ısı, çapı, ısı iletim ve ısı geçiş katsayıları, kontrol hacmi olarak kullanılan borunun çapı, yatak yüksekliği, gözeneklilik, çevreye taşınım ile ısı geçişindeki taşınım katsayısı, evrensel gaz sabiti, aktivasyon enerjisi, karakteristik uzunluk ve difüzyon uzunluğu, özgül alan (m^2 tanecik yüzey alanı / m^3 yatak hacmi), suyun ve havanın mol kütleri ve çevre sıcaklığı matematik model içerisinde sabit değerler olarak kabul edilmiştir.

3.5.2 Sıcaklığa Bağlı Parametreler

Suyun kısmi basıncı ve doyma basıncı, havanın yoğunluğu, ısı iletim katsayısı, viskozitesi, su hava çiftinin difüzyon katsayısı, özgül ısı, gizli buharlaşma ısı, su buharının ve suyun özgül ısıları, su kum çiftinin difüzyon katsayısı gibi parametreler sıcaklıkla birlikte değişim gösteren parametrelerdir.

Aşağıda bu parametrelerle alakalı bilgiler ve bağıntılar verilmiştir.

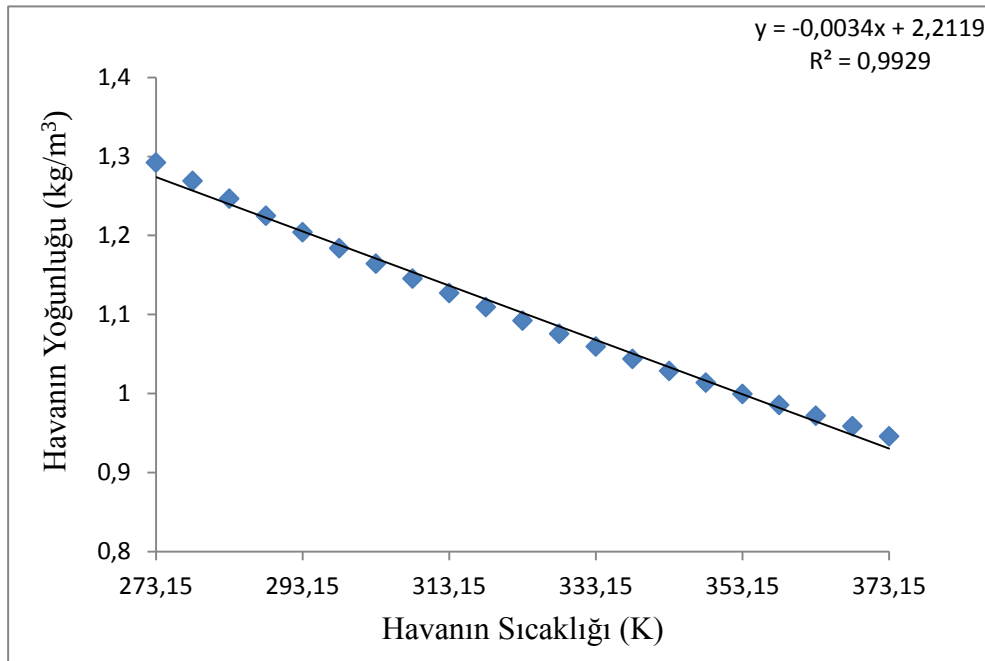
3.5.2.1 Havanın Yoğunluğu

Hava ideal gaz olarak kabul edildiğinde yoğunluğu veren bağıntı (3.49) daki gibidir.

$$\rho_h = \frac{P}{R \cdot T_h} \quad (3.49)$$

1 atm basınçta ve $R = 287,058 \text{ J/kg K}$ değeri için Çizelge 3.1 de çeşitli sıcaklık değerlerine karşılık gelen havanın yoğunluk değerleri listelenmiştir. Şekil 3.3 deki grafik yardımıyla elde edilen (3.50) bağıntısı ise T_h sembolüyle gösterilen hava sıcaklığına göre yoğunluğun değerini hesaplamayı sağlamaktadır. Çizelge 3.1'e bu değerlerde, ideal gaz kanundan hesaplanan yoğunluk değerleriyle karşılaştırma yapılabilmesi için eklenmiştir. Yoğunluğu havanın sıcaklığına bağlı bir denklem olarak vermek denklemlerin bilgisayar yardımıyla çözdürülmesinde kolaylık sağlamaktadır.

$$\rho_h = -0,0034 \cdot T_h + 2,2119 \quad (3.50)$$



Şekil 3.3 : Havanın yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi.

Çizelge 3.1 : Havanın Yoğunluğunun Sıcaklıkla değişimi.

T (C)	T (K)	ρ_h	$\rho_h = - 0,0034.T_h(K) + 2,2119$
0	273,15	1,292248	1,28319
5	278,15	1,269018	1,26619
10	283,15	1,246609	1,24919
15	288,15	1,224978	1,23219
20	293,15	1,204085	1,21519
25	298,15	1,183892	1,19819
30	303,15	1,164366	1,18119
35	308,15	1,145473	1,16419
40	313,15	1,127183	1,14719
45	318,15	1,109469	1,13019
50	323,15	1,092302	1,11319
55	328,15	1,075659	1,09619
60	333,15	1,059515	1,07919
65	338,15	1,043849	1,06219
70	343,15	1,028639	1,04519
75	348,15	1,013866	1,02819
80	353,15	0,999511	1,01119
85	358,15	0,985558	0,99419
90	363,15	0,971988	0,97719
95	368,15	0,958787	0,96019
100	373,15	0,94594	0,94319

3.5.2.2 Havanın Dinamik Viskozitesi ve Isı İletim Katsayısı

Havanın dinamik viskozitesi ($\frac{kg}{m \cdot s}$) hava sıcaklığının Kelvin cinsinden değerine bağlı olarak (3.51)'deki gibidir.

$$\mu_h = 4,25 \cdot 10^{-8} + 5,87 \cdot 10^{-6} \quad (3.51)$$

Havanın ısı iletim katsayısını ($\frac{W}{m \cdot K}$) hava sıcaklığına göre veren bağıntı ise (3.52)'de gösterilmiştir.

$$k_h = 8,4044 \cdot 10^{-5} \cdot T_h + 4,63 \cdot 10^{-5} \quad (3.52)$$

3.5.2.3 Özgül Isılar

Matematik modelde kullanılan havanın, su buharının ve suyun özgül ısı değerlerini sıcaklığa bağlı olarak veren bağıntılar sırasıyla aşağıda gösterilmiştir.

Havanın ve su buharının özgül ısıları Çengel(1996-a) den alınan (3.53) deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3 \quad (3.53)$$

Bu denklemin sabitleri Çengel(1996,syf 791) daki tablolardan su buharı ve hava için ayrı ayrı alınmıştır.

Sabit katsayılar;

$$a = 28,11 \quad b = 0,1967 \cdot 10^{-2} \quad c = 0,4802 \cdot 10^{-5} \quad d = - 1,966 \cdot 10^{-9}$$

Havanın özgül ısısı;

$$C_{p_h} = 28,11 + 0,1967 \cdot 10^{-2} \cdot T_h + 0,4802 \cdot 10^{-5} \cdot T_h^2 - 1,966 \cdot 10^{-9} \cdot T_h^3 \quad (3.54)$$

Su buharının özgül ısısı ise (3.54)'kine benzer şekilde (3.55)'de gösterilmiştir.

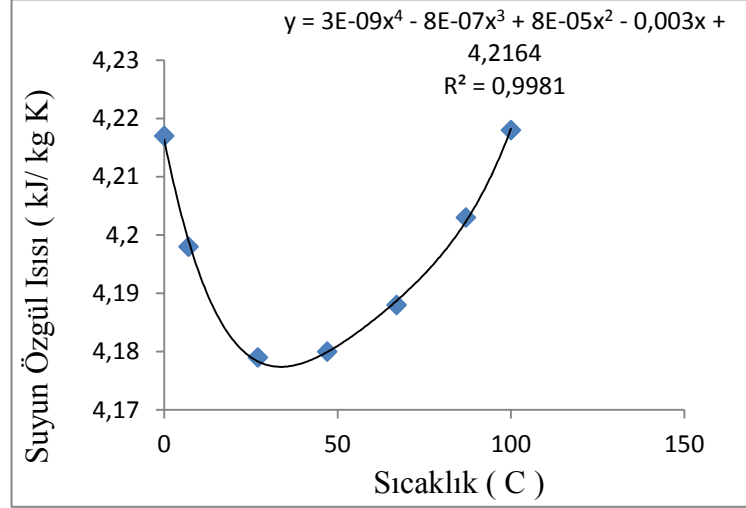
Sabitler;

$$a = 32,24 \quad b = 0,1923 \cdot 10^{-2} \quad c = 1,055 \cdot 10^{-5} \quad d = - 3,595 \cdot 10^{-9}$$

Su buharının özgül ısısı;

$$C_{p_{sb}} = 32,24 + 0,1923 \cdot 10^{-2} \cdot T_h + 1,055 \cdot 10^{-5} \cdot T_h^2 - 3,595 \cdot 10^{-9} \cdot T_h^3 \quad (3.55)$$

Suyun özgül ısı, havanın ve su buharının özgül ısılarının aksine havanın değil katının sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.4 de suyun özgül ısının sıcaklığa göre nasıl değiştiği gösterilmiş ve suyun özgül ısını katının Celcius cinsinden sıcaklığına göre veren bağıntı (3.56) da verilmiştir. Çizelge 3.2 de ise katının sıcaklığı buna karşılık gelen suyun özgül ısı değeri ve (3.56) bağıntısından elde edilen özgül ısı değerleri tablo halinde verilerek karşılaştırma yapabilme imkanı sunulmuştur.



Şekil 3.4 : Suyun özgül ısının katı sıcaklığına göre değişimi.

Suyun özgül ısını sıcaklığa bağlı olarak veren ifade şu şekildedir;

$$C_{p_s} = 3.10^{-9}.T_k^4 - 8.10^{-7}.T_k^3 + 8.10^{-5}.T_k^2 - 0,003 . T_k + 4,2164 \quad (3.56)$$

Çizelge 3.2 : Suyun özgül ısının çeşitli sıcaklıklardaki değerleri (Çengel,1996).

T (C)	C _{p_s} (kJ/ kg K)	C _{p_s} =3.10 ⁻⁹ .T _k ⁴ - 8.10 ⁻⁷ .T _k ³ +8.10 ⁻⁵ T _k ² - 0,003T _k + 4,2164
0	4,217	4,2164
7	4,198	4,1990528
27	4,179	4,17956792
47	4,18	4,18370064
67	4,188	4,19436296
87	4,203	4,20598688
100	4,218	4,2164

3.5.2.4 Difüzyon Katsayıları

Kurutma sürecinde kütle geçişi hesaplarının yapılabilmesi ve kütle geçiş katsayılarının belirlenebilmesi için su buharı-hava çiftinin ve su-kum çiftinin difüzyon katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir.

Su buharı-hava çiftinin difüzyon katsayısı Farouki (1981) 'in ifade ettiği üzere (3.57) deki bağıntıyla bulunmaktadır. Birimi ise $(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}})$ 'dir.

$$D_{sh} = \frac{0,244}{P} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{2,3} \quad (3.57)$$

P : toplam basınç (bar)

T : mutlak sıcaklık (K)

Su-kum çiftinin difüzyon katsayısı ise Arrhenius denklemi (Brady 2013) olarak geçen (3.58) deki bağıntı ile bulunmaktadır. Birimi $(\frac{\text{m}^2}{\text{s}})$ 'dir.

$$D_{sk} = D_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R_u \cdot T_k}\right) \quad (3.58)$$

D_0 : Referans Difüzyon Katsayısı (m^2/s)

E_a : Aktivasyon enerjisi (J/mol)

R_u : Evrensel gaz sabiti (J/mol K)

T_k : Katının sıcaklığı (K)

3.5.2.5 Suyun Doyma ve Kısmi Basıncı

Belirli bir hava sıcaklığındaki suyun doyma basıncı P_d (3.59) daki gibi hesaplanmaktadır. Denklemdaki hava sıcaklığı T_h 'ın birimi Celcius doyma basıncının birimi ise kPa'dır.

$$P_d = 0,00012 \cdot (T_h)^{2,9365} \quad (3.59)$$

Doyma basıncının havanın bağıl nem ile çarpılması sonucunda suyun hava içindeki kısmi basıncı(3.60) belirlenmektedir.

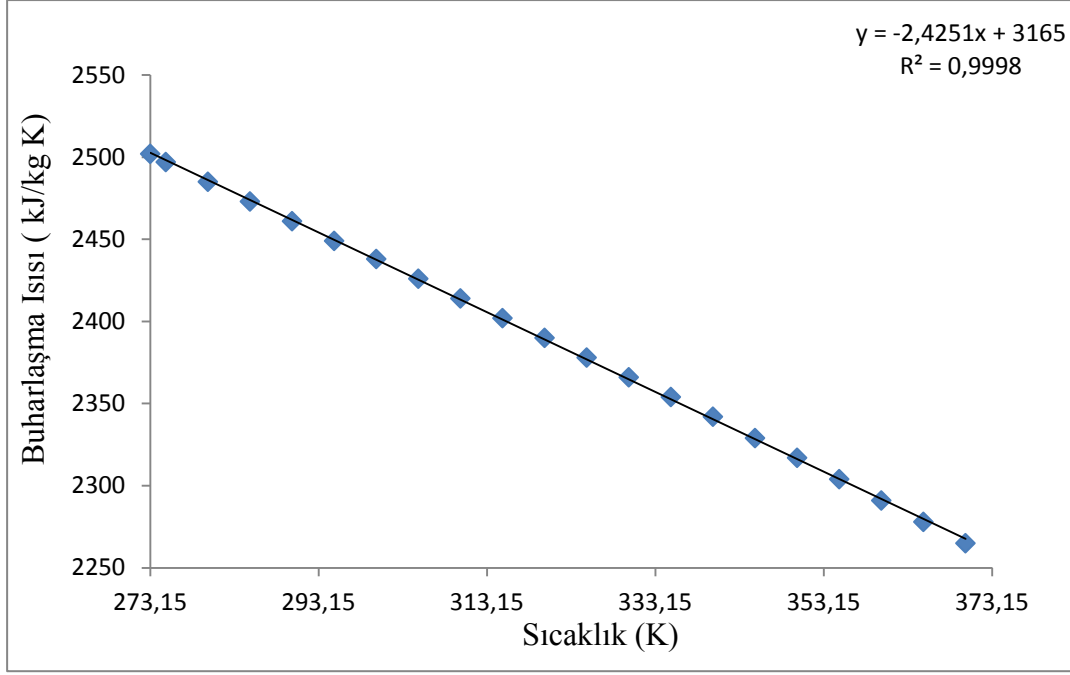
$$P_s = \phi \cdot P_d \quad (3.60)$$

3.5.2.6 Gizli Buharlaşma Isısı

Gizli buharlaşma ısısı h_{sb} sembolü ile gösterilmiştir. Birimi ise J/kg K 'dir. Şekil 3.5'deki grafikte buharlaşma ısısının katının sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Buradan elde edilen bağıntı (3.61) ile hesaplanan buharlaşma ısısı değerleri ile Incropera (2001)'dan alınan değerler ile Çizelge 3.3'te karşılaştırma yapabilmek olanağı sunmaktadır.

Çizelge 3.3 : Çeşitli sıcaklık değerlerine karşılık gelen buharlaşma ısısı değerleri.

$T_k(K)$	$h_{sb}(kJ/kgK)$	$h_{sb} = -2,4251.T_k + 3165$
273,15	2502	2502,584
275	2497	2498,098
280	2485	2485,972
285	2473	2473,847
290	2461	2461,721
295	2449	2449,596
300	2438	2437,47
305	2426	2425,345
310	2414	2413,219
315	2402	2401,094
320	2390	2388,968
325	2378	2376,843
330	2366	2364,717
335	2354	2352,592
340	2342	2340,466
345	2329	2328,341
350	2317	2316,215
355	2304	2304,09
360	2291	2291,964
365	2278	2279,839
370	2265	2267,713
373,15	2257	2260,074



Şekil 3.5 : Buharlaşma ısısının katı sıcaklığıyla değişimi.

Yukardaki grafikten yararlanılarak buharlaşma ısısı ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$) biriminde, şu şekilde belirlenmektedir;

$$h_{sb} = -2,4251 \cdot T_k + 3165 \quad (3.61)$$

3.5.2.7 Katı Kısımın Isı ve Kütle Geçiş Katsayıları

Difüzyon uzunluğu ile bağlantılı olan ısı ve kütle geçiş katsayıları sırasıyla (3.62) ve (3.63) de gösterilmiştir.

Katının ısı iletim katsayısı k_k ile doğru orantılı olan ısı geçiş katsayısı ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$);

$$\hat{h}_k = \frac{\pi^2 \cdot k_k}{4 \cdot L_d} \quad (3.62)$$

Katının kütle geçiş katsayısı ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$) ise su-kum çiftinin difüzyon katsayısı olan D_{sk} ile bağıntılıdır.

$$kc_k = \frac{\pi^2 \cdot D_{sk}}{4 \cdot L_d} \quad (3.63)$$

3.5.2.8 Hava Tarafının Isı ve Kütle Geçiş Katsayıları

Karakteristik uzunlukla ters orantılı olan hava tarafının ısı ve kütle geçiş katsayıları sırasıyla (3.64) ve (3.65) de gösterilmiştir.

Isı geçiş katsayısı ($\frac{W}{m^2 K}$);

$$\hat{h}_h = \frac{Nu \cdot k_h}{L_k} \quad (3.64)$$

Kütle geçiş katsayısı ($\frac{W_m}{s}$) ise;

$$kc_h = \frac{Sh \cdot D_{sh}}{L_k} \quad (3.65)$$

Isı ve kütle geçiş katsayılarını hesaplayabilmek için havanın ısı iletim katsayısı k_h ve su buharı-hava çiftinin difüzyon katsayısı D_{sh} daha önceden bahsedilmiş olan bağıntılar yardımıyla bulunur ve bağıntılardaki yerine koyulur. Nusselt (Nu) ve Sherwood (Sh) değerleri Perry(1997) 'den alınan (3.66) ve (3.67) deki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$0 < Re < 15000$ için;

$$Nu = \frac{0,765}{\varepsilon} \cdot Re^{0,18} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} + \frac{0,365}{\varepsilon} \cdot Re^{0,614} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3.66)$$

$$Sh = \frac{0,765}{\varepsilon} \cdot Re^{0,18} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} + \frac{0,365}{\varepsilon} \cdot Re^{0,614} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3.67)$$

Nu ve Sh bağıntılarını çözebilmek için Re, Pr ve Sc değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$Re = \frac{L_k \cdot V_h \cdot \rho_h}{\mu_h} \quad (3.68)$$

$$Pr = \frac{Cp_h \cdot \mu_h}{k_h} \quad (3.69)$$

$$Sc = \frac{\mu_h}{\rho_h \cdot D_{sh}} \quad (3.70)$$

3.6 Ayırıklaştırma

Kütle ve enerji dengesini gösteren bağıntıların çözümünü kolaylaştırmak için açık (explicit) metoda göre ayırıklaştırılması aşağıda anlatılmıştır.

3.6.1 Kütle Dengesi Denklemlerinin Ayırıklaştırılması

Katı kısımdaki su için kütle dengesini veren (3.9) denkleminin ayırıklaştırılması için öncelikle diferansiyel ifade olan $\frac{dX}{dt}$ 'nin (3.71) de gösterildiği şekilde açık metoda göre ifade edilmesi gerekmektedir.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(t, j) - X(t - 1, j)}{\Delta t} \quad (3.71)$$

(3.71) denklemi (3.9) daki yerine koyulduğunda denklem (3.72) deki hale gelmektedir.

$$\frac{X(t, j) - X(t - 1, j)}{\Delta t} = \frac{-kc_k \cdot a_v \cdot (X(t - 1, j) - X_a(t - 1, j))}{(1 - \epsilon)} \quad (3.72)$$

Bu ifadelerden $X(t, j)$ bilinmeyen olduğundan dolayı denklemin sol tarafında yalnız bırakılırsa katı kısımdaki su için kütle dengesini veren ifadenin ayırıklaştırılmış hali (3.74) denklemindeki gibi olmaktadır.

$$A_1 = \frac{kc_k \cdot a_v \cdot \Delta t}{1 - \epsilon} \quad (3.73)$$

$$X(t, j) = (1 - A_1) \cdot X(t - 1, j) + A_1 \cdot X_a(t - 1, j) \quad (3.74)$$

Hava tarafında su için kütle dengesini veren (3.18) denkleminin ayırıklaştırılmasında ise $\frac{dY}{dt}$ ve $\frac{dY}{dz}$ ile gösterilen havadaki nem oranının zamana ve konuma göre değişimlerini gösteren ifadelerin açık metoda göre yazılması ve daha sonra (3.18) yerine koyulması gerekmektedir.

$$\frac{dY}{dt} = \frac{Y(t,j) - Y(t-1,j)}{\Delta t} \quad (3.75)$$

$$\frac{dY}{dz} = \frac{Y(t-1,j) - Y(t-1,j-1)}{\Delta z} \quad (3.76)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Y(t,j) - Y(t-1,j)}{\Delta t} \\ = & \frac{kc_h \cdot a_v \cdot (Y_a - Y)}{\varepsilon} \\ - & \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot S} \frac{Y(t-1,j) - Y(t-1,j-1)}{\Delta z} \end{aligned} \quad (3.77)$$

Bu ifadelerden $Y(t,j)$ bilinmeyen olduğundan dolayı denklemin sol tarafında yalnız bırakılırsa hava kısmındaki su için kütle dengesini veren ifadenin ayrıklaştırılmış hali **(3.80)** denklemindeki gibi olmaktadır.

$$B_1 = \frac{kc_h \cdot a_v \cdot \Delta t}{\varepsilon} \quad (3.78)$$

$$B_2 = \frac{\dot{m}_h \cdot \Delta t}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot \text{Vol}} \quad (3.79)$$

$$\begin{aligned} Y(t,j) = & (1 - B_1 - B_2) \cdot Y(t-1,j) + B_1 \cdot Y_a(t-1,j) \\ & + B_2 \cdot Y(t-1,j-1) \end{aligned} \quad (3.80)$$

3.6.2 Enerji Dengesi Denklemlerinin Ayrıklaştırılması

Katı kısmın enerji dengesini ifade eden **(3.28)** denkleminin ayrıklaştırılması da kütle dengesini denklemlerindeki gibi açık metoda göre yapılmıştır. Bu denklemdeki $\frac{dX}{dt}$ ifadesinin yerine **(3.9)** denklemindeki ifade yazılmıştır. Diğer diferansiyel ifade olan $\frac{dT_k}{dt}$ yerine ise açık metoda göre yazılmış olan **(3.81)** bağıntısı yazılmıştır.

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{T_k(t,j) - T_k(t-1,j)}{\Delta t} \quad (3.81)$$

Katı kısmın enerji dengesini gösteren (3.28) bağıntısında $\frac{dX}{dt}$ ve $\frac{dT_k}{dt}$ 'nin yerlerine sırasıyla (3.9) ve (3.81) deki bağıntılar yazıldığında katı kısmın enerji dengesi denklemi (3.82) deki hale gelmektedir.

$$\begin{aligned} & \frac{T_k(t,j) - T_k(t-1,j)}{\Delta t} \\ &= \frac{\hat{h}_k \cdot (T_a - T_k) \cdot a_v}{\rho_k \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (Cp_k + Cp_s \cdot X)} \\ & - \frac{Cp_s \cdot T_k}{(Cp_k + Cp_s \cdot X)} \cdot \frac{-kc_k \cdot a_v \cdot (X - X_a)}{(1 - \varepsilon)} \end{aligned} \quad (3.82)$$

Bu ifadelerden $T_k(t,j)$ bilinmeyen olduğundan dolayı denklemin sol tarafında yalnız bırakılırsa katı kısımdaki su için enerji dengesini veren ifadenin ayrıklaştırılmış hali (3.86) denklemindeki gibi olmaktadır.

$$C_1 = \frac{\Delta t}{(1 - \varepsilon) \cdot (Cp_k + Cp_s \cdot X(t-1,j))} \quad (3.83)$$

$$C_2 = \frac{\hat{h}_k \cdot a_v}{\rho_k} \quad (3.84)$$

$$C_3 = kc_k \cdot a_v \cdot Cp_s \cdot (X(t-1,j) - X_a(t-1,j)) \quad (3.85)$$

$$T_k(t,j) = (1 - C_1 \cdot C_2 + C_1 \cdot C_3) \cdot T_k(t-1,j) + C_1 \cdot C_2 \cdot T_a(t-1,j) \quad (3.86)$$

Hava kısmındaki enerji dengesini gösteren (3.38) denkleminin ayrıklaştırılması da yukarıdaki işlemlerle aynı şekile açık metoda göre yapılmıştır. Bu denklemde ayrıklaştırma işlemine $\frac{dY}{dt}$ 'nin yerine (3.77) denklemindeki ifade yazılmıştır. Diğer diferansiyel ifade olan $\frac{dT_h}{dt}$ yerine ise açık metoda göre yazılmış olan (3.87) bağıntısı yazılmıştır.

$$\frac{dT_h}{dt} = \frac{T_h(t,j) - T_h(t-1,j)}{\Delta t} \quad (3.87)$$

Hava kısmındaki enerji dengesini gösteren **(3.38)** bağıntısında $\frac{dY}{dt}$ ve $\frac{dT_h}{dt}$ 'nın yerlerine yukarıda belirtilen ifadeler yazıldığında denklem aşağıdaki hale gelmektedir.

$$\begin{aligned}
\frac{T_h(t,j) - T_h(t-1,j)}{\Delta t} &= \frac{1}{(C_{p_h} + C_{p_{sb}} \cdot Y)} \cdot \\
&\left\{ \left[- (h_{sb} + C_{p_{sb}} \cdot T_h) \cdot \frac{kc_k \cdot a_v \cdot (Y_a - Y)}{\varepsilon} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot S} \frac{Y(t-1,j) - Y(t-1,j-1)}{\Delta z} \right] \right. \\
&\quad \left. + \left[\frac{kc_k \cdot a_v \cdot \rho_k \cdot h_{sb} \cdot (X - X_a)}{\rho_h \cdot \varepsilon} \right] \right. \\
&\quad \left. - \left[\frac{\hat{h}_h \cdot a_v \cdot (T_h - T_a)}{\rho_h \cdot \varepsilon} \right] - \left[\frac{\hat{h}_{\text{cev}} \cdot A_{\text{cev}} \cdot (T_h - T_{\text{cev}})}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot Vol} \right] \right. \\
&\quad \left. - \left[\frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot S} \cdot \frac{dh_h}{dz} \right] \right\}
\end{aligned} \tag{3.88}$$

Bu ifadelerden $T_h(t,j)$ bilinmeyen olduğundan dolayı denklemin sol tarafında yalnız bırakılırsa hava kısmındaki su için enerji dengesini veren ifadenin ayrıklaştırılmış hali **(3.96)** denklemindeki gibi olmaktadır.

$$D_1 = \frac{\Delta t}{C_{p_h} + C_{p_{sb}} \cdot Y(t-1,j)} \tag{3.89}$$

$$D_2 = \frac{kc_k \cdot a_v \cdot \rho_k \cdot h_{sb}}{\rho_h \cdot \varepsilon} \cdot (X(t-1,j) - X_a(t-1,j)) \tag{3.90}$$

$$D_3 = \frac{\hat{h}_h \cdot a_v}{\rho_h \cdot \varepsilon} \tag{3.91}$$

$$D_4 = \frac{\hat{h}_{\text{cev}} \cdot A_{\text{cev}}}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot Vol} \tag{3.92}$$

$$D_5 = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \cdot \varepsilon \cdot Vol} \tag{3.93}$$

$$\begin{aligned}
D_6 = [& C_{ph} \cdot T_h(t-1, j) + (h_{sb} + C_{psb} \cdot T_h(t-1, j)) \cdot Y(t-1, j)] \\
& - [C_{ph} \cdot T_h(t-1, j-1) + (h_{sb} + C_{psb} \cdot T_h(t-1, j-1)) \cdot Y(t-1, j-1)]
\end{aligned} \tag{3.94}$$

$$\begin{aligned}
D_7 = [& \frac{kc_h \cdot a_v \cdot (Y_a(t-1, j) - Y(t-1, j))}{\varepsilon} \\
& - D_5 \cdot (Y(t-1, j) - Y(t-1, j-1))]
\end{aligned} \tag{3.95}$$

$$\begin{aligned}
T_h(t, j) = & (1 - D_1 \cdot D_3 - D_1 \cdot D_4 - D_1 D_7 C_{psb}) \cdot T_h(t-1, j) + D_1 \cdot D_2 \\
& + D_1 \cdot D_3 \cdot T_a(t-1, j) + D_1 \cdot D_4 \cdot T_{\zeta ev} - D_1 \cdot D_5 \cdot D_6 \\
& - D_1 \cdot D_7 \cdot h_{sb}
\end{aligned} \tag{3.96}$$

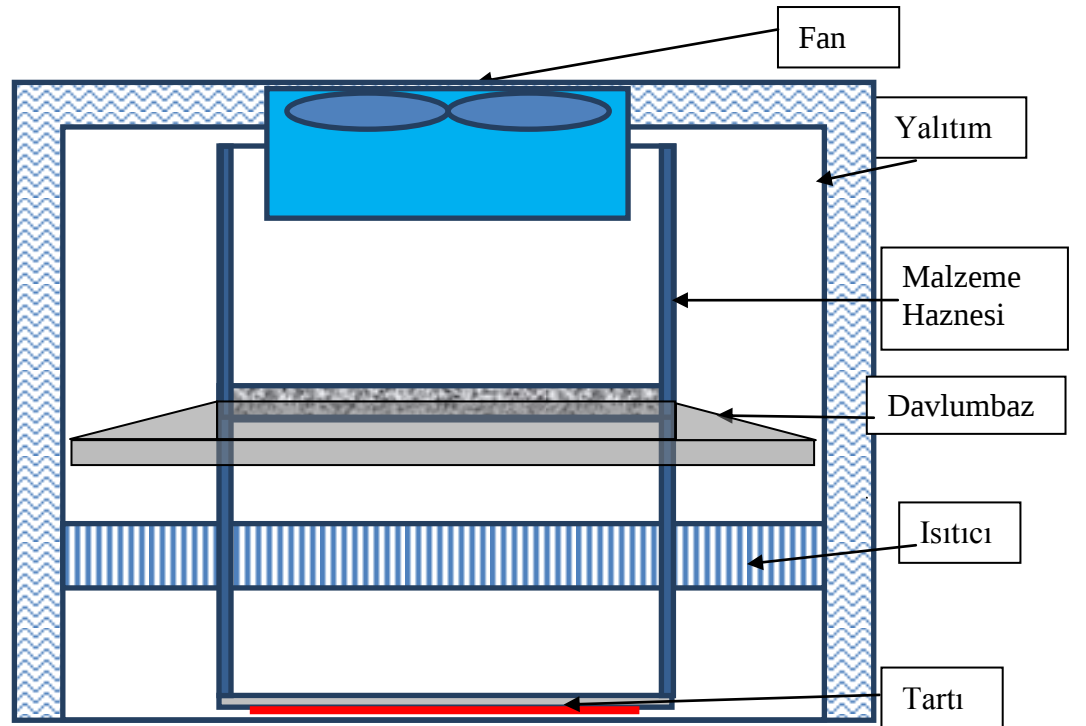
4. DENEYSEL ARAŞTIRMA

4.1 Amaç

Bu bölümde kurutmanın gerçekleştirildiği fırının tasarımı, tasarım kısmında karşılaşılan problemler ve bunların çözümü, tasarımı yapılırken hangi parametrelerin göz önünde bulundurulduğu, deneyde ne yapılmak istendiği, hangi ölçümlerin yapıldığı ve bunların nasıl değerlendirildiği üzerinde durulmuştur. Deney düzeneğini oluşturan elemanlar, deneydeki etkin parametreler ve bunların ölçümü hakkında bilgi verildikten sonra deneyin yapılışı, yöntemi ve elde edilen bulgular açıklanmıştır.

4.2 Deney Düzeneği

Deney düzeneği terazi, fırın ana gövdesi, ısıtıcı, davlumbaz, kontrol hacminden oluşmaktadır. Bu bölümde deney düzeneği bölümleri hakkında genel olarak bilgi verilmiştir. Deney düzeneğinin basit bir taslağı Şekil 4.1 deki gibidir.



Şekil 4.1 : Kurutma Fırını.

4.2.1 Terazi

Deneyde Precisa 1212 M SCS model terazi kullanılmıştır. 1200 g 'a kadar ölçme kapasitesi olan cihaz 1mg ölçüm hassasiyetine sahiptir. Cihazdan alınan digital output bir kablo aracılığıyla COM bağlantısından bilgisayara aktarılmakta ve BALINT isimli bir yazılım aracılığıyla okunabilmektedir. Deney süresince ağırlıkta değişim 2s'lik zaman adımıyla izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır. Hava akışını sağlayan fan çalıştırıldığında hassas terazi üzerinde oluşturduğu yaklaşık 20g'lık etki deney sonuçları incelenirken dikkate alınmıştır.

4.2.2 Fırın Ana Gövde

Kurutma işlemini gerçekleştireceğimiz fırın 35cm x 30cm x 25cm ebatlarında dış cephesi 1mm et kalınlığına sahip alüminyum sac ile kaplanmış dikdörtgen prizma şeklinde bir kutu olarak tasarlanmıştır.

Kutudan olması muhtemel ısı kaçaklarını azaltmak için dış kutu ile iç kutu arasına yalıtım malzemesi konulmuştur. İç kutunun dış cephesine yalıtım malzemesi plakalar halinde kesilerek yerleştirildikten sonra yalıtımların kesişme noktaları alüminyum bant ile yapıştırılarak kapatılmıştır. Bu işlemten sonra dış kutu getirilip iç kutu ve yalıtımın üzerine yerleştirilmiştir.

Hassas terazi 1.2 kg' a kadar tartma işlemini gerçekleştirebildiği için fırının dış kutu, yalıtım, iç kutu ve ısıtıcı ünite kısmının ağırlığının 1.2 kg' dan fazla olması nedeniyle, bu dört parça bir bütün haline getirilip, teraziye oturtmamak için Şekil 4.2 den de görüldüğü gibi alüminyum profil üzerine monte edilmiştir. Daha sonrasında fırını dengede tutmak ve gerektiğinde yüksekliğinin değiştirilebilir olması için alüminyum profilden, yüksekliği ayarlanabilir 4 adet ayak yapılarak fırının alt kısmındaki profile monte edilmiştir.

Fırının kapağına 18cm x 10cm ebatlarında sıcaklığa dayanıklı camdan sistemi gözleyebilmek için bir pencere yapılmıştır. Kapağın fırınla temas eden yüzeyinden olabilecek kayıpları engellemek içinde yüksek sıcaklığa dayanıklı kauçuk bir conta kullanılmış ve Şekil 4.2 den görüldüğü üzere kapağın temas edeceği yüzeye yapıştırılmıştır.



Şekil 4.2 : Fırın Ana Gövde

4.2.3 Isıtıcı

Kurutma için kullanılacak sıcak havanın ısıtılması için direnç telinden bir ısıtıcı tasarlanmış ve yapılmıştır. Isıtıcının kapasitesini belirlemek için kabaca bir hesap yapılmıştır.

$$Q=V*I \quad (4.1)$$

Diğer bir ifadeyle ısıyı şu şekilde de yazabiliriz;

$$Q=I^2*R \quad (4.2)$$

Denklemleri gerilim, akım ve direnç değerlerini kullanarak ısı enerjisinin hesaplanmasını sağlar.

$$Q= m.X.h_{sb} +m.Cp_k.(1-X).\Delta T_k+ m.X.Cp_s.\Delta T_k+ \dot{m}_h.Cp_h. \Delta T_h \quad (4.3)$$

İfadesinden kullanarak kurutma için gerekli olan ısı miktarı kabaca tahmin edilmiştir. Kurutma için gerekli olan ısı enerjisi miktarı yaklaşık olarak 1000 W bulunmuştur. Isıtıcıyı besleyecek olan elektrik şebekeden alınırsa yani gerilim 220 V olarak

alındığında ve ısı değeri ile birlikte a ve b denklemlerinde yerine konulduğunda akımın 5 A ve direncin yaklaşık olarak 44 ohm olduğu görülmektedir.

Direnç değerini sağlamak için ısıtıcı devresinin seri ya da paralel mi bağlanacağına karar vermek gerekmektedir. Paralel ve seri bağlantı için toplan direnç denklemi şu şekildedir;

Paralel devre;

$$\frac{1}{R_{top}} = \sum \frac{1}{R_i} = \frac{n}{R_i} \quad (4.4)$$

Seri devre;

$$R_{top} = n * R_i \quad (4.5)$$

Direnç tellerinin amiyant plakaları sarılmasıyla yapılmış olan ısıtıcıdaki plakalar paralel bağlanırsa örneğin 20 plakadan oluşan ısıtıcıda tek bir plakadaki direncin 860 ohm olması gerekir. Kullanılan direnç teli 4.75 ohm/m olduğundan bir plakadaki direnç telinin uzunluğu 240 m olarak hesaplanır ve plakaların paralel bağlanmasının neredeyse imkansız olduğu kolaylıkla anlaşılır. Direnç telleri seri bağlandığında ise 44 ohm direnç değerini elde etmek için 11.5 m direnç teli kullanmak yeterli olacaktır. Isıtıcının 19 tane plakadan oluşması durumunda bir plaka için gerekli olan tel uzunluğu 0.605 m dir ve bu makul bir değerdir.

Bu değerler ışığında ısıtıcı 19 adet plakanın seri olarak bağlanmasıyla 44 ohm değerini verecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak elektrik şebekesinden alternatif akım kullanmak yerine daha kullanışlı ve daha hassas kontrol edilebilir bir ısıtıcı oluşturabilmek için doğru akım kullanmanın daha uygun olduğu görülmüştür. Bunun neticesinde 45 V 20 A lik ayarlanabilir bir doğru akım güç kaynağı tarafından beslenen bir ısıtıcı tasarımı yapılmıştır. Güç kaynağından azami gücü alındığında direnç değeri 1.75 ohm olmaktadır. Bu yüzden seri olarak bağlanmış 19 adet plakadan oluşan ısıtıcının paralel bir devre haline getirilmesi gerekmiştir. Öncelikle homojen bir ısı ve sıcaklık dağılımı elde edebilmek için plaka sayısı 20 ye çıkarılmıştır.

Bir plakadaki direnç ;

$$44 \text{ ohm} / 19 = 2.26 \text{ ohm}$$

5 adet 4 er plakadan oluşan paralel devre oluşturulduğunda;

$$R_{devre} = 4 * 2.26 = 9.04 \text{ ohm}$$

$$\frac{1}{R_{top}} = \sum \frac{1}{R_i} = \frac{n}{R_i}$$

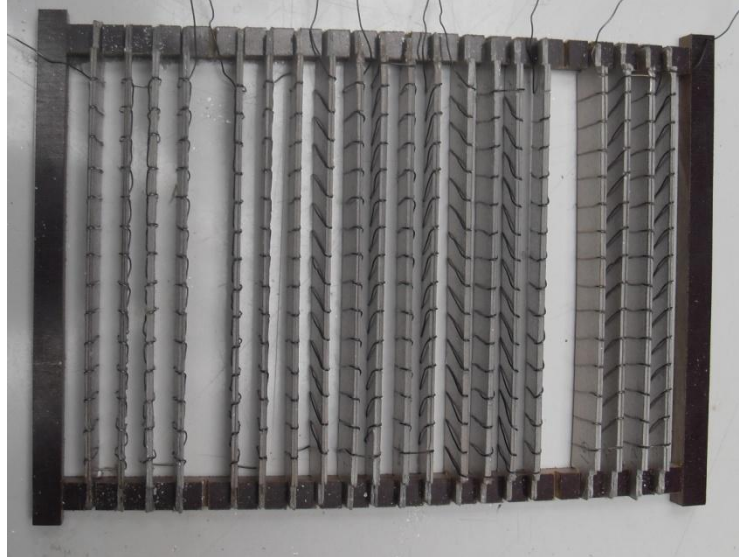
$$\frac{1}{R_{top}} = \frac{5}{9.04} = 1.808 \text{ ohm}$$

$$45 \text{ V} = I * 1.808$$

$$I = 19.46 \text{ A}$$

$$Q = V * I = 45 \text{ V} * 19.46 \text{ A} = 676 \text{ W}$$

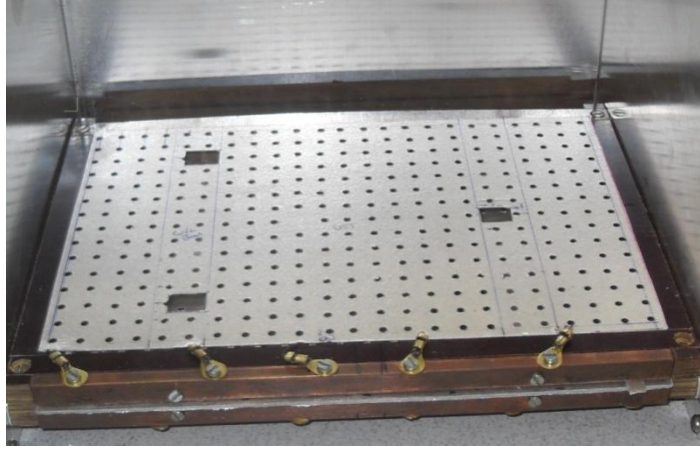
Deney düzeneğinde kullanılan ısıtıcı aşağıdaki şekilden de görüleceği üzere 5 adet devreden oluşmaktadır. Her bir devrede 4 adet amiyant plaka bulunmakta ve bir devrenin direnci 9.04 ohm dur. Rtop yukarıdaki hesaplardan da görüleceği üzere 1.808 ohm olarak hesaplanmıştır. Güç kaynağı en fazla 45 V gerilim üretmektedir ve bu değerlere göre ısıtıcının üretebileceği maksimum ısı değeri 676 W olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3 : Plakaların ısıtıcıdaki dağılımı.

Deney süresince sabit bir hava sıcaklığı istendiğinden düşük sıcaklıklardan başlayarak havanın sıcaklığı güç kaynağındaki ayar butonları ile kontrollü bir şekilde artırılmış istenen değere ve kararlılığa ulaşana kadar bu işlem devam etmiştir.

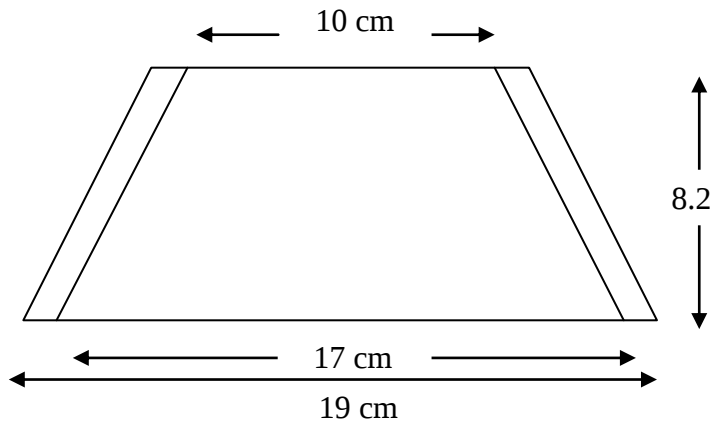
Isıtıcıdan geçen havanın honojen bir şekilde dağılabilmesi ve ısınan direnç tellerinde olması muhtemel ışıınım etkilerini önlemek için ısıtıcının altına ve üstüne Şekil 4.4'de görülen delikli amiyant plaka yerleştirilmiştir.

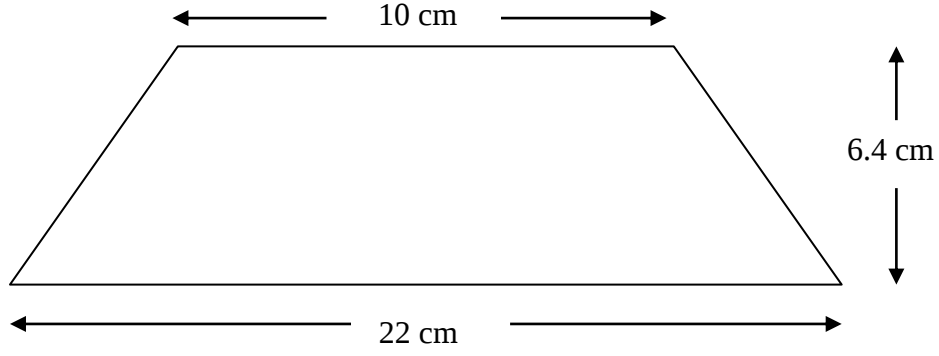


Şekil 4.4 : Isıtıcı ve üzerindeki delikli amiyant.

4.2.4 Davlumbaz

Isıtıcıdan çıkan sıcak havanın minimum kayıp ile kontrol hacmine girmesini sağlamak için Şekil 4.1 de görüleceği üzere ısıtıcının 1-1,5 cm üstüne 5cm yüksekliğinde 17cm x 22cm bir alandan sıcak havayı çekip, 77,5mm çapındaki kontrol hacmi borusuna aktarımını sağlamak için bir davlumbaz tasarlanmıştır. Davlumbaz 1mm et kalınlığına sahip alüminyum saçtan yapılmıştır. Şekil 4.5.'de ölçüleri verilmiş olana parçalardan ikişer adet üretilmiş Şekil 4.5.a deki parçanın iki yanında montaj kolaylığı için ve tüm parçaların alt kısmında 1cm'lik kulaklar bırakılmıştır. Yan taraftaki kulaklar davlumbaz ölçülerine uygun olacak şekilde belirli bir açıyla bükülmüştür sonrasında ise 22cm uzunluğundaki parçalara saç vidası ile sabitlenmiştir. Tüm parçaların alt kısmında bulunan 1cm'lik kulakların bükülmesi ile ısıtıcının hemen üzerinde 17cm x 20cm ebatlarında dikdörtgen bir alan oluşturulmuştur.





Şekil 4.5 : Davlumbaz parçalarının teknik resimleri.

Davlumbazın üst kısmına ise kontrol hacmi borusunun gelip oturacağı 10cm x 10cm ortasında sıcak havanın geçmesi için 8cm çapında delik bulunan düz bir yüzey oluşturmak için 12cm x 12cm ebatlarında alüminyum saç bir plaka kesilmiş ortası dairesel olarak kesilip atıldıktan sonra davlumbaza monte etmek için dört kenarından 1cm'lik kulaklar bükülmüş ve vida ile davlumbaza monte edilmiştir. Kontrol hacmini oluşturan borunun gelip oturması için borunun iç çapı 77.5mm olmasından dolayı 76mm çapında bir flanş yapılmış ve 10cm x 10cm'lik tabana monte edilmiştir. Şekil.4.6. de davlumbazın genel bir görünümü görülmektedir.



Şekil 4.6 : Davlumbaz genel görünüm.

Tasarıma göre, teraziye davlumbaz ve üzerinde bulunan kontrol hacminin ağırlığı binecek, kontrol hacmi yükleme yapmak için her deneyden önce çıkarılacağından

dolayı terazi ile temasa geçecek kısmının davlumbazın üzerinde olması daha uygundur. Davlumbazdan gelen 6mm çapında alüminyum çubuktan yapılmış 3 adet ayak, Şekil 4.6.'dan anlaşılabilirceği üzere terazinin kefesi üzerine oturtulan dikdörtgen bir plakanın üstüne monte edilmiş yuvalarına yerleştirilmiştir. Davlumbaz ve ısıtıcı arasındaki mesafenin de ayarlanabilir olması istendiğinden, çubuklara dış çekilerek davlumbaz kısmındaki bağlantı noktalarına da uygun ölçülerde dış açılarak yüksekliği ayarlanabilir bir davlumbaz üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 : Al çubuklar ve terazi üstündeki kefe.

Isıtıcının içinden geçecek olan çubukların sıcaklıktan etkilenmesini önlemek amacıyla seramik borular kullanılmıştır. Alüminyum çubuklar bu boruların içinden geçirildikten sonra alt plakaya yerleştirilmiştir.

4.2.5 Kontrol Hacmi

Kurutma işlemine tabi tutulacak ürünün koyulacağı 80mm dış çapında alüminyum borudan yapılan 150mm yüksekliğindeki haznenin alt tarafına, malzemeyi koymak ve havanın akışını sağlamak için Şekil 4.8'den görülebileceği üzere sık ağ yapısına sahip bir tel konulmuştur. Hazne malzeme yüklemesi yapıldıktan sonra davlumbazın üzerine yerleştirilmektedir. Isıtıcıdan çıkan hava davlumbaz vasıtasıyla üst kısımdaki hazneye ulaşacak ve hazne boyunca ilerleyecek malzemedeki nemi buharlaştırarak kurumasını sağlayacaktır.

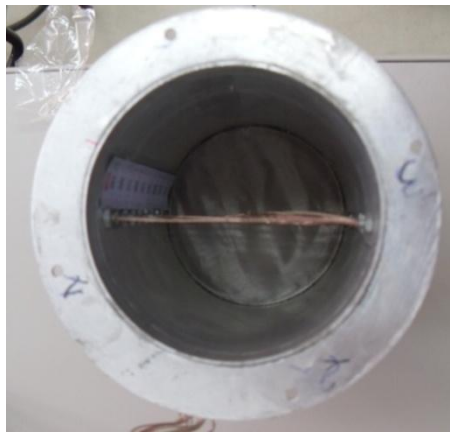


Şekil 4.8 : Kontrol hacmi.

4.3 Deneyi Etkileyen Parametreler ve Ölçümleri

4.3.1 Sıcaklık

Deney süresince malzemenin, giriş ve çıkış noktalarının ve ortamın sıcaklığının bilinmesi ve takip edilmesi gerekmektedir. Ortam sıcaklığı için ortama yerleştirilen termokupldan bilgisayara veri aktarımı yapılmıştır. Davlumbazda ise kontrol hacminin giriş noktasının hemen altına termokupl yerleştirilmiş ve giriş hava sıcaklığı bu şekilde takip altına alınmıştır. Şekil 4.9 de görüldüğü üzere kontrol hacmi boyunca 1cm aralıklarla 9 adet termokupl yerleştirilmiş ve hazne boyunca sıcaklık dağılımının nasıl olduğu Keithley 2750 veri toplama cihazı vasıtasıyla bilgisayara aktarılarak deney süresince izlenmiştir. Kontrol hacminden çıktıktan sonra orifisin bulunduğu boruya giren havanın sıcaklığı da bu borunun kontrol hacmine bağlanan alt kısmının 2 cm yukarısına bağlanmıştır.



Şekil 4.9 : Kontrol hacmindeki termokupl yerleşimi.

4.3.2 Hız

Kurutma işlemini gerçekleştirmek için hava akışını sağlamak gerekmektedir. Hava akışını sağlayan motor plastik boru kullanılarak, Şekil 4.10 da görüldüğü gibi sabitlenmiş ve yüksekliği ayarlanabilen 75mm çapındaki alüminyum boruya bağlanmıştır. Bu borunun yüksekliği değiştirilerek hız ayarı yapılmaktadır. Orifisinde bulunduğu bacaya boru yaklaştıkça hız artmakta, uzaklaştıkça hız azalmaktadır.



Şekil 4.10 : Hava akışını sağlayan motor ve hız ayarlama

4.3.2.1 Orifis

Orifis ile debi ölçülmesi, ne hacimsel debiyi ne de kütleli debiyi doğrudan belirleme olanağı vermez. Doğrudan ölçülen, orifis olarak adlandırılan akış engelinin oluşturduğu basınç farkıdır. Orifis yöntemiyle debi ölçülmesinin temel prensiplerini iki fiziksel yasa oluşturur. Bu fiziksel yasalardan biri, termodinamiğin birinci yasasına göre tanımlanan akışın enerji bağıntısıdır(Benoulli), diğeri ise süreklilik denklemidir(Can,1987).

Kütle dengesi;

$$\dot{V}=A_1V_1=A_2V_2 \longrightarrow V_1=(A_2/A_1).V_2=(d/D)^2.V_2 \quad (4.6)$$

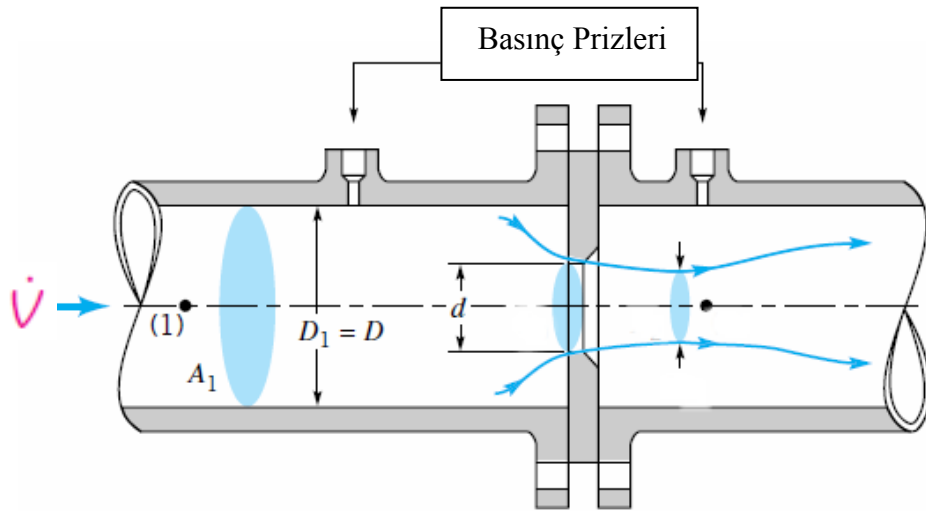
Bernoulli ($z_1=z_2$) ;

$$P_1/\rho g + V_1^2/2g = P_2/\rho g + V_2^2/2g \quad (4.7)$$

Bu iki denklemden;

$$V_2 = \sqrt{2(P_1 - P_2) / (1 - \beta^4)} \quad (4.8)$$

Bu son ifadenin elde edilışinde kayıplar ihmal edilmiştir. Gerçekte ise sürtünme etkilerinden dolayı basınç kayıplarının oluşması kaçınılmazdır ve dolayısıyla hız daha düşük olacaktır. Ayrıca, akış engeli geçtikten sonra Şekil 4.11 deki gibi daralmaya devam edecek ve daralmış kesit alanı engelin akış alanından daha azdır. Debi katsayısı C_d denilen bir düzeltme faktörü kullanılarak her iki kayıp hesaba katılabilir.(2)



Şekil 4.11 : Orifis (Url-1).

$$\dot{V} = A_0 C_d = \sqrt{2(P_1 - P_2) / (1 - \beta^4)} \quad (4.9)$$

A_0 = Deliğın kesit alanı

C_d = Debi katsayısı

β = d/D delik çapının boru çapına oranı

4.3.2.2 Basınç Kaybının Ölçümü

Orifisin bulunduğu boru üzerinde standartlara uygun olarak Şekil 4.12 deki gibi belirli noktalara yerleştirilmiş olan 2 adet basınç prizi plastik boru ile Testo 354/454 cihazına bağlanmıştır. Cihazdan doğrudan basınç farkı Pa cinsinden okunmuştur.



Şekil 4.12 : Orifisin bulunduğu borudaki basınç prizleri.

4.3.2.3 Orifis Kalibrasyonu

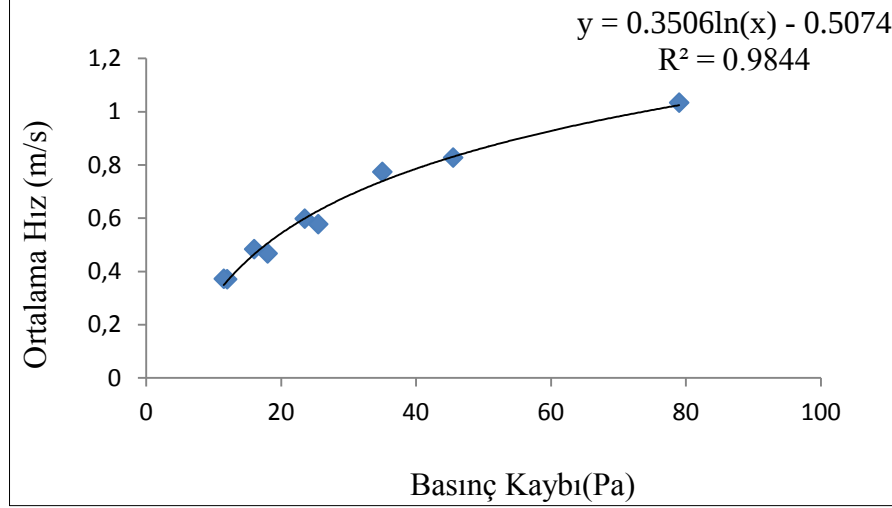
Okunan basınç kaybı değerine karşılık gelen hız değerleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Bu değerler kızgın tel anemometresi ile boru kesiti eşit alanlara bölünüp her alanın merkez noktasından ölçüm alacak şekilde anemometrenin probuyla kesitin taranması ile tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Basınç kaybı ortalama hız.

ΔP (Pa)	V_{ort} (m/s)
79	1,04475
45,5	0,8275
35	0,77475
25,5	0,5775
23,5	0,598125
18	0,4675
16	0,48475
12	0,370625
11,5	0,3725

Basınç kaybı ve ortalama hız arasındaki bağıntıyı elde etmek için Şekil 4.13 deki grafik oluşturulmuş. Şu bağıntı elde edilmiştir;

$$V_{ort} = 0.3506 \ln(\Delta P) - 0.5074 \quad (4.10)$$



Şekil 4.13 : Basınç kaybı ve ortalama hız arasındaki ilişki.

Deneyde istenen hız değeri yukarıdaki denkleme göre ayarlanmıştır. Okunan basınç kaybı değeri denklemde yerine koyulmuş ve hız değeri belirlenmiştir. İstenilen hız değerine ulaşmak için gerekli olan basınç kaybı değeri belirlendikten sonra hava akışını sağlayan borunun yüksekliği değiştirilerek gerekli olan basınç kaybı değeri elde edilmiştir ve deney sonuna kadar boru bu konumda sabit olarak durmuştur.

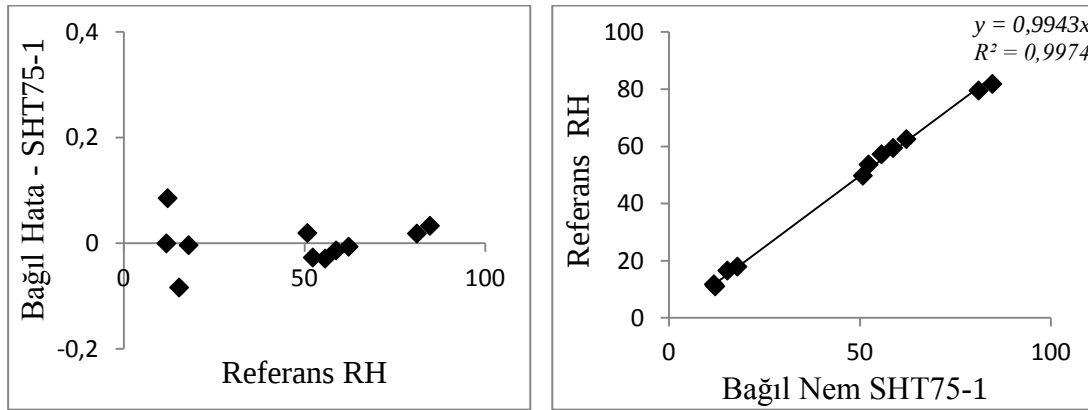
4.3.3 Nem Miktarı

Kurutma işlemindeki önemli parametrelerden biri de nem miktarıdır. Kurutulacak malzemenin ve havanın nem miktarlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Ortam havasının bağıl nemi fırın dışına konulmuş olan 2 adet nem sensörü ile tespit edilmiş ve meteorolojinin web sayfasındaki nem içeriği ile ve ıslak, yaş termometre sıcaklıklarıyla psikometrik diyagramdan okunarak doğrulanmıştır. Davlumbaz üzerinde bulunan termokuplun yanına yerleştirilen diğer bir nem sensörü ile de kontrol hacmine girişteki havanın bağıl nemi tespit edilmiştir. Kontrol hacminin çıkış noktasına konulan 2 adet nem sensörüyle de çıkış havasının bağıl nemi tespit edilmiştir. Sıcak havanın ne kadar su emdiği diğer bir ifadeyle malzemeden ne kadar su buharlaştığı bu değerler vasıtasıyla tespit edilmiştir. Kullanılan nem sensörleri (Sensirion SHT75) Sensmax TH110 markalı veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmış ve anlık olarak sıcaklık ve nem miktarındaki değişim izlenmiştir.

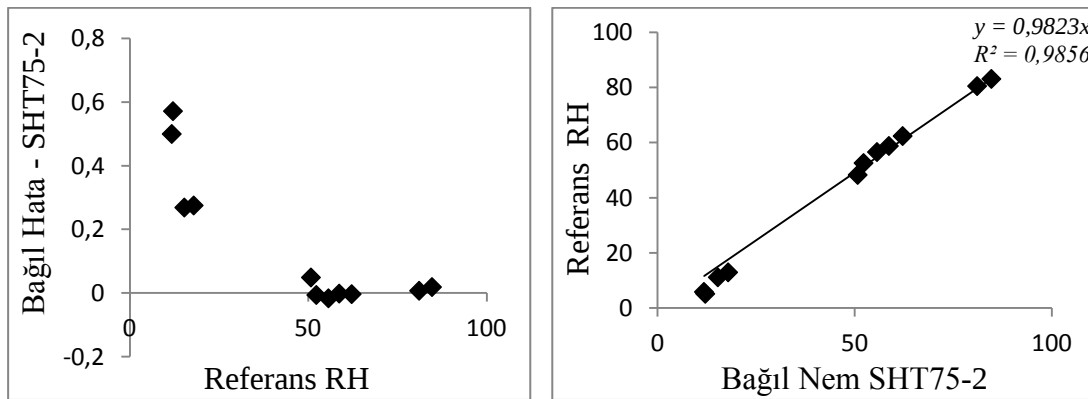
4.3.3.1 Sensörün Bağıl Nem Kalibrasyonu

Sensörün kalibrasyonunu yapabilmek için farklı ortam şartları oluşturulmuş ve bu ortam şartlarında sensörlerle bağıl nem değerleri ölçülmüştür. Aynı ortamda bulunan yaş ve kuru civalı termometre ile ölçülen sıcaklık değerlerini kullanarak psikometrik diyagramdan bağıl nem değeri okunmuştur ve su değeri referans değeri olarak kabul edilmiştir. Sensörlerden okunan değerler Şekil 4.14 deki grafiklerden görülebileceği üzere referans değerlerle karşılaştırılarak kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir.

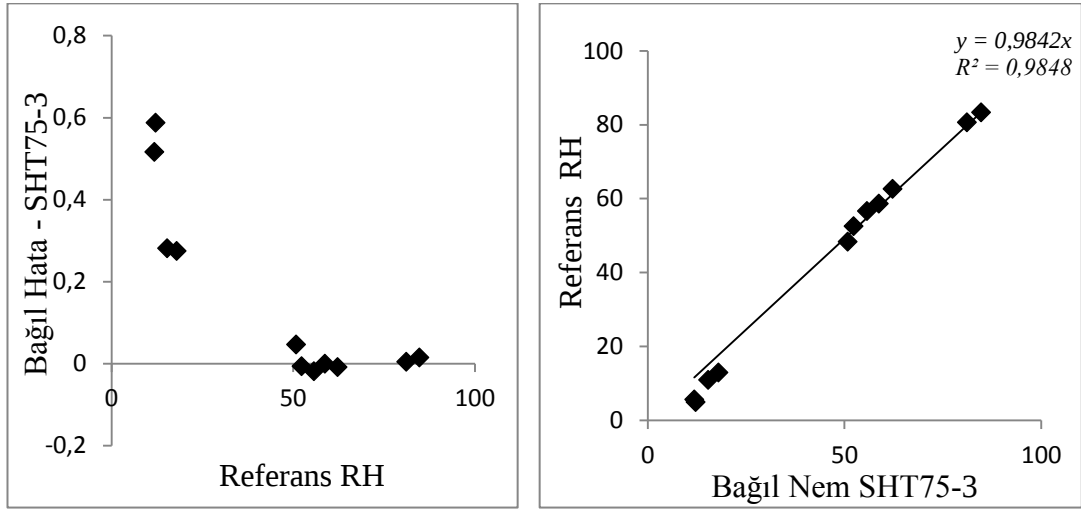
Farklı bağıl neme sahip ortamlar oluşturmak için silikajel, KCl, K_2CO_4 , $MgCl_2$ ve $CaCl_2$ kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta bekletilerek nemden arındırılmış Silika jel ve $CaCl_2$ kalibrasyon yapılan fırın içine konulduğunda ortamdeki nemi emmekte ve ortamın bağıl nemini %10-20 mertebelerine getirmektedir. KCl, K_2CO_4 ve $MgCl_2$ ise su ile karıştırılıp doymuş çözelti haline getirilip fırın içine koyulmuştur. KCl çözeltisi %80 mertebelerinde bağıl nem sağlarken K_2CO_4 ve $MgCl_2$ ise ortam bağıl nemini %50-60 civarına getirmiştir. Bu deneyler 25 - 45 °C arasındaki çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.



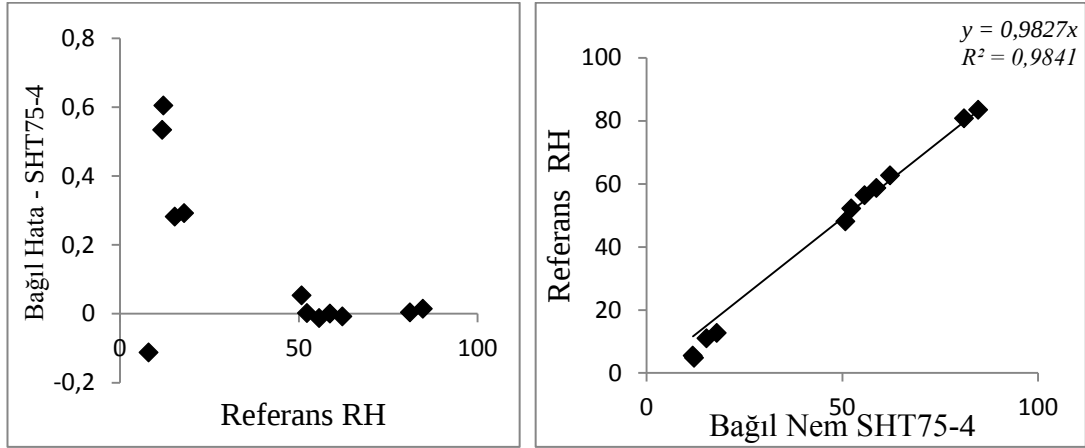
a) SHT75 – 1 Nolu Sensör



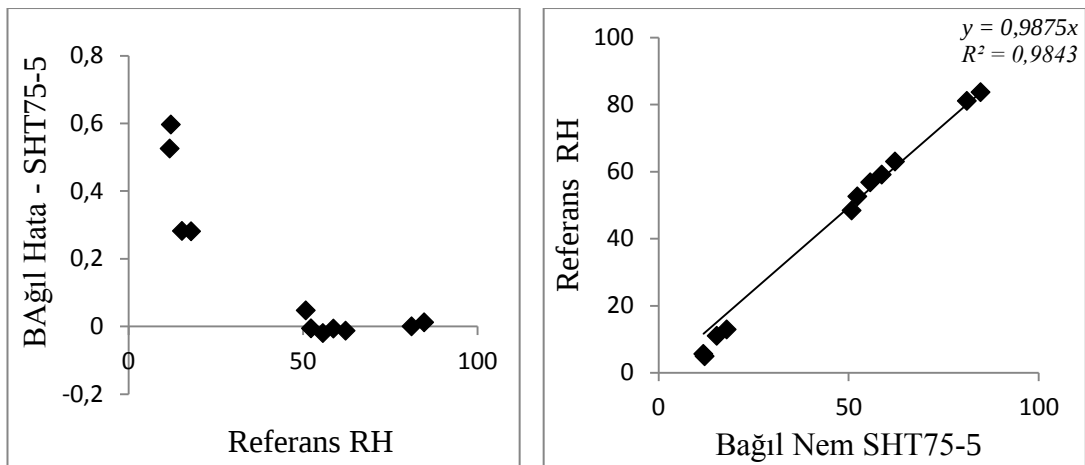
b) SHT75 – 2 Nolu Sensör



c) SHT75 – 3 Nolu Sensör



d) SHT75 – 4 Nolu Sensör

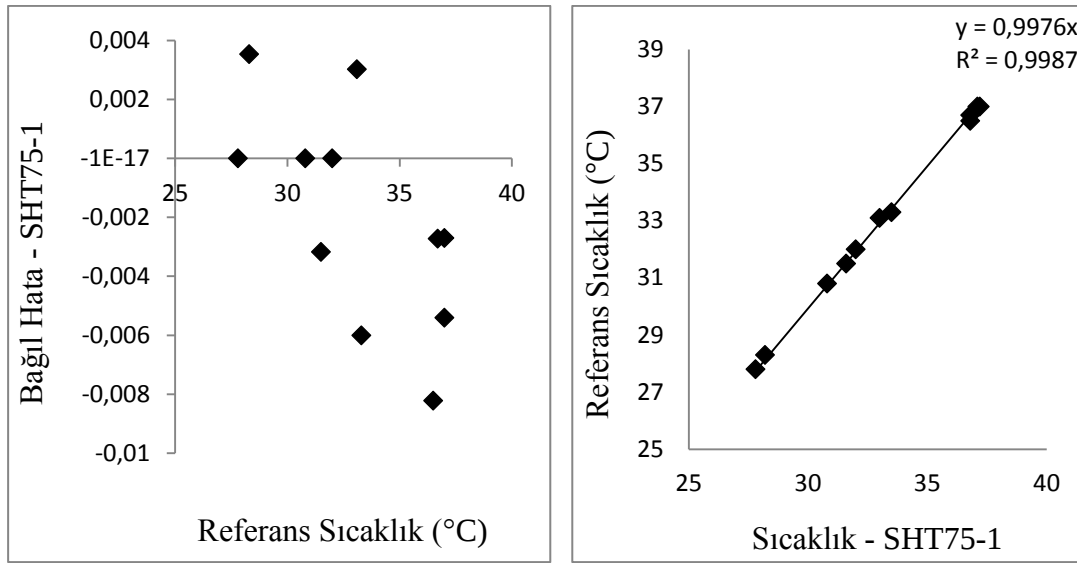


e) SHT75 – 5 Nolu Sensör

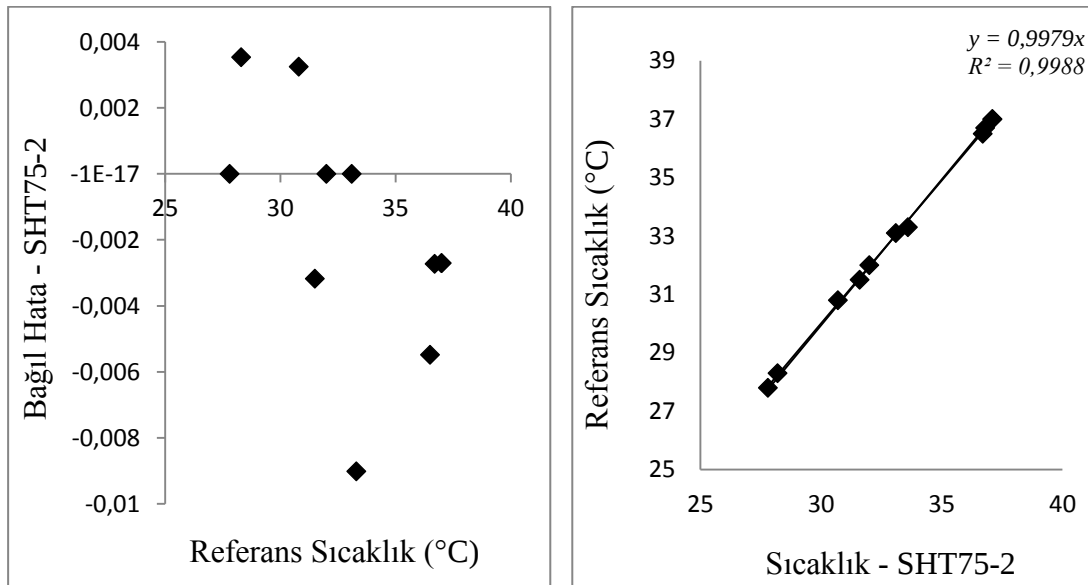
Şekil 4.14 : Sensörlerin bağıl nem kalibrasyon eğrileri.

4.3.3.2 Sensörün Sıcaklık Kalibrasyonu

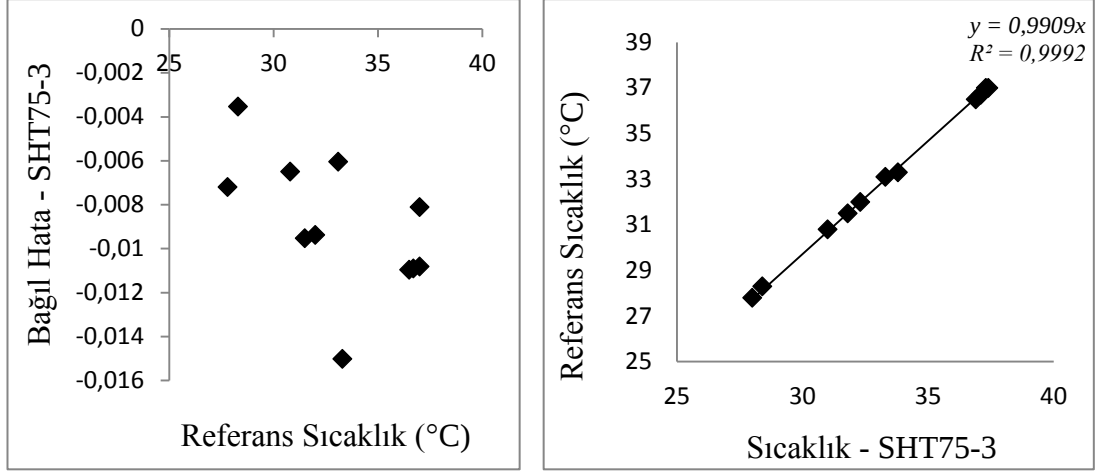
Sensörler bağıl nem, sıcaklık ve çiy noktası sıcaklıklarını ölçebilmektedir. Farklı bağıl nem oranlarında kalibrasyon için deney yapılırken bu şartlardaki sıcaklık değerleri de kayıt altına alınmıştır. Kaydedilen bu değerler sensörün sıcaklık kalibrasyon deneyinin yapıldığı fırın içine konulan civalı termometreden okunan sıcaklık değerleriyle karşılaştırılmıştır. Civalı termometreden okunan değer referans değer kabul edilmiş ve Şekil 4.15 de görülen sıcaklık kalibrasyon eğrileri elde edilmiştir.



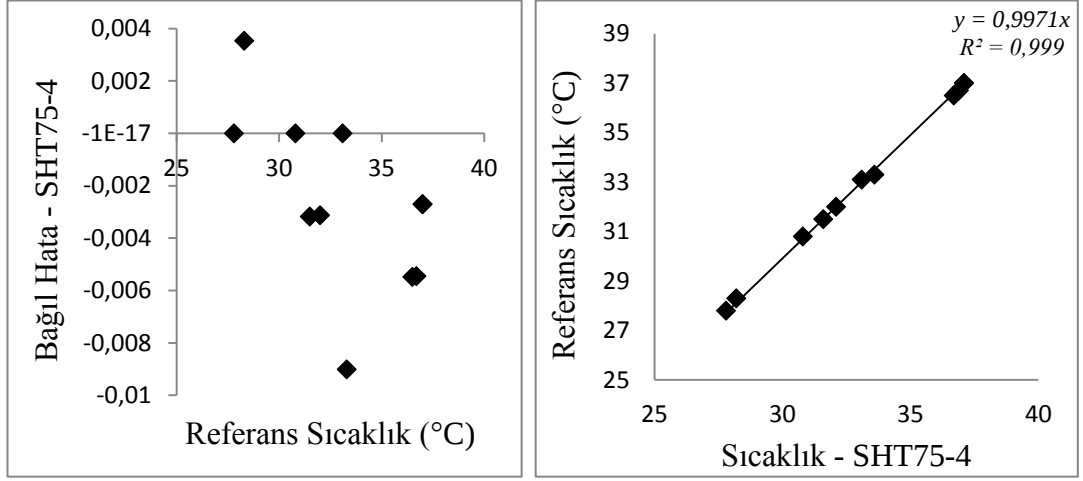
a) SHT75 – 1 Nolu Sensör



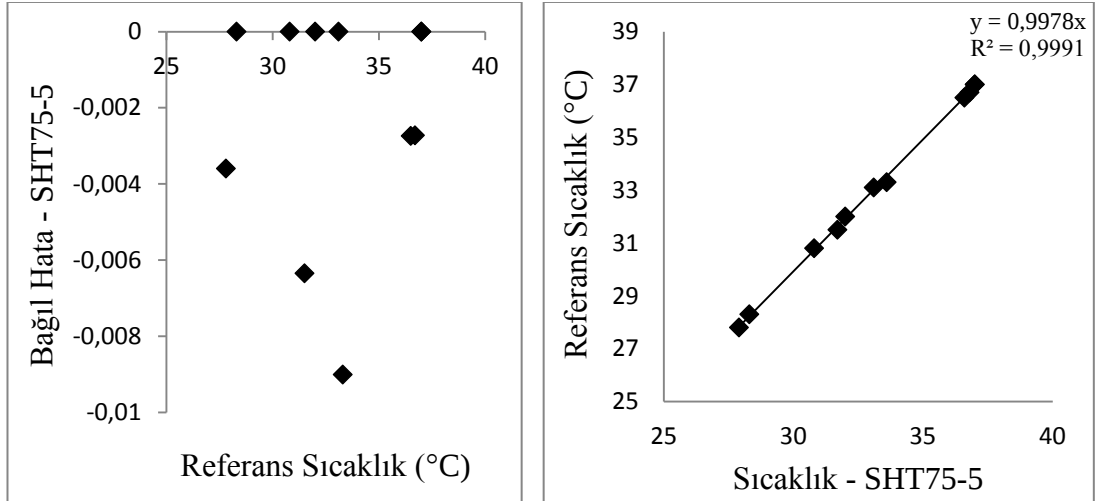
b) SHT75 – 2 Nolu Sensör



c) SHT75 – 3 Nolu Sensör



d) SHT75 – 4 Nolu Sensör



e) SHT75 – 5 Nolu Sensör

Şekil 4.15 : Sensörlerin sıcaklık kalibrasyon eğrileri.

4.4 Deneyler

Deneyisel araştırma için kullanılan metot, deneylerin yapılışı, hesaplama metodu, deneylerden elde edilen bulgular, bulgulara göre çizdirilmiş grafikler ve grafiklerin yorumlanması sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

4.4.1 Metot

Kurutma deneylerinde kullanılan silisyum kumu belirli bir kaynaktan alınmıştır. Çeşitli çaplardan oluşan kum eleme işlemine tabi tutulmuş ve deneylerde kullanılacak 1mm çapında kum tanecikleri elde edilmiştir. Deneyde kullanılacak olan kum laboratuvar ortamında oda şartlarında muhafaza edilmiştir.

Ortam şartlarındaki kumun nem içeriğini belirlemek amacıyla ağırlığı önceden ölçülmüş olan kum numuneleri Şekil 4.16'da görülen fırın içine konunulmuş 190 °C de 3 gün bekletililerek tamamen kuruduktan sonraki ağırlığı 0,1mg hassasiyete sahip terazi ile tekrar ölçülmüştür. Ortam şartlarındaki ağırlık ile fırından çıktıktan sonraki ağırlık arasındaki fark kumun ortam şartlarındaki nem miktarını vermektedir.



Şekil 4.16 : Fırın.

Çizelge 4.2'de ortam şartlarından alınmış çeşitli ağırlıklarda hazırlanmış numunelerin kurutma fırınından çıktıktan sonraki ağırlıkları gösterilmiş ve numunelerin nem miktarları ve nem oranları hesaplanarak çizelgeye eklenmiştir. Sonrasında nem içeriği değerleri için ortalama değer hesaplanmış ve çizelgeye ilave edilmiştir. Bu

değer ortam şartlarındaki kumun nem içeriği olarak kabul edilmiş deneyler ve hesaplar bu ortalama değere göre yapılmıştır.

Çizelge 4.2 : Ortam şartlarındaki kumun nem içeriği.

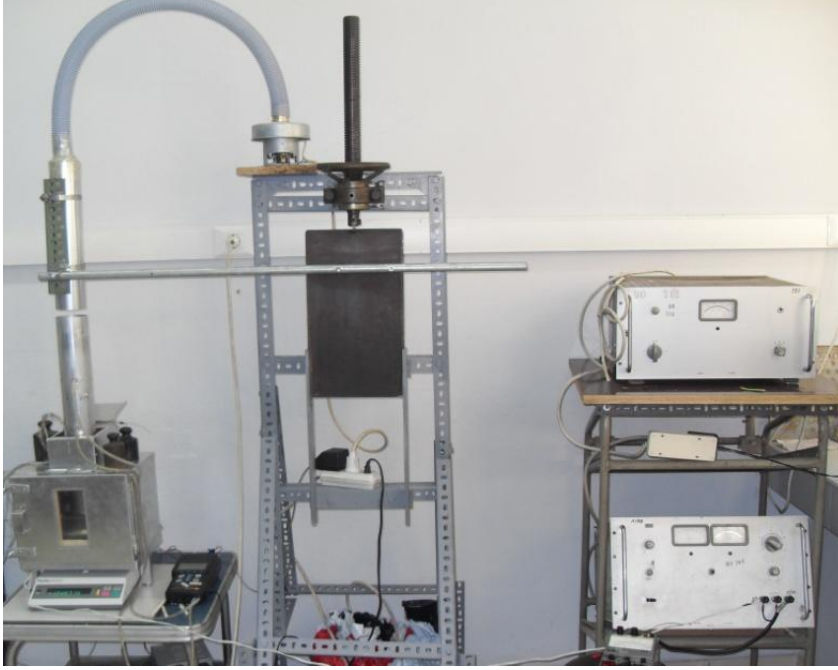
Fırından önce	Fırından sonra		
Net Ağırlık	Net Ağırlık	Nem Miktarı	Nem İçeriği
(gr)	(gr)	(gr)	gr su/gr kmad)
100,0002	98,6841	1,3161	0,013336495
70,0009	68,7845	1,2164	0,017684217
70,0008	68,8745	1,1263	0,016352932
50,0006	49,3299	0,6707	0,013596216
40,0008	39,3733	0,6275	0,015937196
30,0017	29,496	0,5057	0,017144698
80,001	78,9684	1,0326	0,013076117
60,0027	59,2046	0,7981	0,013480371
		Ortalama:	0,01507603

Kumun alabileceği maksimum nem miktarını belirlemek için yukardakine benzer şekilde belirli ağırlıklarda alınan kum numuneleri su ile dolu bir kavanozda hava almayacak ve buharlaşma miktarı minimum olacak şekilde 3 gün bekletilmiş sonrasında kavanoz açılarak numune sık bir şekilde örülmüş telin üzerine koyulmuş ve su damlacıkları kaybolana kadar beklenmiştir. Tam doymuş halde bulunan numunenin ağırlığı hassas terazi yardımıyla ölçülmüş ortam şartlarındaki numunenin nem içeriği ve kuru madde miktarı da hesaba katılarak doymuş haldeki nem miktarı ve nem oranları hesaplanmış Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Doymuş haldeki kumun nem miktarı ve nem içeriği.

Suya koymadan önce	Sudan çıktıktan sonra		
Net Ağırlık	Net Ağırlık	Nem Miktarı	Nem İçeriği
(gr)	(gr)	(gr)	(gr su/gr kmad)
40,0009	42,4992	2,4983	0,079389
50,0017	55,0371	5,0354	0,115672
40,0014	43,2037	3,2023	0,097269
30,0016	31,7274	1,7258	0,075654
35,0042	39,487	4,4828	0,145113
25,0035	27,6867	2,6832	0,12404
		Ortalama	0,10619

Tanecikli maddelerin kuruma davranışının incelenmesini amaçlayan bu çalışma Şekil 4.17'de genel görünümü olan sabit yataklı bir kurutucuda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17 : Deney düzeneği genel görünüm.

Davlumbaz, hazne, baca, orifis, Al bacaklar, seramik kılıflar, tartının üzerine koyulan alt plaka, termokupllar ve sensörlerin ağırlığı yaklaşık 870 gr civarındadır. Terazinin toplam kapasitesi ise 1212 gr'dır. Bu yüzden deneyler 300 gr ortam şartlarındaki kuma nem içeriği 0,5 ve 0,7gr su/gr kurumadde olacak şekilde su ilavesi yapılarak numuneler hazırlanmıştır. 300gr kuma bir miktar su ilave edilmiş sonrasında kum suyu eminceye ve gözle görülür bir su kabarcığı kalmayınca kadar beklendikten sonra hassas tezi ile ağırlık ölçümü yapılmıştır. 300gr kuma yaklaşık 11gr nem ilave edince nem içeriği 0,5gr su/gr kurumadde, 16gr nem ilave edince ise nem içeriği 0,7gr su/gr kurumadde olmaktadır. Deneylerde bu iki nem içeriğinde gerçekleştirilmiştir.

İki farklı nem içeriğinde hazırlanmış olan numuneler 1m/s, 0,7m/s ve 0,4m/s olmak üzere 3 farklı hızda kurutulmuştur. Hız ise Şekil 4.17'de görülmekte olan motordan kurutma bacasının üzerine uzanan borunun yüksekliği değiştirilerek ayarlanmaktadır. Bacada bulunan orifisin oluşturduğu basınç kaybı basınç prizlerinden Testo 354/454 cihazına bağlanan borular ile ölçülmüş ve Çizelge 4.4 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4 : Basınç kaybı ve hız.

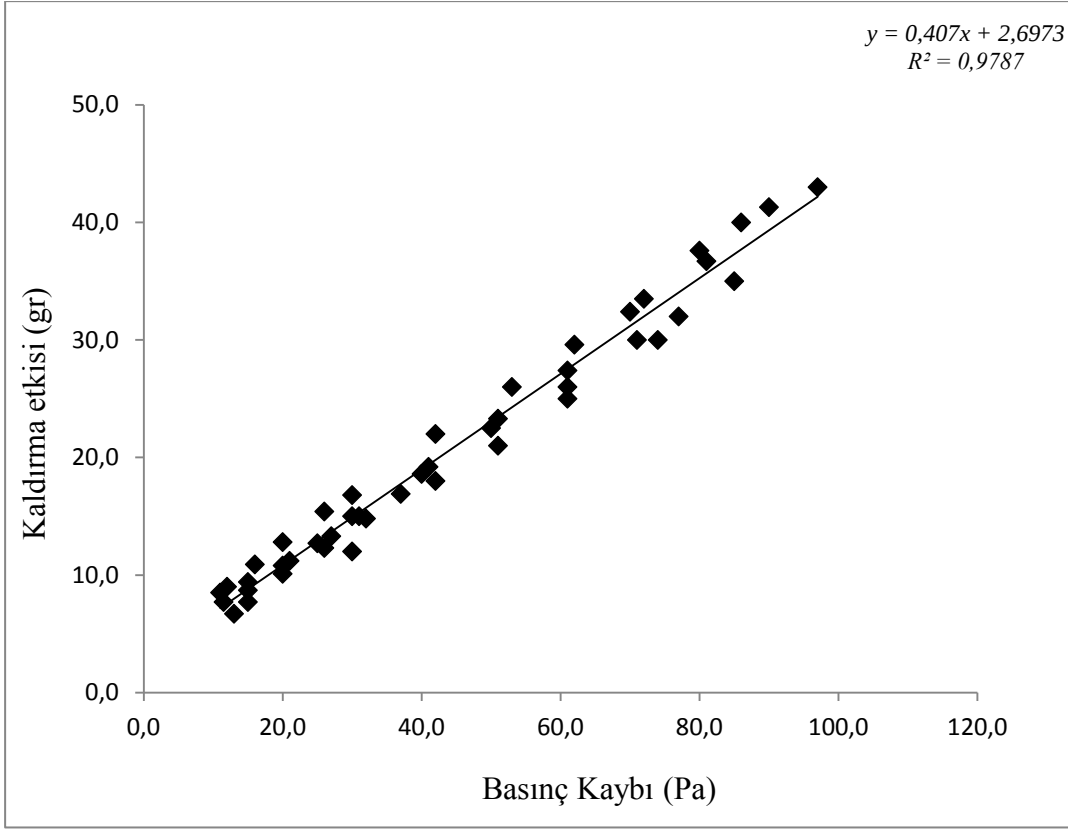
Basınç Kaybı (Pa)	Hız (m/s)
~ 75	~ 1
~ 33	~ 0,7
~ 11	~ 0,4

Ortam şartlarındaki havanın ısıtılması direnç telleriyle oluşturulmuş olan ısıtıcıya Şekil 4.17'nin sağ tarafında görülen doğru akım güç kaynağından sağlanan 12,5V gerilim 6A akım ile beslenmiştir. Hassas sıcaklık ayarı yapmak zor olduğu için tellere sabit gerilim ve akım vererek havaya verilen ısı miktarı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Deneyler havanın hızına bağlı olarak 75-80°C arasında değişen giriş havası sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve nem miktarları Sensirion SHT-75 sensörleri ve 12 adet termokupl ile deney süresince takip edilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır.

İki farklı nem içeriği için üç farklı hız değerinde toplam 6 adet deney gerçekleştirilmiştir.

4.4.2 Deneyin Yapılışı

İlk olarak sıcaklık, nem ve ağırlık ölçümlerini takip edebilmek için bilgisayara yüklenmiş programlar çalıştırılarak kayıt işlemi başlatılmıştır. Bunun ardından doğru akım güç kaynağı çalıştırılarak ısıtıcı aktif hale getirilmiş ve giriş havasının 80°C civarına gelmesi beklenmiştir. Bu esnada yukarıda açıklandığı üzere hazırlanan numuneler hazne içerisine homojen bir dağılım olacak şekilde yerleştirilmiştir. İstenen sıcaklık değerine ulaşıldığında hazne ve bu hazneye vida ile tutturulmuş olan baca davlumbazın üzerindeki yuvasına yerleştirilmiştir. Davlumbazın, haznenin ve bacanın fırın üzerinde herhangi bir yere temas edip etmediği kontrol edildikten sonra teraziden okunan ağırlık değeri bir kenara not edilmiştir. Daha sonrasında hava akışını sağlayacak olan motor çalıştırılmış ve ağırlık miktarı tekrar not edilmiştir. Bu iki ağırlık arasındaki fark aynı şekilde deney sonunda da kontrol edilmiş ve önceden ölçülen basınç kaybı ve buna karşılık gelen kaldırma etkisi değerleriyle oluşturulmuş olan Şekil 4.18'deki grafik ve buradan elde edilen denklem ile hesaplanan değer ile karşılaştırıldıktan sonra teraziden ölçülen değerlere deney sonrasında kaldırma etkisi miktarı eklenmiştir.



Şekil 4.18 : Basınç kaybı ve kaldırma etkisi arasındaki ilişki.

Teraziden okunan değer havanın hızına ve numunenin nem içeriğine göre yeterli bir süre geçtikten sonra değişmemeye başlamakta ve küçük bir aralıkta salınım göstermektedir. Bu durum kuruma işleminin sona ermeye başladığının bir göstergesidir. Ağırlıktaki değişim çok düşük miktarlara geldiğinde deneyler ısıtıcı ve motorun kapatılmasıyla bitirilmiştir. Daha sonrasında ilk ağırlığı bilinen haznedeki numune alınarak son ağırlığı diğer teraziyle ölçülmüş numuneden ne kadar nem alındığı hesaplanmıştır. Kurutma işleminden sonra başka bir teraziyle ölçüm yapılması kurutma fırının altındaki teraziden alınan değerlerin doğruluğunun sağlanmasını yapmak ve pekiştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İki ölçüm arasında ihmal edilebilecek düzeylerde farklılıklar görülmüştür. Bunun sebebi ise hazneden çıkarılıp ölçüm yapılana kadar geçen sürede kum ile temas eden havanın sıcaklığındaki değişim ve kuru maddenin ortamdan nem almasıdır.

Çizelge 4.5'de yapılan 8 deney ve bu deneylerdeki hava hızları ile numunenin nem oranları bir tablo halinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : Deneydeki hava hızları ve numune nem oranları.

Deney	Hava Hızı (m/s)	Nem İçeriği(gr su/gr k.madde)
Deney 1	0,15	
Deney 2	0,4	
Deney 3	0,7	0,05
Deney 4	1	
Deney 5	0,15	
Deney 6	0,4	0,07
Deney 7	0,7	
Deney 8	1	

4.4.3 Analiz

Deney süresince alınan ölçümler yazılımlar aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Gerekli hesaplamalar da yine bilgisayarda yapılmıştır. Belirli bir zaman boyunca kaydedilen bilgiler daha sonra tablolar haline getirilmiştir.

Kum taneciklerinin kuruma davranışının incelenebilmesi için grafikler çizdirilmiş ve bu grafikler aracılığıyla hava hızının ve nem içeriğinin kuruma hızına ve kuruma süresine etkisi incelenmiştir.

Deneysel araştırma için çizdirilen grafikler;

- Numunenin nem içeriğinin zamana göre değişimi
- Numunenin nem oranının zamana göre değişimi
- Numunenin kuruma hızının zamana göre değişimi
- Numunenin kuruma hızının nem içeriğiyle değişimi

4.4.4 Hesaplama

4.4.4.1 Nem içeriğinin belirlenmesi

Numune nemi; başlangıç ve çıkış kütlelerinden gidilerek kuru baza göre aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_{kb} = \frac{m_{su}}{m_{kb}} = \frac{m_T - m_{km}}{m_{km}} \quad (4.11)$$

$$m_T = m_{su} + m_{km} \quad (4.12)$$

X_{kb} : Kuru baza göre başlangıç nem içeriği (gr su/gr kurumadde)

m_{su} : Üründeki su kütlesi (gr)

m_T : Ürünün toplam kütlesi (gr)

m_{km} : Üründeki toplam kuru madde kütlesi (gr)

4.4.4.2 Kuruma Hızı

$(m_T - m_{t,\Delta t}) / \Delta t$ zaman aralığında numuneden uzaklaşan nem miktarını göstermek üzere kuruma hızı;

$$V_{kh} = \frac{(m_T - m_{t,\Delta t})}{\Delta t} \quad (4.13)$$

V_{kh} : Ürünün Kuruma hızı (gr/dk)'dır.

4.4.5 Deneyden Elde Edilen Bulgular

Deney 1:

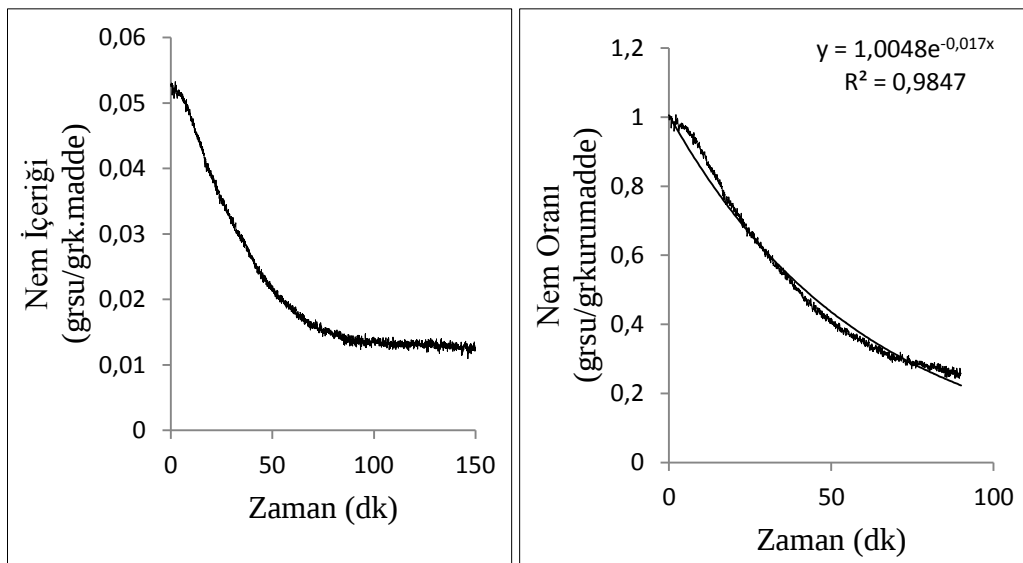
$V=0,15$ m/s $X_0= 0,053$ gr su/gr kuru madde $Q= 72,275$ Watt $m_{T0}= 311$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 24,7$ °C $T_{yb}= 18,4$ °C $\phi = 54,7$

Yukardaki şartlarda gerçekleşen 1 nolu deneyden elde edilen sıcaklık bilgileri 10'ar saniye, teraziden alınan kütle bilgileri ise 3'er saniye aralıkla deney süresince kaydedilmiştir. Bu veriler çok fazla yer kapladığı için Çizelge 4.6 10 dakikalık periyotla alınan bilgilerden oluşturulmuştur.

Çizelge 4.6 : Deney1-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

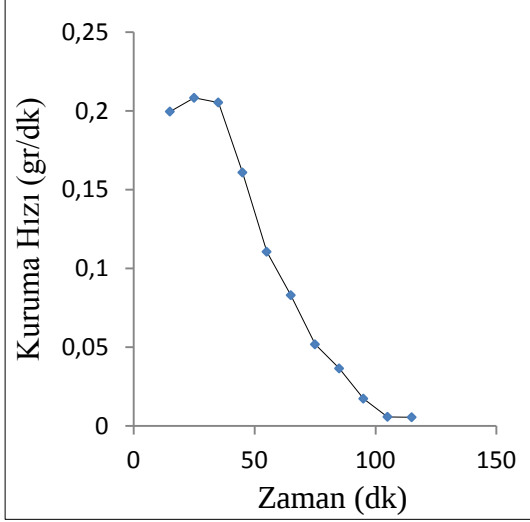
Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	311,1000	0,052899	1,000000	-
5	310,4644	0,050748	0,959335	0,063559
15	308,2071	0,043108	0,814917	0,225726
25	305,8954	0,035284	0,667010	0,231178
35	304,0694	0,029104	0,550186	0,182596
45	302,4599	0,023657	0,447212	0,160949
55	301,3537	0,019913	0,371423	0,110621
65	300,5235	0,017103	0,323321	0,083020
75	300,0056	0,01535	0,290184	0,051794
85	299,6405	0,014115	0,266825	0,036510
95	299,4673	0,013529	0,255748	0,017313
105	299,4095	0,013333	0,252049	0,005781
115	299,3544	0,013146	0,248521	0,005514
125	299,3512	0,013136	0,248319	0,000316
135	299,2796	0,012893	0,243734	0,007168
145	299,1963	0,012612	0,238410	0,008321

Şekil 4.19'de Deney1'den elde edilen veriler neticesinde nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için grafikler verilmiştir.

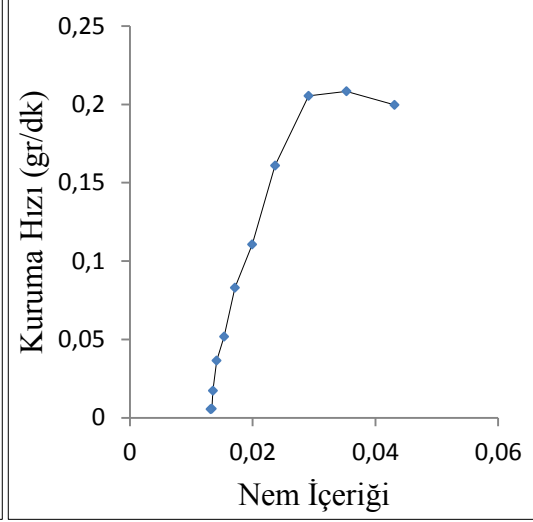


a) Nem içeriği - Zaman

b) Nem Oranı- Zaman



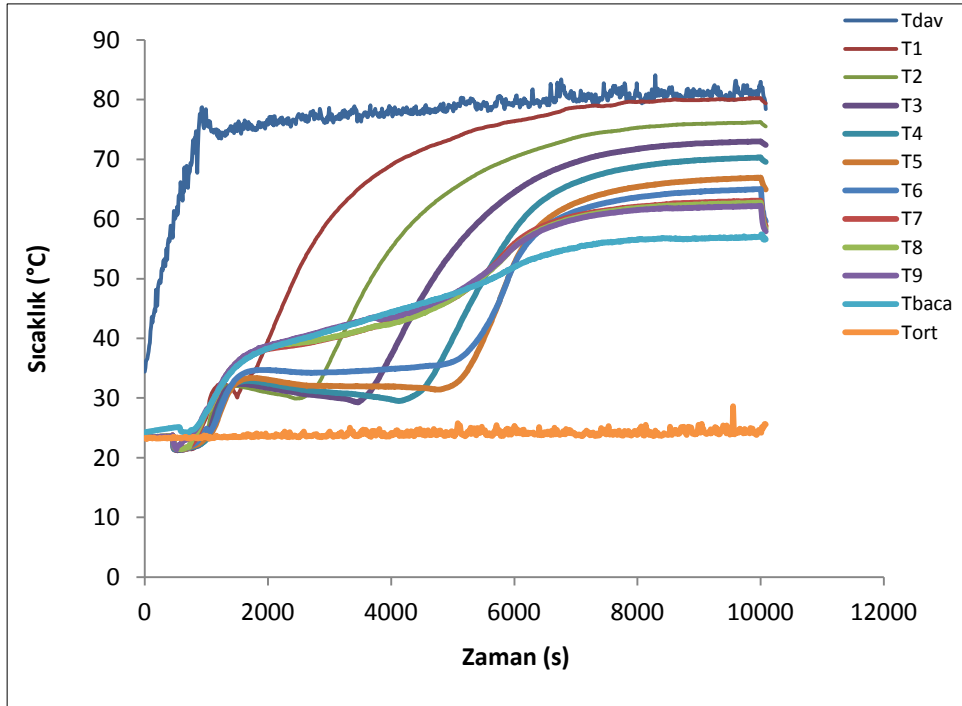
c) Kuruma Hızı - Zaman



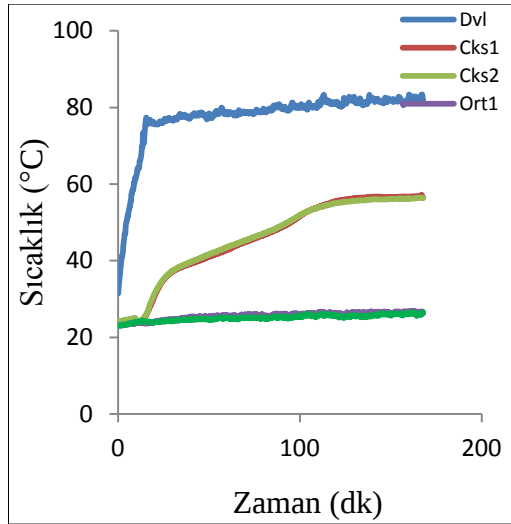
d) Kuruma Hızı - Nem İçeriği

Şekil 4.19 : Deney1-Kuruma grafikleri.

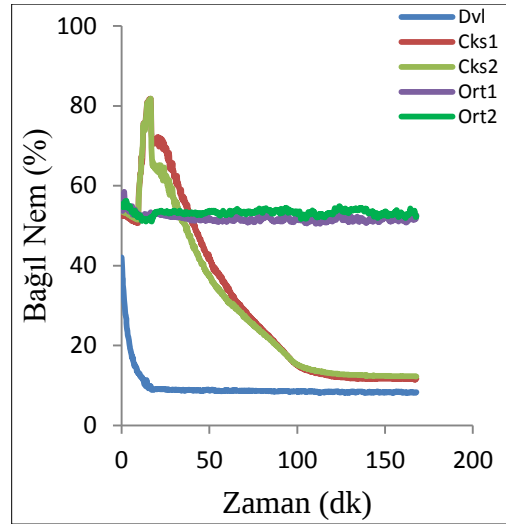
Şekil 4.20'de ise termokupllardan alınan sıcaklık verilerinin ve sensörlerden alınan sıcaklık ve bağıl nem verilerinin derlenmesi sonucu elde edilmiş olan grafiklerle kuruma esnasındaki sıcaklık ve bağıl nemdeki değişimin zamanla olan ilişkisi gösterilmeye amaçlanmıştır. Bu grafikler daha sonra hava hızının ve numune nem içeriğinin kurutma üzerindeki etkisini açıklanması amacıyla kullanılmıştır.



a) Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman (sensör)



c) Bağıl Nem - Zaman (sensör)

Şekil 4.20 : Deney1 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 2:

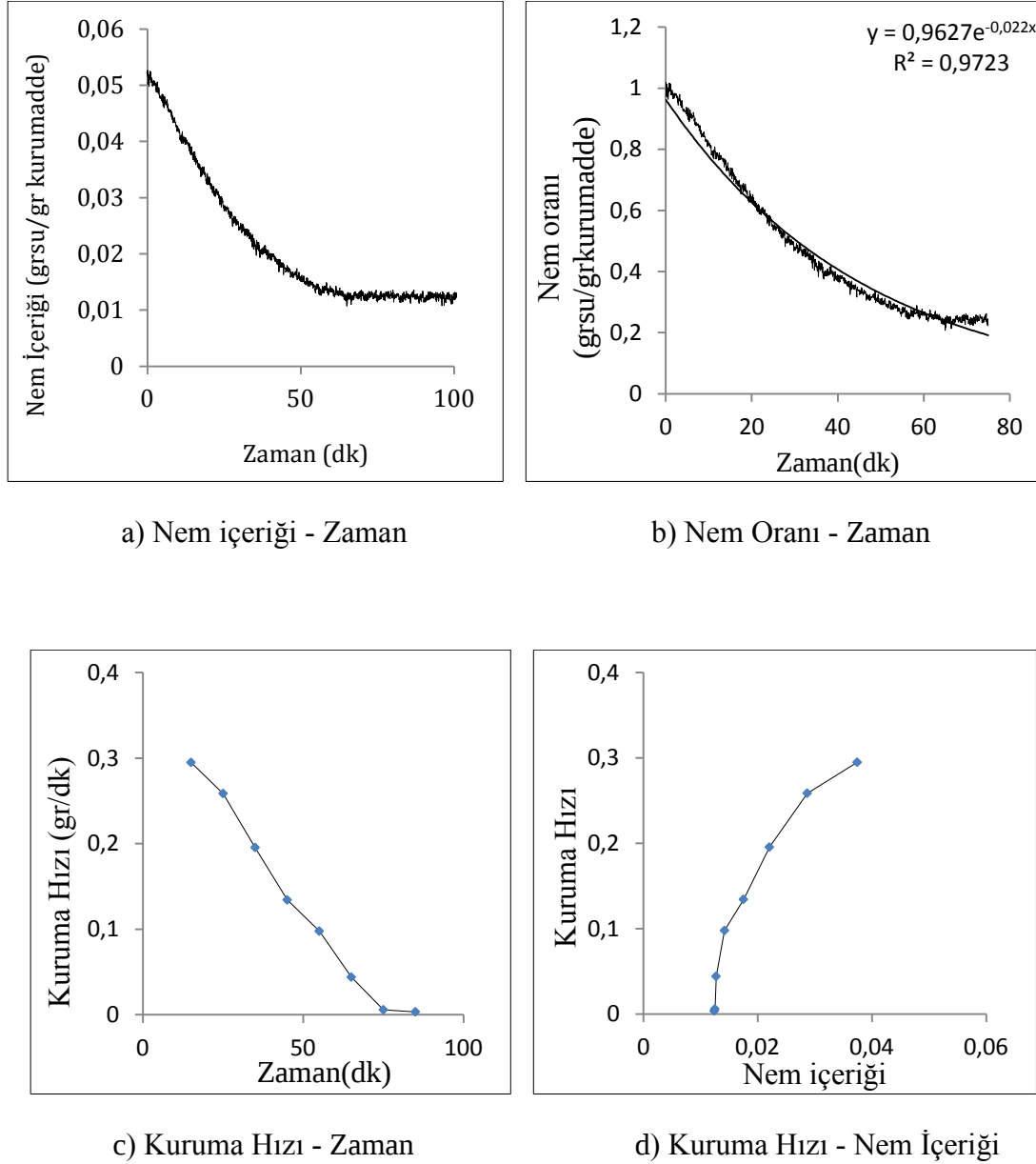
$V=0,4$ m/s $X_0=0,052$ gr su/gr kuru madde $Q=75$ Watt $m_{T0}=310,73$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}=28$ °C $T_{yb}=21,6$ °C $\phi=57,2$

Deney1'de olduğu gibi 10 dakikalık periyotlarla kaydedilmiş toplam kütle ve bu değere göre hesaplanmış nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızı değerlerinden oluşmakta olan Çizelge 4.7 aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7 : Deney2-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	310,7258	0,051632145	1	-
5	309,4815	0,047421109	0,918441571	0,124423
15	306,5322	0,037439182	0,72511381	0,294936
25	303,946	0,028686652	0,555596742	0,258611
35	301,9908	0,022069229	0,427431952	0,195525
45	300,6479	0,017524266	0,339406126	0,13429
55	299,6699	0,014214387	0,275301116	0,097797
65	299,2295	0,012723762	0,246431018	0,044043
75	299,1712	0,012526348	0,242607541	0,005833
85	299,1368	0,012410211	0,240358226	0,003431
95	299,1017	0,012291096	0,238051227	0,003519

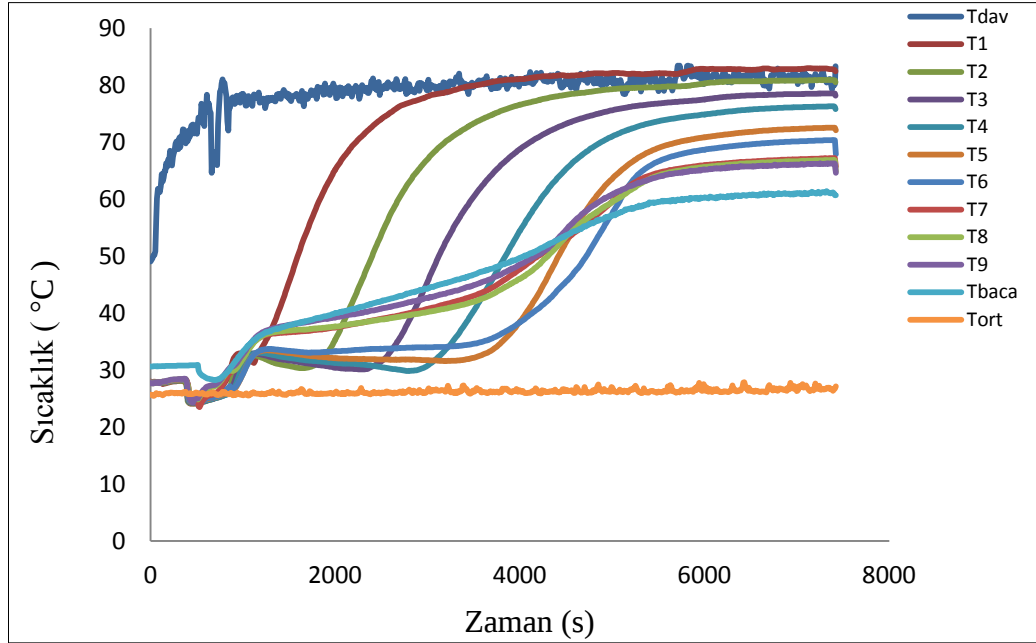
Deney2'den elde edilen veriler neticesinde nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 4.21'de görülen grafikler oluşturularak gösterilmeye çalışılmıştır. Bu grafiklerin yardımıyla yukarıda belirtilen koşullarda gerçekleştirilmiş olan Deney2'nin yorumlanması ve diğer deneylerden alınan bilgi ve grafiklerle karşılaştırılması kolaylaşmıştır.



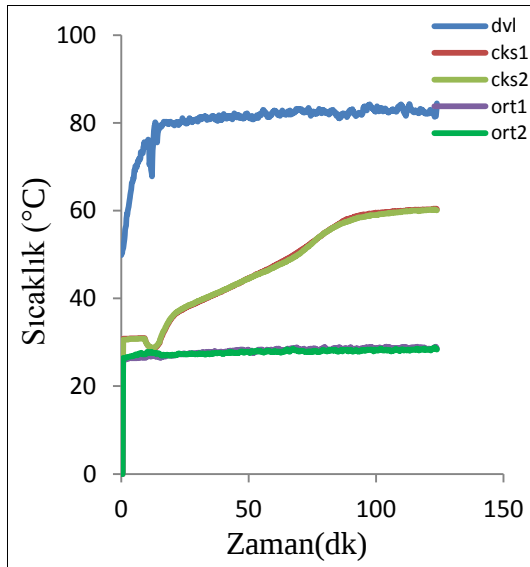
Şekil 4.21 : Deney2-Kuruma grafikleri.

Şekil 4.22'de görülen grafikler ise Deney2 süresince termokupl ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermekte ve deneyin yorumlanmasında kolaylık ve yarar

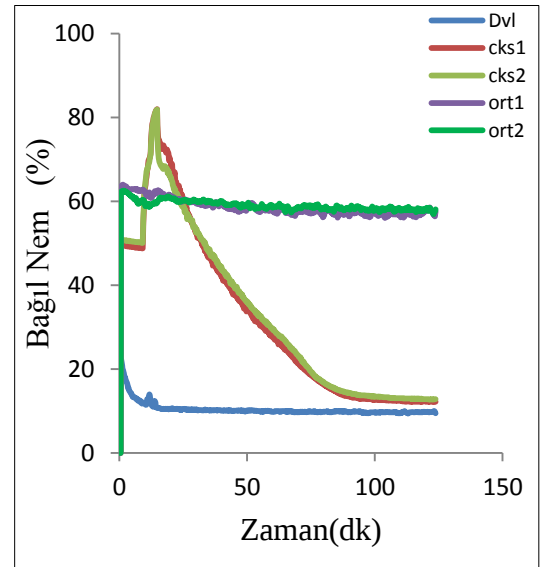
sağlamaktadır. Şekil 4.22a'da termokupllardan alınan sıcaklık değerlerinin zamanla değişimi görülmekte b ve c de ise sensörlerden alınan sıcaklık ve bağıl nemin zamanla değişimi görülmektedir.



a) Deney2 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman



c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.22 : Deney2 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 3:

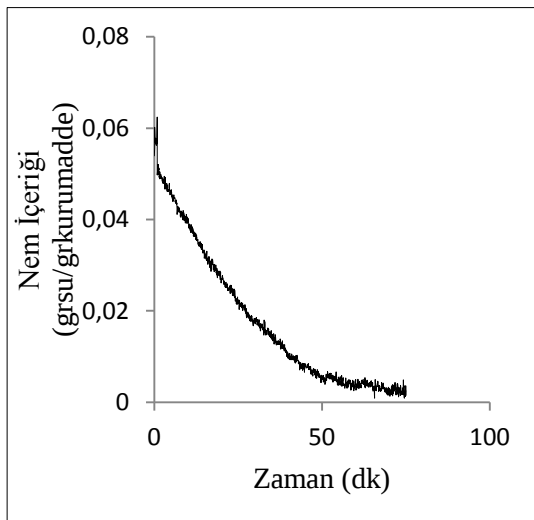
$V=0,7$ m/s $X_0= 0,054$ gr su/gr kuru madde $Q= 75$ Watt $m_{T0}= 311,4$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 28$ °C $T_{yb}= 23,6$ °C $\phi = 69,5$

10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.8 oluşturulmuştur.

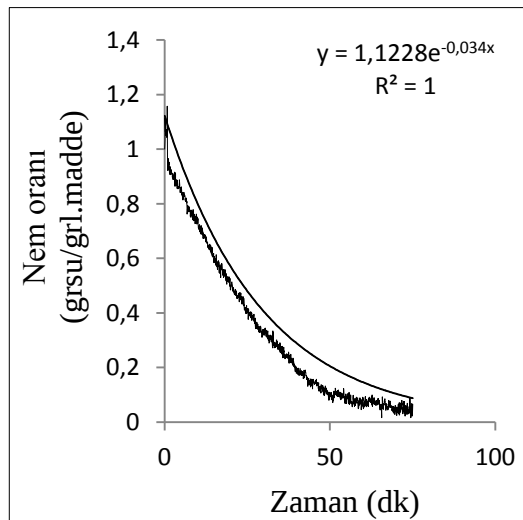
Çizelge 4.8 : Deney3-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	311,909	0,053944563	1	-
5	308,65	0,045952229	0,851841709	0,3259
15	305,1607	0,032797695	0,607988895	0,348927
25	302,0027	0,022109487	0,4098557	0,315804
35	299,61	0,014350899	0,266030491	0,239269
45	297,7692	0,007781653	0,144252776	0,184075
55	296,8585	0,004699259	0,087112742	0,091076
65	296,5026	0,003494653	0,064782295	0,035592
72,5	296,2198	0,002537753	0,047043729	0,056547

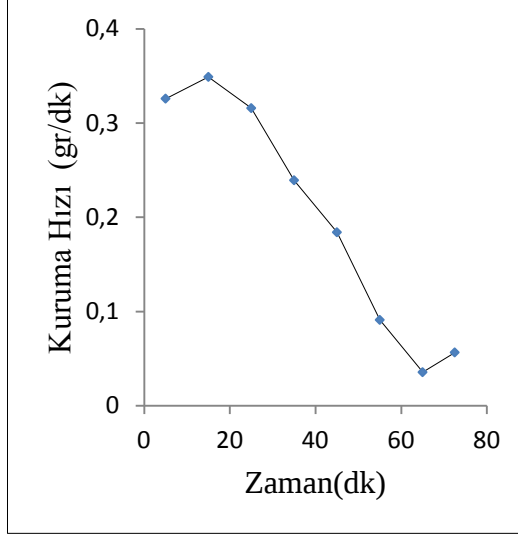
Deney3'den elde edilen veriler neticesinde nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 4.23'de görülen grafikler oluşturularak gösterilmeye çalışılmıştır.



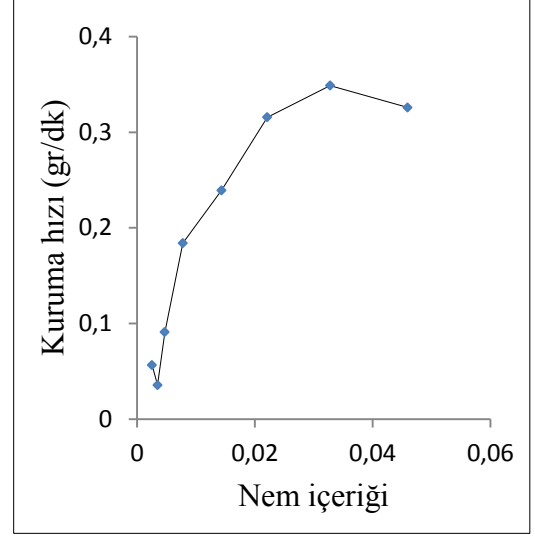
a) Nem İçeriği -Zaman



b) Nem Oranı - Zaman



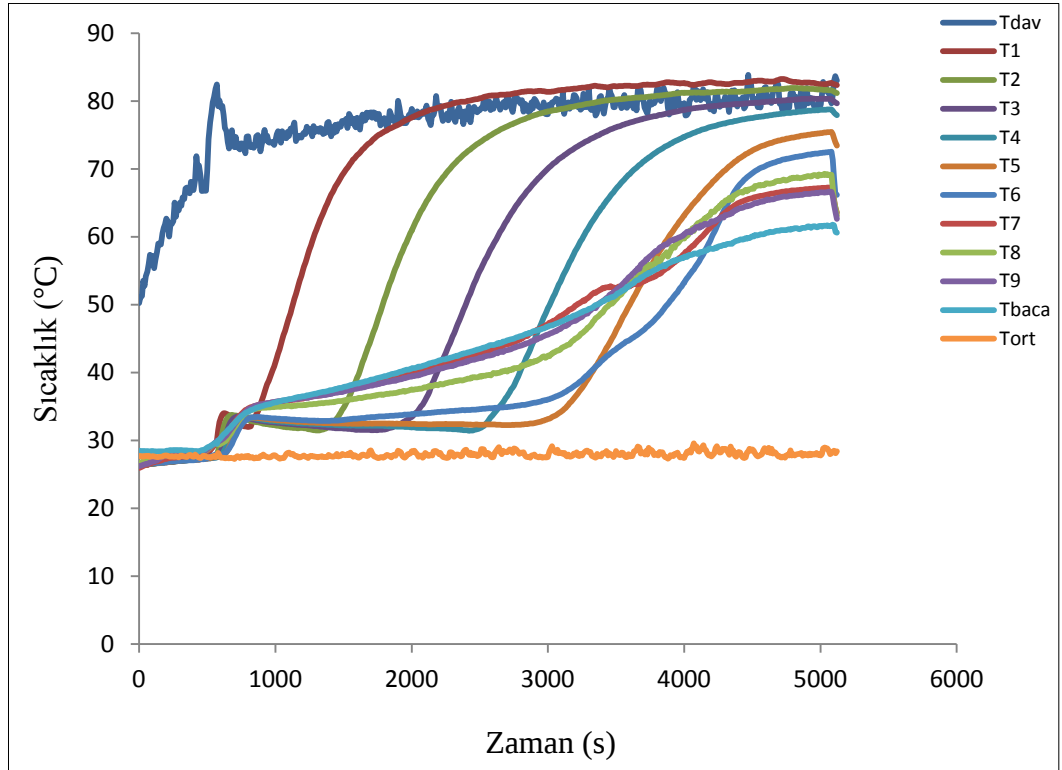
c) Kuruma Hızı - Zaman



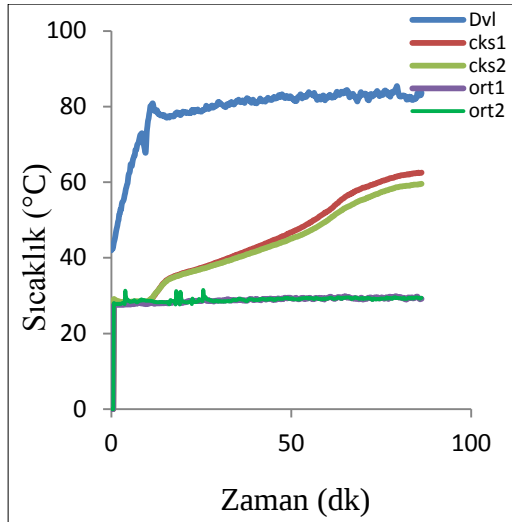
d) Kuruma Hızı - Nem İçeriği

Şekil 4.23 : Deney3-Kuruma grafikleri.

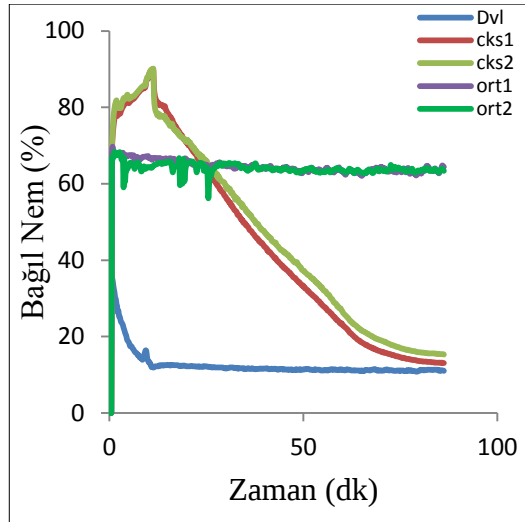
Şekil 4.24'de görülen grafikler ise Deney3 süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.



a) Deney3 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman



c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.24 : Deney3 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 4:

$V=1,0$ m/s $X_0= 0,057$ gr su/gr kuru madde $Q= 75$ Watt $m_{T0}= 312,2$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 26,5$ °C $T_{yb}= 21$ °C $\phi = 64,4$

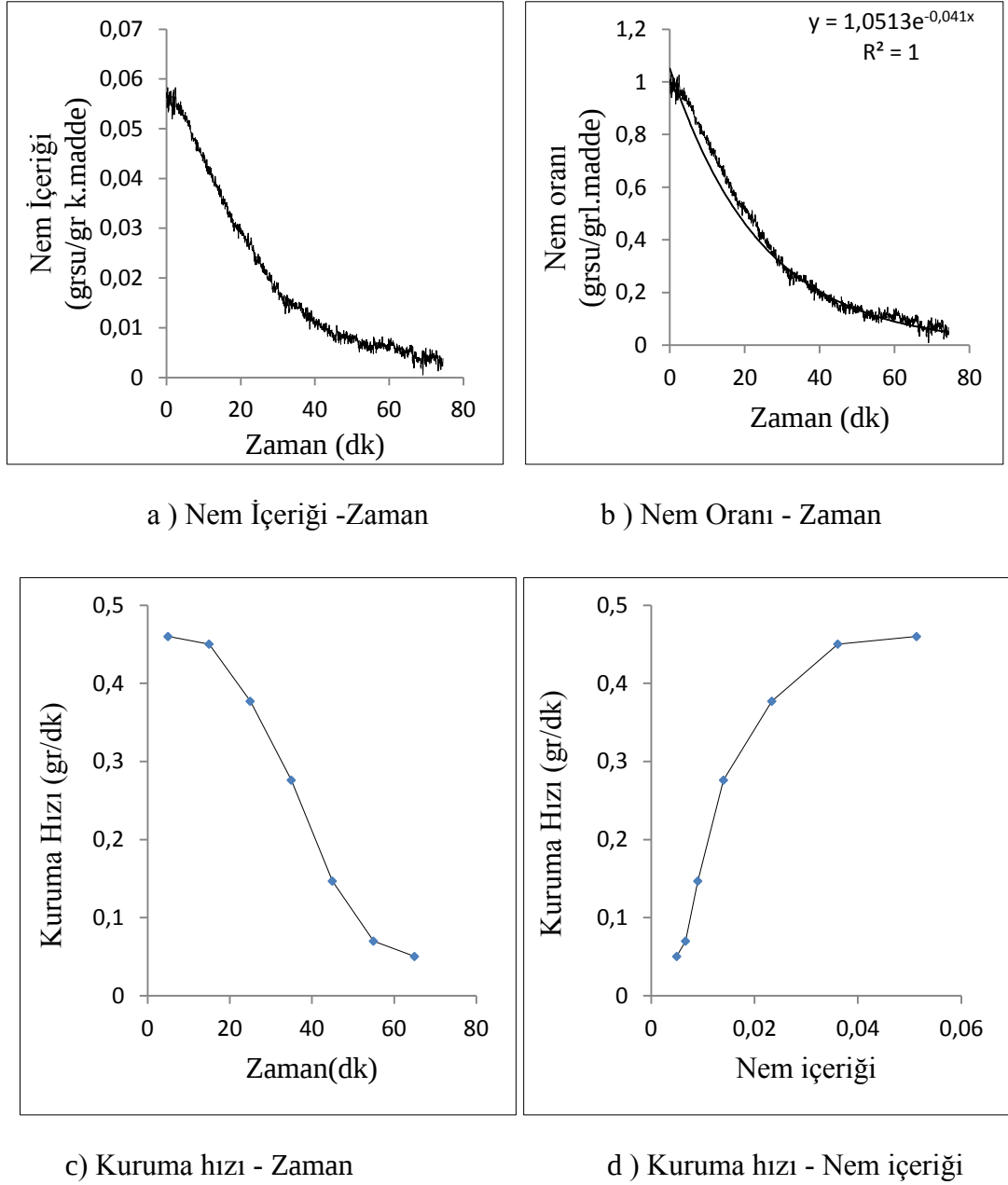
10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.9 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.9 : Deney4-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	312,243	0,056767184	1	-
5	310,64255	0,05135056	0,904581768	0,160045
15	306,139385	0,036109876	0,636104752	0,450316
25	302,367565	0,023344384	0,411230251	0,377182
35	299,606065	0,013998257	0,246590652	0,27615
45	298,136365	0,009024148	0,158967686	0,14697
55	297,43538	0,006651707	0,117175222	0,070099
65	296,93101	0,004944698	0,087104871	0,050437
72,5	296,577809	0,003749311	0,066047158	0,07064

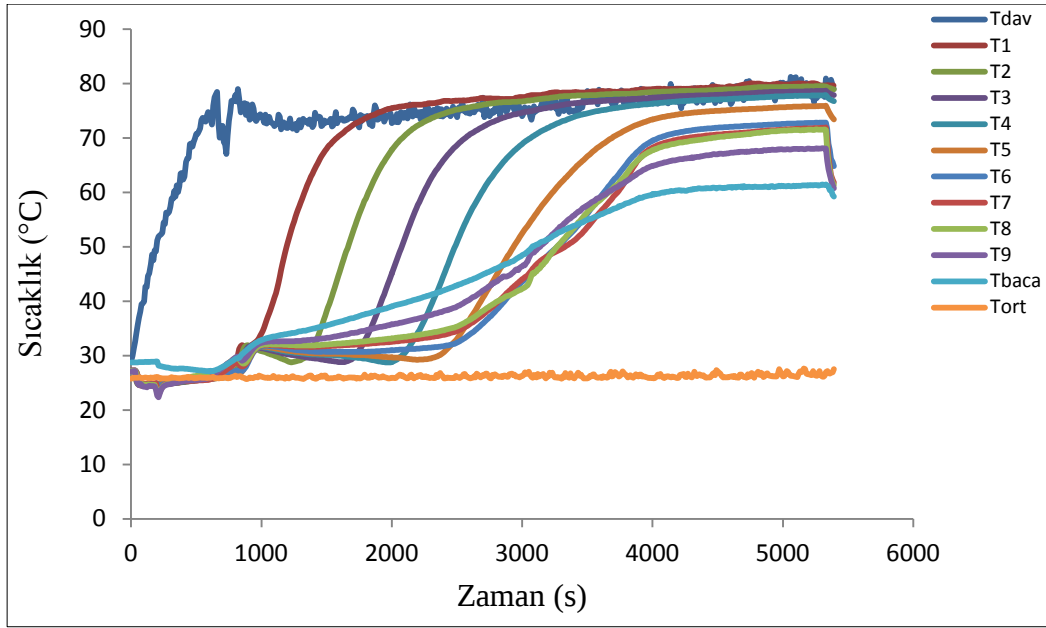
Şekil 4.25'de ise 3 saniye aralıklarla teraziden alınan veriler yardımıyla hazırlanmış grafikler görülmektedir. Kuruma hızı-zaman ve Kuruma hızı-Nem içeriği grafikleri

ise Çizelge 4.9'da 10 dakikalık periyotla kaydedilmiş verilerden yararlanılarak çizdirilmiştir. Nem içeriğinin ve kuruma hızının zamanla değişimi ile kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi aşağıdaki grafiklerde daha iyi anlaşılmaktadır.

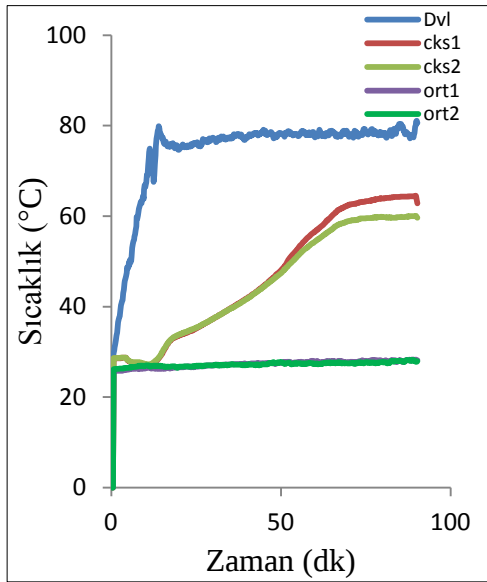


Şekil 4.25 : Deney4-Kuruma grafikleri.

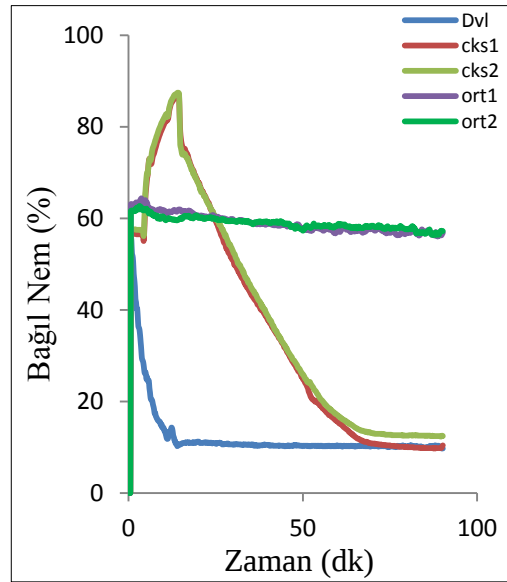
Aşağıda Şekil 4.26'de görülen grafikler ise Deney4 süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.



a) Deney4 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman



c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.26 : Deney4 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 5:

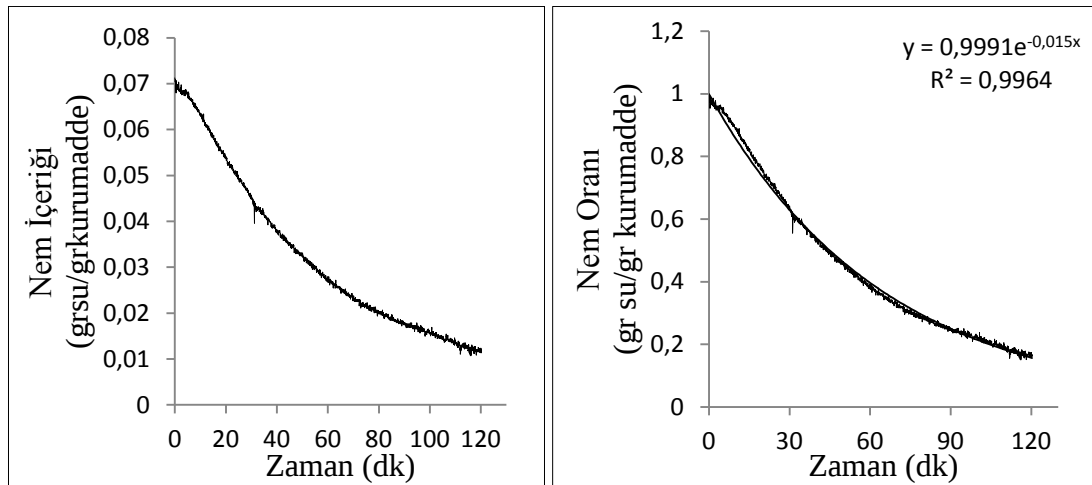
$V=0,15 \text{ m/s}$ $X_0= 0,0713 \text{ gr su/gr kuru madde}$ $Q= 70,2 \text{ Watt}$ $m_{T0}= 316,2 \text{ gr}$
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 24,9 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{yb}= 19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ $\phi = 57,5$

10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.10 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.10 : Deney5-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

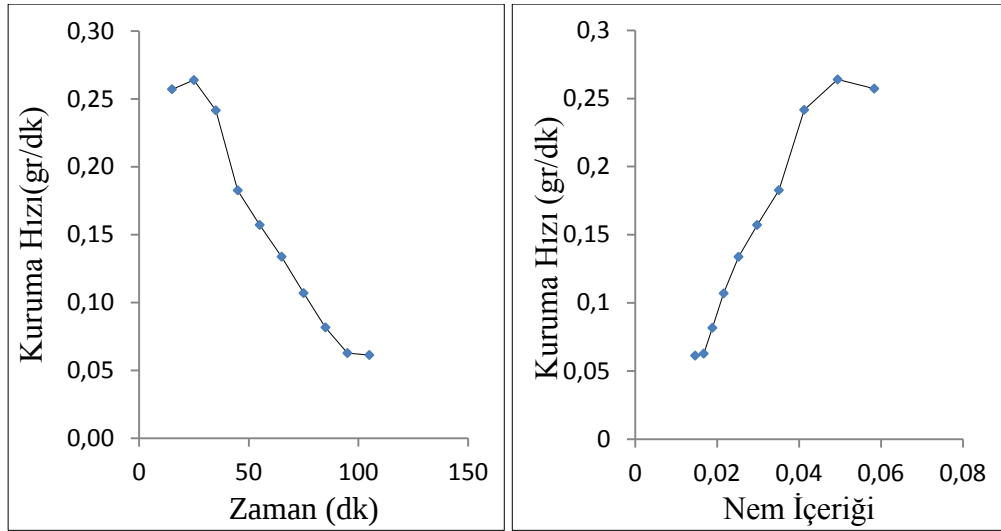
Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	316,533	0,071286425	1	-
5	315,28819	0,067073464	0,940900942	0,124480345
15	312,71572	0,058367095	0,8187687	0,2572471
25	310,07606	0,049433325	0,6934465	0,2639661
35	307,65941	0,041254336	0,5787124	0,2416646
45	305,83240	0,035070913	0,4919718	0,1827016
55	304,26053	0,029751012	0,4112471	0,1571871
65	302,92273	0,025223324	0,3538307	0,1337796
75	301,85311	0,021603258	0,3030487	0,1069621
85	301,03660	0,018839827	0,2642835	0,0816511
95	300,40937	0,016717019	0,2345049	0,0627226
105	299,79656	0,014642998	0,2054107	0,0612811
115	299,14181	0,012427043	0,1743255	0,0654748

Şekil 4.27'de ise 3 saniye aralıklarla teraziden alınan veriler yardımıyla hazırlanmış grafikler görülmektedir. Kuruma hızı-zaman ve Kuruma hızı-Nem içeriği grafikleri ise Çizelge 4.10'da 10 dakikalık periyotla kaydedilmiş verilerden yararlanılarak çizdirilmiştir. Nem içeriğinin, nem oranının ve kuruma hızının zamanla değişimi ile kuruma hızının nem içeriğine göre değişimi aşağıdaki grafiklerde daha iyi anlaşılmaktadır.



a) Nem İçeriği -Zaman

b) Nem Oranı - Zaman

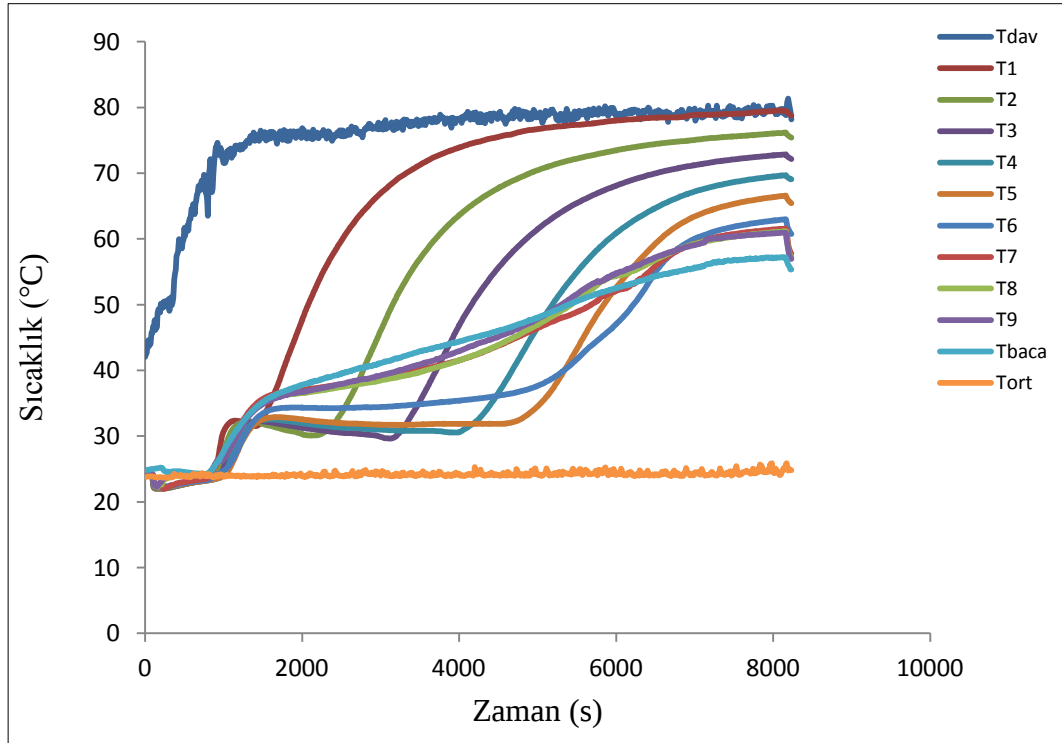


c) Kuruma hızı - Zaman

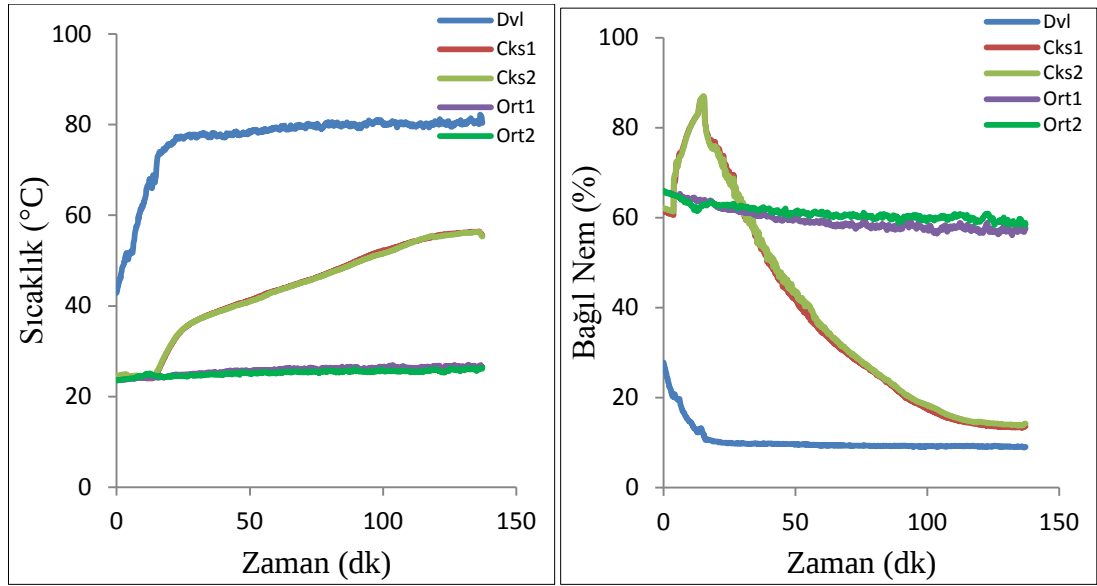
d) Kuruma hızı - Nem içeriği

Şekil 4.27 : Deney5-Kuruma grafikleri.

Şekil 4.28'de görülen grafikler ise Deney5 süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.



a) Deney5 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman

c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.28 : Deney5 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 6:

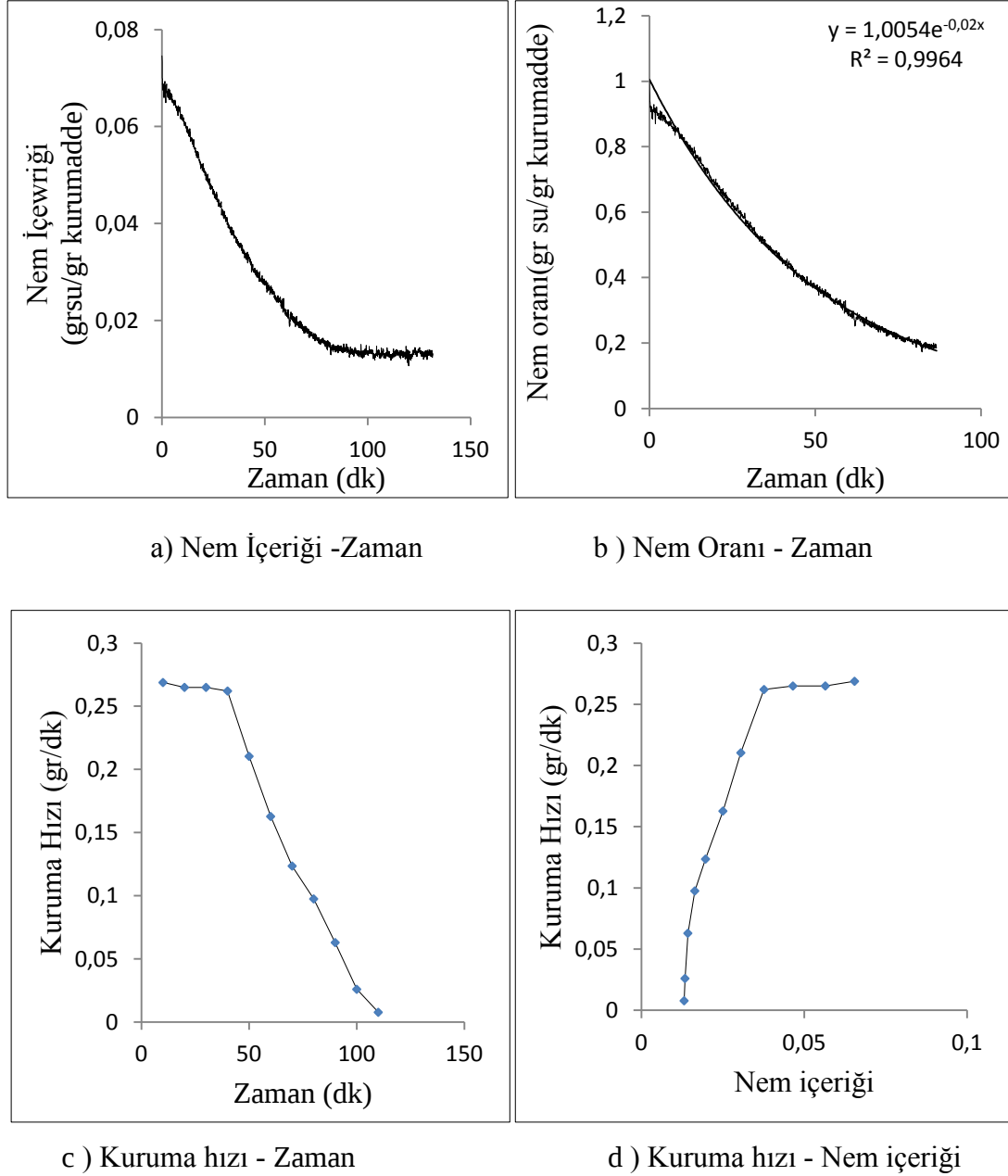
$V=0,4 \text{ m/s}$ $X_0= 0,071 \text{ gr su/gr kuru madde}$ $Q= 75 \text{ Watt}$ $m_{T0}= 316,4 \text{ gr}$
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 29,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{yb}= 23,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\phi = 64,6$

10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.11 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.11 : Deney6-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

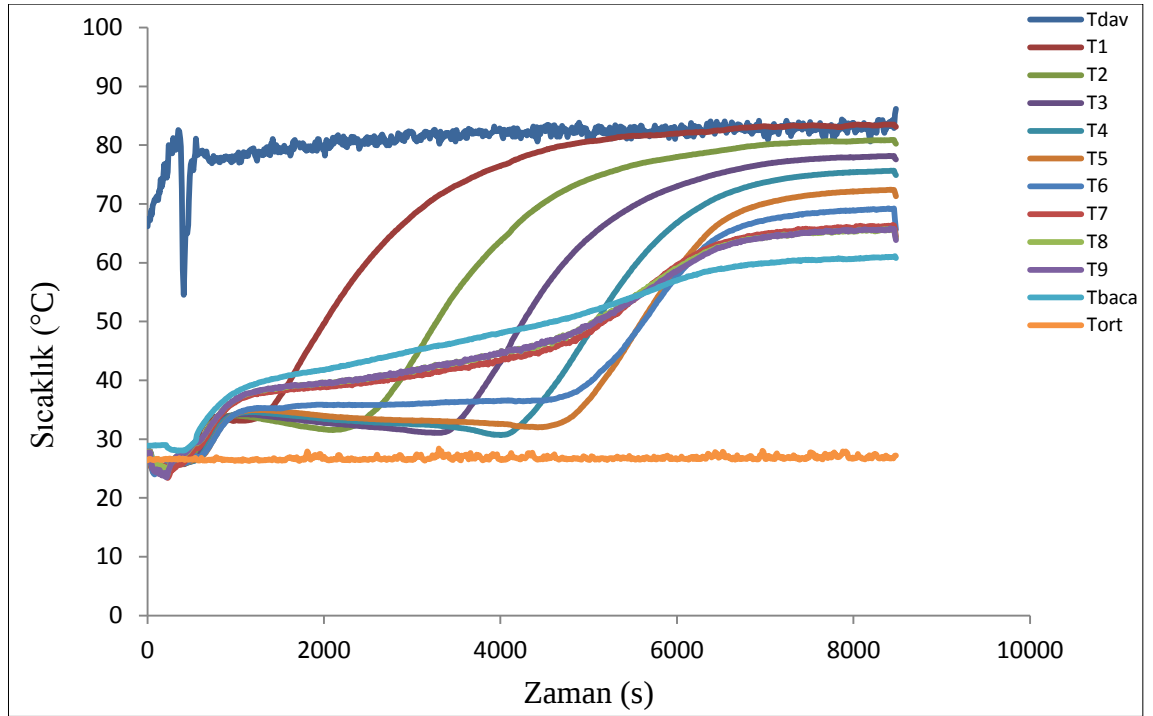
Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	317,506	0,074579484	1	-
5	314,817555	0,065480607	0,877997595	0,2688445
15	312,167525	0,056511744	0,757738473	0,265003
25	309,22733	0,046560835	0,624311581	0,264987
35	306,60623	0,037689884	0,505365311	0,26211
45	304,502225	0,030569009	0,409884961	0,2104005
55	302,87426	0,025059262	0,336007442	0,1627965
65	301,29886	0,019727417	0,264515339	0,12356
75	300,323465	0,016426253	0,220251634	0,0975395
85	299,693795	0,014295174	0,191677028	0,062967
95	299,43391	0,013415609	0,179883373	0,0259885
105	299,35603	0,013152029	0,176349156	0,007788

Deney6'dan elde edilen veriler neticesinde nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 4.29'da görülen grafikler gösterilmiştir.

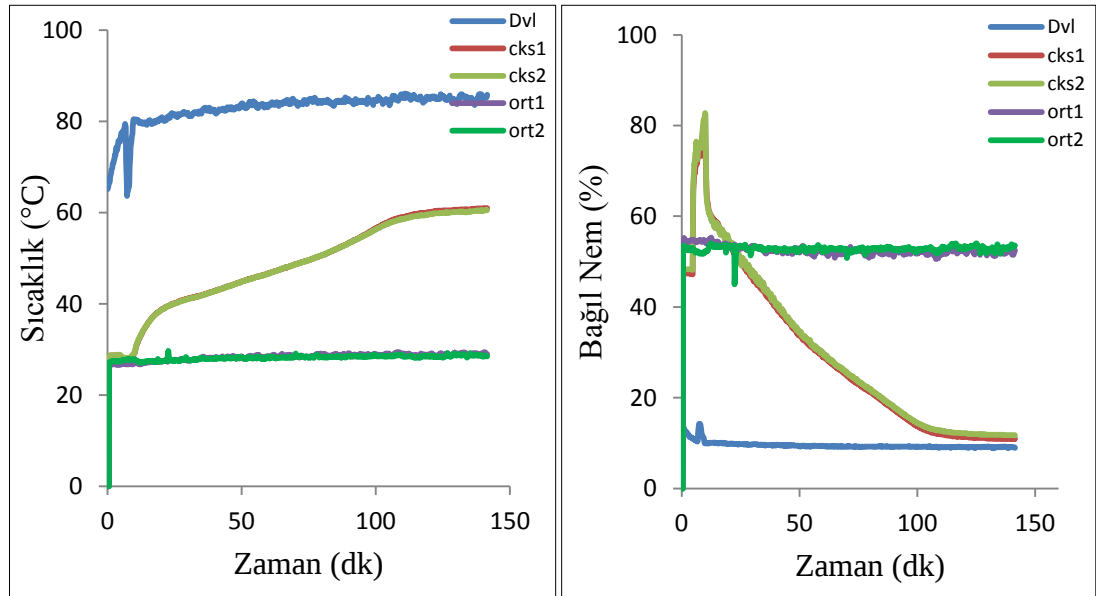


Şekil 4.29 : Deney6-Kuruma grafikleri.

Şekil 4.30'da görülen grafikler ise Deney6 süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.



a) Deney6 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman

c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.30 : Deney6 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 7:

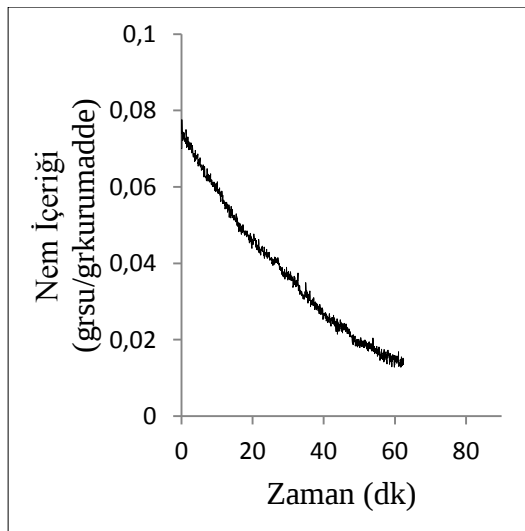
$V=0,7$ m/s $X_0=0,071$ gr su/gr kuru madde $Q=75$ Watt $m_{T0}=316,4$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}=29,1$ °C $T_{yb}=23,8$ °C $\phi=64,6$

10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.12 oluşturulmuştur.

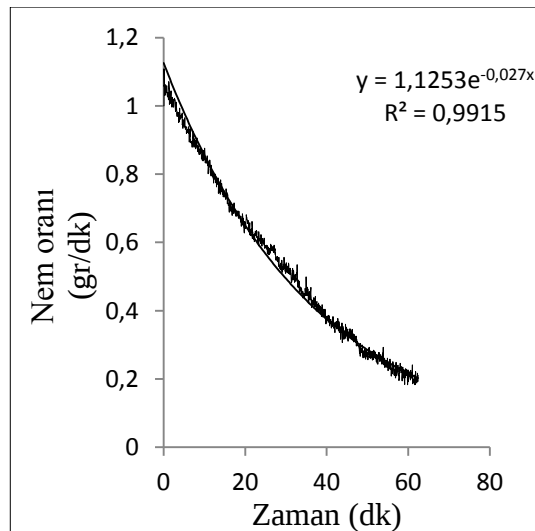
Çizelge 4.12 : Deney7-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	316,1615	0,070029106	1	-
5	313,101	0,066452144	0,948921779	0,30605
15	310,8089	0,051913477	0,741312858	0,301
25	307,6742	0,041304464	0,589818525	0,313465
35	304,8299	0,031677852	0,452352657	0,284437
45	302,2672	0,02300484	0,328503975	0,2331
55	300,4807	0,016958321	0,242161032	0,178656
62,5	299,6989	0,014312617	0,204380977	0,156345

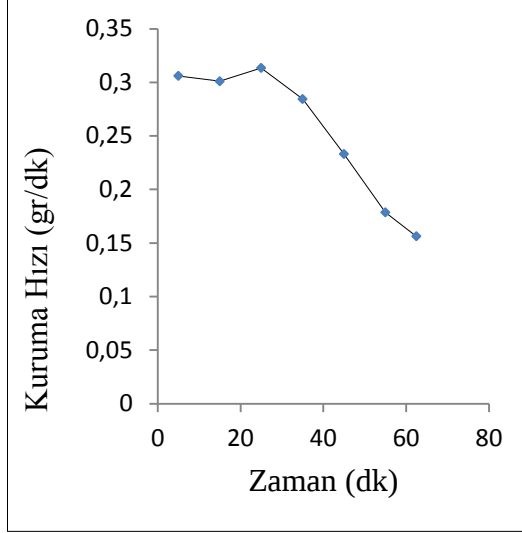
Deney7'dan elde edilen veriler yardımıyla nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 4.31'deki grafiklerde gösterilmiştir.



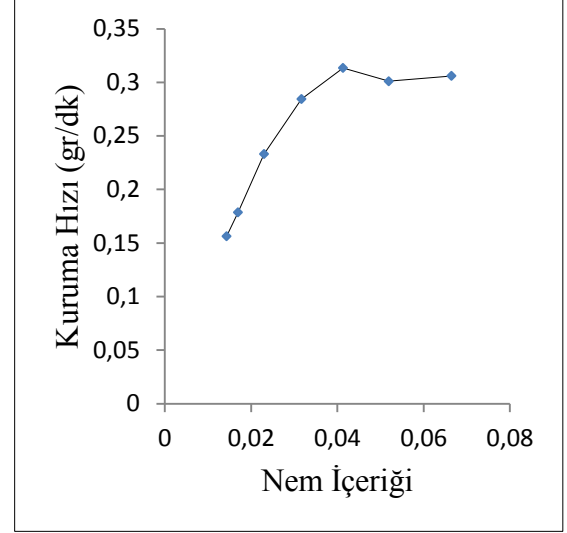
a) Nem İçeriği -Zaman



b) Nem Oranı - Zaman



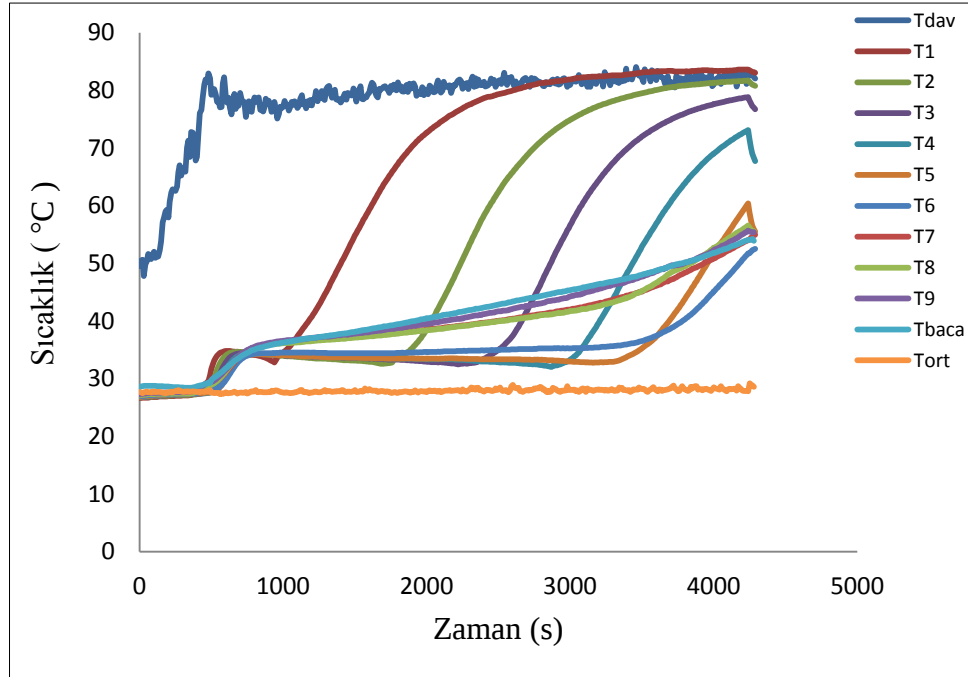
c) Kuruma hızı - Zaman



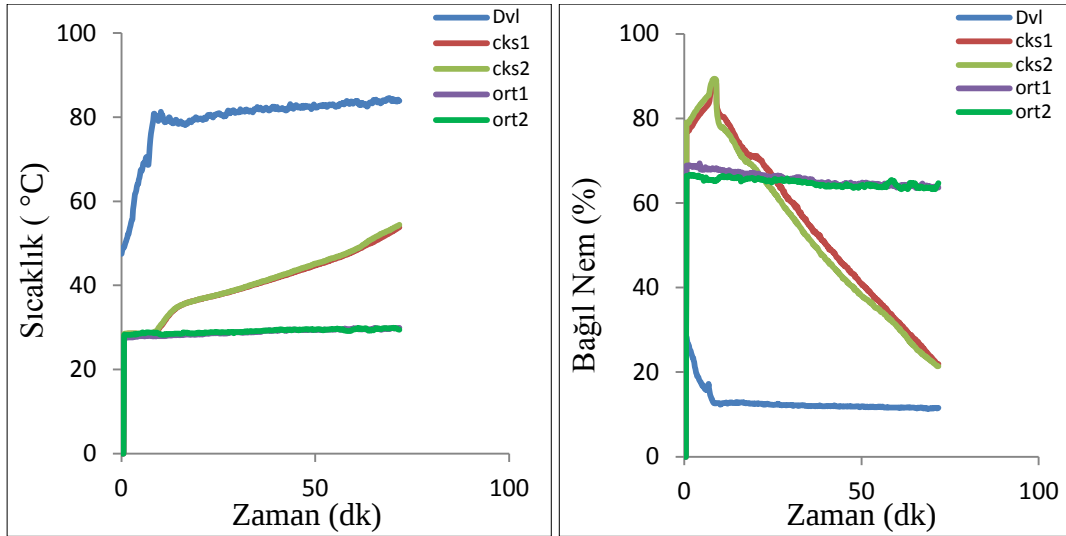
d) Kuruma hızı - Nem içeriği

Şekil 4.31 : Deney7-Kuruma grafikleri.

Şekil 4.32'de görülen grafikler önceki deney sonuçlarında olduğu gibi Deney7 süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir.



a) Deney7 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman

c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.32 : Deney7 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

Deney 8:

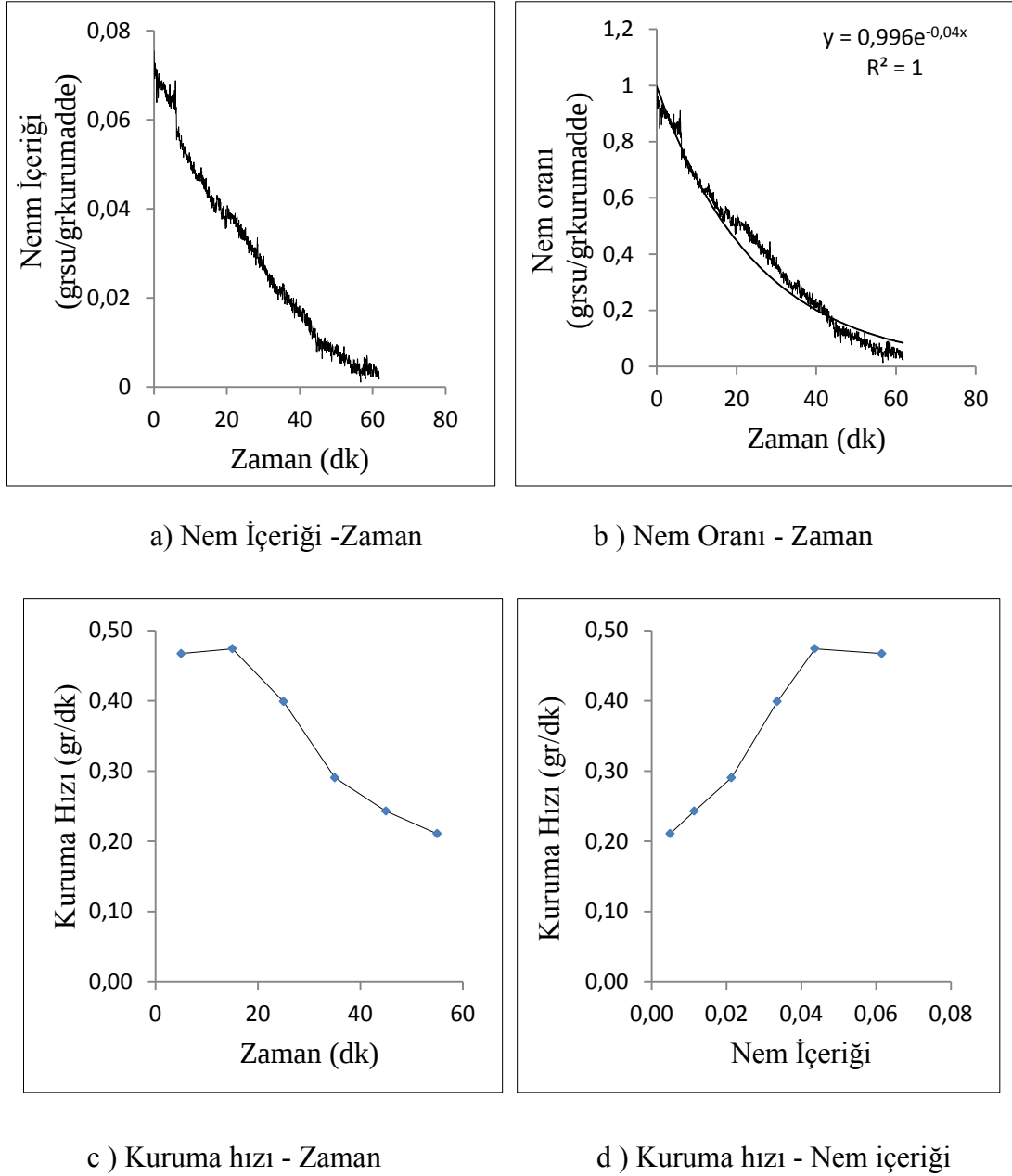
$V=1,0$ m/s $X_0= 0,071$ gr su/gr kuru madde $Q= 75$ Watt $m_{T0}= 317,8$ gr
Ortam Sıcaklığı ve bağıl nemi; $T_{kb}= 29,1$ °C $T_{yb}= 23,8$ °C $\phi = 64,6$

10'ar dakikalık periyotla alınan verilerden toplam kütle, nem miktarı, nem içeriği ve kuruma hızını gösteren Çizelge 4.12 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.13 : Deney8-10dk'lık periyotla elde edilen kütle-nem içeriği-kuruma hızı.

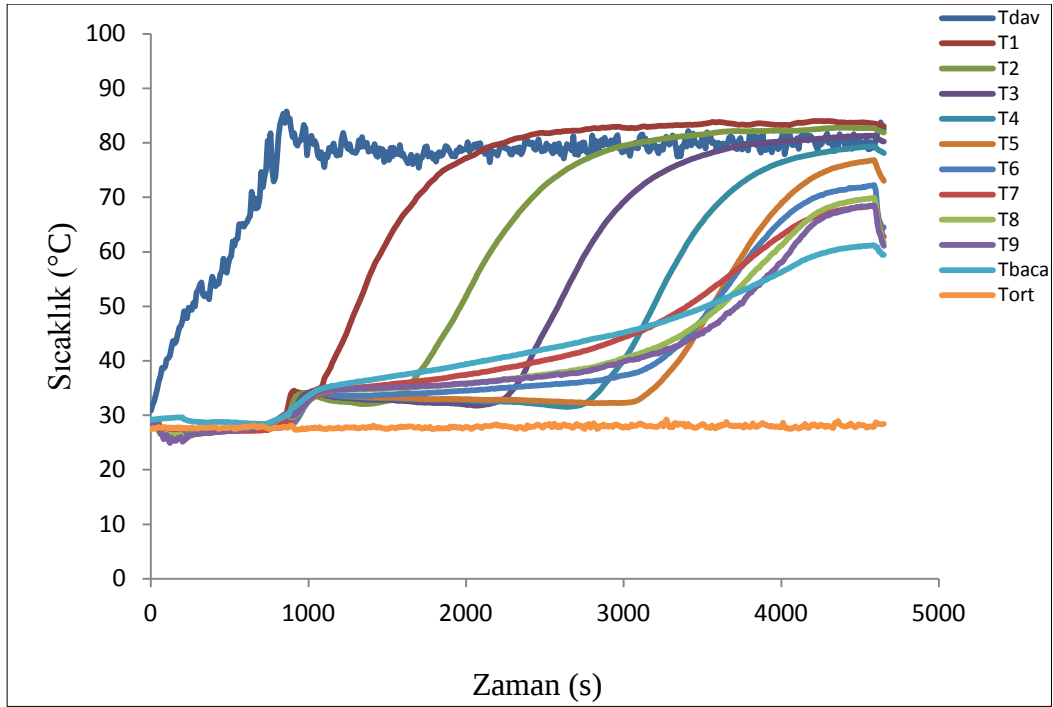
Zaman (dk)	Kütle (gr)	Nem İçeriği (grsu/gr k.madde)	Nem Oranı (grsu/gr k.madde)	Kuruma Hızı (gr/dk)
0	317,771550	0,075478	1,000000	-
5	313,100800	0,061551	0,815485	0,467075
15	308,359000	0,043622	0,577942	0,474180
25	304,368900	0,033559	0,444612	0,399010
35	301,464589	0,021303	0,282245	0,290431
45	299,034856	0,011377	0,150728	0,242973
55	296,926164	0,004928	0,065294	0,210869

Deney7'dan elde edilen veriler yardımıyla nem içeriği-zaman, nem oranı-zaman, kuruma hızı-zaman ve kuruma hızı-nem içeriği arasındaki ilişki Şekil 4.33'deki grafiklerde gösterilmiştir.

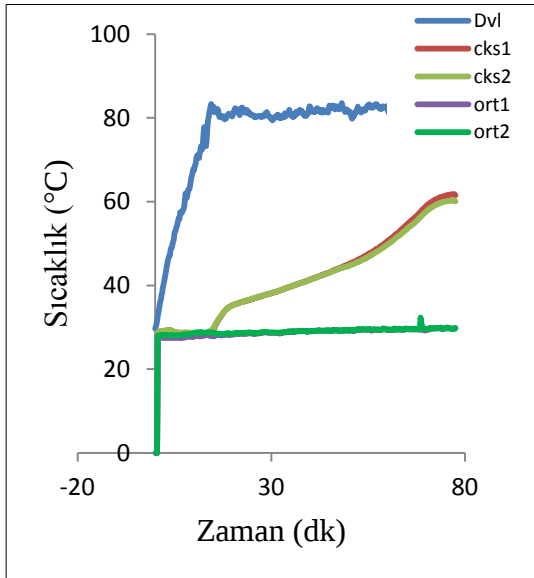


Şekil 4.33 : Deney8 Kuruma grafikleri.

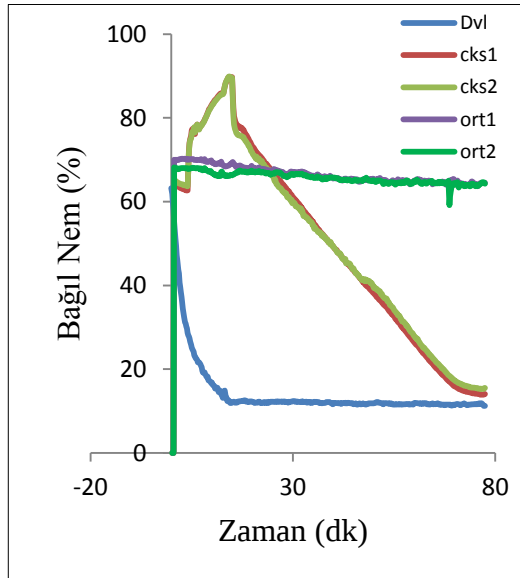
Deney8'den alınan veriler ışığında çizdirilen ve deney süresince termokupllar ve sensörler aracılığıyla deney sisteminden alınan sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin zaman içerisindeki değişimini gösteren grafikler Şekil 4.34'deki gibidir.



a) Deney8 için Keithley 2750 - Termokupllardan alınan sıcaklık değerleri



b) Sıcaklık - Zaman



c) Bağıl Nem - Zaman

Şekil 4.34 : Deney8 için sensörlerden ve termokupllardan alınan sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

4.4.6 Kuruma Eğrilerinin Matematik Modellerle Kıyaslanması

Nem oranı eğrileri literatür bulunan Çizelge 4.14'de listelenmiş 5 farklı matematik modelle kıyaslanmıştır. Bunlar arasından Henderson ve Pabis yöntemi ile deneylerden alınan veriler ile (4.14) denklemi kullanılarak elde edilen nem oranı sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

$$MR = \frac{x}{x_0} \quad (4.14)$$

Çizelge 4.14 : Kurutma eğrisi modelleri.

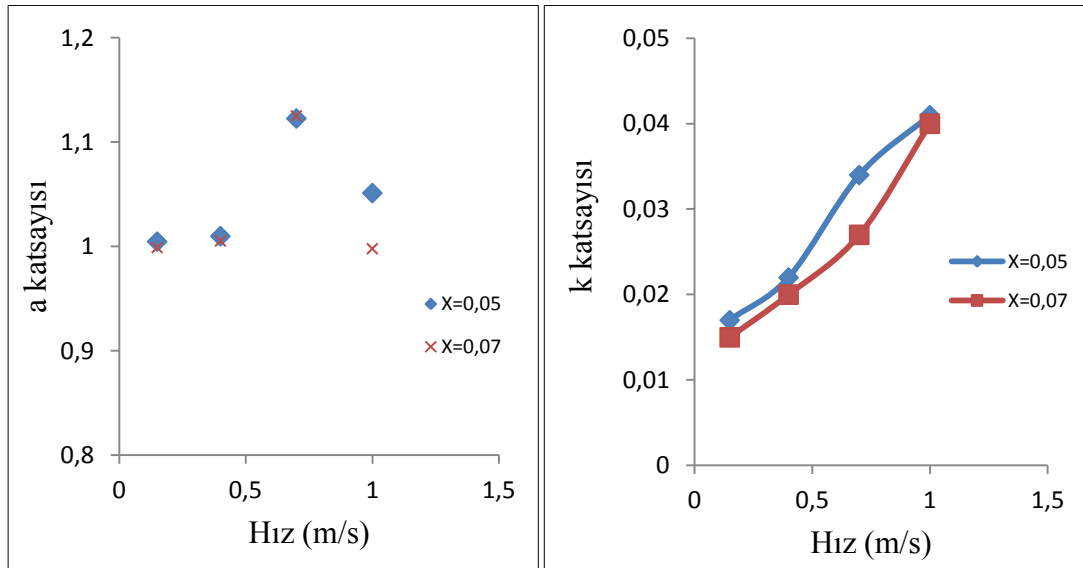
Model No	Model Adı	Model	Kaynak
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	Mujumdar, 1987
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Diamante and Munro, 1993
3	Henderson ve Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Zhang and Litchfield, 1991
4	Wang ve Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Sing, 1978
5	Verma et al.	$MR = a \cdot \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma vd., 1985

Henderson-Pabis yöntemindeki matematik model ile deney verilerinin uyuşması sebebiyle sadece bu model üzerinde durulmuş diğer modellerde ki katsayılar çıkarılmaya çalışılmamıştır. Henderson-Pabis yöntemindeki katsayılar her bir deney için tek tek elde edilmiş ve Çizelge 4.15'deki gibi listelenmiştir. Bu katsayıların hava hızı, nem içeriği ve sıcaklık ile değişimi gözlemlenmiştir. Bu parametrelerin katsayılar üzerindeki etkisi grafikler yardımıyla yorumlanmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.15 : Henderson-Pabis modeline göre denklemler ve katsayılar

Deney No	Nemiçerığı (grsu/grk.madde)	Hava Hızı(m/s)	Denklem (MR=)	a	k
1	0,053	0,15	$1,0048 \exp(-0,017t)$	1,0048	0,017
2	0,052	0,4	$1,0100 \exp(-0,022t)$	1,01	0,022
3	0,054	0,7	$1,1228 \exp(-0,034t)$	1,1228	0,034
4	0,056	1	$1,0513 \exp(-0,041t)$	1,0513	0,041
5	0,071	0,15	$0,9991 \exp(-0,015t)$	0,9991	0,015
6	0,075	0,4	$1,0054 \exp(-0,02t)$	1,0054	0,02
7	0,07	0,7	$1,1253 \exp(-0,027t)$	1,1253	0,027
8	0,075	1	$0,9980 \exp(-0,04t)$	0,998	0,04

Yukarıdaki çizelgede bulunan veriler kullanılarak Şekil 4.36'daki grafikler elde edilmiştir. Henderson-Pabis modelindeki a ve k katsayılarının $X=0,05$ ve $X=0,07$ grsu/gr kurumadde değerleri için 4 farklı hız değerindeki değişimi incelenmiştir.



a) a-Hava hızı

b) k-Hava hızı

Şekil 4.35 : Henderson-Pabis modeli katsayılarının hava hızı ile değişimi.

Grafiklerden kolayca anlaşılabileceği üzere hava hızı arttıkça k katsayısıda artmakta a katsayısı ise 0,15 ve 0,4 m/s hava hızlarında neredeyse aynı değerde iken 0,7m/s değerine giderken artmakta bu değerden sonra azalma göstermektedir. Nem içeriği değerinin bu katsayılar üzerinde bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

4.4.7 Deney Sonuçlarının Kıyaslanması ve Yorumlanması

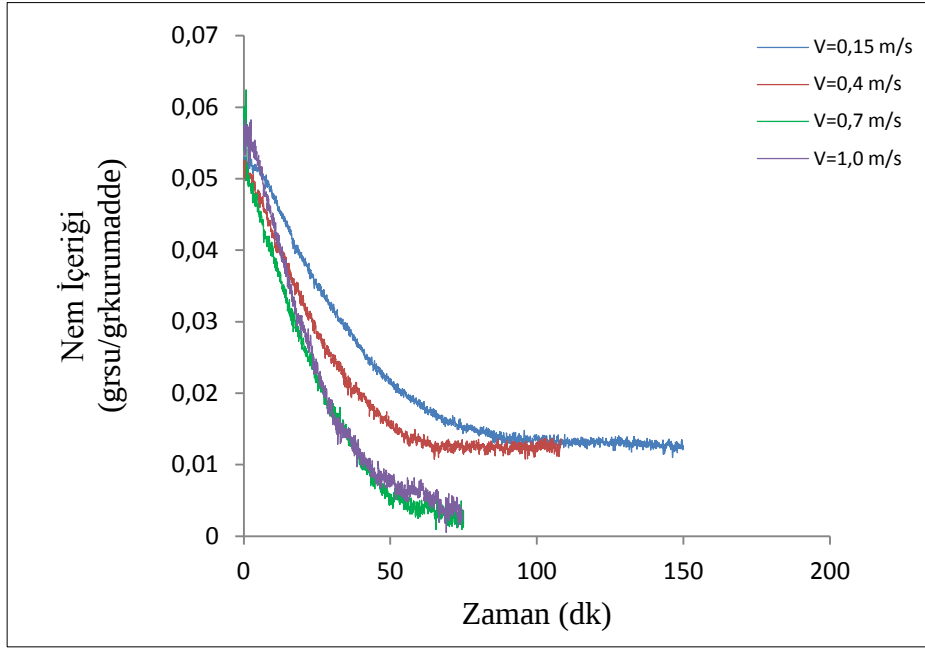
Deneyler sonucunda elde edilen veriler neticesinde Nem İçeriği-Zaman, Nem Oranı-Zaman, Kuruma Hızı-Zaman, Kuruma Hızı-Nem İçeriği ve Sıcaklık ve Bağıl nemin Zamanla değişimini gösteren grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerden yararlanılarak sabit giriş sıcaklığı ve sabit nem içeriği için hava hızının kuruma üzerindeki etkisi sabit hava hızı için nem içeriğinin kuruma üzerine herhangi bir etkisinin olup olmadığı aşağıda değerlendirilmiştir.

4.4.7.1 Hava Hızının ve Nem İçeriğinin Kuruma Süresi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

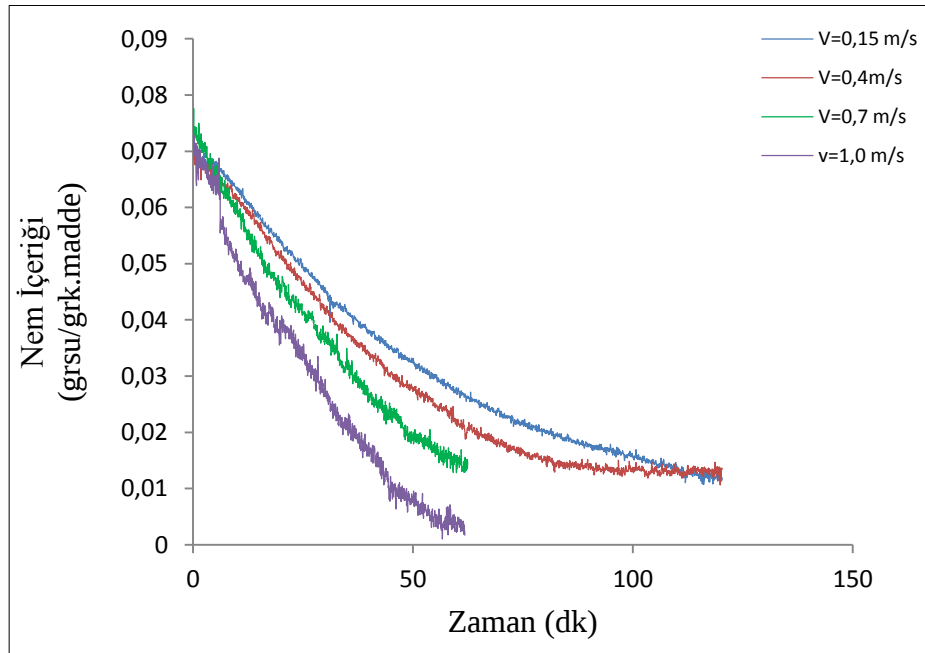
Kurutma işleminin en önemli parametrelerinde birisi numunenin üzerinden geçen sıcak havanın hızıdır. Şekil 4.37'de deneylerden alınan verilerin yardımıyla çizdirilmiş olan $X=0,05$ ve $X=0,07$ grsu/gr kurumadde nem içerikleri için iki adet grafik bulunmaktadır. Grafiklere bakıldığında 0,15 ve 0,4 m/s ile 0,7 ve 1,0 m/s hızlarında kuruma sürelerinin aynı mertebelerde olduğu gözlenmektedir. En uzun kuruma süresinin en düşük hız değeri olan 0,15 m/s de, en kısa kuruma süresinde 1,0 m/s hızında olduğu kolaylıkla görülmektedir. Buradan kuruma süresinin sıcak havanın hızıyla ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır.

Nem içeriğinin etkisine baktığımızda ise 0,07 grsu/gr kurumadde nem içeriğine sahip numunelerde kuruma süresinin 0,05 grsu/gr kurumadde nem içeriğindeki numunelere göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise 0,07grsu/gr kurumadde nem içeriğindeki numunelerde diğer numunelere göre daha fazla su bulunmasıdır. Deneylerin hepsinde numunelerin kuru madde miktarı yaklaşık olarak 295,5 gr'dır. İki farklı nem içeriği elde etmek için numunelere nem ilavesi yapılmıştır. Nem içeriği büyük olan numunelerde nem miktarıda diğer numunelere nazaran fazladır. Bu fazlalığı kurutmakta aynı hız değerleri için daha fazla kuruma süresi anlamına gelmektedir. Özellikle 0,15 ve 0,4 m/s sıcak hava hızlarına bakıldığında 0,05 grsu/gr kurumadde nem içeriğine sahip numunelerin denge nemine ulaşması 75-80

dakikayı bulurken diğer nem içeriğindeki numunelerde bu süre 100 dakikayı geçmektedir.



a) $X = 0,05$ gr su/k.madde

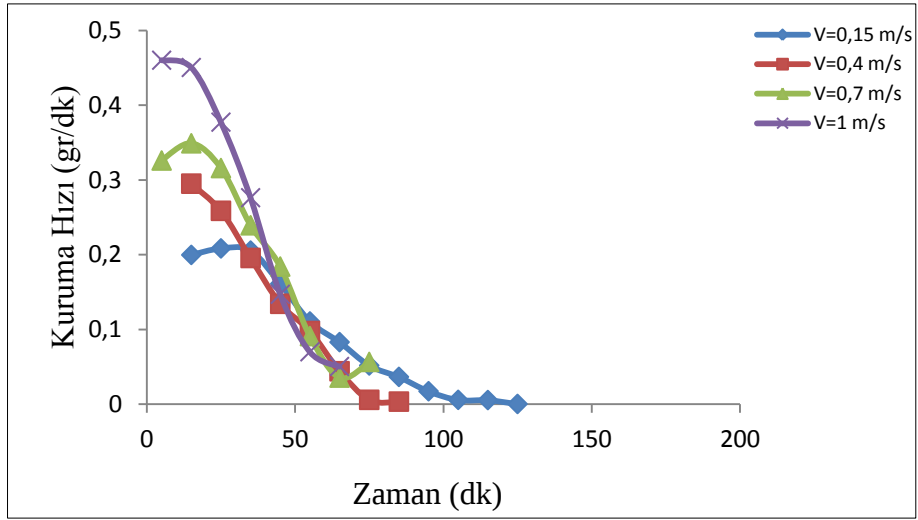


b) $X = 0,07$ gr su/gr kurumadde

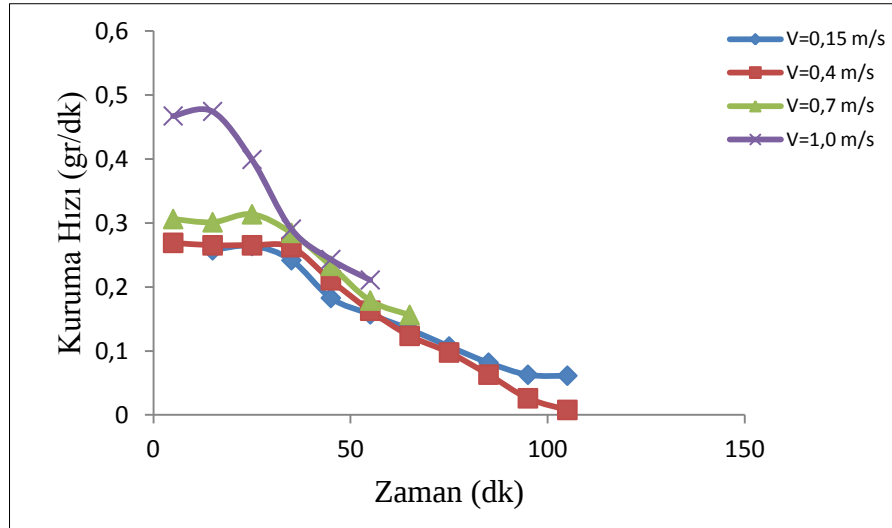
Şekil 4.36 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma üzerindeki etkisi.

4.4.7.2 Hava Hızının ve Nem İçeriğinin Kuruma Hızı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Sıcak hava hızının ve nem içeriğinin kuruma hızı üzerindeki etkilerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.38'deki grafikler çizdirilmiştir. Grafiklere bakıldığında kuruma hızı ve sıcak havanın hızı arasında bir doğru orantı olduğu görülmektedir. En büyük kuruma hızı değeri 1m/s hava hızında en düşük kuruma hızı değeri ise 0,15m/s hava hızındadır. Kuruma işleminin sonuna doğru numunede uzaklaştırılacak nem kalmadığı için kuruma hızı neredeyse sıfır değerine ulaşmaktadır.



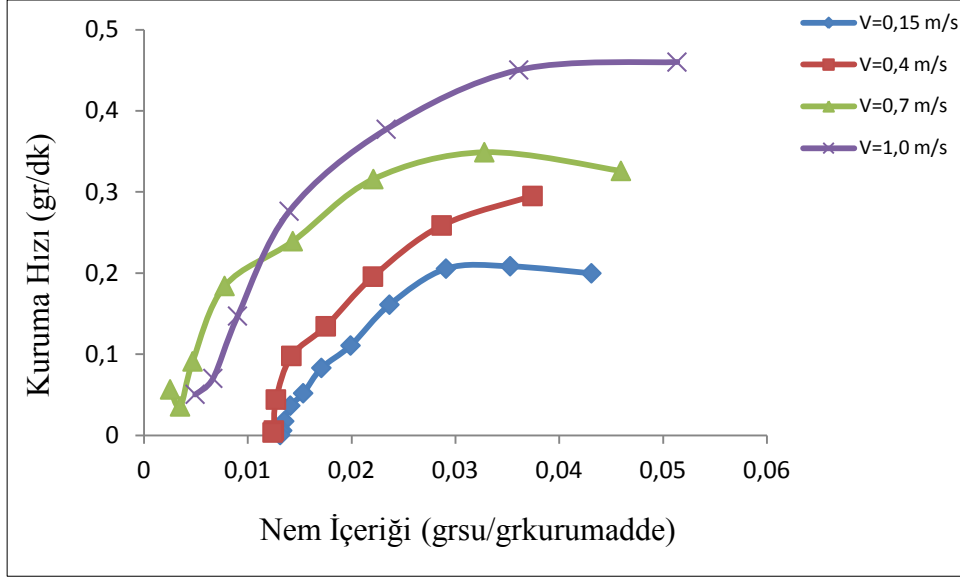
a) X= 0,05 gr su/k.madde



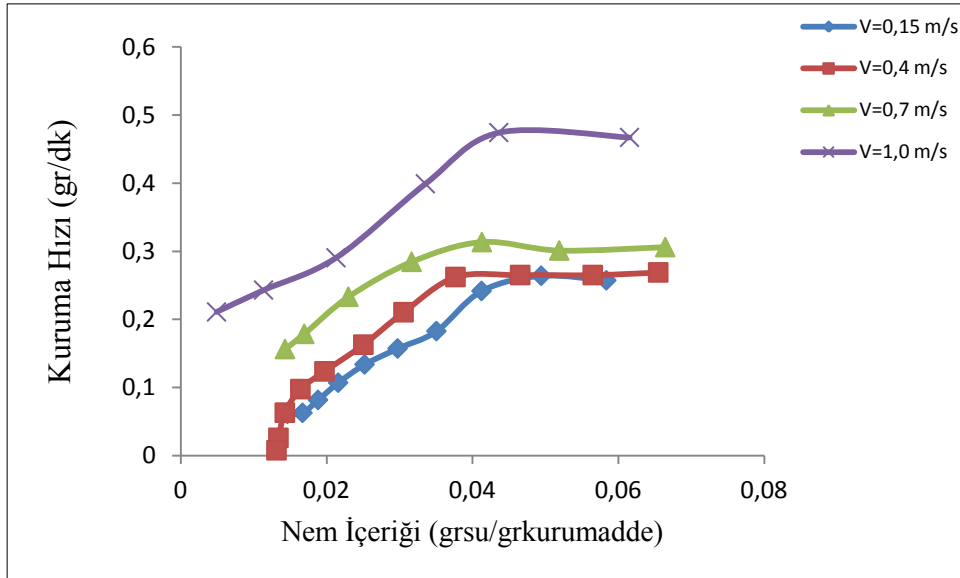
b) X= 0,07 gr su/gr kurumadde

Şekil 4.37 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma hızı üzerindeki etkisi.

Kurutma havasının hızının artması ile kuruma hızında artış meydana geldiğini belirlenmişti. Bu hız artışının ve nem içeriğindeki değişimin kuruma üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.38'deki grafikler çizdirilmiştir.



a) X= 0,05 gr su/k.madde



a) X= 0,07 gr su/k.madde

Şekil 4.38 : Sabit sıcaklıkta nem içeriğinin ve hava hızının kuruma hızı-nem içeriği ilişkisi üzerindeki etkisi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma neticesinde çeşitli kurutma modelleriyle karşılaştırıldığında makul sonuçların elde edilebildiği bir kurutma deney düzeneği tasarımının yapılması ve deney sonuçlarının kurutma modelleriyle ve oluşturduğumuz matematik modelle kıyaslanması hedeflenmişti.

Kurutulacak numune ile oluşturulan kontrol hacminin içerisi katı ve gaz kısmı olmak üzere iki kısımdan oluştuğu varsayılarak, kontrol hacminin gaz ve katı kısımları için tek tek kütle ve enerji denklilikleri çıkarılmış ve bir matematik model elde edilmiştir. Ancak deney için kullanılan kumun difüzyon katsayısı, su aktivitesi, denge nemi, ısı ve kütle geçiş katsayıları gibi özelliklerinin belirlenmesindeki güçlükler ve bu değerlerin kumun alındığı kaynağa göre farklılıklar göstermesi nedeniyle matematik modelde hesaplama yapılamamıştır.

Matematik modelde ve deneyde ihtiyaç duyulan yukarıda bahsi geçen özelliklerin ölçülebileceği deney düzeneklerinin tasarımının yapılması ve bu özelliklerin deneysel olarak elde edilmesi planlanmaktadır. Böylece sadece bu çalışmada kullanılan kum için değil, bunun yanı sıra birçok malzemenin kurumasının hem deneysel hem de nümerik olarak incelenmesi sağlanacaktır. Bu sayede kurduğumuz matematik modelin kurutma tasarımında kullanılabilir hale getirilmesi düşünülmektedir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ise çeşitli kurutma modelleri ile kıyaslanmış ve bunlar arasından Henderson-Pabis modeli ile deneylerden elde ettiğimiz bulguların uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

Kurutma havası hızının ve nem içeriğinin kuruma üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu inceleme neticesinde kuruma süresinin kurutma havası hızıyla ters orantılı olduğu yani havanın hızı arttığında kuruma süresinin azaldığı, havanın hızı azaldığında ise kuruma süresinin arttığı görülmüştür. Nem içeriği değerinin büyük olduğu numunelerde yapılan deneyler ise nem içeriği arttıkça kuruma süresinin de nem miktarı ile birlikte bir artış gösterdiği görülmüştür.

Kurutma havasının hızının kuruma süresinin aksine kuruma hızı ile doğru orantılı olduğu yüksek kurutma havası hızlarında daha büyük kuruma hızı değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Bayhan, H.A.** (2011). Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Sürecini Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez (Y. Lisans).
- Brady, J.B.** (2013) Diffusion Data for Silicate Minerals, Glasses, and Liquids, in Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants (ed T. J. Ahrens), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/RF002p0269.
- Can, A.** (1987). Orifis ile debi ölçüm esasları, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt28, Sayı 428, Mayıs.
- Cemeroğlu, B.** (2004). . Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi. 479s.
- Çalışkan, M.K.** (2002). Mikrodalga Enerjisi ile Kurutma, Tez (Y. Lisans)-- İTÜ Fen Bil. Enst.,
- Çengel, Y.A., Boles, M.A.** (1996). Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, çev. T. Derbentli, Literatür Yayınları .
- Dinçer, I.** (2000). Heat and Mass Transfer during Food Drying University of Ontario Institute of Technology (UOIT).
- Ersöz, M.A. ve Doğan, H.** (2003). Isi Geri Kazanımlı Akışkan Yatak Sürekli Kurutucu Tasarımı, İmalatı Ve Tuz Kurutmasında İncelenmesi.
- Farouki, O.** (1981). Thermal properties of soils, United States Army Corps Of Engineers Cold Regions Research And Engineering Laboratory Hanover, New Hampshire, U.S.A., December.
- Geankoplis, C.J.** (1993). Transport Processes and Unit Operations, third ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Güner, B.** (1991). Raf tipi güneşli bir meyve kurutucunun matematiksel modellenmesi ve optimizasyonu. Tarımsal Mekanizasyon 13.Ulusal Kongresi, Konya, 451-460.
- Güngör, A. ve Özbalta, N.** (1997). Endüstriyel Kurutma Sistemleri. III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bild. Kitabı, II.Cilt, MMO Yayın No:203/2, 737s.
- Güngör, A., Özbalta, N.** (1997). Endüstriyel Kurutma Sistemleri. III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bild. Kitabı, II.Cilt, MMO Yayın No:203/2, 737s.
- Herman , D. E. G. , Rodríguez C. ve García, M. A.** (2001). Mathematical Modeling For Fixed-Bed Drying Considering Heat And Mass Transfer And Interfacial Phenomena, Drying Technology, An International Journal, 19:1.

- Herman-Lara, E. , Salgado-Cervantes, M.A. , Garcí'a-Alvarado, M.A.** (2005). C Mathematical simulation of convection food batch drying with assumptions of plug flow and complete mixing of air, Journal of Food Engineering 68 (2005) 321–327.
- Incropera, F. ve Dewitt, D.P.** (2001). Fundamentals Of Heat And Mass Transfer, John Wiley&Sons, New York. 4. Basımdan Çeviri, Isı Ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür,İstanbul.
- Isaeva, J.** (2007). Kayısı Kurutmasının Deneysel Ve Teorik Olarak Araştırılması Fbe Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında Hazırlanan Doktora Tez.
- Kantay, R., ve Bozkurt, Y.** (1980). Biçilmiş Ağaç Malzemesinin Kurutulmasında Kullanılan Kurutma Metotlarının Isı Ekonomisi Bakımından İncelenmesi. Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Cilt: 2,31-36.
- Kavak, E., Biçer, Y., Yıldız, C.** (1999). Kurutma ve Kurutma Modelleri. Bilim Günleri 5-6-7 Mayıs 1999 Bildiriler Kitabı. Makine Mühendisleri Odası Yayın No:221, Denizli.
- Kaviany, M.** (1995).Principles of Heat Transfer inPorous Media, Springer-Verlag, New York.
- Kouris, D.M. ve Maroulis, Z.B.** (2006). Handbook of Industrial Drying, Chapter 4.Transport Properties in the Drying of Solids Third Edition
- Mujumdar, Arun S.** (2000). Mujumdar's practical guide to industrial drying, Exergex Corp., Montreal
- Palencia , C. , Nava ,J. , Herman , E. , Rodríguez-Jimenes, G. C. ve García-Alvarado, M. A.** (2002). Spray Drying Dynamic Modeling With A Mechanistic Model, Drying Technology, An International Journal, 20:3, 569.
- Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O.** (1997). Perry's Chemical Engineers Handbook, seventh ed. McGraw-Hill, USA.
- Ratti, C. ve Mujumdar, A. S.** (1993). Fixed-Bed Batch Drying Of Shrinking Particles With This Varying, Drying Air Conditions, Drying Technology: An International Journal, 11:6, 1311-1335.
- Ratti, C. ve Mujumdar, A. S.** (1995). A Simulation Of Packed Bed Drying Of Foodstuffs With Airflow Reversal Original Research Article Journal Of Food Engineering, Volume 26, Issue 3, Pages 259-271.
- Ruiz-López, I.I., Martínez-Sánchez, C.E., Cobos-Vivaldo, R., Herman-Lara, E.** (2008). Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow, Journal of Food Engineering 89 (2008) 310–318.
- Tadesse, A.** (2011). Addis Ababa Institute of Technology (AAiT) Feasibility Study and Performance Evaluation (Simulation) of Solar DryerHand Tools Share Company Moulding Sand Drying Mechanism, November.
- UETM.** (1997).

- Yağcıoğlu, A., Degirmencioğlu, A., Çagatay, F.** (1999). . Drying characteristics of laruel leaves under different drying conditions. 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy, Adana, 565-569.
- Yaşartekin, Y.** (1991). Kabinet Tipi, Güneşi Dikey Eksende Belirli Aralıklarla İzleyen, Güneş Enerjili Kurutucunun Tasarımı ve Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Denenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, 1-2.
- Url-1** <<http://www.belgeler.com/blg/2hoo/debi-ve-hiz-olcumu>>, alındığı tarih: 30.08.2013.
- Url-2** < https://dosya.sakarya.edu.tr/Dokumanlar/2013/472/318959351_giris.pdf>, alındığı tarih:1.5.2013.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İbrahim Hakkı TONYALI

Doğum Yeri ve Tarihi: ZONGULDAK 09.03.1987

Adres: Gülbahar Mh., Yenidere Sok. Kıröğlü Konak Apt. D:22 34394 Şişli/İstanbul,

E-Posta: tonyali@itu.edu.tr

Lisans: Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği