

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

## **ATIK SU ÇAMURUNUN KURUTULMASI**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. İsmail Emre MERSİN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mesut GÜR**

**Haziran 2008**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIK SU ÇAMURUNUN KURUTULMASI**

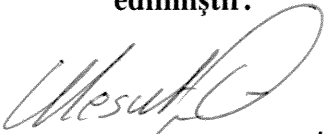
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. İsmail Emre MERSİN**

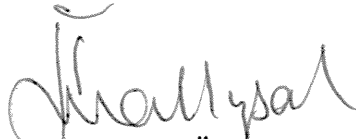
**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**

Bu tez 11 / 06 /2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



**Prof. Dr. Mesut GÜR**  
**Jüri Başkanı**



**Yrd.Doç.Dr. Ünal UYSAL**  
**Üye**



**Yrd.Doç.Dr. Vedat ARI**  
**Üye**

Bu alışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 2008.50.01.006' no lu araştırma projesi olarak desteklenmiştir.

## **TEŞEKKÜR**

Öncelikle yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her türlü desteği vermekten kaçınmayan ve yaptığım bu çalışmada tüm bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Mesut GÜR'e, bütün destekleriyle arkamda duran aileme ve bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen herkese teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
KURUTMA.....	3
2.1. Kurutma.....	3
2.2. Kurutmada Kütle ve Enerji Bilançosu.....	4
2.2.1. Kütle bilançosu.....	5
2.2.2. Enerji bilançosu.....	6
2.3. Kurutma Havaasının Özellikleri.....	9
2.3.1. Buhar basıncı.....	9
2.3.2. Nemli havaanın özellikleri.....	10
2.4. Dış Kuvvetlerin Buhar Basıncına Etkisi.....	14
2.4.1. Kapiler yüzey ve sıvı damlası üzerindeki buhar basıncı.....	17
2.4.2. Adsorbe edilen gaz üzerindeki buhar basıncı.....	17
2.5. Gıda Maddelerinde Bulunan Su ve Su Aktivitesi.....	18
2.6 Kuruma Olgusu.....	19
2.6.1. Tarım tahıllarının kuruma evreleri.....	19

2.7. Kurutma Hızına Etki Eden Faktörler.....	22
2.8. Kurutmada Meydana Gelen Değişimler.....	24
2.8.1. Gıdaların kurutulmasında kalite ve besin değerleri.....	26
2.9. Kurutma Sistemleri .....	26
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>SORBSİYON İZOTERMLERİ.....</b>	<b>28</b>
3.1. Sorbsiyon İzotermi.....	28
3.2. Tarım Ürünleriyle Nem Arasındaki Temel İlişkiler.....	31
3.2.1. Tarım ürünlerinde suyun tutulma şekilleri.....	31
3.2.1.1. Tarım ürünlerinde suyun tutulması.....	32
3.2.2. Tarım ürünlerinde denge nemi.....	38
3.3. Tarım Ürünlerinde Sorbsiyon İzotermeleri ve Özellikleri.....	42
3.4. Nemli Havanın Özellikleri.....	49
3.4.1. Buhar basıncı.....	50
3.4.2. Bağlı nem.....	50
3.4.3. Mutlak nem.....	51
3.5. Literatür Özeti.....	52
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>54</b>
4.1. Deney Düzenegi.....	54
4.2. Düzenegin Tanıtılması.....	55
4.3. Düzenegin Çalışma Sistemi.....	59
4.4. Yapılan Deneyler.....	62
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>64</b>
5.1. Bağlı Nem-Zaman Değişimleri.....	64
5.1.1. 60 °C deneylerinde bağlı nem-zaman değişimleri.....	64
5.1.2. 70 °C deneylerinde bağlı nem-zaman değişimleri.....	66
5.1.3. 80 °C deneylerinde bağlı nem-zaman değişimleri.....	68
5.1.4. 90 °C deneylerinde bağlı nem-zaman değişimleri.....	70

5.2. Bağıl Nem-Özgül Nem Değişimleri.....	71
5.2.1. 60 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimi.....	71
5.2.2. 70 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimi.....	72
5.2.3. 80 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimi.....	73
5.2.4. 90 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimi.....	74
5.3. Deney Sonuçlarının Formülasyonları.....	75
5.3.1. Kelvin eşitliği.....	75
5.3.2. Henderson eşitliği.....	77
5.3.3. Chung eşitliği.....	80
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	88

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_b$	: Yüzey kesit alanı ( $m^2$ )
$A_f$	: Dağıtıcının serbest alan yüzdesi
$a_w$	: Su aktivitesi
$c$	: Özgül ısı ( $kJ/kg\ K$ )
$c_D$	: Sürtünme katsayısı
$d_p$	: Ortalama tanecik çapı (m)
$d_B$	: Aynı kire hacmine eşit habbe çapı (m)
$D_{eo}$	: Dağıtıcıda oluşan habbenin başlangıç çapı (m)
$d_{cp}$	: Nozul gaz çıkış orifizinin çapı (m)
$d_i$	: Nozul gaz girişinin çapı (m)
$d_{OR}$	: Delikli plaka tipi dağıtıcıdaki orifizlerin çapı (m)
$d_p$	: Tanecik çapı (m)
$d_w$	: Duvar etkilerinin ihmal edilebildiği uzaklık (m)
$E$	: Enerji ( $kJ/kg$ )
$ERH$	: Hacmin denge nemi
$g$	: Yer çekim ivmesi ( $m/s^2$ )
$G_{mf}$	: Minimum akışkanlaşmada kütleli akım hızı (m/s)
$H$	: Yatak yüksekliği (m)
$H$	: Nipel veya nozul gaz çıkış orifizinin dağıtıcı yüzeyine uzaklığı
$h$	: Entalpi ( $kJ/kg$ )
$H_{mf}$	: Minimum akışkanlaşmada yatak yüksekliği
$K_D$	: Dağıtıcı akım faktörü
$K_T$	: Kampana akım faktörü
$m$	: Taneciklerin kütlesi (kg)
$m_h$	: Kurutucu havanın debisi ( $m^3/s$ )
$m_b$	: Su buharının debisi ( $m^3/s$ )



$m_s$	: Malzeme içindeki su miktarı (kg)
$N$	: Ürünün nem oranı
$P$	: Basınç (Pa)
$P_b$	: Havanın kuru basıncı (Pa)
$P_{b0}$	: Ürün yüzeyindeki kuru buhar basıncı (Pa)
$P_{b''}$	: Doymuş buhar basıncı (Pa)
$Q$	: Isı (kJ)
$R$	: İdeal gaz sabiti (kJ/kg K)
$r$	: Buharlaşma gizli ısısı (kJ)
$T$	: Sıcaklık (K)
$u$	: Yüzeysel gaz sabiti (m/s)
$V$	: Hacim ( $m^3$ )
$W$	: Ağırlık (N)
$W$	: İş (kJ)
$u_{mf}$	: Minimum akışkanlaşma hızı (m/s)
$t$	: Zaman (s)
$Y_m$	: Özgül nem
$\phi$	: Bağıl nem

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Sürekli kurutucuda madde akışı.....	5
Şekil 2.2.	Sürekli kurutucuda madde akışı.....	6
Şekil 2.3.	Sürekli kurutucuda enerji akışı.....	7
Şekil 2.4.	Sürekli kurutucuda enerji akışı.....	8
Şekil 2.5.	Suyun basınç-sıcaklık eğrisi.....	9
Şekil 2.6.	Kurutmada ürün ile basınç ilişkisi.....	10
Şekil 2.7	Dış kuvvetlerin $p_b/p_b''$ oranına etkisi.....	16
Şekil 2.8.a	Kurutma eğrisi.....	21
Şekil 2.8.b	Kurutma hızı eğrisi.....	21
Şekil 2.8.c	Kurutma hızı ve nem arasındaki ilişki .....	21
Şekil 3.1.	Sorbsiyon izotermi.....	29
Şekil 3.2.	Bitki dokusu ve hücresi.....	33
Şekil 3.3.	Tanelenmiş mısırın denge nemi eğrileri.....	39
Şekil 3.4.	Buğdayın DBN'e bağlı olarak denge nemine ulaşması için gerekli süre.....	40
Şekil 3.5.	Nem adsorbsiyon izotermi.....	42
Şekil 3.6.	Mısır tanesinde çeşitli unsurların adsorbsiyon izotermi.....	44
Şekil 3.7.	Mısır tanesinin germ ve endosperm kısımlarının denge nemleri...	45
Şekil 3.8.	Adsorbsiyon ve desorbsiyon izotermi.....	45
Şekil 3.9.	Buğdayın adsorbsiyon ve desorbsiyonunun 50 C tekrarlanması durumunda histerisiz azalması.....	46
Şekil 3.10.	Tahıllarda nem, DBN ve sıcaklığın depolama özelliklerine etkisi.	47
Şekil 3.11.	Besin maddelerinde DBN'ne bağlı olarak çeşitli etmenlerin neden olduğu bozulmaların göreceli değişim hücreleri.....	48
Şekil 4.1.	Çamur kurutma deney düzeneğinin şematik resmi.....	54
Şekil 4.2.	Deney düzeneği.....	55

Şekil 4.3.	Bakır boru.....	56
Şekil 4.4.	Nemlendirme kutusu.....	56
Şekil 4.5.	Karıştırıcılar ve rezistanslar.....	57
Şekil 4.6.	Numune kutusu.....	58
Şekil 4.7.	Dijital termostatlı sigorta panosu.....	58
Şekil 4.8.	Testo 454.....	59
Şekil 4.9.	Mollier diyagramı.....	61
Şekil 5.1.	Bağıl nem-zaman grafiği (60 °C).....	65
Şekil 5.2.	Bağıl nem-zaman grafiği (70 °C).....	67
Şekil 5.3.	Bağıl nem-zaman grafiği (80 °C).....	69
Şekil 5.4.	Bağıl nem-zaman grafiği (90 °C).....	71
Şekil 5.5.	Bağıl nem-özgül nem grafiği (60 °C).....	72
Şekil 5.6.	Bağıl nem-özgül nem grafiği (70 °C).....	73
Şekil 5.7.	Bağıl nem-özgül nem grafiği (80 °C).....	74
Şekil 5.8.	Bağıl nem-özgül nem grafiği (90 °C).....	75
Şekil 5.9.	Deney sonuçlarının Kelvin eşitliğine uyarlanması.....	76
Şekil 5.10	Henderson eşitliğine göre özgül nemlerin farklı sıcaklıklarda değişimi.....	78
Şekil 5.11.	60 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	78
Şekil 5.12.	70 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	79
Şekil 5.13.	80 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	79
Şekil 5.14.	90 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	80
Şekil 5.15.	Chung eşitliğine göre özgül nemlerin farklı sıcaklıklarda değişimi.....	81
Şekil 5.16	60 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	81
Şekil 5.17	70 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	82
Şekil 5.18	80 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	82
Şekil 5.19	90 °C de teorik özgül nem üzerindeki deneysel sonuçlar.....	83

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kurulmuş gıda maddelerinde arzu edilen kalite değerleri.....	26
Tablo 3.1.	Bazı tarım ürünlerinin depolanabilmeleri için uygun nem miktarları.....	31
Tablo 3.2.	Henderson ve Chung eşitlikleri için gerekli katsayılar.....	42
Tablo 4.1.	Düzenek üzerindeki parça listesi.....	54
Tablo 4.2.	Deney düzeneğinde yapılan deneyler.....	61
Tablo 5.1.	60 °C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri.....	64
Tablo 5.2.	70 °C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri.....	66
Tablo 5.3.	80 °C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri.....	68
Tablo 5.4.	90 °C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri.....	70
Tablo 5.5.	60 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimleri.....	71
Tablo 5.6.	70 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimleri.....	72
Tablo 5.7.	80 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimleri.....	73
Tablo 5.8.	90 °C deneylerinde bağıl nem-özgül nem değişimleri.....	74

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Atık su çamuru, kurutma, sorbsiyon izotermi

Günümüzde daha da gelişmekte olan sanayi ve artan insan nüfusu ile birlikte atık su çamurları büyük problemlere sebep olmaktadır. Atık suların biyolojik artımı sonucu ortaya çıkan atık su çamurlarının çevreye zarar vermeden ekonomik ve ekolojik biçimde giderilmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ürünlerin kuruma karakteristiklerini sorbsiyon izotermi belirler ve sorbsiyon izotermi deneysel çalışmalar neticesinde bulunabilir. Bu çalışmada atık su çamurlarının kuruma karakteristiğini inceleyebilmek için, bir deney düzeneği kurulmuştur.

# **DRYING OF WASTEWATER SLUDGE**

## **SUMMARY**

Key Words: Wastewater, drying, sorption isotherms

Nowadays wastewater causes big problems because of the growing industry and increasing of population. Economical and ecological evaluation methods for sewage sludge generated by biological sewage treatment.

Sorption isotherms are defining to the drying characters for product and we can get this sorption isotherms with experimental working. In this study we set up an experimental mechanism for investigate to drying characterizing of sewage sludge.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gerek evsel gerekse endüstriyel ve karışık (evsel+endüstriyel) atık su arıtma tesislerinden açığa çıkan arıtma çamurları depolama ve uzaklaştırma problemlerine sebep olmaktadır. Şu anda ülkemizde belediyeler tarafından çalıştırılan ve toplam nüfusun ancak %13'üne karşılık gelen 69 adet evsel atık su arıtma tesisinde her yıl yaklaşık 500 bin ton arıtma çamuru açığa çıkmaktadır. İmalat sanayisinde ise 3,6 milyon ton/yıl arıtma çamuru açığa çıkmakta ve %8'i tarımsal alanlara yayılmakta, %12'si denize boşaltılmakta, %34'ü sahaya, %20'si özel depolama alanlarında biriktirilmekte ve yaklaşık %1'i ise yakılarak yok edilmektedir. Ayrıca, İstanbul Tuzla Deri, İzmir-Atatürk, Adana Hacı Sabancı, Bursa Merkez başta olmak üzere 11 adet Organize Sanayi Bölgesinde orta-büyük ölçekli endüstriyel ağırlıklı arıtma tesisi çalışmakta ve her yıl yaklaşık 270 bin ton çamur keki açığa çıkmaktadır. İnşaatı devam eden diğer arıtma tesisleri ile birlikte bu rakamın yakın bir gelecekte 750 bin tonu bulması beklenmektedir.

Arıtma çamurunun içermiş olduğu organik maddelerin bir ısı değerinin oluşu veya bu çamurun tarım arazilerinde kullanılabilir oluşu nedeniyle, arıtma çamurlarının çevreye verdiği zararların önüne geçebilmek için değişik giderme metotları kullanılmaktadır. Bu metotlar şöyle sıralanabilir,

1. Açık alanda değerlendirme
2. Kurutulmuş çamurun değerlendirilmesi
3. Çamurdan biyogaz eldesi
4. Gazlaştırma (proliz)
5. Alternatif metotlar,

Bu çalışmada atık su çamuruna uygulanan işlemlerden biri olan kurutma üzerinde durulmuştur. Atık su çamurunun nasıl daha efektif olarak kurutulabileceği

araştırılmıştır, bunun sonucunda çamurun kuruma eğrisini tespit edebilmek için bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde yapılan deneylerde atık su çamuruna farklı sıcaklıklarda kurutma uygulanmıştır, çamurun 4 farklı sıcaklığı için sorbsiyon izotermi çıkarılmıştır ve bulunan deneysel sonuçların fomlasyonu yapılmıştır.



## **BÖLÜM 2. KURUTMA**

### **2.1. Kurutma**

Gözenekli yapıya sahip üründeki nemin, ısı ve kütle transferi yardımıyla alınarak kurutucu akışkana (gaz veya hava) taşınması olayına "Kurutma" ve bu işlem ile ilgilenen bilim ve teknolojiye "Kurutma Tekniği" denir [11].

Ürünlerin kurutulmalarının başlıca nedenleri;

1. Tohumların çimlenme yeteneklerinin korunması
2. Ekonomik değeri olan yeni ürünlerin elde edilmesi (kuru üzüm vb.)
3. Ürün atıklarının yeni bir alanda değerlendirilmesine olanak vermesi
4. Ürünlerin erken hasat edilmelerine olanak vermesi
5. Ürünün bozulmadan uzun süre saklanabilmesi,

Şeklinde sıralanabilir [3].

Kurutma işlemleri ürünün fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Sıvının malzemedan uzaklaştırılması bir preste veya bir santrifüjde yapılırsa, işlem mekanik kurutma olarak adlandırılır. Termik Kurutma ise, ısıtma yolu ile sıvının malzemedan alınması işlemine denilir.

Termik kurutmada evvela malzemedeki su buhar haline getirilir ve sonradan buhar malzemedan uzaklaştırılır. Bu uygulamada bir hal değişikliği söz konusudur ve bu da buharlaşma veya buğulaşma şeklinde gerçekleşir.

Buğulaşmada kurutulan malzeme üzerinde bir gaz bulunur ve serbest kalan buhar difüzyon yolu ile bu gaza karışarak uzaklaştırılır. Buharın gaz içindeki hareketini gaz

içinde bulunan kısmi buhar basıncı farkı sağlar. Buharlaşmada ise malzeme üzerinde yalnız sıvının serbest kalan kendi buharı vardır ve bunu uzaklaştırmak için bir basınç farkının tetkiki (araştırma, muayene) gerekir. Bu bir aspiratör veya vakum pompası olabilir.

Malzeme içerisinde farklı durumda bulunan sıvıyı buhar haline getirmek için malzemeye ısının tatbik ediliş şekline göre farklı kurutma yöntemleri elde edilir.

Bu kurutma yöntemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

1. Konveksiyon kurutması. Malzemenin, üzerinden sıcak ve kuru havanın akması sonucu ısıtılması
2. Kontakt kurutması. Malzemenin, sıcak bir yüzeyle teması sonucu kondüksiyon yolu ile ısıtılması
3. Radyasyon kurutması. Malzemenin, onu çevreleyen sıcak yüzeylerin ışınımı ile ısıtılması
4. Dielektrik kurutması. Malzemenin yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarla ısıtılması

Termik kurutmada genel olarak malzemenin ısıtılması ve ısıtma sonucu serbest kalan buharın uzaklaştırılması şeklinde iki işlem söz konusu olmaktadır.

Kurutma tekniğine hâkim olabilmek için kondüksiyon, konveksiyon ve rediyasyon gibi ısı transferi olaylarının ve ayrıca buharın hareketiyle ilgili olarak buhar difüzyonu ve gazların akışını yakından tanınması ve bu olayları tayin eden ısı transferi ve buhar hareketi kanunlarını uygulanması gerekmektedir. Ayrıca genellikle kurutulacak malzeme içerisindeki su, bu malzemenin gözenek ve boşluklarında bulunduğundan, buharlaşmanın meydana geldiği yere kadar bir sıvı hareketi söz konusu olur ki, bu da kendine öz kanunlara tabidir [10].

## **2.2. Kurutmada Kütle ve Enerji Bilançosu**

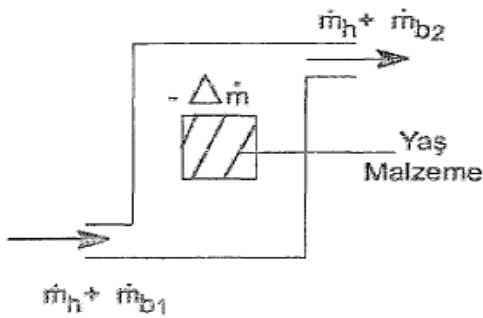
Mühendislikte önemli olan belirli bir zamanda belirli bir miktar malzemenin belirli bir dereceye kadar kurutulmasıdır. Bunun için sisteme ısı enerjisi, elektrik enerjisi ve

mekanik enerji verilmesi gerekmektedir. Kurutulan malzemeye verilecek ısınn ve bunun sonucu malzemenin kurutucuya giriş ve çıkış koşullarına göre kurutucu için kütle ve enerji bilânçosunun yazılmasıyla mümkün olmaktadır.

### 2.2.1. Kütle Bilançosu

Kurutucular çalışma rejimi bakımından ; "Sürekli" ve "Sürekli Kurutucular" olmak üzere 2 türde incelenmektedir.

Sürekli kurutucunun çalışma şekli (Şekil 2.1 'de) şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Sürekli kurutucuda madde akışı

Belirli bir kurutma süresinde kurutucudan  $m_h$  kadar kuru hava geçecektir. Bu hava girişte  $m_{b1}$  kadar su buharı beraberinde getirecek ve çıkışta da  $m_{b2}$  kadar su buharını götürecektir. Bu süre içinde kurutulacak malzemenin ağırlığında  $-\Delta m$  kadar azalma olur. Kurutucuda basınç ve sıcaklığın sabit kaldığı kabul edilirse kütle bilânçosu aşağıdaki gibi yazılır:

$$m_{b1} - m_{b2} = -\Delta m \quad (2.1)$$

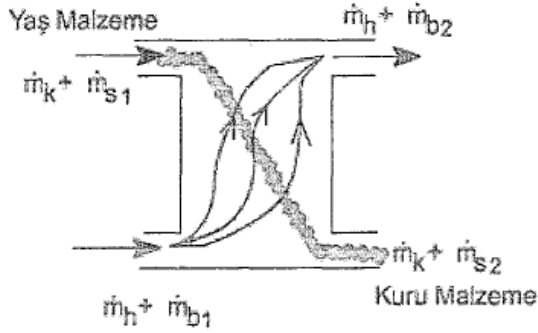
Şekil 2.1'de gösterilen sürekli kurutucudan  $m_k$  kadar kuru malzeme geçerken bu malzemenin içerisindeki su miktarı  $m_{s1} - m_{s2}$  kadar azalacaktır. Denge koşullarında ve belirli süre içerisinde  $\Delta m=0$  olur ve bu sefer kütle bilançosu aşağıdaki gibi yazılır;

$$m_{s1} - m_{s2} = m_{b2} - m_{b1} \quad (2.2)$$

Kurutmada hava yerine başka bir gaz kullanılırsa, sabit kütle bilançosunda kurutucuya giren

Örneğin; kömür gazı ile yapılan bir kurutmada

1. girdiler: kömür, yanma havası ve beraberinde getirdiği nem, kurutulacak malzeme ve beraberinde getirdiği nem
2. çıkanlar: kül, yanma gazı ve beraberinde götürdüğü nem, kurutulmuş malzeme ve malzemede kalan nem olur.



Şekil 2.2. Sürekli kurutucuda madde akışı

### 2.2.2. Enerji bilançosu

Termodinamiğin 1. Kanuna göre bir sistem sınırları içinde bulunan madde topluluğunun enerji değişmesi, sistemin yaptığı ısı ve iş mübadelesine eşit olur. Buna göre kurutma işleminde enerji bilançosu genel olarak aşağıdaki gibi yazılır;

$$\sum Q + \sum W = \sum E_2 - \sum E_1 + \Delta E \quad (2.3)$$

Bu denklemde kullanılan harflerin ne ifade ettikleri aşağıda gösterilmiştir.

1.  $\sum Q$ , kurutucu ile çevresi arasında mübadele edilen toplam ısı,
2.  $\sum W$ , kurutucuya dışarıdan verilen toplam mekanik veya elektrik iş,
3.  $\sum E_1$ , kurutucuya giren maddelerin toplam enerjileri,
4.  $\sum E_2$ , kurutucudan çıkan maddelerin toplam enerjileri,

5.  $\Delta E$ , belirli bir süre içinde sistemin enerji değişmesi,

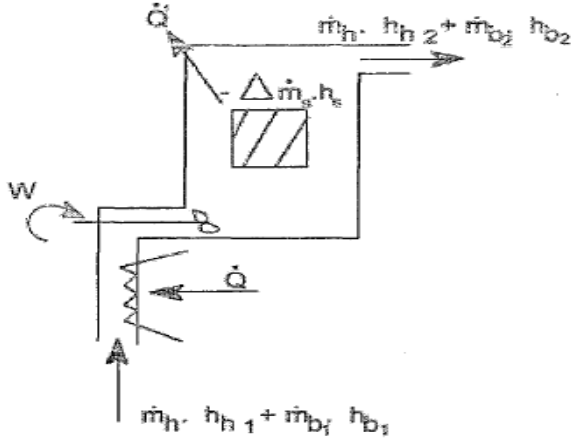
ifade etmektedir.

Kurutma işlemi süresince kurutucuda yaklaşık olarak basınç değişmesi olmaz ve sistemin enerji değişmesini hesaplamak için kurutucuya giren ve çıkan maddelerin entalpilerini bilmek yeterli olur. Kurutma olayında giriş ve çıkıştaki kinetik enerji farkları ihmal edilir.

Şekil 2.3 'teki süreksiz kurutucuda kurutma havasına  $Q$  ısısının verildiği, havanın hareketini sağlamak için üfleç ( vantilatör ) kullanıldığı ve burada  $W$  işi yapıldığı ve çevreye ısı kayıplarının  $Q'$  olduğu kabul edilirse, enerji bilançosu aşağıdaki şekilde yazılır:

$$Q + W - Q' = \dot{m}_h \cdot (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} \cdot h_{b2} - \dot{m}_{b1} \cdot h_{b1} - \Delta \dot{m}_s \cdot h_s \quad (2.4)$$

Burada  $h_h$ ,  $h_b$  ve  $h_s$  sırasıyla havanın, buharın ve sıvının özgül entalpileridir.

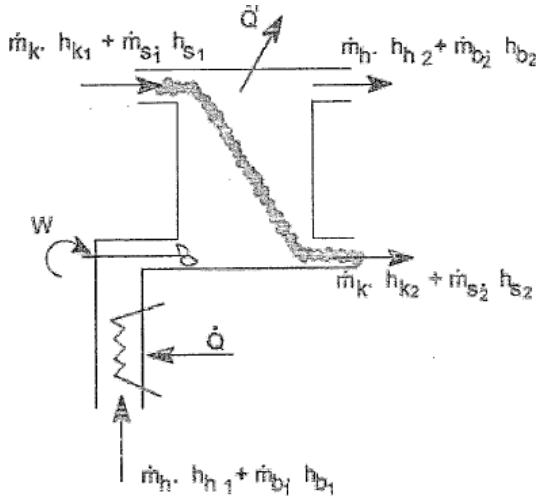


Şekil 2.3. Süreksiz kurutucuda enerji akışı

Kurutucuda sıcaklıklar sabit kalınca sistemin enerji değişme malzemedan çekilen  $\Delta m_s$  kadar sıvının ısınma yeni  $\Delta m_s \cdot h_s'$  e eşit olur.

(Şekil 2.4)'teki sürekli kurutucuda denge koşulları altında belirli bir süre içinde istemin enerji değişmesinde değişiklik olmaz ve  $\Delta E = 0$  olur. Sürekli kurutucunun enerji bilançosu aşağıdaki şekilde yazılır:

$$Q + W - Q' = \dot{m}_h \cdot (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} \cdot h_{b2} - \dot{m}_{b1} \cdot h_{b1} + \dot{m}_k \cdot (h_{k2} - h_{k1}) + \dot{m}_{s2} \cdot h_{s2} - \dot{m}_{s1} \cdot h_{s1} \quad (2.5)$$



Şekil 2.4. Sürekli kurutucuda enerji akışı

Eğer 1 ve 2 durumlarındaki havanın sıcaklıkları ve nem miktarı bilirse (bu değerler kurutucuya giriş ve kurutucudan çıkışta kolaylıkla ölçülebilir), ilerde görülecek  $h-x$ ,  $d$ , yargamı yardımıyla nemli havanın entalpileri  $(h_{1+x})_1$  ve  $(h_{1+x})_2$  kolaylıkla bulunur ve havanın kurutucudan çıkış ve kurutucuya giriş enerjiler farkı için;

$$\dot{m}_h \cdot (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} \cdot h_{b2} - \dot{m}_{b1} \cdot h_{b1} = \dot{m}_h [(h_{1+x})_1 - (h_{1+x})_2] \quad (2.6)$$

yazılabilir. Bu kısaltmayı kullanırsak süreksiz kurutucunun enerji bilançosu

$$Q + W - Q' = \dot{m}_h [(h_{1+x})_1 - (h_{1+x})_2] - \Delta \dot{m}_s \cdot h_s \quad (2.7)$$

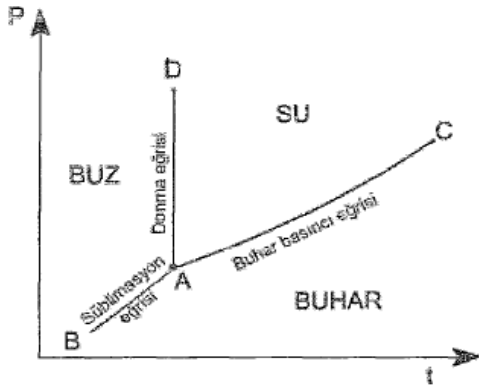
ve sürekli kurutucunun enerji bilançosu,

$$Q + W - Q' = \dot{m}_h [(h_{1+x})_1 - (h_{1+x})_2] + \dot{m}_k \cdot (h_{k2} - h_{k1}) + \dot{m}_{s2} \cdot h_{s2} - \dot{m}_{s1} \cdot h_{s1} \quad (2.8)$$

## 2.3. Kurutma Havaının Özellikleri

### 2.3.1. Buhar basıncı

Kapalı bir kaptaki basınç sabit tutularak sıvı ısıtılırsa belirli bir sıcaklık erişilince buharlaşma başlar ve hacim genişler. Bu andan itibaren suyun tamamen buhara dönüşmesine kadar su-buhar karışımının sıcaklığının değişmediği görülür. Su ve buharın denge halinde bulunduğu bu duruma doyma hali denir. Belirli sıcaklıktaki buharlaşma basıncına ise doymuş buhar basıncı  $p_b$  denir. Bu deney farklı basınçlar altında tekrarlanırsa, her basınç için farklı bir buharlaşma sıcaklığı bulunur ve buharlaşma basıncının buharlaşma sıcaklığına bağlı olarak çizilmesi buhar basıncı eğrisini verir.



Şekil 2.5. Suyun basınç-sıcaklık eğrisi

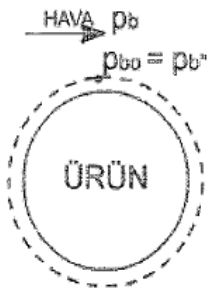
(Şekil 2.5)'de suyun  $p-t$  diyagramı görülmektedir. Buhar basıncı eğrisi AC'nin son bulunduğu C noktası kritik noktayı gösterir, bunun ötesinde buharlaşma esnasında su ve buhar fazları denge halinde bulunmaz ve suyun buhara dönüşmesi ani olur.

Aynı diyagramda AD donma eğrisi ve basıncı buzun erime sıcaklığına etkisini, AB süblimasyon eğrisi, yani buz ve buhar fazlarının denge halinde bulunduğu şartları gösterir. A noktası su, buhar ve buz fazlarının denge halinde bulunduğu üçlü noktadır.

Kurutmada sıvı haldeki su kurutulanan ürünün havaya geçeceğinden, burada doymamış hava söz konusu olur. Aksi takdirde nem (su) kurutulanan ürünün üzerinde (çiğ) veya içerisinde kalır. Kurutma prosesinin başlangıcında, kurutucu akışkanın (havanın) doymamluk derecesi belirlenir ve kurutmada ancak bu noktaya kadar olur. Ürünün kurutulmasında buhar moleküllerinin ürünün nemli havaya geçişi ancak iki şartın gerçekleşmesiyle mümkün olur.

1. Ürün üzerinden geçen havanın doymamış olması yani buhar kısmi basıncı  $P_b$  doymuş kısmi basınçtan  $p_b''$  'den küçük olmalıdır;

$$P_b < P_b''$$



Şekil 2.6. Kurutmada ürün ile basınç ilişkisi

2. Ürünün dış yüzeyindeki sınır tabakasındaki kısmi buhar basıncı  $P_{bo}$ , havanın buhar kısmi basıncı  $P_b$ 'den daha büyük olmalıdır ( $P_{bo} > P_b$ ).

Kurutma tekniğinde toplam basınç, çevre basıncı dolaylarında yani 1 bar dolaylarında, havanın su buharı konsantrasyonu çok düşüktür. Dolayısıyla, doymamış hava, kuru hava ve su buharının karışımından oluşan ideal gaz karışımı olarak değerlendirilir.

### 2.3.2. Nemli havanın özellikleri

Yeteri kadar kuru gaz bir sıvı ile temas getirildiği zaman sıvı buharlaşmaya başlar. Buhar-gaz karışımındaki kısmi buhar basıncı  $p_b$  suyun aynı sıcaklıktaki doymuş buhar



basıncına eşit oluncaya kadar, yani buhar-gaz karışımı doymuş hale gelinceye kadar sıvının buharlaşması devam eder. Suyun buharlaşması ile havanın nemlendirilmesi bu şekilde yapılır.

Bir kg kuru havada bulunan su buharı kütlesi özgül nem olarak adlandırılır.

Özgül nem  $x$  ile gösterilir:

$$x = \frac{m_b}{m_h} \quad (2.9)$$

Nem miktarını kuru hava kütesine orantılı olarak ifade edilmesinin nedeni, nemlendirme veya tersi olan kurutmada su buhar-hava karışımında kuru hava kütesinin sabit kalmasıdır.

Atmosfer basıncında su buhar-hava karışımı ideal gaz olarak kabul edilince Dalton Kanununa göre, su buharı kısmi basıncının kuru hava kısmi basıncına oran, su buharı mol sayısının kuru hava mol sayısına oranına eşit olur ve

$$\frac{p_b}{p - p_b} = \frac{\frac{m_b}{M_b}}{\frac{m_h}{M_h}} = \frac{M_h}{M_b} x \quad (2.10)$$

$$x = \frac{M_b}{M_h} \cdot \frac{p_b}{p - p_b} \quad (2.11)$$

bulunur.

Burada  $p$  su buharı-hava karışımının toplam basıncı ve  $M_h$ ,  $M_b$  hava ile su buharının moleküler kütesidir. Neticede nemli havanın özgül nemi için aşağıdaki bağıntı bulunur:

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{p_b}{p - p_b} = 0,622 \frac{p_b}{p - p_b} \quad (2.12)$$

Bazen havadaki nem miktarı bağıl nem olarak ifade edilir. Bu su buharı-hava karışımının birim hacimdeki su buharı kütlesi  $p_b$  'nin aynı sıcaklık ve basınçta doymuş haldeki karışımındaki su buharı kütlesi  $p_b''$  ya oranı olur.

Bağıl nem  $\varphi$  ile gösterilir ve su buharı-hava karışımının doyma derecesinin bir ölçüsüdür.

$$\varphi = \frac{p_b}{p_b''} = \frac{p_b}{p_b''} \quad (2.13)$$

Buradaki  $p_b''$  doymuş haldeki karışımının su buharı kısmi basıncıdır. Su buharı-hava karışımının hacmi  $V$  olursa nemli havanın yoğunluğu için

$$\rho = \frac{m_h + m_b}{V} \quad (2.14)$$

yazılır.

Diğer taraftan ideal gazlar kanununa göre

$$\frac{p_h \cdot V}{m_h} = R_h \cdot T \quad \text{ve} \quad \frac{p_b \cdot V}{m_b} = R_b \cdot T$$

$$p = p_h + p_b = (m_h \cdot R_h + m_b \cdot R_b) \frac{T}{V} \quad (2.15)$$

olur, buradaki  $V$  değerini bir evvelki bağıntıda kullanılarak nemli havanın yoğunluğu bulunur:

$$\rho = \frac{m_h + m_b}{m_h \cdot R_h + m_b \cdot R_b} \cdot \frac{p}{T} \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{1+x}{\frac{R_h}{R_b}} \cdot \frac{p}{R_b \cdot T} \quad (2.17)$$

Hava ve su buharının gaz sabiteleri  $R_h = 287 \text{ j/kgK}$  ,  $R_b = 462 \text{ j/kg K}$  olduğuna göre, doymamış nemli havanın ( $x < x''$ ) yoğunluk bağıntısı aşağıdaki şekli alır:

$$\rho = \frac{1+x}{0,622+x} \cdot \frac{p}{462 \cdot T} \quad (2.18)$$

Bu bağıntıda p'nin birimi Pa ve T'nin birimi K olunca yoğunluk  $\text{kg/m}^3$  olarak hesaplanır. Aşın doyma halinde ( $x > x''$ ) havadaki fazla su buharı da yoğuşacaktır. Ancak yoğuşan su buharının hacmi su buharı-hava karışımının hacmi yanında ihmal edilir.

(1+x) kg nemli havanın entalpisi, kuru havanın entalpisi  $h_h$  ile hava içinde bulunan su buharının entalpisi  $x \cdot h_b$ ' nin toplamına eşit olur:

$$h_{(1+x)} = h_h + x \cdot h_b \quad (2.19)$$

kuru havanın ortalama özgül ısısı için  $c_{ph}$  kullanılarak t sıcaklığındaki entalpisi;

$$h_h = c_{ph} \cdot t \quad (2.20)$$

Dar bir sıcaklık sınırı dahilinde  $-50 \text{ }^\circ\text{C} < t < +50 \text{ }^\circ\text{C}$ , havanın özgül ısısı için ortalama bir değer olan  $c_{ph} = 1,005 \text{ kJ/kg K}$  kullanılabilir.

Su buharının entalpisini hesaplamak için 0°C'de suyun buharlaşma entalpisinin sıfır olduğu kabul edilirse ve atmosfer basıncı ve 0°C'de suyun buharlaşma gizli ısı  $r = 2500$  kJ/kg olunca, kızgın su buharının entalpisini hesaplanır:

$$h_b = 2500 + c_{pb} \cdot t \quad (2.21)$$

Burada gene su buharının özgül ısı için ortalama bir değer olan  $C_{pb} = 1,842$  kJ/kg K kullanılırsa, doymamış nemli havanın entalpisini veren bağıntı bulunur:

$$h_{(1+x)} = 2500 \cdot x + (1,005 + 1,842 \cdot x) \cdot t \quad (2.22)$$

#### 2.4. Dış Kuvvetlerin Buhar Basıncına Etkisi

Denge koşullarında bir sıvının üzerinde yalnız kendi buharı bulunduğu zaman sıcaklığa bağlı olarak belirli bir buhar basıncının var olduğu ve buna da doymuş buhar basıncı  $p''$ , denilmektedir. Nem içeriği yüksek olan malzeme üzerindeki buhar basıncında doymuş buhar basıncına eşit olur.

Malzeme nem içeriği düşük olunca malzeme üzerindeki buhar basıncının doymuş buhar basıncının altına düştüğü görülür. Malzeme nem içeriğinin buhar basıncına etkisini sıvı ile sıvıyı sınırlayan malzeme gözenek duvarları arasındaki kuvvetler tayin eder.

Sıvı ile buhar fazlarının denge halinde bulunması için her iki fazın serbest entalpilerinin eşit olması ve bir fazda meydana gelen sonsuz ufak serbest entalpi değişikliğinin diğer fazda sonsuz ufak bir basınç değişikliği olarak belirmesi gereklidir. Bu durumda sıvı üzerindeki buhar basıncını sıcaklıktan başka sıvıya tesir eden dış kuvvetler de etkileyecektir. Bu da dış basınç veya emme basıncı olur.

Suya etki eden dış basınç  $P_s$  ve sıvı üzerindeki buhar basıncı  $P_b$  ve sıvı ile buharın özgül hacimleri  $v_s$  ve  $v_b$  ile gösterilirse her iki fazın sıcaklıkları eşit olduğu zaman Gibbs'in denklemine göre;

$$v_b \cdot dp_b = v_s \cdot dp_s \quad (2.23)$$

yazılır ve burada buhar gaz karışımının ideal gaz kabulü ile  $V_b = RT/P_b$  kullanılırsa

$$d \ln p_b = \frac{dp_b}{p_b} = \frac{v_s dp_s}{R_b T} \quad (2.24)$$

Yukardaki bağıntının entegrasyonu sonucu ve dış basınç  $P_s = 0$  olduğu zaman buhar basıncı  $P_b = P_b''$  olacağı kabul edilirse özgül nem ile dış basınç arasındaki ilişkiyi veren;

$$\ln \frac{P_b}{P_b''} = \frac{v_s P_s}{R_b T} \quad (2.25)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının sıcaklık  $T$ 'ye göre türevi alınır;

$$\frac{d \left( n \frac{P_b}{P_b''} \right)}{d \left( \frac{1}{T} \right)} = - \frac{v_s P_s}{R_b} = - \frac{\Delta h}{R_b} \quad (2.26)$$

bulunur. Sabit sıcaklıkta sistemin iç enerjisi değişmeyeceğinden bu bağıntıda  $v_s \cdot p_s$  çarpımını  $\Delta h_s$  ıslatma entalpisi olarak bulunur.

Yaş malzemede olduğu gibi sıvı katı yapıya bağlı olunca sıvının buharlaşması güçleşir ve özgül nemin azalmasıyla malzeme içerisindeki sıvının buharlaşması için

gerekli ısı da artış gösterir. Gözenekler içerisindeki sıvıyı buharlaştırmak buharlaşma gizli ısısının üstünde bir ısıya gerek olur ve bu fazla ısıya ıslatma entalpi denilir.

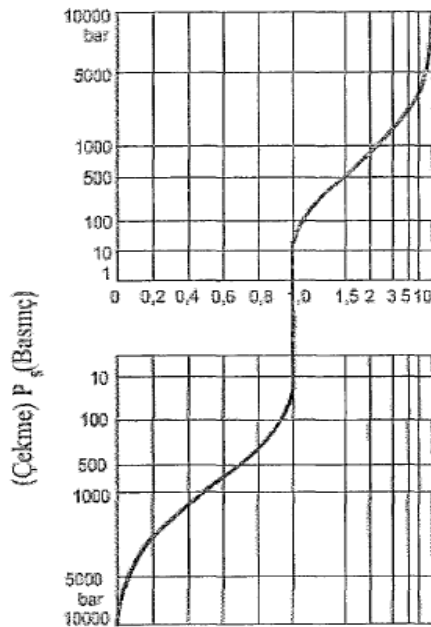
Neticede gözenekli malzemedeki sıvıyı buharlaştırmak için gerekli ısı

$$\Delta h = r + \Delta h_s \quad (2.27)$$

Genellikle ıslatma entalpisinin değeri ufak olur. Örneğin yaş kumda  $\Delta h_s = 92$  kJ/kg su olur.

Higroskopik malzemede bile nem içeriği 0,1 kg/kg'dan büyük olunca toplam buharlaşma entalpi ( $r + \Delta h_s$ ) ile buharlaşma gizli ısısı arasındaki fark çok ufak olur.

Kurutma tekniği hesaplarında çoğu zaman ıslatma entalpi dikkate alınmaz.



Şekil 2.7. Dış kuvvetlerin  $p_b / p_b''$  oranına etkisi

Basınç veya çekme kuvvetinin 10 bar değerine kadar buhar basıncı doymuş buhar basıncına eşit olur  $p_b/p_b''=1$ .

Çekme kuvvetinin artması  $p_b / p_b''$  oranının küçülmesine ve basıncın artması ise aynı oranın büyümesine sebep olur. Çok yüksek çekme kuvveti altında  $p_b / p_b'' \Rightarrow 0$  veya çok yüksek çekme kuvveti altında  $p_b / p_b'' \Rightarrow \infty$  olduğu görülür [10].

#### 2.4.1. Kapiler yüzey ve sıvı damlası üzerindeki buhar basıncı

Yüzey gerilmesinin etkidiği çekme ve basınç kuvvetleri dış kuvvet olarak kabul edilir. Kapiler sıvı halinde sıvı yüzeyi iç bükey olunca çekme kuvvetleri ve damla halinde sıvı yüzeyi dış bükey olunca basınç kuvvetleri söz konusu olur. Bu nedenle kapiler sıvı üzerinde buhar basıncında düşme ve damla üzerinde buhar basıncında yükselme meydana gelir. Ancak bu basınç farkının belirgin olabilmesi için kapiler yüzey veya damla yarıçapı  $r$ 'nin çok küçük olması gerekir.  $r = 10^{-6}$  m olduğu zaman basınç veya çekme kuvveti 1,5 bar mertebesinde olur. Bu durum çok küçük gözenekli malzemede veya püskürtme sonucu elde edilen fevkalade ufak damlacıklarda görülür. Buradaki çekme kuvveti sıvının mekanik olarak gözeneklerden uzaklaştırılması için tatbiki gereken kuvvete eşit olur.

Çok ufak gözeneklerde bu kuvvet çok yüksek olacağından mekanik kurutma yetersiz olur ve termik kurutma yapılması gerekir [5].

#### 2.4.2. Adsorbe edilen gaz üzerindeki buhar basıncı

Çok ufak gözenekli malzemede kapiler sıvının buhar basıncı kurutulmuş malzemenin sıcaklığına tekabül eden buhar doymuş buhar basıncından küçük olur. Kurutmanın devamında buhar basıncı daha da düşer ve buharlaşma yetersiz olur. Sıvı küçük gözenekler içerisinde hapis kalır. Bu tür malzemeye higroskopik malzeme denir. (Örneğin; tahta, selüloz, kâğıt, sebze, meyve ve birçok organik maddeler gibi)

Bir higroskopik madde üzerinde sıvı buharı bulunursa ve madde ile sıvı buharı arasında herhangi bir kimyasal birleşme olmazsa denge durumu teessüs edinceye kadar madde yüzeysel olarak sıvı buharı emer. Bu olaya adsorpsiyon denilir. Örneğin; nem alıcısı olarak kullanılan silikalın su buharını yutması gibi

Malzemedeki sıvı miktarı az olunca, yani adsorpsiyon başlangıcında sıvı ile katı yapı molekülleri arasındaki çekici kuvvetler (Van Der Waals kuvvetleri) buhar basıncının alçalmasında birinci derecede etkili olurlar. Buhar basıncının doymuş buhar basıncı değerinin altına düştüğü görülen diğer bir olay da adsorpsiyon olayıdır.

Burada bir maddenin bir sıvıda çözülmesi söz konusu olur. Bu çözülmesi esnasında kimyasal bir birleşme meydana gelir.

## **2.5. Gıda Maddelerinde Bulunan Su ve Su Aktivitesi**

Bilindiği gibi gıda maddelerinin tümü su içermekte ve özellikle yüksek oranda su içeren gıdalarda biyolojik ve kimyasal bozulmalar daha kolay meydana gelmektedir. Gıda içerisinde oluşan ve su ile ilgili tepkime ve 'değişmelerin mikrobiyolojik gelişmelerle enzimatik etkiler su aktivitesine/bağlı olduğu bilinmektedir.

Genel olarak bir gıda maddesinde su iki şekilde bulunmaktadır. Yüzey gerilimine bağlı olan fiziksel kuvvetlerin etkisiyle maddenin porlarında ve dokular arasındaki boşluklarda bulunan suya bağımsız su (dış su) denilmektedir. Gıda maddesinde bulunan bağımsız su gıdanın kimyasal yapısıyla değil fiziksel yapısıyla ilgilidir.

Gıda maddesinde bulunan suyun bir kısmı da su moleküllerinin çok katmanlı bir tabaka oluşturmak için birbirlerine etki etmesiyle katı içinde tutulurlar. Bu tip suya ise bağlı su adı verilmektedir. Gıda maddelerinde bulunan bağlı su ise gıdanın kimyasal yapısıyla ilgilidir. Kurutma işlemi sırasında önce bağımsız su, daha sonra bağlı suyun bir kısmı buharlaşarak üründen ayrılır.

Serbest nem miktarı denge neminden fazla olan nem miktarıdır. Genellikle serbest su kurutma işlemi sırasında tamamen üründen kaldırılabilir. Üründeki serbest su ürünün tipine, hava sıcaklığına ve su buharı konsantrasyonuna bağlıdır [3].

Ürün bünyesinde tutulan suyun miktarı birçok unsurlardan etkilenir. Bu unsurların başlıcaları;



1. Ürünün çeşidi,
2. Ürünün olgunluk durumu
3. Ürünün bozuşma durumu
4. Ürünün yağ, protein, nişasta, gluten, selüloz vb. içeriği
5. Dış ortamın sıcaklığı
6. Dış ortamın bağıl nemi, şeklinde sıralanabilir [4].

Tarım ürünlerinin içerdiği su miktarı ürünün yaş ve kuru ağırlığına oranlanarak nem oranı şeklinde belirtilir. Ürünün içerdiği suyun ağırlığının ürünün içerdiği su ve kura madde ağırlıklarının toplamına (=yaş ağırlık) bölünmesiyle elde edilen değere yaş baza göre nem oranı ( $N_y$ ); ürünün yalnızca kura madde ağırlığına (=kura ağırlık) bölünmesiyle elde edilen değere ise kura baza göre nem oranı ( $N_k$ ) adı verilir.

$$N_y = W_s / (W_s + W_k) \quad (2.28)$$

$$N_k = W_s / W_k \quad (2.29)$$

$W_s$ = ürünün içerdiği suyun ağırlığı

$W_k$ = ürünün içerdiği kura madde ağırlığı

Ürünün yaş baz esasına göre nem değeri daha çok ticari işlemlerde, kuru baza göre nem değeri ise kurutma ve nemlendirmeye ilgili işlemlerde kullanılmaktadır.

## 2.6. Kuruma Olgusu

### 2.6.1. Tarım tahıllarının kuruma evreleri

Kurutma işlemi temel olarak bir ısı ve kütle transferi olayıdır. Nemli bir maddenin ısıtılmış havayla kurutulması sırasında hava ortamdaki suyun buharlaşması için gerekli olan ısıyı sağlar ve buharlaşma yüzeyinde oluşan su buharını ortadan kaldırmak için taşıyıcı gaz rolü oynar. Bu şartlar altında nemli bir madde ısıtılmış havayla temas ettirilirse madde kuruma yüzeyine paralel akımda akan ısıtılmış

havanın tesiriyle kurumaya başlar. Kuruma için gerekli ısı maddeden konveksiyon yolu ile sağlanır.

Materyal ile çevresi arasında nem transferi sona erene kadar süren kurutma süreci içinde üç ayrı evre izlenir. Bu evreler;

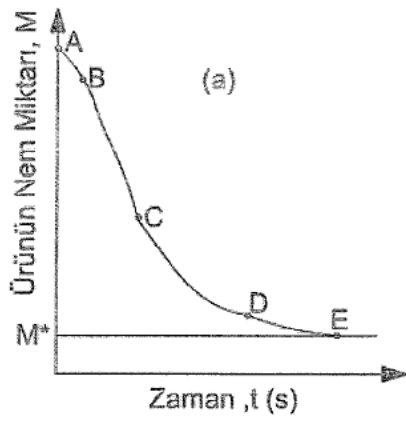
1. Sabit hızla kuruma evresi,
2. Sabit hızla kuruma evresi,
3. Azalan kuruma evresi şeklinde belirtilebilir.

Ürünün kuruyuncaya kadar geçirdiği bu evrelerin süreleri, ürünün yapısına ve kurutma ortamı şartlarına bağlıdır. Ürüne bağlı etkenler arasında, kılcal borularda oluşan nem akışı, difüzyon katsayısı, nişasta, yağ, şeker vb. madde içerikleri, büzülme ve çatlama, kabuk kalınlığı sayılabilir.

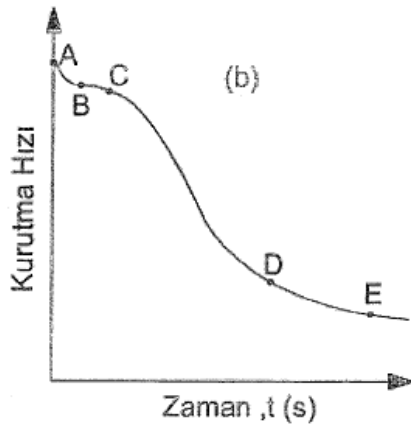
Isınma evresi kurutulacak materyalin sıcaklığının ortam sıcaklığına yükselmesi için geçen süreyi içerir. Bu evrede her birim zaman içinde buharlaşan su miktarı bir önceki zaman birimindekinden daha fazladır. Isınma evresi toplam kuruma sürecine göre çok kısa sürdüğünden tarım ürünlerinin kurutulması işlemlerinde dikkate alınmayabilir.

Sabit hızda kuruma evresinde kurumakta olan materyalden birim zaman içinde buharlaşan su miktarı sabit kalmaktadır. Bu evre süresince materyal yüzeyinin ince bir su filmiyle kaplı kaldığı kabul edilir. Bu durumun gerçekleşebilmesi için iç kısımlardan yüzeye taşınan suyun geliş hızı ile yüzeyden ayrılan suyun buharlaşma hızı eşit olmalıdır. Materyalin iç kısımlarından yüzeye iletim hızı buharlaşma hızına göre azaldığında yüzey üzerindeki su filmi yer yer ortadan kalkmaya başlar. Bu andan itibaren sabit hızda kuruma evresi sona erer. Ve daha sonra azalan hızda kuruma evresi görülür. Kurutma hızı giderek düşer.

Maddenin nem miktarındaki değişimler bütün kuruma periyodu içinde kaydedilirse aşağıda gösterilen kuruma eğrileri elde edilmektedir.

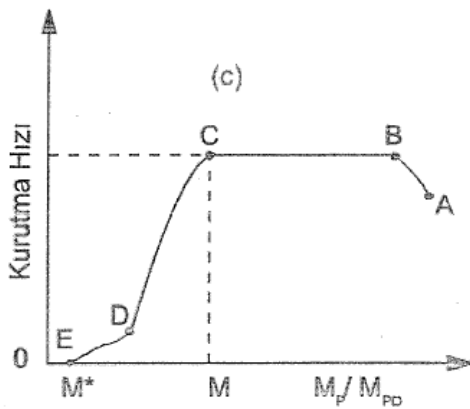


Şekil 2.8a. Kuruma eğrisi



Şekil 2.8b. Kurutma hızı eğrisi

Deney sonuçlarının nümerik yoldan türevi kuruma hızını vermektedir (Şekil 2.9 b).



Şekil 2.8c. Kurutma hızı ile nem arasındaki ilişki

Şekil 2.9 c' de yine en çok kullanılan kuruma yüzeyinin birim alanına isabet kuruma debisinin serbest nem miktarıyla olan ilişkisini veren diyagram gösterilmiştir. Yukarıdaki kuruma eğrilerinin bölgeleri incelenirse;

1. A-B bölgesinde ürün yüzeyi ile kurutma havasının dengeye geldiği bölümdür. Ürünün ısınma evresi de denilebilir. Genellikle kurutma işlemlerinde göz ardı edilir.
2. B-C bölgesinde ise kuruma sabit hızlı periyotta sürdüğü bölümdür. Bu periyotta buharlaşma hızı aynı şartlar altında bulunan bir sıvının yüzeyinde meydana gelen buharlaşma debisine eşittir.
3. C noktasında kuruma hızı düşmeye başlamaktadır. C noktasında gıda maddesinin ihtiva ettiği nem, kritik nem olarak adlandırılmaktadır.
4. C-D bölgesinde azalan hızla kurutma olayı devam etmektedir. Gıda maddesinin iç kısımlarından yüzeye doğru nemin taşınma hızı giderek düşmektedir. Azalan hızla kurutma periyodunda genellikle kurutma olaylarında iki bölümde seyretmektedir. C-E birinci azalan hızla kurutma periyodu ve E-D ikinci azalan kurutma periyodu.

Azalan hızlı kurutma periyodlarında üründen alınan nem miktarı azdır ve geçen zaman oldukça uzundur. Bu evre kurutma işlemlerinde önemli bir evredir [9].

## **2.7. Kurutma Hızına Etki Eden Faktörler**

Kurutma hızı doğrudan doğruya ısı ve kütle transferine etki eden faktörler tarafından kontrol edilir. Bu faktörlerin başlıcaları sıcaklık derecesi havanın nemi ve hızı, kurutulacak materyale maksimum yüzey alanı kazandıracak geometrik düzenleme (parça iriliği, şekli, yığın kalınlığı v.s.) gibi fiziksel faktörlerle, kurutulan materyalin başta bileşimi olmak üzere kendine özgü nitelikleridir.

Materyalin bileşimi onun suyu bağlama gücüyle yakından alakalı olduğundan kuruma hızına etkidiği görülmektedir. Örneğin nişasta pektin ve diğer gam maddelerince zengin olan ürünlerin kurutulması oldukça zordur.

Kurutulan parçaların iriliğinin kurama hızına önemli ölçüde etkide bulunmasına karşın meyve ve sebze gibi ürünlerde kurumanın başlangıç safhalarında önemli bir fark görülmemektedir. Ancak kurumanın ileriki safhalarında kuruma hızı parça boyutlarına göre önemli ölçüde değişmektedir. Kurama hızına etki eden önemli faktörlerden biriside kura termometre sıcaklığı ile yaş termometre sıcaklığı arasındaki farktır. Islak ve kuru termometre sıcaklıkları arasındaki fark ne kadar büyükse kurutma hızı o kadar fazladır.

Kuruma hızına etki eden faktörlerden biriside kurutucu havanın hızıdır. Hava hızı arttıkça kurutma hızının da arttığı görülmektedir.

Kurutma olayına etki eden parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir [8].

#### 1) Isı transferi

Isıtma ortamından sıvı yüzeyine ısı transferi

Yapışkan katmanlarda ısı transferi

Katıdan sıvıya direkt ısı transferi

#### 2) Kurutma atmosferi

Kurutma atmosferi basınç ve sıcaklığı

Kurutma atmosferinin bileşimi

Kurutma yüzeyindeki havanın izafi hızı

#### 3) Katı sıvı sisteminin genel fiziksel özelliği

Katı sıvı arasındaki yüzey gerilmesi

Katı sıvı arasındaki yapışkan film kalınlığı

Gözenekler içinde yüzey alanının sıvı hacmine oranı

#### 4) Katıların özellikleri

Parçacık boyutu

Katının etken alanı

Katının gözenekliği

## 2.8. Kurutmada Meydana Gelen Değişmeler

Kurutma proseslerinde kurutulan ürünlerin yapısında fiziksel ve kimyasal olarak değişmeler meydana gelmektedir. Bu değişmeler aşağıda sıralanmıştır [6].

1-Yöresel kuru madde birikimi: Kurutmada suyun dokudaki gözenekler içindeki hareketi doğrudan doğruya bir sıvı hareketi şeklinde su buharı şeklinde ya da bireysel serbest su molekülleri şeklinde olabilmektedir. Eğer suyun hareketi bir sıvı hareketi şeklinde ise içindeki erimiş maddelerde su ile birlikte yüzeye kadar taşınır. Su uzaklaşıp gidince yüzeyde bir kuru madde yığılımı görülür.

Kuru madde konsantrasyonu artınca iç kısımlarda düşmüş konsantrasyonu artınca iç kısımlarda düşmüş konsantrasyonu dengelem amacıyla bu defa içeri doğru bir kuru madde akımı belirir. Kurutmada uygulanan koşullara göre yüzeyde ya da merkezde aşırı bir kuru madde birikimi belirebilir.

2-Kabuk bağlama: Kurutma koşullarının hatalı seçilmesi sonucunda oluşan bir olaydır. Eğer kurumanın ilk aşamasında yüksek sıcaklık uygulanırsa kabuk bağlama görülmektedir. Yüzeyde oluşan kuru tabaka büzüşme sonucu alt tabakalara baskı yapar, iç taraflar henüz o kadar ıslaktır ki üstten yapılan basınca direnç gösterir ve üst tabaka gerilip sert bir kabuk haline dönüşür. Kabuk bağlamayla birlikte kurama hızı birden bire düşer. Şekerce zengin ürünlerde meyveler de görülür. Ürünün içindeki su dış tabakayı aşamadığından kurama olayı durur. Ürünün dışı kuru, içi ıslak bir halde kalır. Kurumanın tamamlanması artık çok zordur. Kurutma koşullarının ayarlanarak kabuk bağlamasının önlenmesi gerekmektedir. Kitle yoğunluğunda değişmeler: ürünün birim hacminin ağırlığına kitle yoğunluğu denilmektedir. Kurutulan bir üründe hiçbir büzüşme, buruşma olmasa ve kurutma sonunda da başlangıçtaki boyutlarını korursa bu ürünün kurutma sonundaki kitle yoğunluğu sadece kaybedilen su kadar azalır.

Kurutma koşulları eğer iç kısımlara göre ürün yüzeyinin daha fazla ve hızlı kurmasına neden olmayacak kadar ılımlıysa tüm kitle beraberce kurur ve muntazam

bir buruşma belirerek ürün şeklini kaybeder ve hacmi son derece küçülür. Böyle bir ürünün kitle yoğunluğu çok yüksektir.

3-Kurutulmuş ürünün rehidrasyon yeteneği: Kurutulmuş bir üründe aranan en önemli nitelik bunun kullanılması sırasında verilen su ile eski haline dönüştürülebilme düzeyidir. Yani kurutulmuş bir ürün suda tutulunca taze halinde içerdiği kadar su alarak eski haline ve şekline dönüşürse mükemmel niteliklerde olduğu kabul edilir. Kurutulmuş ürünlerin rehidrasyon yeteneği fiziksel bir olay olsa da bunun kurutma sırasında değişmesi materyaldeki kimyasal, fizikokimyasal, ve fiziksel değişmelerle ilgilidir. Nitekim kurutma koşullarına bağlı olarak buruşma parçalanma sonucu hücreler ve dokunun kapiler yapısının bozulması rehidrasyonu olumsuz etkileyen faktörler arasındadır. Kurutulmuş bir maddenin rehidrasyon yeteneği onun belli koşullarda ısıtılması sonucu kazandığı su miktarı ile ölçülür.

Kurutma sırasında bu fiziksel değişmelere paralel olarak kimyasal değişmelerde belirmektedir. Bu değişmeler kendini ürünün renk değişmesiyle, lezzetin değişmesiyle, beslenme değeriyle, depolama stabilitesinde kendini göstermektedir.

Kurutulmuş ürünlerde kurutma sırasında yüksek sıcaklık uygulanması nedeniyle ürün içerisindeki şekerlerin karamelizasyonu ve diğer maddelerin kavrulması nedeniyle esmerleşme görülmektedir. Bu nedenle kurutma işlemi öncesinde kükürtdioksit gazı ile ürünler kükürtlenmektedirler.

### 2.8.1. Gıda maddelerinin kurutulmasında kalite ve besin değerleri

#### 2.1.Kurutulmuş gıda maddelerinde arzu edilen kalite değerleri

Kurutulmuş Ürün	Kütle yoğunluğu Mekanik esnekliği Nem çekme özelliği yapışma özelliği
Su alma işlemi sırasında	Isıtılabilme özelliği Suyla örtülme özelliği Tekrar su alma özelliği Tekrar su alma oranı
Suyunu aldıktan sonraki oran	Mikrobiyolojik kalitesi Besin değeri Renk ve görünüş Tad ve aroma

Ürünün kullanım alanı ve tipine bağlı olarak kalite faktörlerinden bazıları diğerlerinden daha çok veya az önemli olabilir. Örneğin askeri amaçla veya uzay programlarında düşük kütle hacimli ürünler tercih edilirken kurutulmuş hazır sıvı gıdalar için ıslanma özelliği ön plana çıkmaktadır.

Tekrar eski yapışma dönmüş gıda maddesinde renk doku ve lezzet yanında sağlığa uygun olma ve besin değeri arzu edilen faktörlerdir. Bütün bu kalite nitelikleri için maksimum bir değere ulaşmak mümkün değildir. Kalite faktörleri karşılıklı olarak birbirleriyle ilişkilidir. Örneğin sebzelerin hızlı hava akımında kurutulması sonucu ürün gözenekli vetekrar su alma zamanı çabuktur.buna karşılık yavaş hava akımında kurutulan sebzelerde tekrar su alma zamanı uzundur.

### 2.9. Kurutma Sistemleri

Tarım ürünlerinin kurutulmasında kullanılan kurutucular, kurutulacak ürün tipine ve uygulanacak kurutma yöntemine bağlı olarak farklı gruplara ayrılmaktadırlar. Sebze,



meyve ve bunlardan üretilen püre özsu vb. ikincil ürünlerin kurutulmasında kullanılan kurutucular ; kabin tipi, arabalı tünel tipi, sonsuz bantlı tünel tipi, dönen silindirik tip, akışkan yatak tipi, valsli, vakumlu, püskürtmeli tip kurutucular şeklinde sıralanabilir [11].

## BÖLÜM 3. SORBSİYON İZOTERMLERİ

### 3.1. Sorbsiyon İzotermi

Kapiler kuvvetler, absorpsiyon ve adsorpsiyon kuvvetleri higroskopik ürünlerde nemin doyma basıncını etkileyen ana unsurlardır. Bunlardan hangisinin burada etkin olduğunun ayırt edilmesi pratikte mümkün değildir. Doyma basıncını etkileyen tüm bu kuvvetler sorbsiyon kuvvetleri başlığı altında ele alınır. Higroskopik ürünün sabit sıcaklıklarda havanın bağıl nemine bağlı olarak nem tutma özelliğine sorbsiyon izotermi denir. Diğer bir deyişle ürün üzerindeki havanın bağıl nemi üründeki nemin miktarını belirler. Sorbsiyon izotermi ürün cinsine göre birbirlerinden farklı olurlar.

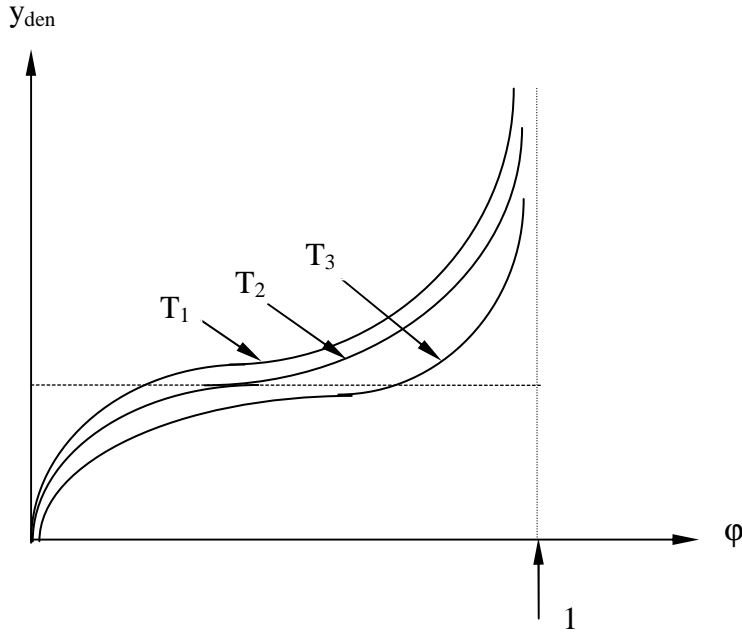
Higroskopik ürünün sabit sıcaklıktaki kurutulması esnasında ürün nem doyma basıncı düşer ve havanın buhar kısmi basıncına (bağıl nem) geldiğinde kurutma durur. Bu durumda ürünün bir denge nemi  $y_m$  veya diğer deyişle belirli bir nem içeriği vardır. Kurutma havasının daha düşük bağıl nem değerlerinde yani daha düşük kısmi buhar basınçlarında ürün denge nem içeriği azalır. Diğer bir deyişle daha fazla kurutma gerçekleştirmek için havanın bağıl nemi düşürülmelidir. Yeni elde edilen hava bağıl nemine kadar kurutma devam eder ve tekrar yeni bir ürün denge nemi elde edilir. Böyle elde edilen ürün denge nemleri  $y_{m,den}$  ile havanın bağıl nemi  $\varphi$  arasındaki ilişki sorbsiyon izotermi ile ifade edilir [11].

$$y_{m,den} = y(\varphi, T) \quad (3.1)$$

Sorbsiyon izotermi teorik belirlenmesi mümkün değildir ve

$$y_{m,den} = y_{m,den}(\varphi, T) \quad (3.2)$$

deneylerle elde edilirler. Sabit sıcaklıklarla yapılan deneylerle ölçülen  $y_m$ , den ve  $\phi$  değerleri sorbsiyon izoterm eğrileri ile gösterilir. Yüksek sıcaklıktaki Sorbsiyon izotermi düşük sıcaklıklardaki eğrilerin üzerinde seyir ederler (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sorbsiyon izotermi

Sorbsiyon izotermlerinin teorik incelenmesi aşağıda ele alınacaktır. Ürün nemi ile ürün neminin bulunduğu kapiler kanalın çapı arasındaki ilişki için,

$$y_m = c_4 D^2 \quad (3.3)$$

yazılabilir. Bu ifade kapiler çap için,

$$D = \sqrt{c_4 y_m} \quad (3.4)$$

olur.

Havanın bağıl nemi;

$$\varphi = \frac{p_B}{p_{Bd}} \quad (3.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Kurutma için havanın buhar basıncının ürün neminin doyma basıncından daha küçük olması  $p_B < \hat{p}_{Bd}$  gerekir. Bu iki basıncın eşitlenmesine dek kurutma devam eder ve burada sonuçlanır.

$$p_B = \hat{p}_{Bd} \quad (3.6)$$

Bağıl nem denkleminde buhar basıncının yerine doyma basıncı  $\hat{p}_{Bd}$  yazılabilir;

$$\varphi = \frac{\hat{p}_{Bd}}{p_{Bd}} \quad (3.7)$$

Doyma basıncı  $\hat{p}_{Bd}$  için;

$$\hat{p}_{Bd} = p_{Bd} \exp\left(-\frac{4\sigma V_s}{R_B T D}\right) \quad (3.8)$$

ve kapiler çap D için;

$$D = \sqrt{c_4 y_m} \quad (3.9)$$

yararlanılarak bağıl nem ifadesine konulduğunda,

$$\varphi = \exp\left(-\frac{4\sigma V_s}{R_B T c_5 \sqrt{y_{m,den}}}\right) = \exp\left(-\frac{c_6}{T \sqrt{y_{m,den}}}\right) \quad (3.10)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem  $y_{m,den}$  göre çözülür ise sorpsiyon izoterm denklemini

$$y_{m,den} = \left( \frac{c_6}{T \ln \frac{1}{\phi}} \right)^2 \quad (3.11)$$

bulunur. Burada ürüne göre değişen  $c_6$  sabit değerleri bilindiğinde sorbsiyon izotermi teorik olarak hesaplanabilir.

### 3.2 Tarım Ürünleri İle Nem Arasındaki Temel İlişkiler

#### 3.2.1. Tarım ürünlerinde suyun tutulma şekilleri ve etkili olan unsurlar

Tarım ürünleri ve onlardan üretilen ikincil ürünlerin tüm özellikleri, içerdikleri su miktarına ve buldukları ortamın sıcaklığına yakından bağlıdır. Ürünün içerdiği su dikkate alınmadan hiçbir fizikomekanik özelliği belirlenemez [13].

Tarım ürünlerinde bulunan suyun etkilediği önemli unsurlardan biri ürünün depolanabilme süresidir. Az su içeren ürünler daha uzun süre depolanabilmektedir. Bazı tarım ürünlerinin 1 ve 5 yıl süreyle saklanabilmeleri için sahip olabilecekleri en yüksek nem düzeyleri, Tablo 3.1 de görülmektedir.

Tablo 3.1 Bazı tarım ürünlerinin depolanabilmeleri için uygun nem miktarları

Ürün	Depolama için izin verilen en yüksek nem (% yb)	
	Saklama süresi: 1 yıl	Saklama süresi: 5 yıl
Arpa	13	11
Ayçiçeği	9	-
Bezelye	17	-
Buğday	13-14	11-12
Çeltik	13	-
Dan	13	10-11
Mercimek	14	-
Mısır	13	11
Soya fasulyesi	13	10
Yer fıstığı (kabuklu)	7	-
(kabuksuz)	9	-
Yulaf	13	10-11
Ot	20-25	10-15

Depolama sırasında, ürünün içerdiği suyun yanı sıra, ortam sıcaklığının etkisi de dikkate alınmalıdır. Örneğin, yığın içindeki nem dağılımı tekdüze ve yığın içi sıcaklık düşükse, yüksek nem içeriğine sahip ürünlerde belirli bir süre bozulmadan saklanabilir. Öte yandan, taneler uygun nem düzeyinde olsalar dahi, yığın içindeki sıcaklık dağılımı tekdüze değilse, ılık ve serin kısımlar arasında konveksiyon yoluyla oluşan hava akımına bağlı olarak, ılık bölgelerdeki üründen alınan nem, serin bölgelerdeki tanelere taşınır. Bu bölgelerdeki tanelerin artan su içerikleriyle birlikte bozuşma riskleri de fazlalaşır.

Tarım ürünlerinde bulunan su miktarı çokluğunun uygulamada ortaya çıkardığı bazı önemli sonuçlar, aşağıda belirtilen şekilde özetlenebilir;

Üründeki su miktarı artıkça, mikroorganizmaların, böceklerin, küf ve mantarların gelişmesi hızlanır. Bu nedenle üründeki kimyasal ve fiziksel değişimler hızla artar.

Üründeki su miktarı artıkça, hacim ağırlığı azalır. Bu nedenle, depolama veya taşıma sırasında aynı miktardaki kuru ürüne göre daha fazla yer ve hacim gereksinimi doğar.

Ürünün içerdiği su miktarındaki artış, akıcılığını azaltır ve elevatörler yardımıyla iletimi zorlaştırır.

### **3.2.1.1. Tarım ürünlerinde suyun tutulması**

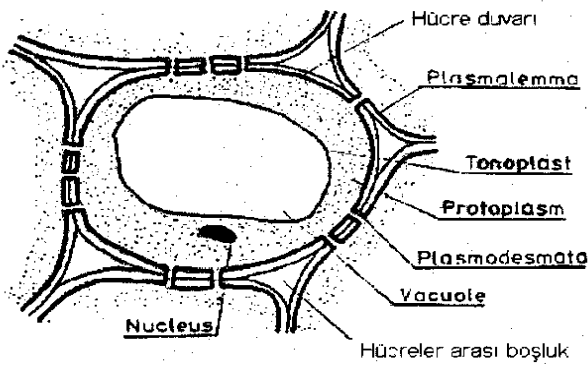
Kurutma tekniği açısından herhangi bir materyalde bulunan su “bağlı nem”, “bağsız nem” ve “serbest nem” olarak üç ana grupta toplanır. Her materyalin içinde bulunduğu hava koşullarına bağlı olarak içerebileceği belirli bir nem miktarı vardır. Materyalin içinde bulunduğu hava şartlarında içerebileceği kadar suyu bulundurması durumundaki nemine, “denge nemi” adı verilir. Bir materyal denge neminin en küçük değerine çevre havası bağıl neminin %0 ve en yüksek değerine de çevre havasının bağıl nemi %100 olması durumunda ulaşır. Bu değerler sırasıyla “en küçük denge nemi” ve “en büyük denge nemi” şeklinde tanımlanabilir. Bu durumda en küçük ve en büyük denge nemi değerleri arasındaki nem bağıl nemi, bulunan

şartlardaki denge nemi ile en yüksek denge nemi arasındaki nem değerleri serbest nemi, en yüksek denge neminden daha fazla olan nem ise bağımsız nemi oluşturur.

Tarım ürünlerinde bulunan su da yukarıda belirtilen üç ana grup içinde ele alınabilir. Tarım ürünleri özel konumuzu oluşturduğundan, bu ürünlerde suyun nerelerde ve nasıl tutulduğunu daha yakından incelersek, söz konusu ürünlerdeki suyun, bitki özsuyu ile çevre koşullarına bağlı olarak değişen miktarlardaki ek sudan oluştuğu görülür.

Bitki özsuyu, biyolojik yapıya bağlı olarak hücre içinde bulunur. Özsuyun tutulduğu kısımların daha iyi anlaşılabilmesi için, bitkisel hücre yapısına ilişkin bilgilerin hatırlanmasında yarar vardır.

Bitki dokuları, genel olarak 0,025-0,25 mm uzunluğunda, 4-30 yüzeyle prizmalar şeklinde hücrelerden oluşur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Bitki dokusu ve hücresi

Hücreler birbirlerine pektinli maddelerle bağlanır. Komşu hücreler arasında çapları 20-70 nm arasında değişen kılcal kanallar bulunur. Komşu hücreler birbirlerine değdikleri hücre duvarlarındaki bu gözenekler yardımıyla sürekli madde alışverişinde bulunurlar. Komşu hücreler arasında gaz alışverişini sağlayan yaygın bir hava ağı vardır. Hücre dışı zarı hücrenin sınırını oluşturur. Hücre duvarı da denilen bu zar pektit bir dolgu maddesinin içinde sıralanan selüloz iplikçiklerden

meydana gelir. Hücre duvarı su v.b mol ağırlığı düşük olan sıvı bileşikler için geçirgen özellik gösterir. Aynı dokunun daha da pekleşmiş şekli, ikinci zar olarak ilk zarın hemen altında bulunur. İkinci zarın hemen altında , genellikle 7,5-10 nm kalınlığında hücre eti zarı “plasmalemma” bulunmaktadır. Bu zar su moleküllerini geçirir, diğer moleküllerin geçişinde ise seçici bir geçirgenlik gösterir.

Hücre eti (Protoplasma), pelte kıvamında bir yapıya sahiptir. İçinde nükleus, nükleolis, kloroplast ve çeşitli diğer mikroskopik unsurları bulundurur. Hücre etinin altında irice bir hücre boşluğu zarı "tonoplast" bulunur. Bu zarın altında bulunan hücre boşluğu (vakuol), % 95 den fazlası sudan oluşan şeker ve diğer organik bileşiklerin eriyiklerini ve mineral maddeleri içeren ince kıvamlı pelte şeklindeki hücre suyuyla doludur. Hücre suyunun en çok bulunduğu yer hücre boşluğudur. Hücre eti ve diğer kısımlarda da bir miktar su bulunmaktadır. Bu kısımlardaki suyun uzaklaştırılması çok zordur ve ancak özel şartlarda gerçekleştirilebilir. Hücre boşluğundaki suyun buharlaşması ise daha kolaydır. Kuruma sırasında buharlaşan hücre özsuyunun esasını, hücre boşluğunda bulunan su oluşturur.

Biyolojik materyallerde çevre koşulları nedeniyle ek olarak bulunan su, çoğunlukla moleküller arası kuvvetler ve kılcal kuvvetler aracılığıyla olmak üzere iki yolla tutulur. Her ikisi arasında önemli farklılıklar vardır.

Bir materyalin tam anlamıyla kuru olduğu durumdan başlayarak suyun tutulması inceliginde, ilk başlarda tutunmanın moleküler kuvvetler aracılığıyla gerçekleştiği görülür. Bu şekilde tutulan suya "Adsorbe Su" adı verilir. Materyal belirli neme ulaştıktan sonra, granüller arasındaki ve materyal içindeki boşluklarda, kılcal kuvvetler yardımıyla su tutulmaya başlar. "Absorbe Su" adı verilen bu su, serbest suyun özelliklerini gösterir. Suyun tutunduğu materyalin molekülleri, absorbe su için taşıyıcı bir yapı oluşturmanın ötesinde bir göreve sahip değildir.

Adsorbe sırasında, su molekülleri ile tutunduğu maddenin molekülleri arasında çok yakın bir ilişki vardır. Birinin özellikleri, diğerininkileri etkiler. Bu yakın ilişkiden ötürü, olayı tanımlamak için "Sorpisyon" terimi kullanılır. Genel olarak, materyalin



sorpsiyon yoluyla sahip olduğu suyun artısı "Adsorpsiyon". azalışı ise "Desorpsiyon" terimleriyle belirtilir.

Adsorbe su, moleküler çekim kuvvetleri nedeniyle materyal tarafından, hücre duvarlarına daha yakın tutulur. Su molekülleri, hücre duvarı etrafında, kat kat tabakalar halinde sıralanır.

İlk tabaka en büyük kuvvetle adsorbe edici yüzeye çekilir. Bu nedenle, materyalden ayrılması en zor olan bu tabakadaki sudur. Diğer tabakalarda yüzey arasında, su moleküllünün çapı ile tabaka sayısının çarpımı kadar mesafe vardır. Su molekülleri ile adsorbe edici yüzey arasındaki uzaklık arttıkça, moleküler çekim, dolayısıyla tutunma kuvvetleri azalır. Moleküler kuvvetler, çekim kuvvetiyle orantılı olarak, su moleküllerinin sıkıştırıcı bir basınç altında tutar. Bundan ötürü suyun yoğunluğu artar ve sistemde basınç gelişir. Materyalin hacmi su adsorpsiyonu sonucu artar. Bu hacim artışı kazanılan suyun hacminden daha küçüktür. Örneğin, bir birim hacim su adsorbe edildiğinde, materyalde oluşan hacim artışı bir birimden daha az olmaktadır. Bunun nedeni, yukarıda belirtilen çekim kuvvetlerinin yarattığı basıncın etkisidir.

Bir yüzey üzerine su buharı adsorbe edildiğinde, "Adsorpsiyon Isısı" adı verilen bir miktar ısı çevreye verilir. Adsorbe edilen su buharı ayrılırken de materyal tarafından bir miktar ısı çevreden alınır. Buna da "Desorpsiyon Isısı" adı verilir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon ısılarının değeri, su buharı ile adsorbe maddesi yüzeyi arasındaki moleküler tutma enerjisinin bir belirtisidir. Adsorpsiyon ısısının değeri, su buharının ve materyalin özelliklerine bağlı olarak "840-1680 kJ/kg su" arasındadır. Desorpsiyon ısısı, adsorpsiyon ısısından bir miktar fazladır. Desorpsiyon sırasında sisteme verilmesi gereken ısının değeri, serbest suyun buharlaşması için verilmesi gereken enerjiden ( $2385 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) daha fazladır.

Adsorbe edilen suyun özellikleri, serbest suyunkinden farklılık gösterir. Bu farklılıklardan bazıları,

1. Adsorbe edilen suyun pratik olarak eritme özelliğinin olmayışı,
2.  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  den daha düşük derecelerde donması,
3. Elektrik iletkenliğinin çok düşük olması,

#### 4. Yüksek frekans kuvvet alanlarında değişik davranış göstermesi

olarak sıralanabilir.

Tarım ürünlerinde absorbe edilen su, selüloz yapısı içinde yer alan kılcal (kapiler) boşluklarda bulunur. Kılcal absorpsiyondan söz edilebilmesi için su, bu kılcal boşluklar içinde, yalnızca yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisiyle tutulmalıdır. Herhangi bir bünyenin içindeki boşlukların, kılcal boru olarak tanımlanabilmesi için, içinde bulunan sıvının üst yüzeyindeki eğriselliğin oluşumunda, kılcal çekim kuvvetleri (kapiler kuvvetler) önemli etkiye sahip olmalı, yer çekimi ihmal edilebilmelidir. Kılcal borucuklarda en büyük yarıçap  $10^{-5}$  m kadardır. Kılcal boruların içindeki sıvının ulaşabildiği yükseklik (h) ıslaklığa ve kılcal basınca bağlıdır. Borunun iç yarıçapı ile kılcal basınç arasında ters bir ilişki olduğundan, aynı ilişki, sıvı yüksekliği ile boru yarıçapı arasında da geçerlidir. Bir başka söyleyişle, yarıçap azaldıkça, sıvının boru içinde ulaştığı yükseklik artar.

Kılcal borularda, su vb. ıslatan sıvıların üst yüzeyleri içbükeydir. Yan çapı  $10^{-7}$  m' den daha küçük olan borucuklarda, bu kavisli yüzeyi oluşturan suyun doymuş buhar basıncı, aynı sıcaklıktaki düz yüzeyli serbest su tabakasının yüzeyindekinden daha düşüktür. Bu etki aşağıda verilen Kelvin eşitliği ile belirtilebilir.

$$\ln \phi = -2 \sigma M \ / r d R T \quad (3.12)$$

3.12 numaralı eşitlikte yer alan  $\phi$ , bağıl nemi;  $\sigma$ , sıvının yüzey gerilimini ( $\text{Nm}^{-1}$ ); r, kılcal borunun yarıçapını (m); M, sıvının molar kütleini ( $\text{kg kmol}^{-1}$ ); d, sıvının yoğunluğunu ( $\text{kg}\backslash\text{m}^{-3}$ ); R , gaz sabitini ( $\text{J}\backslash\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) ve T ise mutlak sıcaklığı (K) belirtmektedir.

Kılcal borucuklarda tutulan suyun buhar basıncı ile serbest su yüzeyindeki buhar basınçları arasında kılcal çekim kuvvetlerinden dolayı ortaya çıkan farklılık,  $10^{-7}$  m' den daha büyük yarıçaplı borularda ortadan kalkmaktadır. Bu nedenle, belirtilen değerden daha büyük çaplı kılcal borulardaki suyun doymuş buhar basıncı, serbest suyunkiyle eşit alınabilir. Kılcal borularda tutulan suyun buhar

basıncının kılcal boru çapına göre farklılık göstermesi nedeniyle, Luikov, kılcal boruları, yarıçapı  $10^{-7}$  m' den büyük olanları "makrokapiler", küçük olanları ise "mikrokapiler" olmak üzere ikiye ayırmaktadır. Luikov, makrokapiler borucukların sadece suyla doğrudan temasta olduklarında suyla dolu olabileceklerini, oysa mikrokapiler borucukların içinde tek veya çok katlı olarak suyun sıvı yada buhar fazında tutulabileceğini ve su veya buharın gelişigüzel moleküler hareketlerle difüzyon yoluyla bu ortamda iletilebileceğini belirtmektedir. Benzer olarak Kavkazov da, makrokapiler borucukların nemli havadan su absorbe edemeyeceğini buna karşılık havaya nem verebileceğini belirtmektedir.

Bazı araştırmacılar kurutulmuş materyalleri "nem tutan", "kısmen nem tutan" ve "nem tutmayan" olmak üzere üç gruba ayırır. Bu ayırım da nem tutmayanlarda kılcal boru yarıçaplarının  $10^{-7}$  m' den büyük, nem tutanlarda ise  $10^{-7}$  m' den küçük olduğu söylenebilir.

Absorbe ve adsorbe edilen suyun dışında, bazı materyallerde, bir miktar su da kimyasal birleşme yoluyla tutulabilir. Bu da bir çeşit adsorbsiyondur. Daha önce belirtilen, moleküler çekim kuvvetleri tarafından oluşturulan adsorbsiyonla farkını belirtmek için, önceki "Fiziksel" bu ise "Kimyasal" adsorbsiyon olarak adlandırılır. Kimyasal adsorbsiyonda su, materyalin adeta bir parçası haline gelir. Sistemde çok büyük kimyasal kuvvetlerle tutulduğundan ayrılması da çok güçtür. Buna karşılık fiziksel adsorbsiyonla tutulan suyun tutulma enerjisi çok daha küçük olduğundan, bu suyun ayrılması daha kolaydır. Rebinder, kimyasal adsorbsiyonla bağlı 1 mol suyun ayrılması için gereken enerjinin  $5000 \text{ J mol}^{-1}$ , fiziksel adsorbsiyonla bağlı 1 mol suyun ayrılması için gereken enerjinin ise  $100 \text{ J mol}^{-1}$  kadar olduğunu belirtmektedir. Genellikle fiziksel ve kimyasal adsorbsiyon aynı zamanda meydana gelirler.

Tarım ürünlerinde suyun tutulma biçimlerini incelediğimizde, yukarıda anlatılan her tür tutulma şeklinin yer aldığı bir çeşitlilikle karşılaşırız. Bu ürünlerde su, serbest durumdaki sudan, organik moleküllerin içsel parçalarında yer alan kimyasal suya kadar çeşitli biçimlerde tutulmaktadır. Tutulan suyun miktarında birçok unsur etki etmektedir. Bunlar arasında ürünün cinsi, çeşidi, olgunluk durumu, bozuşma durumu, yağ, protein,

nişasta, glüten, selüloz vb. maddeler içeriği, ortamın sıcaklığı ve bağıl nemi önemlileri olarak sayılabilir.

### 3.2.2. Tarım ürünlerinde denge nemi kavramı

Herhangi bir ortamda bulunan su molekülleri sürekli olarak faz değişikliği eğilimi gösterir ve özellikle buhar fazına gelmeye çalışırlar. Ele alınan herhangi bir materyaldeki su molekülleri, buhar fazına geçerek çevre havasına katılırken, havada buhar halinde bulunan su molekülleri de sıvı faza dönüşerek materyale geri dönebilirler. Bu sürecin hızı, başta ortam sıcaklığı olmak üzere çevre faktörlerine yakından bağlıdır. Bu nedenle katı, sıvı veya buhar fazlarından herhangi birinde bulunan su moleküllerinin, ortam sıcaklığına bağlı olarak belli bir buhar basıncı değerine sahip olacağı söylenebilir. Belirli bir ortamdan bir başkasına su moleküllerinin geçişinde, bu iki ortamın sahip oldukları buhar basıncı değerleri arasındaki fark etkili olmaktadır. Bu fark ortadan kalktığında, iki ortam arasında denge kurulur ve ortamlardaki su ve su buharı miktarları değerleri, durağan hale gelir [13].

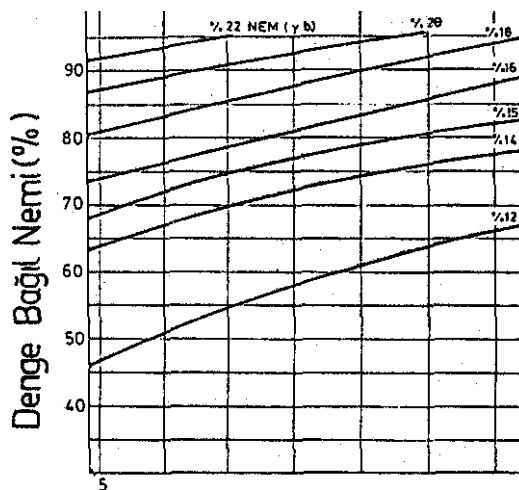
İçlerinde su bulunduran tüm maddeler, belirli bir ortama konulduklarında yukarıda açıklanan nedenle ya ortama su verirler, veya ortamdaki su alırlar. Tarım ürünleri de su içerdiklerinden içinde buldukları çevre ile yukarıda özetlenen nedene bağlı olarak nem alış verişinde bulunurlar. Ürünün bünyesinde bulunan suyun buhar basıncı, çevre havasında bulunan su buharının kısmi buhar basıncından büyükse, üründen çevreye su buharı verilir. Ters durumda ise çevre havasında ürüne su buharı geçişi meydana gelir. Bu nem geçişleri her iki ortamın buhar basınçları eşitlenene kadar devam eder. Denge durumu oluştuğunda, ürünün nem değerindeki değişiklikler sona erer. Ancak bu durumdan ürün ile çevre arasında su buharı ve nem alışverişinin tam anlamıyla sona erdiği yargısı çıkarılmamalıdır. Her iki ortam arasında, nem değerinde belirlenebilen bir farklılık yaratmadan sürüp giden karşılıklı bir nem alış verişidir. Bir başka söyleyişle oluşan denge statik değil dinamik bir denge durumudur. Bulunduğu ortamdaki koşullara göre dengeye gelen ürünün nem değeri “Denge nemi”, ortam havasının o sıradaki bağıl nemi ise “Denge bağıl nemi” olarak adlandırılır. Literatürde genellikle DBN yerine su aktivitesi kavramı

kullanılmaktadır. Sonuç olarak DBN ile su aktivitesi aynı kavramları karşılamaktadır.

Donma noktasının üzerindeki herhangi bir sıcaklıktaki serbest saf suyun  $S_a$  değeri 1,0 dır. Bu nedenle, besinlerin  $S_a$  değerleri 0 ile 1,0 arasında değişir. Örneğin, meyve, sebze, et vb. yüksek nemli besinlerde  $S_a$  değeri 0,97 den fazla, orta nemli besinlerde 0,6-0,9 arasında ve kuru ürünlerde ise 0,6 dan daha azdır.

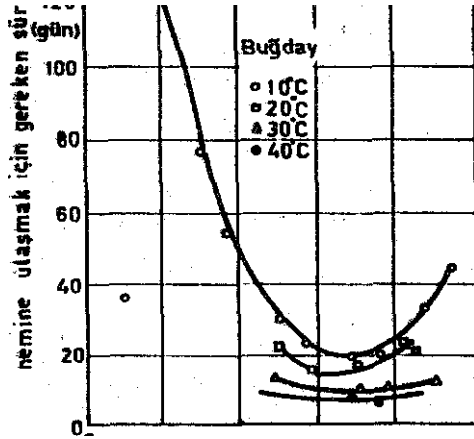
Becker ve Sallans, özellikle yapay olarak kurutulan ürünlerde, dış tabakalardaki nem miktarının iç kısımlardakine göre hızla değiştiğini, iç kısımların daha nemli, dış kısımların ise daha kuru olduğunu, bu nedenle de ürünlerin depolanması sırasında statik denge neminin oluşma sürecinde, iç tabakalardan dış tabakalara doğru bir nem difüzyonu ortaya çıktığını belirtmektedirler.

Tarım ürünlerinin belirli sıcaklık ve bağıl neme sahip ortamlarda ulaşacağı  $N_d$  (denge nemi) değerinin bilinmesi, kurutma ve depolama işlemleri sırasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle, çoğu tarım ürünleri ile onlardan üretilen bazı diğer ürünlerin (un, nişasta vb.) belirli sıcaklık ve bağıl nem koşullarında ulaşacakları  $N_d$  değerleri belirlenmiştir. Tanelenmiş mısırın çeşitli sıcaklık ve bağıl nemdeki ortamlarda ulaşacakları denge nemi değerleri Şekil 3.3 de görülmektedir.



Şekil 3.3 Tanelenmiş mısırın denge nemi eğrileri

Ürünlerin statik koşullarda denge nemi değerine ulaşmaları oldukça uzun sürmektedir. Örneğin, tam anlamıyla kuru durumdaki buğdayın, bağıl nemin bir fonksiyonu olarak denge nemine ulaşmaya kadar geçen sürenin uzunluğu Şekil 3.4 de görülmektedir.



Şekil 3.4 Buğdayın DBN ne bağlı olarak denge nemine ulaşması için gerekli süre

Ürünün bulunduğu ortamın sıcaklığı, bağıl nemin değerini ve bu nedenle de çevre havasının su buharı kısmi basıncını etkilemektedir. Üründeki su buharı basıncı ile çevrenin su buharı kısmi basıncı arasındaki fark, denge nemini belirleyen unsurdur. Sıcaklığın, buhar basıncı değerleri üzerinde etkili olması nedeniyle, denge neminin oluşmasında dolaylı, ancak önemli bir etkisi vardır. Yapılan çalışmalar sıcaklık ile buhar basıncının logaritması arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu ortaya koymuştur.

Tarım ürünlerinin farklı sıcaklık ve bağıl nem koşullarında ulaşacakları  $N_d$  değerinin önceden kestirimi, kurutma veya depolamayla ilgili diğer unsurların belirlenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle çeşitli tarım ürünlerinin ulaşacakları  $N_d$  değerlerinin hesaplanabilmesi için bir takım deneysel eşitlikler geliştirilmiştir. Bu eşitliklerin tümü  $N_d$  ile ortam havasının bağıl nemi ve sıcaklığı arasındaki ilişkiler dikkate alınarak düzenlenmişlerdir. Bunun nedeni, daha önce de belirtildiği gibi, ortam sıcaklığının su buharının kısmi basıncını etkilemesidir. Ortamın kısmi buhar basıncı ise yüzeye birim zamanda çarpan su molekülü sayısını ve dolayısıyla yüzeyde tutulabilecek molekül sayısına etki etmektedir.

Tahıl ve benzeri ürünlerin denge nemi değerlerini belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiş bir çok eşitlik bulunmaktadır. Zamanımızda, tarım ürünlerinin farklı sıcaklık ve denge bağıl nemi koşullarında ulaşacağı denge nemi değerlerinin belirlenmesinde, "Henderson" tarafından önerilen eşitliğin geliştirilmiş şekli ile, "Chung" tarafından önerilen eşitlikler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geliştirilmiş HENDERSON eşitliği

$$N_d = \frac{\sqrt[n]{\frac{\ln(1-\phi)}{-K(T+C)}}}{100}$$

$$\phi = 1 - \exp[-K(T+C)(100N_d)^n]$$

CHUNG eşitliği

$$N_d = E - F \ln[-(T+D) \ln \phi]$$

$$\phi = \exp\left(\frac{-A}{T+D} \exp(-BN_d)\right)$$

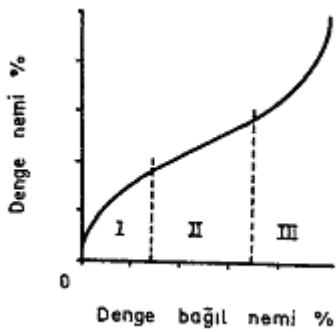
Bu eşitliklerde,  $N_d$ , denge nemini ;  $\phi$ , bağıl nemi; T, sıcaklığı (°C) ifade etmektedir.

Tablo 3.2. Henderson ve Chung eşitlikleri için gerekli katsayıları

Ürün	A	B	C	D	E x 10 <sup>-5</sup>	F x 10 <sup>-6</sup>	K x 10 <sup>-5</sup>	n
Arpa	761.66	19.889	195,267	91,323	33363	50279	2,2919	2,0123
Baklagil, yemelik	962.58	15.975	254,23	160,629	43001	62596	2,0899	1,8812
Buğday (Durum)	921.61	18.077	70,318	112,350	37761	55318	2,5738	2,2110
Buğday, sert	529.43	17,609	55,815	50,998	53616	56788	2,3007	2,2857
Buğday, yumuşak	726,49	23,607	64,346	35,667	27908	42336	1,2299	2,5558
Çeltik	594.61	21,732	51,161	35,703	29394	46015	1,9187	2,4451
Mısır, tane	312.30	16,958	49,810	30,205	33872	58970	8,654	1,8634
Sorgum	1099.67	19,644	113,725	102,840	35649	50907	0,8532	2,4757
Soya	928.30	13,917	134,136	100,288	41631	71853	30,5327	1,2164
Yerfıstığı, kabuksuz	254,90	29,243	50,561	33,892	18948	34196	65,0413	1,4934
Yerfıstığı, kabuklu	522.01	37,903	23,318	12,354	16510	26383	6,6587	2,5367

### 3.3. Tarım Ürünlerinde Sorbsiyon İzotermi ve Özellikleri

Sıcaklık sabit kalmak şartıyla, farklı bağıl nem koşullarında ürünün ulaştığı  $N_d$  değerleri, havanın bağıl neminin bir fonksiyonu olarak bir koordinat sistemine işaretlendiğinde, ürünün “Sorpsiyon İzotermi” olarak adlandırılan önemli bir özelliği elde edilir. Ürünlerin sorpsiyon izotermi genellikle düzgün bir sigmoid şeklindedir.



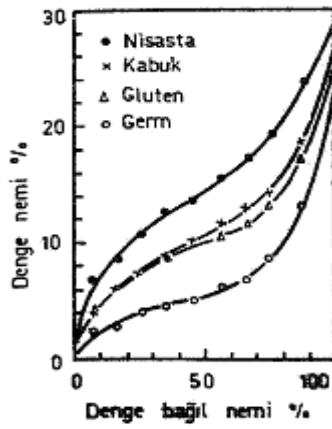
Şekil 3.5. Nem adsorbsiyon izotermi



Şekil 3.5 ten görüldüğü gibi izoterm eğrisi düşük nem değerlerinde denge bağıl nemi eksenine göre içbükey (I), orta nem değerlerinde yaklaşık olarak doğrusal (II), yüksek nem değerlerinde ise dışbükey (III) bir eğilim gösterir. I numaralı bölgenin, hava bağıl neminin %0-20 olduğu, II numaralı bölgenin bağıl nemin %20-60 olduğu ve III numaralı bölgenin ise bağıl nemin %60 dan fazla olduğu bölümlerde yer aldığı görülmektedir. B.E.T. (Brunauer-Eumelt-Teller) çok tabakalı adsorpsiyon teorisine göre, eğrinin içbükey olduğu bölüm, materyalin yüzeyine su moleküllerinin ilk tabakasının adsorbe edilmesini; doğrusal bölüm, su moleküllerinin ikinci tabakasının ve eğrinin son kısmı ise öteki tabakaların adsorbe ve absorbe edilmesini temsil eder.

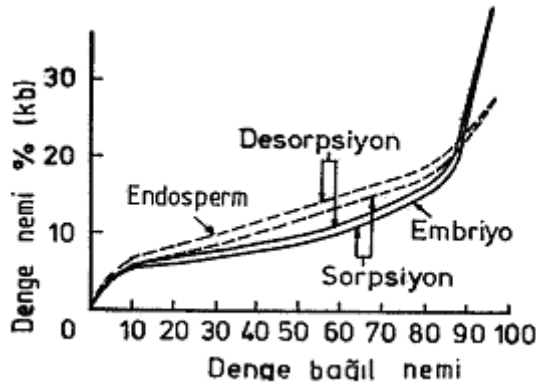
İzotermin bu üç bölümünün her birinde buhar basıncı ile nem oranı arasındaki ilişkiler, birbirinden farklıdır. İzotermin ilk bölümünde su buharı ile nem arasındaki ilişkiyi, su molekülleri ile adsorbe eden yüzey arasındaki bağlayıcı enerji belirler. Bu enerji, suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra, tutunduğu yüzeye ve onun kimyasal yapısına bağlıdır. Suyun bir tek molekül tabakası şeklinde tutulduğu bu bölgede, tutunma kuvvetleri en yüksektir. Kurutma sırasında bu suyun uzaklaştırılması oldukça zordur. İzotermin nem oranı ekseninden ayrılma miktarı, su molekülleri ile adsorbe eden yüzey arasındaki bağlayıcı enerjinin göstergesidir. İzotermin oldukça doğrusal olan orta bölümünde, su molekülleri, ilk tabakayı oluşturmuş su moleküllerinin üzerine birikir. I. bölgedeki suya göre, tutunma kuvvetlerinin şiddeti daha düşüktür. Bu bölgede etkili olan, suyun kondensasyon enerjisidir. Adsorbe olan su miktarı ile su buharı basıncı arasında sıkı bir ilişki vardır. Su buharının, adsorpsiyonun kinetiğiyle ilgisi üzerindeki çalışmalar, adsorpsiyon hızının, öncelik sırasıyla, buhar basıncına, materyalin ilk nemine ve sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir. İzotermin yüksek nem oranlı üçüncü bölümünde, su molekülleri, ikinci tabakanın üzerine, birbirini izleyen üçüncü, dördüncü vb. tabakalar halinde sıralanır ve kılcal borucuklarda su toplanmaya başlar. Eğrinin bu bölgesinde su moleküllerinin birikmesi, kılcal kondensasyonun etkisindedir. Her tabakada biriken su molekülleri, daha önceki tabakada biriken molekülleriyle hemen hemen aynı özelliği gösterir. Bundan ötürü, izotermin belirlediği bu bölgede tutulan su miktarı hızla arttığı halde, sistemin buhar basıncındaki artış çok daha yavaştır. İzotermin en ilginç bölümü ilk kısmıdır. Bu bölgenin, adsorbe edici yüzey ile su molekülleri arasındaki ilişkiyi kuran kuvvetleri

tanımladığı kabul edilir. İzotermin bu bölgesinde, eğrinin nem eksenine doğru yaklaşma miktarı, moleküller arası kuvvetlerin şiddetinin bir göstergesidir. Yaklaşma ne kadar fazla ise su ile yüzey molekülleri arasındaki çekim kuvvetleri de o denli büyüktür. Bu durum ayrıca, suyun ürün tarafından düşük buhar basıncı ortamında, kimyasal sorpsiyon yoluyla adsorbe edilmesi olasılığını da içermektedir. Değişik tarım ürünlerine ait izotermlerin birbirlerinden farklı olmalarının yanı sıra, aynı ürünün içerdiği yağ, protein ve karbonhidrat polimerlerinin adsorpsiyon izotermleri de farklılık göstermektedir.



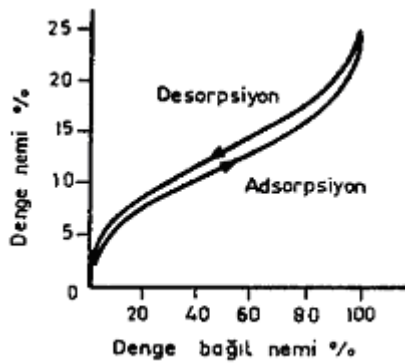
Şekil 3.6. Mısır tanesinde çeşitli unsurların adsorpsiyon izotermleri

Özellikle tahıl tanelerinin biyolojik yapıları nedeniyle, tüm yüzeylerindeki her bölgenin adsorpsiyon ve desorpsiyon hızları birbirine eşit olmayabilir. Tanenin embriyo kısmındaki sorpsiyon ve desorpsiyon hızları, diğer bölümlerinkinden daha fazladır. Genel olarak denge nemi durumunda, tanenin germ kısmındaki nem oranı, tüm tanenin ortalama neminden daha yüksektir. Şekil 3.7 da mısır tanesinin germ ve endosperm kısımlarının sorpsiyon ve desorpsiyon eğrileri görülmektedir.



Şekil 3.7 Mısır tanesinin germ ve endosperm kısımlarının denge nemleri

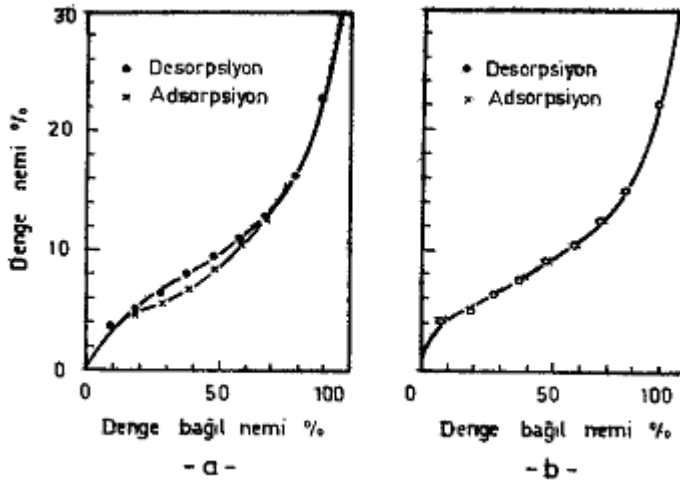
Nişasta ve selüloz gibi karbonhidrat polimerlerine ait nem sorpsiyon izotermi düzgün sigmoid şeklindedir. Bu gibi maddelerin adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermine ait eğrilerin birbirinin aynısı olması gerekmez. Birçok maddede olduğu gibi tahıllar ve onlardan yapılmış ürünlerin desorpsiyon izotermi, adsorpsiyon izoterm eğrisine göre bir miktar sola kaymıştır. (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Adsorpsiyon ve desorpsiyon izotermi

Bu şekilden de görüldüğü gibi, her bağıl nem değerinde materyalin ulaşacağı nem oranı, su alma ve su verme durumlarına göre birbirlerinde farklı olacaktır. Tahıl ve ürünlerinin su kaybetme durumlarında ulaştıkları denge nemli değeri, aynı şartlarda su alma durumunda ulaşacağı değerden daha yüksektir. Bu oluşum "histerisiz" olarak adlandırılır. Histerisiz nedeniyle ele alınan herhangi bir bağıl nem koşulunda materyalin denge neminde su alma ve su verme durumlarına göre % 1,5-2 kadar bir

fark görülebilir. Aynı materyalin tekrarlı olarak su alması ve vermesi durumunda histerisiz artmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Buğdayda adsorpsiyon ve desorpsiyonun 50 C tekrarlanması durumunda histerisizin azalması ( a-1 kez b-3 kez )

Ortam sıcaklığının artışı da histerisizin azalmasına neden olmaktadır. Tarım ürünlerinde karşılaşılan histerisizin nedeni tam olarak belirlenememiştir. Bu konuda geliştirilmiş bir çok teori bulunmaktadır.

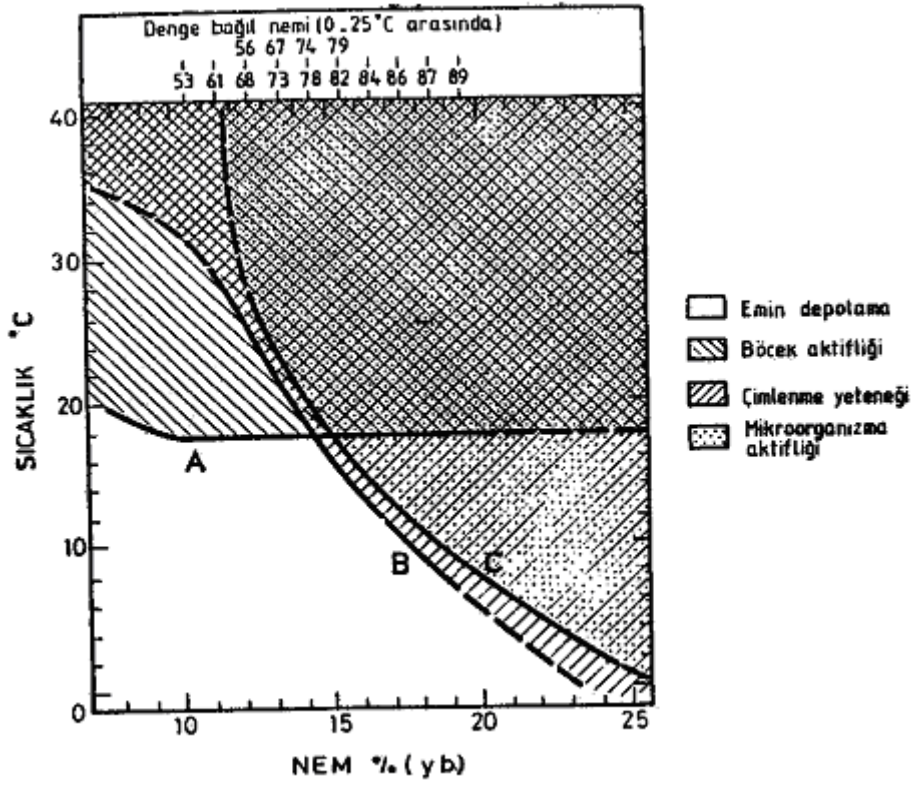
Sorbsiyon izotermi den yararlanarak materyalin nem durumunu daha iyi değerlendirebilmek için, daha önce materyale su alma ve su verme işlemlerinden hangisinin uygulandığını bilmek gerekmektedir.

Sorbsiyon izotermi belli bir sıcaklıkta ürünün ulaştığı denge nemlerini, DBN' nin bir fonksiyonu olarak verdiği için, ürünlerin depolanması veya kurutulması sırasında yararlı olacak bilgileri içerir. Adsorpsiyon izotermi kuru ürünlerin depolanması: desorpsiyon izotermi ise yaş ürünlerin kurutulması için gerekli bilgileri taşır.

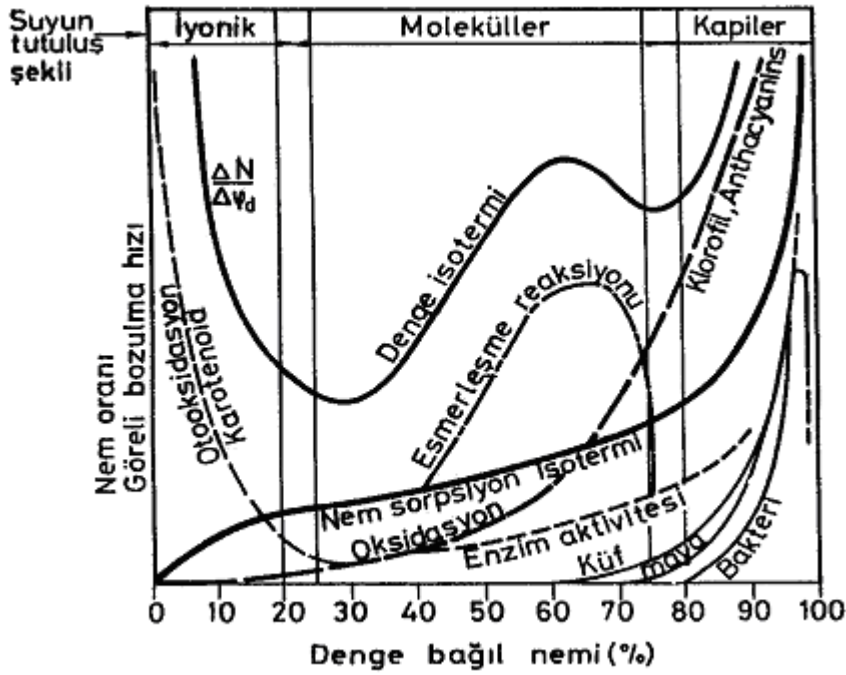
Depolama sırasında ürünün neminden çok ortamdaki DBN önem taşımaktadır. Bu değer ulaşılabilecek nem miktarını gösterdiğinden, ürün üzerinde bulunan mikroorganizmaların depolama sırasında ne yönde gelişme gösterebileceklerine dair tahmin olanağı verir. Şekil 3.10' da tahıllar için tane nemi, denge bağıl nemi ve ortam sıcaklığına bağlı olarak

hazırlanmış çimlenme yeteneği, böcek ve mikroorganizmaların aktif olduğu durumlar belirtilmiştir.

Besin maddelerinde denge bağıl nemine (su aktivitesi) bağlı olarak çeşitli etkenler nedeniyle meydana gelen bozulmaların göreceli hızlarının değişimleri Şekil 3.11' de görülmektedir.



Şekil 3.10 Tahıllarda nem, DBN ve sıcaklığın depolama özelliklerine etkisi



Şekil 3.11 Besin maddelerinde DBN' ne bağlı olarak çeşitli etmenlerin neden olduğu bozulmaların göreceli değişim hızları

Şekil 3.11 dan % 75 DBN değerinden itibaren küflerin aktifliğinin arttığı görülmektedir. Bu nedenle, depolama ortamının DBN değeri %75 in altında tahıl gibi ürünlerde ise %70 ve daha düşük değerlerde olmalıdır. Depolanacak ürünün adsorpsiyon izoterm eğrisinden %70-75 DBN değerlerindeki  $N_d$  değeri belirlenir. Depoya koyulacak ürünün neminin depoya bu nemden fazla olmamasına dikkat edilir. Tahılların % 70 DBN değerindeki denge nemi değerleri arasında çok büyük farklılık yoktur. Bu sınırlardaki denge nemleri, genellikle yaklaşık olarak % 12-14,5 (yb) arasında değişir. Yağlı tohumlarda ise bu değer önemli değişiklikler gösterebilmektedir.

DBN, yığın halinde depolanan ürünlerin yanı sıra paketlenmiş ürünler için de önemlidir. Bu durumda, paketleme materyalinin nem geçirgenliği önem kazanmaktadır. Eğer kap geçirgense, ortam havası ile ürün arasında bir nem alışverişi başlar. Ürünün nem oranı artar veya azalır. Bu durum, ürünün nem alıp bozulmasına veya ağırlık kaybetmesine neden olur. Kabin geçirgen olmaması durumunda, ürün ile ortam arasında nem alışverişi durur. Ancak ortam sıcaklığı ani olarak düşürülürse, kap içindeki havanın

DBN hemen yükselir ve ürün yüzeyinde su yoğuşması görülebilir. Paketlenmiş ürün yeterince düşük nemde değilse, bu durum ürünün bozulmasına neden olabilir.

Kurutma sırasında, özellikle çevre havasının ısıtılmadan olduğu gibi kullanıldığı uygulamalarda, ürünün ulaşabileceği nem, desorpsiyon izoterminden yararlanılarak önceden kestirilebilir.

### 3.4. Nemli Havanın Özellikleri

Tarım ürünleri genellikle, ya çevre havasıyla doğrudan doğruya yada bu havanın ısıtılmasıyla elde edilen sıcak hava yardımıyla kurutulurlar.

Kurutma işlemi açısından hava, kuru hava ve su buharı karışımı olarak ele alınır. Kuru hava, birtakım gazların karışımından meydana gelir. Molekül ağırlığı 28,966 gmol<sup>-1</sup> olan kuru havanın içinde bulunan başlıca gazlar, karışımın içindeki mol oranlarına göre sırasıyla, Azot (0,7809), Oksijen (0,2095), Argon (0,0093) ve Karbondioksit (0,0003) olarak sayılabilir. Bu oranlar, bulunulan yöreye göre bazı ufak değişiklikler gösterebilir.

Nemli havanın içinde, yukarıda belirtilen kuru havayı oluşturan gazlara ek olarak, değişen miktarlarda su buharı bulunur. İçinde su buharı bulunan hava, teknik açıdan "nemli hava" olarak tanımlanır.

Kurutma işlemlerinde kullanılan havanın içinde bulunan su buharının ağırlık oranı, genel olarak 1/10 düzeyinde olmasına rağmen, havanın içinde su buharının bulunması, kuruma olayını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, nemli hava (kuru hava ve su buharı karışımı) ile ilgili bazı özelliklerin (bağıl nem, özgül nem, basınç, sıcaklık, hacim, entalpi vb.) daha detaylı incelenmesi, kurutma olgusunun kavranması ve denetimi açısından yararlı olacaktır.

Nemli havanın özelliklerinin incelenmesi "psikometri" adı verilen termodinamiğin özel bir dalının konusu olmaktadır. Kurutma tekniği açısından önemli olan bazı psikometrik kavramlar, aşağıda kısaca özetlenerek açıklanmaya çalışılmıştır.

### 3.4.1. Buhar basıncı

Nemli havanın içinde bulunan su buharı moleküllerinin kısmi basıncıdır ( $P_b$ ). Hava, içinde bulundurabileceği su buharının tamamını içerdiğinde, sahip olduğu buhar basıncı, doymuş buhar basıncı ( $P_{bs}$ ) olarak tanımlanır. Doymuş durumdaki havanın su buharı basıncı ( $P_{bs}$ )  $0 < T < 260$  °C sıcaklık şartları için aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$\ln \frac{P_{bs}}{R} = \frac{A + BT_m + CT_m^2 + DT_m^3 + ET_m^4}{FT_m - GT_m^2} \quad (3.13)$$

Eşitlikte yer alan  $P_{bs}$  , doymuş buhar basıncını ( $P_a$ );  $T_m$  , hava sıcaklığını (K); A,B,C,D,EJ,G ve R katsayıları belirtmektedir. Bu katsayıların değerleri aşağıda sıralanmıştır

$$\begin{array}{llll} A = -27405,526 & C = -0,146244 & E = -0,48502 \times 10^{-7} & G = 0,39381 \times 10^{-2} \\ B = 97,5413 & D = 0,12558 \times 10^{-3} & F = 4,34903 & R = 22\ 105\ 649,25 \end{array}$$

### 3.4.2. Bağlı nem

Bağlı nem, herhangi bir sıcaklık derecesi ve basınçtaki 1 kg kuru hava içinde bulunan su buharı miktarının, aynı sıcaklık ve basınç şartlarında, havanın su buharıyla doymuş hale gelmesi durumunda taşıyabileceği su buharına oranıdır.

Relatif Nem ve/veya Orantılı Nem olarak da adlandırılabilen Bağlı Nem , havada bulunan su buharının kısmi buhar basıncının ( $P_b$ ), doymuş durumdaki havanın kısmi buhar basıncına ( $P_{bs}$ ) oranı şeklinde de tanımlanabilir.

$$\phi = \frac{P_b}{P_{bs}} 100 \quad (3.14)$$



Yukarıda yapılan tanımlara dayanarak, incelenen havanın bağıl neminin, örneğin, %60 olması durumunda, havanın içinde bulunan su buharının, aynı koşullar altında bulunabilecek su buharının %601 olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.4.3. Mutlak nem

Herhangi bir durumda, incelenen nemli hava içinde 1 kg kuru havaya karşılık bulunan kg veya g olarak su buharı miktarına, Mutlak Nem ( $w$ ) adi verilir ( $w$ )= kg su buhar / kg kuru hava).

Özgül Nem olarak da adlandırılan mutlak nem, nemli havayı oluşturan kuru hava ve su buharının kısmi basınçları cinsinden yazılabilir. Nemli havadaki su buharı ağırlığının, karışımdaki kuru havanın ağırlığına oranı, havadaki su buharı kısmi basıncı ile suyun molekül ağırlığı çarpımının, kuru havanın kısmi basıncı ile havanın molekül ağırlığı çarpımının arasındaki orana eşittir,

$$\frac{\text{Su buharı ağırlığı}}{\text{Kuru hava ağırlığı}} = \frac{\text{Su buharı kısmi basıncı} \times \text{Suyun mol ağırlığı}}{\text{Kuru hava kısmi basıncı} \times \text{Kuru havanın mol ağırlığı}}$$

Bu durumda;

$$w = \frac{P_b 18,02}{P_h 28,97} = 0,6219 \frac{P_b}{P_h} \quad (3.15)$$

yazılabilir. Eşitlikte yer alan ( $P_h$ ), kuru havanın kısmi basıncını belirtmektedir.

Bir gaz karışımının basıncı, karışımı oluşturan gazların kısmi basınçlar toplamına eşit olduğundan, nemli havanın basıncı ( $P$ ), su buhar ile kuru havanın kısmi basınçları toplamına eşit olacaktır.

$$P = P_h + P_b \quad (3.16)$$

Bu eşitlikten yararlanılarak elde edilen ( $P_h = P - P_b$ ) değeri yukarıdaki eşitlikte yerine koyularak;

$$\omega = 0,6219 \frac{P_b}{P - P_b} \quad (3.17)$$

yazılabilir.

Mutlak nem, bağıl nem değerini içerecek şekilde yazılabilir. Daha önce belirtildiği gibi bağıl nem ( $\phi = P_b/P_{bs}$ ) şeklinde ifade edilip bu eşitlikten ( $P_b$ ) bulunur ve yukarıdaki eşitlikte yerine koyulursa;

$$\omega = 0,6219 \frac{\phi P_{bs}}{P - \phi P_{bs}} \quad (3.18)$$

elde edilir.

### 3.5. Literatür Özeti

Sorbsiyon izotermi kurutmada veya ürünlerin neme doyurulmasında çok önemli bir modeldir. Bu çalışmada orta nemli ürün olan numune olarak muz kullanılmıştır ve 5 farklı sıcaklıkta deneyler yapılmıştır. Yapılan bütün deneyler kayıt altına alınmış ve en iyi sonuçlar geliştirilmiş Freunlich eşitliği kullanılarak alınmıştır. Modellerin sıcaklıkla değişimindeki neticeler araştırılmıştır ve en iyi sonuç 10 °C de yapılan deneylerden alınmıştır. Bu sonuçlar dizayn ve uygun paketleme sistemleri için önemli olan sorbsiyon izotermelerini güvenilir olarak ortaya koymuştur [14].

Farklı bir çalışmada Illinois kömürlerinin sorpsiyon davranışları incelenmiş ve sonuçların Langmuir ve Dubinin-Astokhov sorpsiyon modelleri ile uygunluk gösterdiği anlaşılmıştır [15].

Lagünler ucuz fiyatları ve minimum operasyon gereklilikleri olduğu için genel olarak yerel ve endüstriyel atık sularda kullanılmaktadır. Fakat bunların mikrobik yönleri hakkında çok az şey bilinmektedir. Bu çalışmada lagünlerin bakteri karakterizasyonu araştırılmıştır [16].

Çamurun kurutma yatağında direkt olarak kurutulması araştırılmıştır fakat taze çamura u yatakta kurutma yapmak uygun değildir bu yüzden kurutucu yatak modeli geliştirilmiştir [17].

2006 yılı sonu itibariyle 2 adet atık su arıtma tesisi olan Bursa kentinde yılda en az 270.000 ton çamur açığa çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı bu sorunun en ekonomik yönden giderilebilmesi için alternatif bir kurutma yöntemi olan güneşle kurutma prosesini öne çıkarmaktır [18].

Yapılan bu çalışmada büyük bir sorun teşkil eden atık çamurların susuzlaştırılması, akışkan yatakta kurutulması ve son olarak da CHP üniteleri aracılığıyla yararlı enerji üretilmesi esas amaçtır [19].

Atık su çamurunun ekolojik stabilizasyonu araştırılmıştır [20].

Önceki yapılan çalışmaların çoğunda plazma yönteminden en efektif ve çevreyle dost bir metot olarak bahsedilmişti. Yapılan bu çalışmada plazma yönteminin lağım çamurlarına uygulanması tartışılmıştır [21].

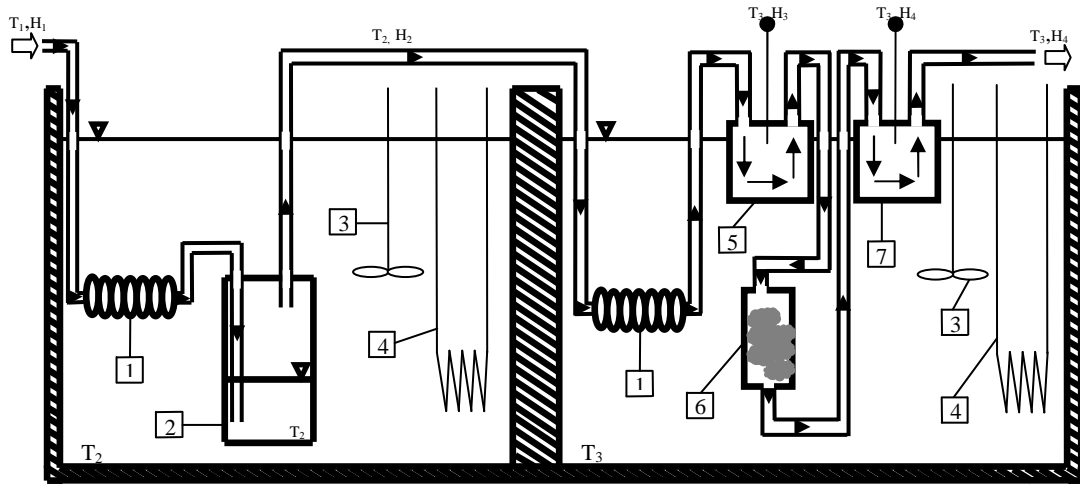
Izoterm deyimi çevresel sistemler için çok önemlidir. Bu çalışmada minimum hata ile çalışan, aldığı verileri izoterm parametrelerine dönüştüren ISOFIT adında bir software programı geliştirilmiştir [22].

Başka bir çalışmada atık suların günlük kapasitesi 300 ton olan enerji içeceği sektöründe kullanılmasının geliştirilmesi amaçlanmıştır [23].

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 4.1. Deney Düzeneği

Atık su çamurunun kurutulmasının araştırılması ve çamurun kuruma eğrisinin çizilebilmesi için bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzeneğin şematik resmi şekil 4.1’ de gösterilmektedir. Düzenek bir adet 2 bölmeli cam fanus, 2 adet bakır boru, 1 adet nemlendirme kutusu, 2 adet karıştırıcı, 2 adet rezistans, 2 adet ölçüm kutusu, 1 adet numune kutusu, dijital termostatlı sigorta panosu, 2 adet hem nem hem sıcaklık ölçer ve diğer bağlama, aktarma ve yalıtım malzemelerinden oluşmaktadır.



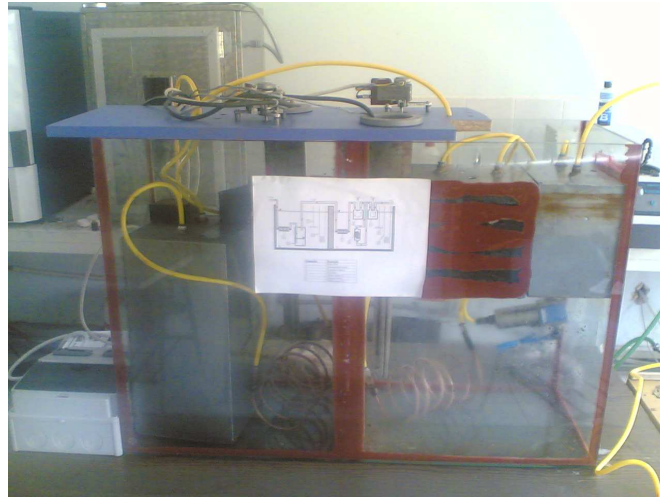
Şekil 4.1 Çamur kurutma deney düzeneğinin şematik resmi

Tablo 4.1 Düzenek üzerindeki parça listesi

<u>Numaralar</u>	<u>Parça ismi</u>
1	Bakır boru
2	Nemlendirme kutusu
3	Karıştırıcı (mixer)
4	Rezistans
5	Ölçüm kutusu (1)
6	Numune kutusu
7	Ölçüm kutusu (2)

#### 4.2. Düzeneğin Tanıtılması

Cam fanus; Boyu 60 cm, genişliği 90 cm, ve derinliği 30 cm' dır. İki bölmeli olarak tasarlanmıştır ve fanus ortadan ikiye ayrılmıştır bölmelerin arasında ısı geçişini önlemek için yalıtım yapılmıştır. Fanusun içi su ile doludur.



Şekil 4.2. Deney düzeneği

Bakır boru; Kullanılan bakır borunun boyu 1 metre ve çapı 6 mm' dır. Fanusun her iki bölümünde de bulunmaktadır. Düzenekte bakır borunun kullanılmasının amacı fanusun içinde sıcaklığı yüksek olan suyun içinde dolaştırılan havanın 1. ve 2. bölmelere girdiğinde bakır borudan geçirilerek sıcaklığının biran önce yükseltilebilmesidir.



Şekil 4.3. Bakır boru

Nemlendirme Kutusu; Nemlendirme kutusunun boyu 40 cm, genişliği 20 cm ve derinliği 20 cm olarak tasarlanmıştır devamlı fanusun 1. bölümüne yerleştirilmiştir fakat burada devamlı suyla temas edecektir bu yüzden malzemesi paslanmaz çelik olarak seçilmiştir. Nemlendirme kutusunun içi yaklaşık olarak su ile doludur ve düzenekte kullanılma amacı; buraya kadar doymamış halde gelen havayı nemlendirme kutusunun içine sokmak ve içerde suyla temas ettirmek yani havanın çıkışında %100 bağıl nem de hava elde etmektir.



Şekil 4.4. Nemlendirme kutusu

Karıştırıcı; Düzeneğin her iki bölümünde de bulunmaktadır. Bulunduğu bölmede ki suyun sıcaklığının homojen olmasını sağlamaktadır

Rezistans; Düzeneğin her iki bölümünde de bulunmaktadır ve içerdeki suyun sıcaklığını artırmak için kullanılmaktadır, gücü 3000 W' ıdır. Dijital termostatlı sigorta panosuna bağlıdır, kontrolleri buradan yapılmaktadır.



Şekil 4.5. Karıştırıcılar ve rezistanlar

Ölçüm kutusu; Düzenekte 2. bölümde bulunmaktadır ve biri numune kutusundan önce diğeri numune kutusundan sonra olmak üzere 2 adettir. Ölçümün daha iyi sonuç vermesi için ölçüm kutuları sistemin yani suyun içine koyulmuştur. Kutunun üzerinde 3 adet delik vardır bunlardan 2 tanesi havanın içeriye girmesini ve dışarıya çıkmasını sağlar diğeri ise ölçüm aletinin prob deliğidir.

Numune kutusu; Düzenekte çamurun bulunduğu yerdir. Burada çamur sıcak hava tarafından kurutulmaktadır. Bu düzenekle yapılan her deneyde farklı numuneler ihtiyaç vardır yani her deney için çamurun değişmesi gerekmektedir bu yüzden numune kutusu çok rahat açılan ve kapanabilen aynı zamanda suyun içinde olduğundan sızdırmazlığına güvenilen bir malzemeden olmalıdır. Bu yüzden bu kutu için bir pnomatik eleman olan hava tüpü seçilmiştir.



Şekil 4.6. Numune kutusu

Dijital termostatlı sigorta panosu; Üzerinde 2 adet dijital ekran bulunmaktadır ve ekranlar bize bölmelerdeki suların sıcaklıklarını göstermektedir. 2 adet rezistans ve 2 adet karıştırıcı bu sigortaya bağlanmıştır.



Şekil 4.7. Dijital termostatlı sigorta panosu

Sıcaklık ve nemölçerler; Havanın numuneyle temasından önce ve sonra nemini ve havanın düzenekten çıkış sıcaklığını belirlemek için kullanılmıştır. Bunlar direkt olarak dâhil olduğu ortamın sıcaklık ve nemini dijital ekranlarında gösterirler. Testo 454 tipi sıcaklık ve nemölçer. Prob çabı 12 mm ve uzunluğu 125 mm. Sıcaklık aralığı -20–120 °C ve bağıl nem aralığı %0-100 arasındadır.





Şekil 4.8. Testo 454

### 4.3. Düzeneğin Çalışma Sistemi

Amacı esas olarak bağıl nem değişikliğini sağlamak olan düzenek 2 ayrı bölmeden oluşmaktadır. 1. bölme ve 2. bölme birbirlerinden izolasyon yapılarak ayrılmıştır. 1. bölme ve 2. bölmenin içinde su mevcuttur bu sular farklı sıcaklıklara ısıtılmaktadır, böylece suyun içinden 8 mm çapında hortum yardımıyla geçen havanın sıcaklığı bulunduğu bölmede ki suyun sıcaklığına ulaşmaktadır.

Her iki bölmedeki sular 3000 W 'lık rezistanslar tarafından ısıtılmaktadır. Bölmelerin içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı meydana getirebilmek için mixer yardımıyla su devamlı olarak karıştırılmaktadır.

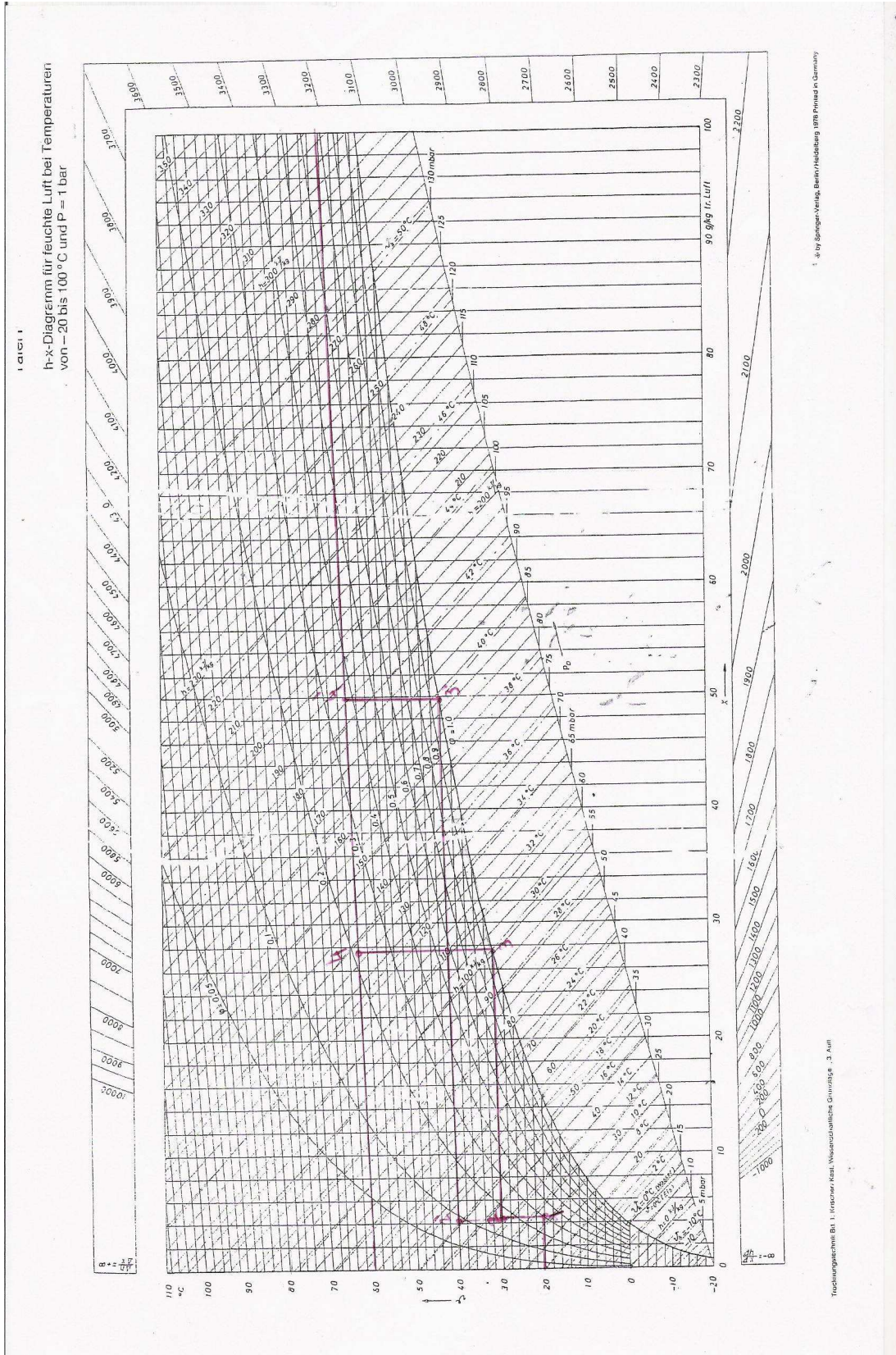
Şekil 4.1 ' de 1 numarayla gösterdiğimiz bakır borunun kullanılma amacı; dışarıdan soğuk olarak suyun içine giren havanın, ısı iletimi yüksek olan bakır borudan geçirilerek bulunduğu ortamın sıcaklığına daha çabuk ulaştırılmasını sağlamaktır.

Şekil 4.1' de 2 numarayla gösterdiğimiz nemlendirme kutusunun içerisinde yeteri kadar su bulunmaktadır. Bu kutuya giren doymamış hava, kutu içerisindeki suyla temas ettikten sonra kutu dışına %100 bağıl nemde çıkmaktadır.

Ölçüm kutuları ise içleri boş olarak tasarlanmıştır. Bu kutuların üzerinde sadece hava giriş ve çıkış delikleriyle birlikte, ölçüm cihazının (Şekil 4.8) prob deliği bulunmaktadır. Herhangi bir hava kaçağı yoktur hava kutudan içeri girmekte ve aynı debiyle dışarı çıkmaktadır ve kutunun içinde bulunan ölçüm cihazının probu havanın o andaki özelliklerini bize göstermektedir.

Numune kutusuna kadar nemi sadece sıcaklığın etkisiyle değişen hava, bu aşamada numuneyle temas etmektedir. Bu temas, numune kutusunda gerçekleşmektedir, böylece numuneden daha düşük nemdeki hava numune içerisinden nemlenmiş olarak dışarı çıkmaktadır.

Bu düzeneğin kurulmasındaki amaç havayı aynı sıcaklıkta, fakat farklı bağıl nem değerlerinde sistem dışarısına çıkartmayı sağlamaktır. Düzenek Mollier (h-x) diyagramı (Şekil 4.9) baz alınarak tasarlanmıştır. Havanın aynı sıcaklıkta fakat farklı bağıl nemlerde sistem dışına çıkarabilmek için 2 bölmeden oluşan düzeneğin, 1. bölmelerinin sıcaklığı, tek çıkış sıcaklığı için 6 kere değiştirilmektedir. Böylece 1. bölmede farklı sıcaklıklarda doyan (%100 bağıl neme ulaşan) hava 2. bölmeye geldiğinde aynı sıcaklıkta fakat farklı bağıl nemlere ulaşmaktadır. 2. bölmeye aynı sıcaklıkta, farklı bağıl nemlerde gelen havanın, numune üzerinden aldığı nem değerleri de farklı olmaktadır. Deneylerimiz 4 farklı çıkış sıcaklığı için toplam 24 farklı sonuçtan oluşmaktadır. Ayrıca sistem içinde kurutulan çamurun, kurutulduktan sonraki özgül nem değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.9 Mollier diyagramı

Şekil 4.9 Mollier diyagramının da kırmızı ile çizilen çizgiler 60 °C’de yapılan 2 deneyi göstermektedir hava 20 °C ve 0,3 bağıl nemde düzeneğin 1. bölmesine girmektedir (1 noktası). Daha sonra hava 1. bölmenin sıcaklığına ulaşmaktadır fakat bu sıcaklık artışı havanın nemini düşürmektedir (2 noktası). 1. bölmenin sıcaklığına ulaşan hava numune kutusuna 2 noktasındayken girmekte ve numune kutusundan aynı sıcaklıkta fakat %100 bağıl neme ulaşmış şekilde çıkmaktadır (3 noktası). Numune kutusundan çıkan hava daha sonra 2. bölmeye gönderilmektedir burada sıcaklık 1. bölmeden daha yüksektir bu yüzden 2. bölmenin sıcaklığına ulaşan hava üzerinden nem kaybetmektedir (4 noktası).

Yapılan 2. deneyde ise 1. bölmenin sıcaklığı artırılıp 2. bölmenin sıcaklığı sabit bırakılmıştır, aynı şartlarda düzeneğe giren dış hava (20°C ve 0,3 bağıl neminde) bu sefer 2’ noktasına ulaşmaktadır burada doyurulan hava numune kutusundan çıkışta 3’ noktasına gelmektedir daha sonra hava 2. bölmeye geçip numuneyle temasından önce 4’ noktasına ulaşmaktadır yani sonuç olarak hava aynı şartlarda düzeneğe alınıp aynı sıcaklıkta fakat farklı bağıl nemlerde sistemden dışarı çıkarılmaktadır.

#### 4.4. Yapılan Deneyler

Bu çalışmada 4 farklı çıkış sıcaklığı için deneyler yapılmıştır. Bu çıkış sıcaklıklarının her biri 6 farklı sıcaklıkta doyurulmuştur. Tablo 4.2’ de gösterilen değerler deneylerin yapılma sıcaklıklarıdır buradaki ilk değerler 1. bölmenin sıcaklığını 2. değerler ise 2. bölmenin sıcaklığını göstermektedir.

Tablo 4.2. Deney düzeneğinde yapılan deneyler

60 °C-	30°C-60°C	35°C-60°C	40°C-60°C	50°C-60°C	52°C-60°C	55°C-60°C
70 °C-	30°C-70°C	40°C-70°C	50°C-70°C	60°C-70°C	62°C-70°C	65°C-70°C
80 °C-	40°C-80°C	50°C-80°C	60°C-80°C	70°C-80°C	72°C-80°C	75°C-80°C
90 °C-	50°C-90°C	60°C-90°C	70°C-90°C	80°C-90°C	82°C-90°C	85°C-90°C

Deneyler sırasında her 2 dakikada ölçüm sonuçları alınmıştır ve bağıl nemim zamanla nasıl değiştiği incelenmiştir. Daha sonra deney düzeneğinde kurutulan

çamurun özgül nemi ölçülmüştür ve sonuç olarak çamurun bağıl nem-özgül nem değişimi, sorbsiyon izotermi çıkarılmıştır. Son olarak alınan deneysel sonuçlar literatür çalışmalarından elde edilen 3 formüle uygulanmıştır.

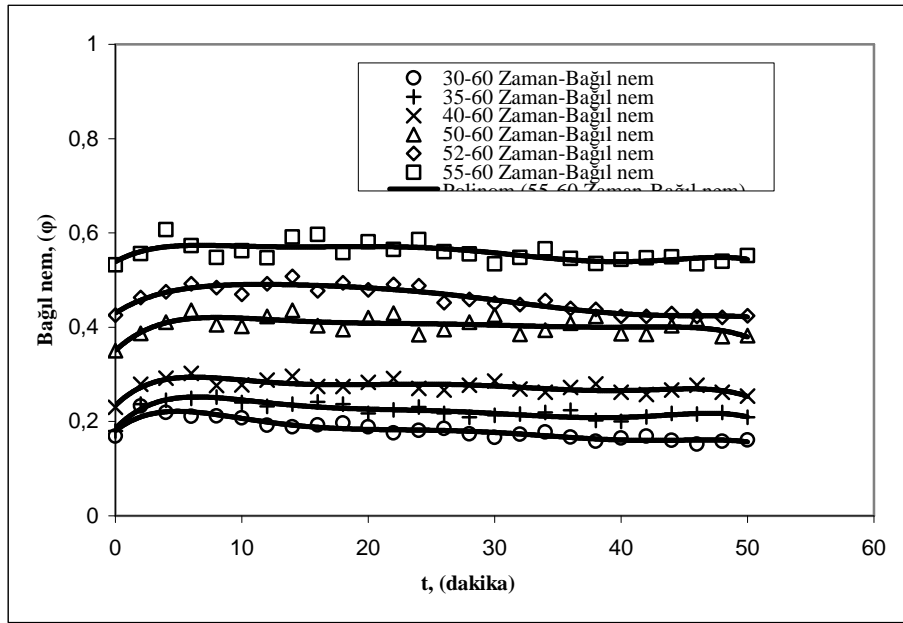
## BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARI

### 5.1. Bağıl Nem-Zaman Değişimleri

#### 5.1.1. 60°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

Tablo 5.1. 60°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

	30-60	35-60	40-60	50-60	52-60	55-60
Zaman	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem
0	0,169	0,180	0,23	0,350	0,426	0,532
2	0,233	0,237	0,279	0,387	0,463	0,556
4	0,219	0,245	0,292	0,411	0,475	0,607
6	0,211	0,249	0,302	0,436	0,492	0,573
8	0,212	0,252	0,276	0,405	0,484	0,548
10	0,208	0,240	0,278	0,402	0,479	0,562
12	0,192	0,232	0,288	0,423	0,492	0,547
14	0,189	0,237	0,296	0,436	0,508	0,591
16	0,193	0,242	0,274	0,403	0,477	0,597
18	0,197	0,237	0,274	0,395	0,494	0,558
20	0,189	0,217	0,283	0,420	0,479	0,581
22	0,176	0,225	0,291	0,430	0,491	0,565
24	0,181	0,231	0,270	0,384	0,488	0,586
26	0,185	0,217	0,267	0,395	0,452	0,560
28	0,174	0,209	0,277	0,411	0,459	0,555
30	0,166	0,213	0,286	0,426	0,451	0,534
32	0,173	0,216	0,269	0,385	0,448	0,548
34	0,178	0,219	0,262	0,394	0,457	0,566
36	0,167	0,224	0,272	0,409	0,440	0,546
38	0,158	0,202	0,28	0,423	0,438	0,535
40	0,165	0,201	0,262	0,386	0,423	0,544
42	0,169	0,210	0,257	0,385	0,423	0,547
44	0,165	0,217	0,267	0,403	0,429	0,549
46	0,152	0,216	0,277	0,417	0,423	0,534
48	0,158	0,219	0,262	0,380	0,421	0,540
50	0,161	0,209	0,254	0,382	0,424	0,552



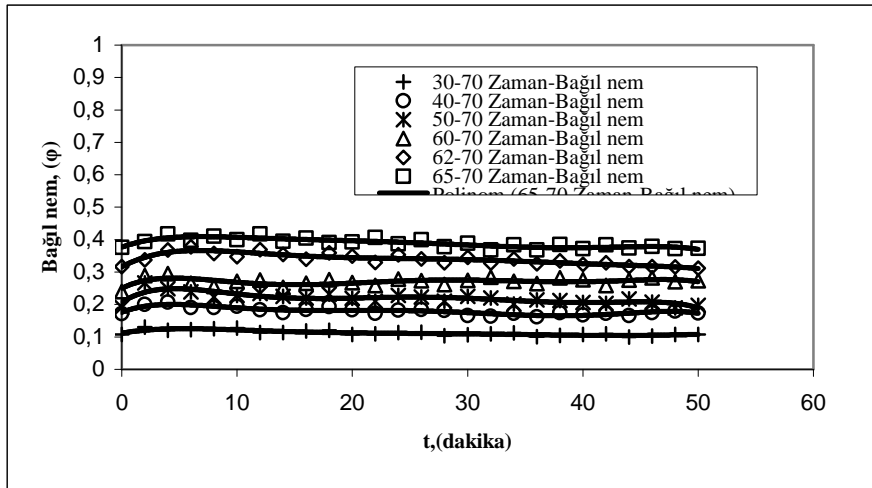
Şekil 5.1. Bağıl nem-zaman grafiği (60°C )

### 5.1.2. 70°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

Tablo 5.2. 70°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

	30-70	40-70	50-70	60-70	63-70	67-70
Zaman	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem
0	0,108	0,172	0,192	0,244	0,317	0,376
2	0,134	0,223	0,267	0,289	0,338	0,394
4	0,129	0,207	0,249	0,295	0,368	0,418
6	0,122	0,191	0,239	0,266	0,378	0,398
8	0,125	0,191	0,223	0,256	0,357	0,411
10	0,127	0,194	0,228	0,271	0,347	0,414
12	0,114	0,184	0,234	0,275	0,369	0,418
14	0,114	0,175	0,225	0,253	0,354	0,395
16	0,118	0,185	0,222	0,266	0,343	0,405
18	0,121	0,193	0,232	0,276	0,359	0,391
20	0,108	0,184	0,219	0,268	0,349	0,393
22	0,112	0,173	0,217	0,259	0,335	0,407
24	0,114	0,183	0,228	0,278	0,353	0,387
26	0,115	0,185	0,223	0,273	0,341	0,404
28	0,104	0,182	0,213	0,262	0,329	0,378
30	0,107	0,166	0,225	0,274	0,346	0,389
32	0,112	0,164	0,224	0,284	0,328	0,368
34	0,113	0,173	0,201	0,271	0,341	0,384
36	0,101	0,162	0,214	0,265	0,326	0,368
38	0,105	0,175	0,212	0,282	0,335	0,385
40	0,108	0,168	0,206	0,276	0,324	0,372
42	0,112	0,173	0,203	0,259	0,329	0,384
44	0,102	0,166	0,217	0,275	0,317	0,374
46	0,103	0,175	0,207	0,282	0,316	0,379
48	0,108	0,183	0,194	0,273	0,316	0,372
50	0,108	0,174	0,197	0,273	0,312	0,373



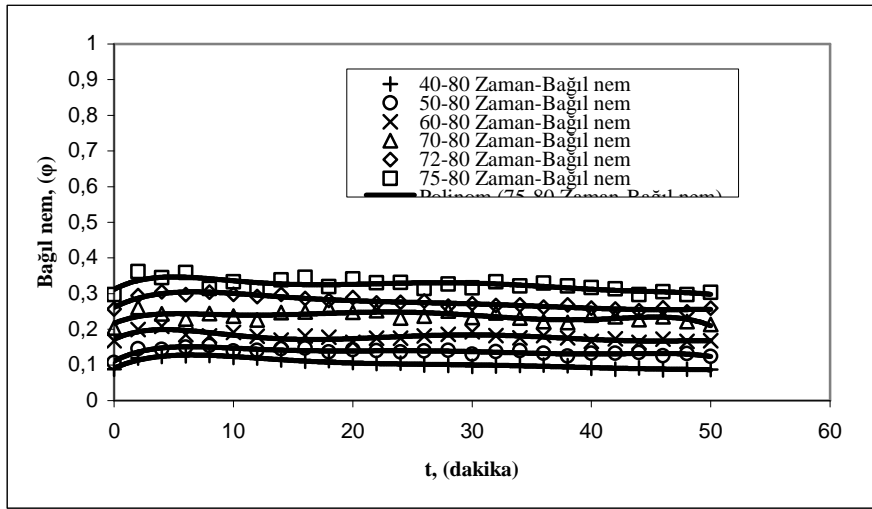


Şekil 5.2. Bağıl nem-zaman grafiği (70°C )

### 5.1.3. 80°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

Tablo 5.3. 80°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

	40-80	50-80	60-80	70-80	72-80	75-80
Zaman	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl Nem	Bağıl nem	Bağıl nem
0	0,088	0,107	0,168	0,204	0,257	0,297
2	0,119	0,145	0,199	0,261	0,294	0,362
4	0,124	0,144	0,208	0,243	0,305	0,345
6	0,126	0,152	0,185	0,229	0,297	0,359
8	0,127	0,154	0,181	0,244	0,304	0,314
10	0,121	0,139	0,191	0,237	0,298	0,333
12	0,119	0,141	0,181	0,226	0,292	0,312
14	0,114	0,145	0,172	0,247	0,298	0,338
16	0,11	0,147	0,181	0,249	0,286	0,346
18	0,112	0,136	0,178	0,266	0,281	0,327
20	0,107	0,143	0,163	0,248	0,289	0,341
22	0,104	0,144	0,175	0,252	0,274	0,334
24	0,105	0,136	0,175	0,232	0,276	0,331
26	0,104	0,139	0,181	0,237	0,279	0,314
28	0,099	0,141	0,186	0,251	0,265	0,327
30	0,096	0,136	0,193	0,233	0,272	0,316
32	0,097	0,137	0,182	0,246	0,267	0,333
34	0,099	0,14	0,176	0,232	0,268	0,321
36	0,107	0,133	0,182	0,222	0,262	0,329
38	0,098	0,125	0,176	0,219	0,268	0,321
40	0,091	0,133	0,166	0,244	0,259	0,317
42	0,088	0,133	0,173	0,235	0,257	0,313
44	0,092	0,135	0,163	0,227	0,252	0,297
46	0,086	0,126	0,172	0,235	0,264	0,305
48	0,088	0,132	0,166	0,222	0,249	0,297
50	0,087	0,124	0,168	0,214	0,259	0,303

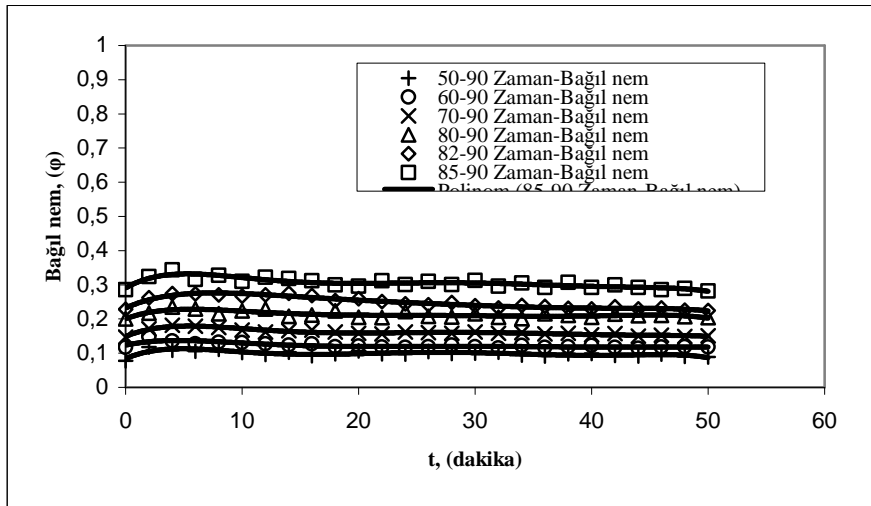


Şekil 5.3. Bağıl nem-zaman grafiği (80°C )

### 5.1.4. 90°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

Tablo 5.4. 90°C deneylerinde bağıl nem-zaman değişimleri

	50-90	60-90	70-90	80-90	82-90	85-90
Zaman	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem	Bağıl nem
0	0,078	0,117	0,147	0,204	0,228	0,286
2	0,118	0,148	0,171	0,217	0,262	0,324
4	0,109	0,136	0,182	0,235	0,274	0,344
6	0,106	0,127	0,179	0,229	0,273	0,316
8	0,111	0,132	0,175	0,215	0,271	0,328
10	0,102	0,131	0,168	0,224	0,267	0,318
12	0,096	0,127	0,162	0,229	0,271	0,322
14	0,103	0,124	0,166	0,208	0,275	0,318
16	0,093	0,127	0,168	0,212	0,269	0,312
18	0,098	0,119	0,162	0,224	0,254	0,318
20	0,107	0,121	0,158	0,205	0,259	0,296
22	0,098	0,118	0,156	0,204	0,251	0,312
24	0,097	0,117	0,162	0,222	0,244	0,301
26	0,105	0,119	0,163	0,208	0,242	0,316
28	0,099	0,124	0,158	0,206	0,248	0,301
30	0,108	0,119	0,162	0,215	0,239	0,313
32	0,103	0,115	0,158	0,205	0,232	0,296
34	0,095	0,123	0,165	0,201	0,247	0,305
36	0,092	0,117	0,156	0,215	0,237	0,292
38	0,098	0,119	0,158	0,211	0,231	0,307
40	0,099	0,123	0,154	0,205	0,229	0,292
42	0,094	0,117	0,157	0,214	0,236	0,304
44	0,092	0,114	0,156	0,216	0,229	0,292
46	0,097	0,118	0,153	0,211	0,232	0,286
48	0,091	0,119	0,149	0,207	0,226	0,289
50	0,089	0,118	0,151	0,204	0,225	0,282



Şekil 5.4. Bağıl Nem-Zaman Grafiği (90°C )

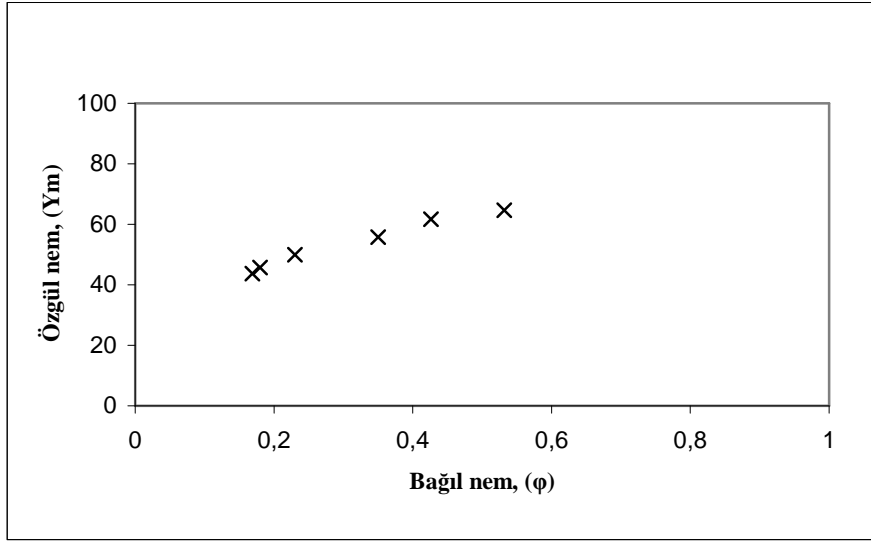
## 5.2. Bağıl Nem-Özgül Nem Değişimleri

Deney düzeneğinde 50 dakika boyunca düşük bağıl nemlerdeki, sıcak havayla kurutulan çamur numunelerinin üzerlerinden ne kadar nem alındığı ölçülmüştür. Bu ölçüm Sortorius cihazında yapılmıştır (105 °C ve 90 dakika).

### 5.2.1. 60°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değişimleri

Tablo 5.5. 60°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değişimleri

Bağıl Nem	Özgül Nem
0,169	43,75
0,18	45,73
0,23	49,95
0,35	55,75
0,426	61,74
0,532	64,68

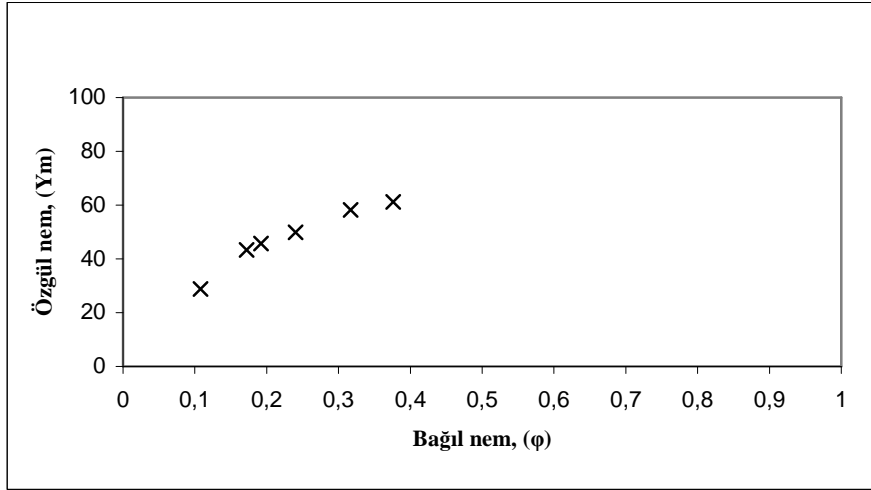


Şekil 5.5. Bağıl nem-özümlü nem grafiği (60°C çamur için )

### 5.2.2. 70°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değışimleri

Tablo 5.6. 70°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değışimleri

Bağıl Nem	Özümlü Nem
0,108	28,81
0,172	43,35
0,192	45,71
0,24	49,91
0,317	58,18
0,376	61,24

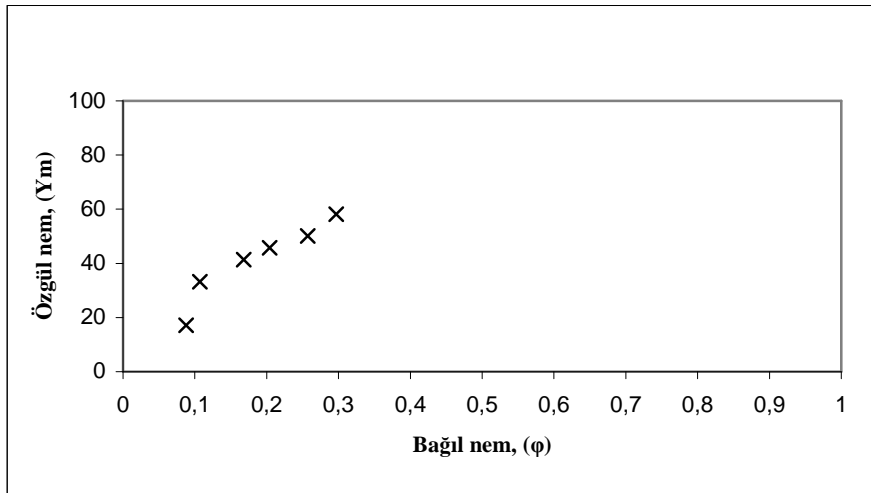


Şekil 5.6. Bağıl nem-özümlü nem grafiği (70°C çamur için )

### 5.2.3. 80°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değışimleri

Tablo 5.7. 80°C deneylerinde bağıl nem-özümlü nem değışimleri

Bağıl Nem	Özümlü Nem
0,088	17,12
0,107	33,2
0,168	41,34
0,204	45,72
0,257	50,12
0,297	58,14



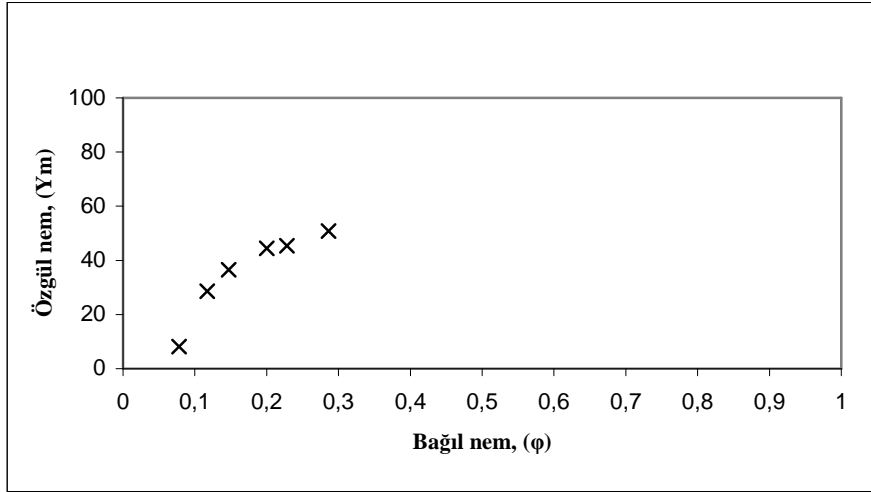
Şekil 5.7. Bağlı nem-özgül nem grafiği (80°C çamur için )

#### 5.2.4. 90°C deneylerinde bağli nem-özgül nem değişimleri

Tablo 5.8. 90°C deneylerinde bağli nem-özgül nem değişimleri

Bağlı Nem	Özgül Nem
0,078	8,13
0,117	28,6
0,147	36,55
0,2	44,48
0,228	45,39
0,286	50,88





Şekil 5.8. Bağıl nem-özgül nem grafiği (90°C çamur için )

### 5.3. Deneysel Sonuçlarının Formülasyonu

Yapılan deneylerden alınan değerler 3 farklı formülde uygulanmıştır. Bu formüller Kelvin eşitliği, Henderson eşitliği ve Chung eşitliğidir.

#### 5.3.1. Kelvin eşitliği

$$y_{m,den} = \left( \frac{c_6}{T \ln \frac{1}{\varphi}} \right)^2$$

Yapılan deneyler sonucunda 4 farklı T değerine karşın 24  $y_{m,den}$  ve 24  $\varphi$  değeri bulunmuştur ve burada  $c_6$  sabit bir değerdir. Eğer sabit  $c_6$  değeri aynı sıcaklıktaki deneyler için, T değerlerine bölünürse yeni eşitliğimiz,

$$y_{m,den} = \left( \frac{c_7}{\ln \frac{1}{\varphi}} \right)^2$$

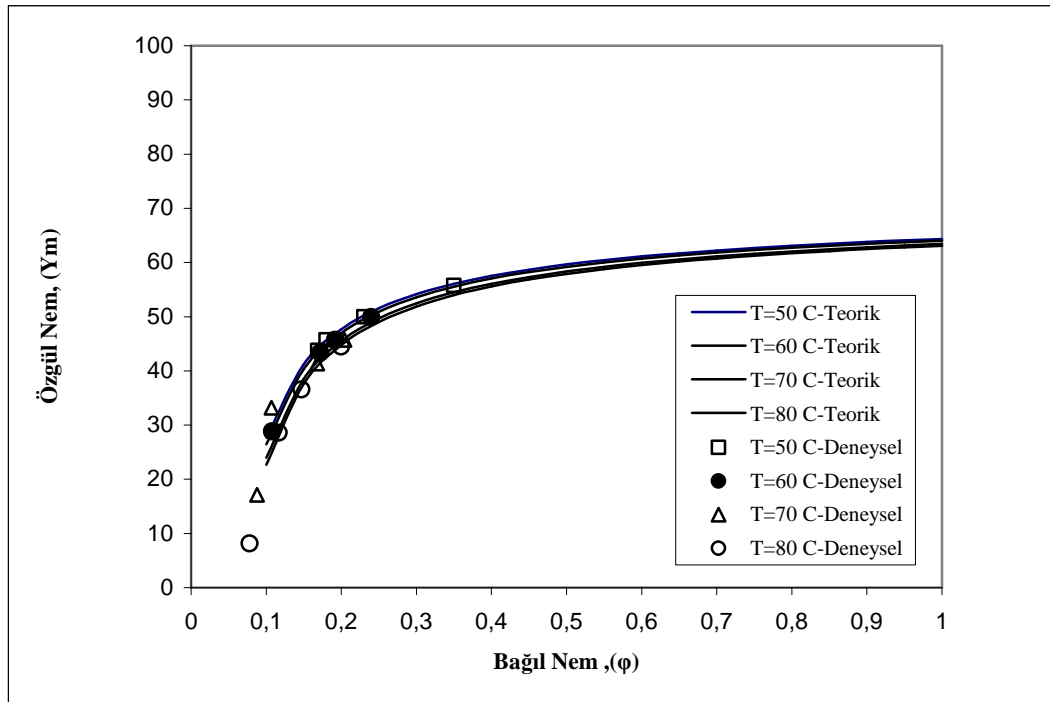
halini alır ve sonuç olarak toplamda 4 farklı sıcaklık olduğu için 4 farklı  $c_7$  değeri elde edilir.

$$c_7(60^\circ)=0,169$$

$$c_7(70^\circ)=0,167$$

$$c_7(80^\circ)=0,163$$

$$c_7(90^\circ)=0,161$$



Şekil 5.9. Deneysel sonuçların Kelvin eşitliğine uyarlanması

### 5.3.2. Geliştirilmiş Henderson eşitliği

$$N_d = \frac{\sqrt[n]{\frac{\ln(1-\phi)}{-K(T+C)}}}{100}$$

$$\phi = 1 - \exp[-K(T+C)(100 N_d)^n]$$

Yukarıdaki formül henderson eşitliğidir buradaki  $N_d$  ile gösterilen değer özgül nem değeridir ( $Y_m$ ) ve  $\Phi$  ile gösterilen değer ise bağıl nem ( $\phi$ ) değeridir.

Formüldeki  $n$ ,  $K$  ve  $C$  değerleri katsayılar olur bu katsayılar her maddeye göre farklı olmaktadır. Deneylemlerden alınan sonuçlar bu formüle uygulanmış ve bulunması gerekli katsayılar atık su çamuru için hesaplanmıştır.

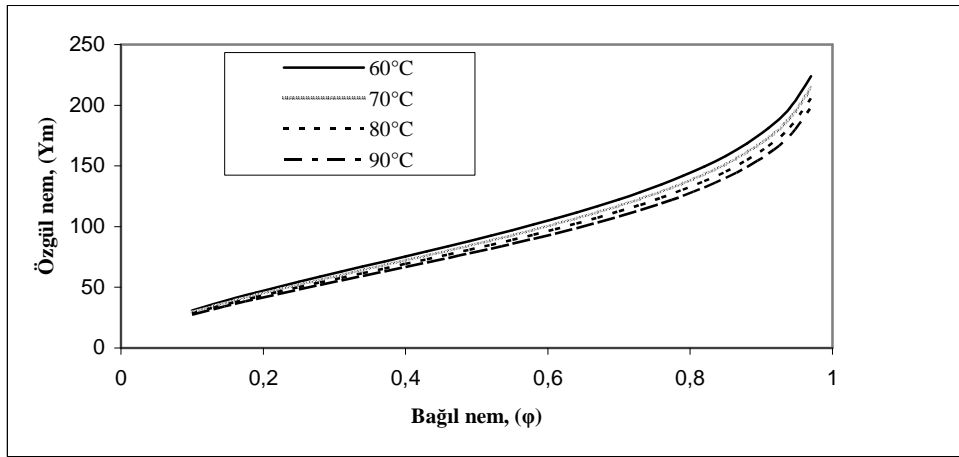
$$C=73,567$$

$$n=1,769$$

$$K=0,00000190649375$$

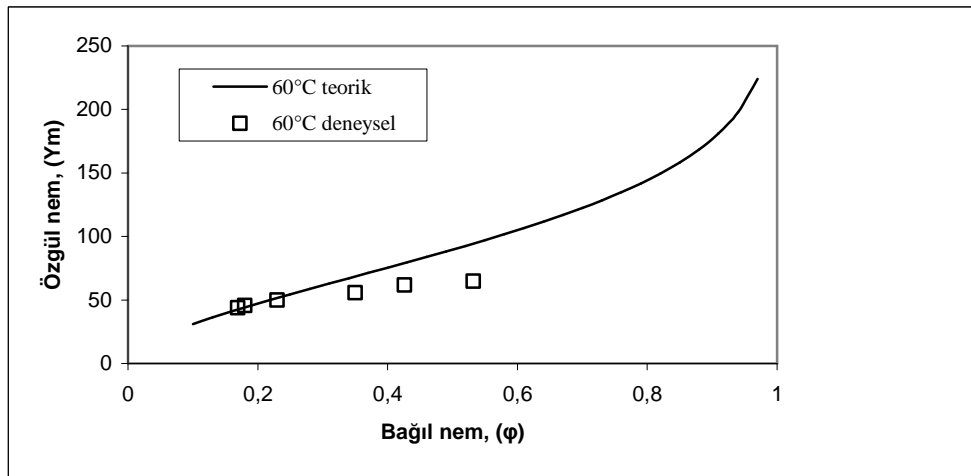
Bu katsayılardan yararlanarak bağıl nemin 0,1 ve 1 arası değerleri için teorik özgül nem değerleri hesaplanmıştır ve bu teorik sonuçlar grafiklerde gösterilmiştir daha sonra bulunan deneysel çalışma sonuçları teorik grafiklerin üstüne yerleştirilmiştir.

Öncelikle teorik olarak hesaplanan özgül nemin bütün sıcaklık değerlerindeki değişimlerini veren grafik gösterilmiştir.

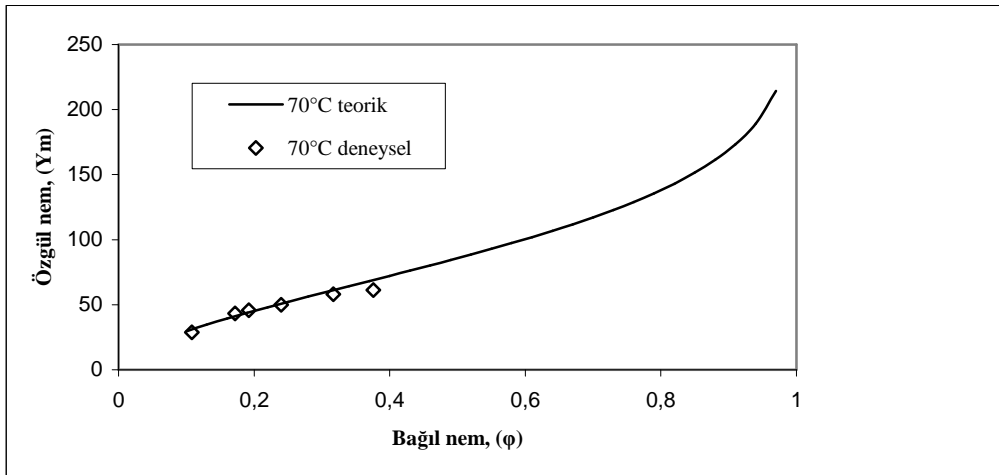


Şekil 5.10. Henderson eşitliğine göre özgül nemlerin farklı sıcaklıklarda değişimi

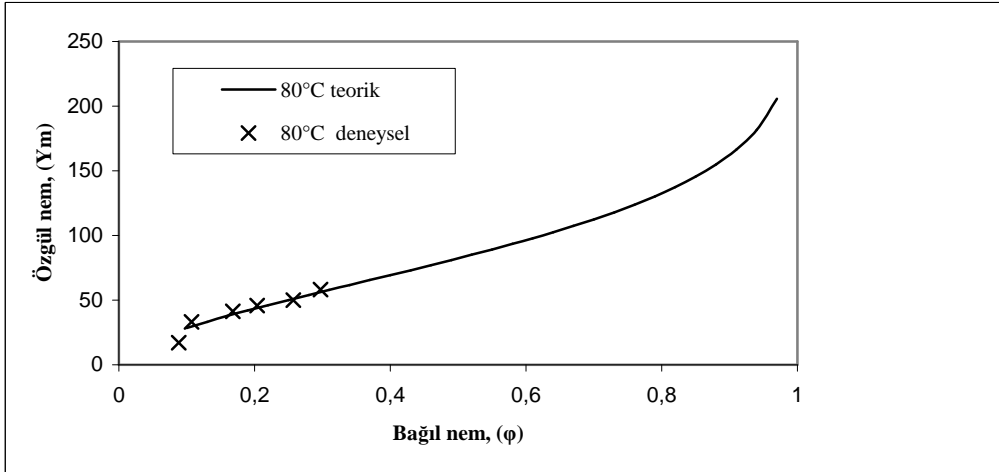
Teorik olarak hesaplanan özgül nem grafiği üstüne bulunan deneysel sonuçlar yerleştirilmiştir ve grafikerin birbirleriyle uyduğu görülmüştür.



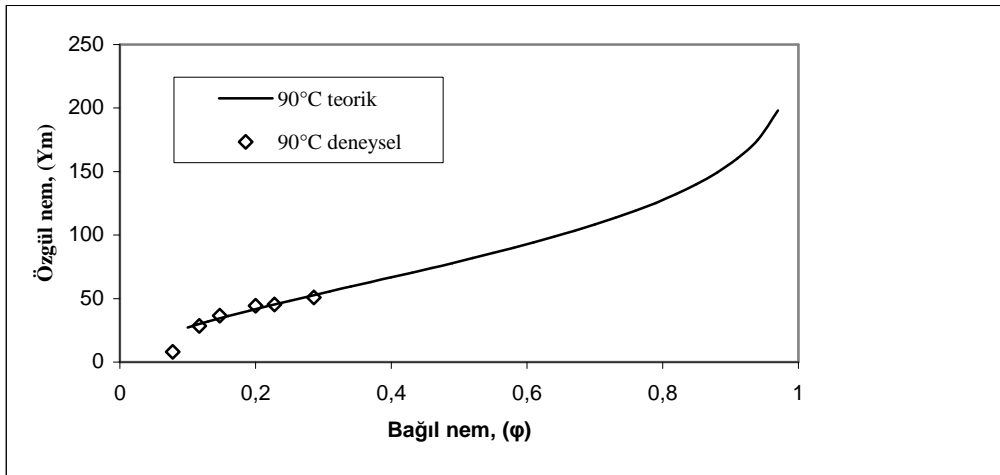
Şekil 5.11. 60°C'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi



Şekil 5.12. 70°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi



Şekil 5.13. 80°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi



Şekil 5.14. 90°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi

### 5.3.3. Chung eşitliği

$$N_d = E - F \ln [-(T+D) \ln \phi]$$

$$\phi = \exp\left(\frac{-A}{T+D} \exp(-B N_d)\right)$$

Yukarıdaki formül Chung eşitliğidir buradaki  $N_d$  ile gösterilen değer özgül nem değeridir ( $Y_m$ ) ve  $\Phi$  ile gösterilen değer ise bağıl nem ( $\phi$ ) değeridir.

Formüldeki  $B$ ,  $D$  ve  $A$  değerleri katsayılar olup bu katsayılar her maddeye göre farklı olmaktadır. Deneylerden alınan sonuçlar bu formüle uygulanmış ve bulunması gerekli katsayılar atık su çamuru için hesaplanmıştır.

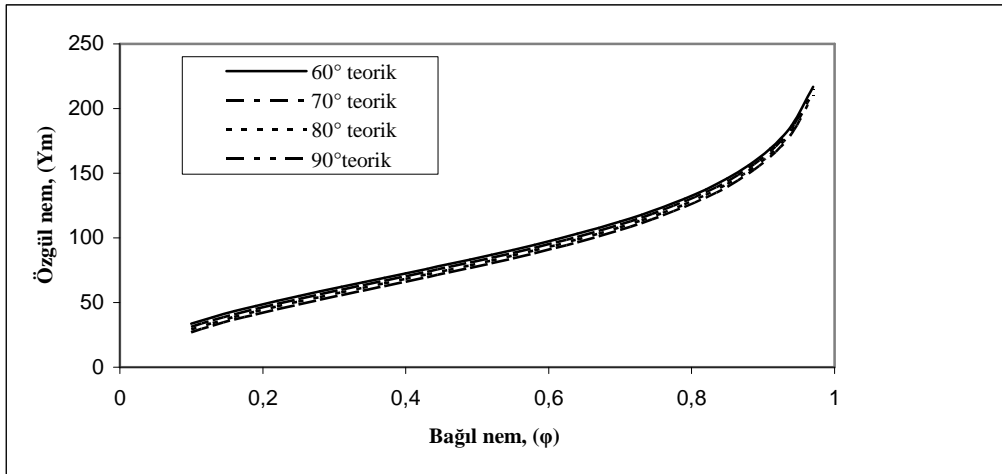
$$B=2,359$$

$$D=132,59397$$

$$A=927,65$$

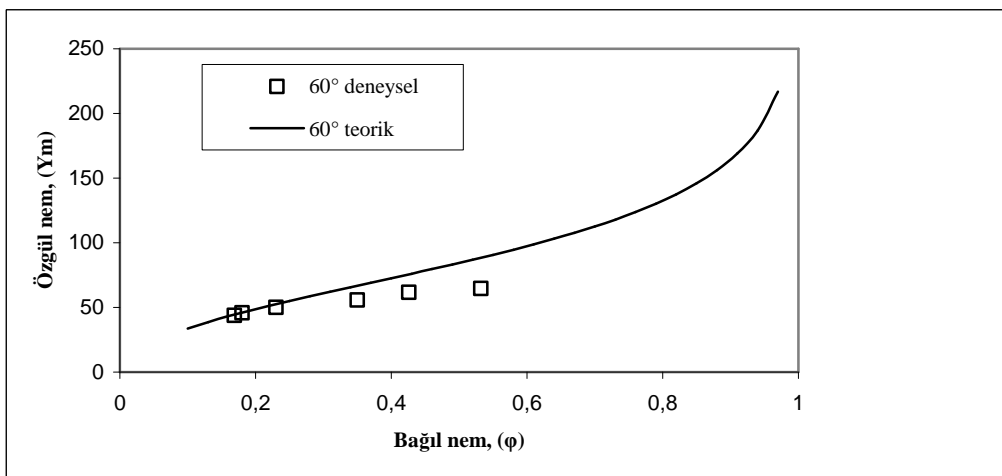
Bu katsayılarından yararlanarak bağıl nemin 0,1 ve 1 arası değerleri için teorik özgül nem değerleri hesaplanmıştır ve bu teorik sonuçlar grafiklerde gösterilmiştir daha sonra bulunan deneysel çalışma sonuçları teorik grafiklerin üstüne yerleştirilmiştir.

Öncelikle teorik olarak hesaplanan özgül nemin bütün sıcaklık değerlerindeki değişimlerini veren grafik gösterilmiştir.

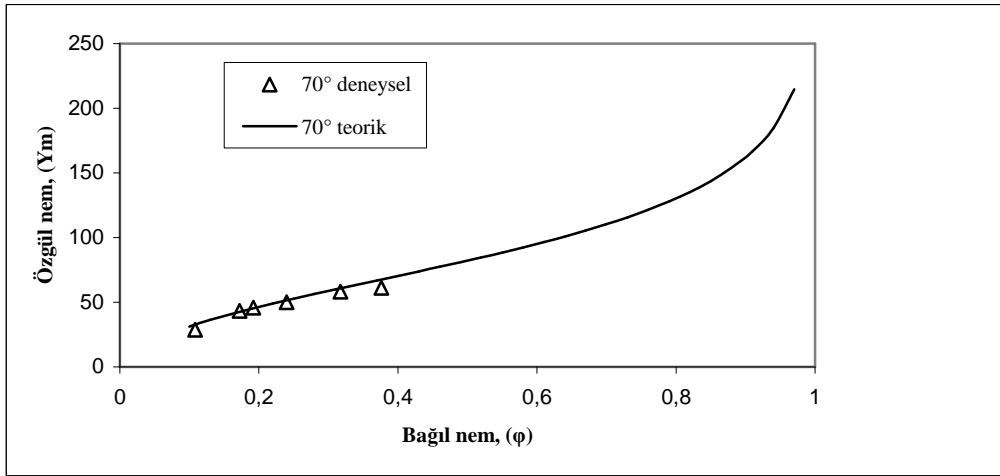


Şekil 5.15. Chung eşitliğine göre özgül nemlerin farklı sıcaklıklarda değişimi

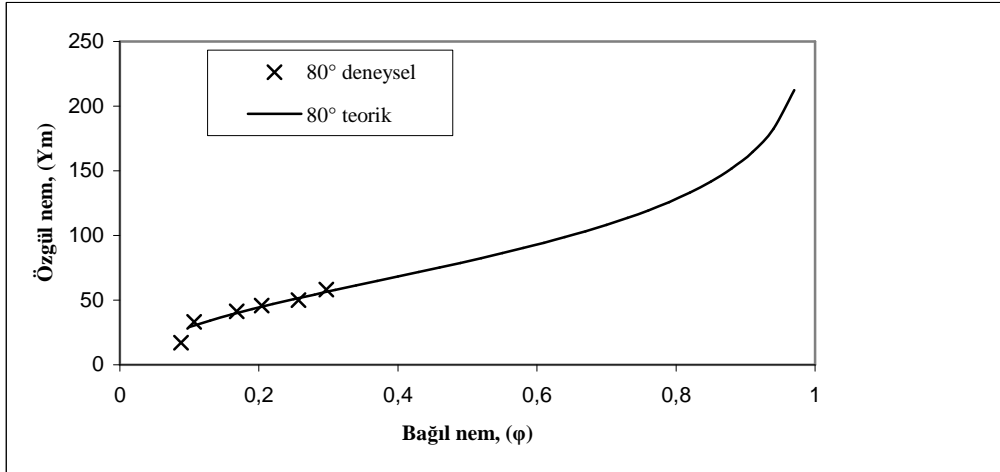
Teorik olarak hesaplanan özgül nem grafiği üstüne bulunan deneysel sonuçlar yerleştirilmiştir ve grafikerin birbirleriyle uyduğu görülmüştür.



Şekil 5.16. 60°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi

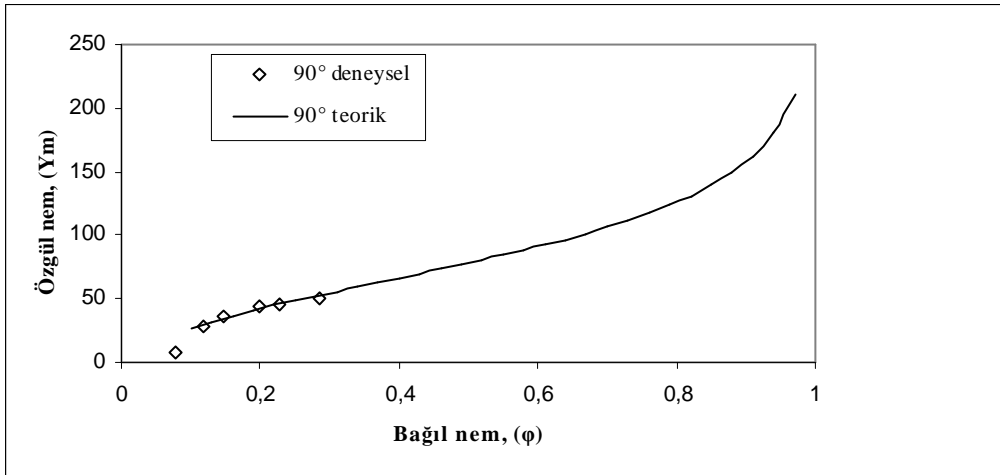


Şekil 5.17. 70°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi



Şekil 5.18. 80°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi





Şekil 5.19. 90°'de teorik özgül nem üzerine deneysel sonuçların yerleştirilmesi

## **BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Çamurun kurutma karakteristiği açısından bu deneyler ile çok sayıda yeni bilgiye ulaşılmıştır.

Öncelikle sadece deneysel çalışma ile ulaşılabilen çamurun 4 farklı sıcaklığı için sorbsiyon izotermi çizilmiştir.

Yapılan deneylerde çamurun kendisinden daha sıcak olan havayla temas ettiği ilk anlarda, havaya çok fazla nem verdiği fakat artan zamanlarda çamurun denge nemine ulaştığı görülmüştür. Çamurun denge nemine gelmesi yaklaşık 50 dakika olarak ölçülmüştür.

Yapılan deneylerden çıkan sonuçlara göre havanın doyma sıcaklığı arttıkça aynı çıkış sıcaklığında bağıl neminin arttığı görülmüştür.

Yapılan deneyler sonucu düşük bağıl nemle çamura temas eden havanın çamurdan daha fazla nem alabildiği görülmektedir. Havanın bağıl nemi artıkça çamurun özgül nemi artmaktadır.

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçların formüllere uygulanması sonucu formüllerdeki gerekli katsayılar atık çamur için bulunmuştur.

İleriye dönük yapılacak çalışmalarda çamurun daha yüksek sıcaklıklarda kuruma eğrilerinin çıkarılmasında fayda olacağı düşünülmektedir.

Aynı deney düzeneği kullanılarak yapılacak çalışmalarda suyun bulunduğu havuzun boyutları istenilirse büyütülebilir ve ayrıca suyun sıcaklığını artıran rezistansların kapasiteleri büyütülebilir.

Düzenek üzerinde yapılan ölçüm yerleri artırılabilir ve daha hassas sonuçlar için daha fazla ölçüm aleti kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] DAVIDSON, J.D., CLIFT R. and HARRISON D., “Fluidization 2. Edition”, Academic Press, London, 1985
- [2] KUNII D., LEVENSPIEL, O., “Fluidization Engineering”, Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, Newyork, 1977
- [3] YAĞCIOĞLU A., “Ürün işleme Tekniği”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No.517, İzmir1996
- [4] GÜRSES, Ö.L., “Gıda İşleme Mühendisliği II”, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara, 1986
- [5] ŞATIROĞLU, N., “Gıda Üretim Temel İşlemleri”, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1990
- [6] CEMEROĞLU, B., ACAR, J., “Meyve ve Sebze İşletme Teknolojisi” Gıda Teknolojisi Derneği, No.6
- [7] GÜVENİLİR, İ.Y., “Akışkan Yatakta Dağıtıcı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü., İstanbul, 1984
- [8] TOPUZ, A., “Akışkan Yatakta Fındık Kurutma ve Isı ve Kütle Geçişinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002
- [9] ERDAĞ, E., “Taze Fasulye Kurutulması”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul , 1984
- [10] AYBERS, R., “Kurutma Tekniği”, Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul 1984.
- [11] GÜR, M., “Kurutma Tekniği”Ders Notları, SAÜ Mühendislik Fakültesi, Sakarya, 2008.

- [12] PARLAK N., “Akışkan Yataklı Reaktörde Kurutma Prosesi”, Yüksek Lisans Tezi , SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü , Sakarya, 2003
- [13] YAĞCIOĞLU A. “Tarım Ürünleri Kurutma Tekniği” Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, İzmir, 1997
- [14] ZHANGANG Y., “Sorption Isotherms and Moisture Sorption Hysteresis of Intermediate Moisture Content Banana,
- [15] DUTTA P., “ Modelling of Sorption on Coal”
- [16] ALEXANDRA M., “Characterization of Bacterial Diversity in Two Aerated Lagoons of a Wastewater Treatment Plant Using PCR-DGGE Analysis
- [17] MASARU Y. “Improvements in Drying Beds For Non-Concentrated Sludge
- [18] SALİHOĞLU N.K., “Solar Drying in Sludge Management in Turkey”
- [19] EDER C. “Energy Recovery From Sewage Sludge By Means of Fluidised Bed Gasification”
- [20] YUBO C. “Performance of Wastewater Sludge Ecological Stabilization”
- [21] MOUNTOURIS A. “Plasma Gasification of Sewage Sludge”
- [22] MATOTT S. L. “ISOFIT ( A program for fitting sorption isotherms to experimental data)”
- [23] OKTAY S., İSKENDER G., “Improving The Wastewater Management For a Beverage Industry With a-Plant Control”

## ÖZGEÇMİŞ

İsmail Emre MERSİN, 31.01.1985 yılında Sakarya'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sakarya'da tamamladı. 2002 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2006 yılında Makine Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı.