



**AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE SUNTA
KURUTULMASINDA
UYGULANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Reşat SELBAŞ

**Doktora Tezi
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
1998**

**T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI
TEKÖĞRETİM YÜKSEK LİSESİ**

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

78799

AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE SUNTA
KURUTULMASINDA UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Reşat SELBAŞ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

78799

Prof. Dr. Mustafa ACAR
(Danışman)

Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Doç. Dr. Mehmet KUNDUZ

ÖZET

Bu çalışmada, kurutma mekanizması ve kurutma termodinamiği incelenmiş ve akışkan yataklı kurutma özellikleri verilerek, akışkan yatakta odun yongalarının kurutulması için bir deney seti hazırlanmıştır.

Deneyssel çalışmada sıcaklık, akış hızı, distribütör tipi, odun parçalarının büyüklükleri, besleme miktarı gibi parametreler değiştirilerek kurutma hızının değişim eğrileri elde edilmiştir.

Yapılan bu deneyler sonucunda, yongaların büyüklüklerinin artmasıyla çıkıştaki nem oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Giriş gaz sıcaklığının artmasıyla indirekt olarak yonga sıcaklığının da artması ve kurutma hızının yükselmesi belirlenmiştir. Gaz hızının yükseltilmesi ısı ve kütle transferini arttırarak çıkışta daha düşük nem oranı elde edilmesini sağlamıştır. Gaz dağıtıcı tiplerinin değiştirilmesi neticesinde kurutma hızında farklılıklar meydana gelmiştir. Uygun bir gaz dağıtıcısı kabarcık oluşumunu engelleyerek kurutma hızında artmaya sebep olmuştur. Yongaların akışkan yatağa beslemesi kapaktan yapılarak besleme miktarı değiştirilmiş ve besleme miktarının büyümesi kurutma süresinde artmaya sebep olmuştur.

Bu çalışma, akışkan yataklı sürekli kurutma proseslerinin nicel olarak tanımlanması ve daha iyi anlaşılması için katkıda bulunabilir. Ayrıca kurutucu ekipmanlarının boyutlandırılmasında yararlanılabilir.

ABSTRACT

In this study, drying mechanisms, drying thermodynamics and fluidized bed drying properties are investigated. An experimental set up has been established to dry wood particles in fluidized bed.

In the experimental work, drying rate curves have been obtained by changing parameters such as, temperature, flow rate, type of distributor, size of wood particles, amount of feeding.

Results of experiments show that increase in the a size of wood particles causes increase in humidity rate of output. Increase in input gas temperature causes increase in both the temperature of wood particles and drying rate. Higher gas speed, causes lower humidity rate in output by increasing heat and mass transfer. When the type of gas distributor is changed, differences in drying rate occurs. A proper gas distributor caused the increase in drying rate by suppressing the occurrence of bubbles. Feeding of wood particles into fluidized bed was made through lid. Increase in the amount of feeding caused an increase in drying time.

Present study contributes to the definition and better understanding of continuous fluidized bed drying processes. It also provides useful informations required to design drying equipments.

ÖNSÖZ

Kurutma ve akışkan yataklı yanma üzerine pekçok çalışma bulunmasına rağmen, akışkan yataklı kurutma üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Akışkan yataklı kurutmada matematiksel model oluşturma ve çözümündeki zorluklar sonucunda deneysel çalışmalar daha da önem kazanmıştır.

Endüstriyel tesislerde enerji gereksiniminin büyük bir kısmı kurutma proseslerinde harcanmaktadır. Ayrıca orman endüstrisinde üretilen ürünlerin maliyetini büyük oranda kurutma prosesinde harcanılan enerji tayin etmektedir. Kurutma prosesinin ürünlerinin kalitesinde ise önemi büyüktür. Akışkan yataklı kurutmada mükemmel ısı ve kütle transferi, düşük sıcaklıkta kurutma nedeniyle az enerji sarfıyatı ve hızlı kurutma sağlanırken kurutucu emisyonlarının çevreye zararı minimum düzeydedir. Akışkan yatak kurutucuların özelliklerinin ve kurutma hızı verilerinin anlaşılmasının önemli bir ihtiyaç olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmanın yapılmasında, her türlü maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof.Dr. Mustafa ACAR' a ve tez çalışmalarım esnasında her türlü literatür ve ihtiyaçların temininde yardımlarını esirgemeyen Prof.Dr. Oğuz SOYLU (YTÜ) 'ya şükranlarımı arz ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. A. Kemal YAKUT (SDÜ)'a , Yrd.Doç.Dr. İbrahim ÜÇGÜL (SDÜ)'e , Öğr.Gör. Zehra ALKAN (SDÜ) 'a , Arş Gör. A.Emre ÖZGÜR (SDÜ) ' e teşekkürü bir borç bilirim.

Deney setimin Teknik Eğitim Fakültesi Makine laboratuvarında kurulmasına izin veren Teknik Eğitim Fakültesi Dekanı Prof.Dr. Süleyman KODAL'a (SDÜ) ve Dekan Yardımcısı Doç.Dr. Abdullah ÖZSOY'a (SDÜ) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET

ABSTRACT

ÖNSÖZ

SİMGELER LİSTESİ

ŞEKİLLER LİSTESİ

TABLolar LİSTESİ

1. GİRİŞ.....	1
1. 1. Kurutma Mekanizması.....	3
1. 1. 1. Denge.....	3
1. 1. 2. Kurutma Hızı Eğrileri.....	5
1. 1. 3. Sabit Kurutma Hızı Devresi.....	6
1. 1. 4. Sabit Kurutma Hızı Devresi Sonu.....	8
1. 1. 5. Azalan Kurutma Hızı Devresi.....	8
2. KURUTMA ÇALIŞMALARI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	11
2. 1. 1930 Öncesi Kurutma Teorileri.....	11
2. 2. 1930' lardan Sonraki Kurutma Teorileri.....	12
2. 2. 1. Sıvı-Difüzyon Teorisi.....	12
2. 2. 2. Kapiler Teori.....	13
2. 2. 3. Krischer Teorisi.....	16
2. 2. 4. Philip ve De Vries Teorisi.....	17
2. 2. 5. Whitaker Teorisi.....	17
2. 3. Diğer Çalışmalar.....	18
3. KURUTMA TERMODİNAMİĞİ.....	22
3. 1. Kurutmada Kütle ve Enerji Balansı.....	22
3. 1. 1. Kütle Balansı.....	22
3. 1. 2. Enerji Balansı.....	24
4. AKIŞKAN YATAK.....	27
4. 1. Akışkan Yatakta Akışkanlaşma Aşamaları.....	27
4. 2. Akışkanlaşma Özellikleri.....	29

4. 3. Akışkan Yatağın Avantajları.....	30
4. 4. Akışkan Yatakların Kullanıldıkları Yerler.....	30
4. 4. 1. Fiziksel İşlemler	30
4. 4. 2. Kimyasal İşlemler.....	31
4. 5. Akışkan Yatakta Kullanılan Terimler.....	32
4. 5. 1. Minimum Boşluk Oranı (ϵ_{mf}).....	32
4. 5. 2. Şekil Faktörü (ξ)	32
4. 5. 3. Minimum Akışkanlaşma Hızı (U_{mf}).....	33
4. 5. 4. Akışkan Yatakta Basınç Düşmesi	33
4. 5. 5. Akışkan Yatakta Tanecik Terminal Hızı	34
4. 6. Akışkan Yatakta Basınç Aşamaları.....	34
4. 7. Akışkan Yatakta Dağıtıcı Elek.....	35
4. 7. 1. Dağıtıcı Elek Özellikleri	35
4. 7. 2. Dağıtıcı Elek Çeşitleri ve Seçimi	36
5. SÜREKLİ AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA İÇİN MODELLEME.....	38
5. 1. Akış Modeli.....	39
5. 2. Kütle Balansı.....	41
5. 2. 1. Kabarcık Faz	41
5. 2. 2. Gaz Faz	42
5. 3. Isı Balansı.....	44
5. 3. 1. Kabarcık Faz	44
5. 3. 2. Gaz Fazı	46
5. 4. Tek Bir Katı Parçacık İçin Isı Ve Kütle Balansı	48
5. 4. 1. Kütle Balansı.....	48
5.4.2. Isı Balansı.....	49
5. 5. Çözüm Metodu.....	53
5. 6. Yaklaşık Çözüm	53
5. 7. Nümerik Örnek.....	56
5. 8 Nümerik Örnek Çözümü.....	57
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	64
6. 1. Materyal ve Metod	64
6. 2. Materyal.....	71

6. 3. Metot.....	74
6. 4. Akışkan Yatak Kurutucu Deneyi Akış Şeması	77
6. 5. Akışkan Yatak Kurutucu Ayarlarının Değiştirilmesi Akış Şeması.....	78
6. 6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	79
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	101
KAYNAKLAR	105
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	



SİMGELER LİSTESİ

a	Spesifik yüzey, (1/m)
A	Kesit alanı, m^2 (Enine kesit alanı)
c	Nem konsantrasyonu, (kg/m^3)
C	Spesifik ısı, $Ws/kg^\circ C$
d	Çap, m
D	Difüzyon katsayısı, m^2/s
f	Yüzey, m^2
g	Yer çekimi ivmesi, m/s^2
G	Gaz kütlesi akış oranı, kg/m^2s
h	Isı transfer katsayısı, $W/m^2^\circ C$
H	Hacimsel ısı transfer katsayısı, $W/m^3^\circ C$
i	Entalpi, Ws/kg
K	Kütle transfer katsayısı, (1/s)
K	Denklem (89)' da ki sabit $(kg_{nem}/kg_{katı})^n$
L	Akışkan yatak yüksekliği, m
m	Kütle, kg
n	Denklem (89)' da ki boyutsuz üs
N	Kütle akısı, $kg/m^2/s$
p	Basınç, mmHg
q	Isı akısı, W/m^2
r_o	Buharlaştırma ısısı, W/kg
S	Yüzey alanı, m^2
S	Katı besleme oranı, kg/s
T	Sıcaklık, $^\circ C$
u	Nem konsantrasyonu, $kg_{nem}/kg_{katı}$
U	Gaz hızı, m/s
V	Hacim, m^3
$\dot{V}$	Hacimsel akış oranı, m^3/s
x	Nem konsantrasyonu, kg_{nem}/kg_{gaz}
z	Uzunluk – koordinat, m

ϵ	Boşluk – boyutsuz
λ	Isı iletim kat sayısı, W/m°C
μ	Viskozite, kg/ms
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
θ	Zaman, s
ξ	Partikül yuvarlaklığı, (boyutsuz)
δ	Kabarcıktaki yatak kesri



İNDİSLER

b	Kabarcık faz
bc	Kabarcık-bulut faz
e	Emülsiyon faz
eff	Efektif
ex	Dış
g	Gaz
h	Isı transfer
i	Giriş gazı
ib	Giriş- kabarcık faz
mf	Minimum akışkanlaşma
o	Giriş durumu
p	Partikül
r	Relativ
s	Katı faz, yüzey
tot	Toplam
w	Duvar, nem
wg	Nemli gaz, buhar
ws	Nemli katı

BOYUTSUZ SAYILAR

Ar	Arşimet Sayısı
J	Colburn –Faktörü
L	Lewis Sayısı
Nu	Nusselt Sayısı
Pr	Prandl Sayısı
Re	Reynolds Sayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Oda Sıcaklığında Bazı Katıların Denge Eğrileri	4
Şekil 1.2	Zamanın Fonksiyonu Olarak Kurutma Hızı Eğrisi	6
Şekil 1.3	Özgül Nemin Fonksiyonu Olarak Kurutma Hızı Eğrisi	7
Şekil 1.4	Kurutmada Katı Maddede Ara Yüzey	8
Şekil 2.1	Kum Tabakasının Kuruması Esnasında Nem Dağılımı	15
Şekil 2.2	Kumun Kuruması Esnasında Nem Dağılımı	15
Şekil 2.3	Tahta Kuruması Esnasında Nem Dağılımı	16
Şekil 3.1	Süreksiz Kurutucuda Madde Akışı	22
Şekil 3.2	Sürekli Kurutucuda Kütle Akışı	23
Şekil 3.3	Süreksiz Kurutucuda Enerji Akışı	25
Şekil 3.4	Sürekli Kurutucuda Enerji Akışı	26
Şekil 4.1	Akışkan Yatakta Akışkanlaşma Aşamaları	28
Şekil 4.2	Akışkan Yatağın Sıvısal Davranımı	29
Şekil 4.3	Belirli Bir Büyüklükteki Kum Tanecikleri İçin Basınç Düşüşü İle Gaz Hızı İlişkisi	34
Şekil 4.4	Dağıtıcı Elekte deliklerin Yerleşim Düzeni	36
Şekil 4.5	Dağıtıcı Elek Tipleri	37
Şekil 5.1	Sürekli Akışkan Yataklı Kurutucu Modeli	38
Şekil 5.2	Kabarcık Faz Kütle Balansı	41
Şekil 5.3	Katı Partikül İle Giriş Gazı Arasındaki Kütle Transferi	42
Şekil 5.4	Kabarcık Faz İle Gaz Fazı Arasındaki Isı Transferi	45
Şekil 5.5	Katı Partikül Ve Giriş Gazı Arasındaki Isı Transferi	46
Şekil 5.6	Katı Partikül İçin Kütle Balansı	48
Şekil 5.7	Katı Partikül İçin Isı Balansı	49
Şekil 5.8	ψ' nin Fonksiyonu Olarak Giriş Gazının Sıcaklığı Ve Nem Oranı	59
Şekil 5.9	$\psi^* = 0.55$ Olması Halinde Katı Bir Partikülün Nem Oranı Ve Sıcaklık Değişimi	59
Şekil 5.10	ψ' nin Fonksiyonu Olan Hesaplanmış ψ İle ψ' nin Deneme Değeri ψ^* Arasındaki Fark	60
Şekil 5.11	Partikül Çapının Etkisi	60

Şekil 5.12	Giriş Gazı Neminin Etkisi	61
Şekil 5.13	Giriş Gaz Sıcaklığının Etkisi	61
Şekil 5.14	Giriş Gaz Hızının Etkisi	62
Şekil 5.15	Kabarcık Çapının Etkisi	62
Şekil 5.16	Besleme Süresinin Etkisi	63
Şekil 5.17	Kurutucu Duvar Sıcaklığının Etkisi	63
Şekil 6. 1	Dorr – Oliver Akışkan Yatak Kurutucu	64
Şekil 6. 2	Carey Tuz Şirketinin İki Kademeli Akışkan Yataklı Tuz Kurutucusu	65
Şekil 6. 3	P. P. Thomas Ve Y.B.G. Varma Deney Seti	66
Şekil 6. 4	Michael R. Milota Ve James B. Wilson Deney Seti	66
Şekil 6. 5	M. Abid, R. Gilbert, C. Laguerie Deney Seti	66
Şekil 6. 6	Subba Rao Ve Y.B.G. Varma Deney Seti	66
Şekil 6. 7	Akışkan Yataklı Yonga Kurutucu Deney Seti Fotoğrafları	68
Şekil 6. 8	Akışkan Yataklı Yonga Kurutucu Deney Seti Fotoğrafları	69
Şekil 6. 9	Akışkan Yataklı Yonga Kurutucu Deney Seti Şeması	70
Şekil 6. 10	Akışkan Yataklı Yonga Kurutucu Deney Seti Fotoğrafları	73
Şekil 6. 11	Deney 1 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	87
Şekil 6. 12	Deney 1 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	87
Şekil 6. 13	Deney 2 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	88
Şekil 6. 14	Deney 2 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	88
Şekil 6. 15	Deney 3 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	89
Şekil 6. 16	Deney 3 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	89
Şekil 6. 17	Deney 4 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	90
Şekil 6. 18	Deney 4 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	90
Şekil 6. 19	Deney 5 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	91
Şekil 6. 20	Deney 5 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	91
Şekil 6. 21	Deney 6 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	92
Şekil 6. 22	Deney 6 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	92
Şekil 6. 23	Deney 7 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	93
Şekil 6. 24	Deney 7 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	93
Şekil 6. 25	Deney 8 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	94
Şekil 6. 26	Deney 8 Şartlarında Yonga Özgöl Neminin Zamana Göre Değişimi	94

Şekil 6. 27 Deney 9 Şartlarında Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişimi	95
Şekil 6. 28 Deney 9 Şartlarında Yonga Özgül Neminin Zamana Göre Değişimi	95
Şekil 6. 29 Sıcaklığın Etkisi İle Nem Oranının Zamana Göre Değişiminin Deney 1, 2, 3 İçin Karşılaştırılması	96
Şekil 6. 30 Yükleme Miktarı Ve Nem Oranının Değişiminin Etkisinin Deney 1 Ve Deney 5 İçin Karşılaştırılması	96
Şekil 6. 31 Klapenin Açık Veya Yarı Açık Konumuna Göre Nem Oranının Zamana Göre Değişiminin Deney 1 Ve Deney 6 İçin Karşılaştırılması	97
Şekil 6. 32 Dağıtıcı Eleğin Etkisinin Deney 1 Ve Deney 9 İçin Karşılaştırılması	97
Şekil 6. 33 Dağıtıcı Eleğin Etkisinin Deney 8 Ve Deney 9 İçin Karşılaştırılması	98
Şekil 6. 34 Yonga Tipinin Değişiminin Etkisinin Deney 7 Ve Deney 8 İçin Karşılaştırılması	98
Şekil 6. 35 Yonga Tipinin Değişiminin Etkisinin Deney 1 Ve Deney 7 İçin Karşılaştırılması	99
Şekil 6. 36 P. P. Thomas Ve Y.B.G. Varma' nın Yeşil Biberin Kurutulması İle İlgili Deney Sonuçları	99
Şekil 6. 37 Kabin Ve Akışkan Yatak Kurutucuda Islak Yonga Kütlesinin Zamana Göre Değişiminin Karşılaştırılması	100
Şekil 6. 38 Kabin Ve Akışkan Yatak Kurutucuda Yonga Özgül Neminin Zamana Göre Değişiminin Karşılaştırılması	100

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 6. 1	Deneylerde Değişen Parametreler	76
Tablo 6. 2	Deney 1 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	80
Tablo 6. 3	Deney 2 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	81
Tablo 6. 4	Deney 3 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	81
Tablo 6. 5	Deney 4 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	82
Tablo 6. 6	Deney 5 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	83
Tablo 6. 7	Deney 6 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	84
Tablo 6. 8	Deney 7 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	84
Tablo 6. 9	Deney 8 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	85
Tablo 6. 10	Deney 9 Şartlarında Ölçülen Ve Hesaplanan Deney Verileri	85
Tablo 6. 11	Kabin Kurutucu Deney Sonuçları	86



1. GİRİŞ

Kurutma terimi genelde herhangi bir malzemeden nemin uzaklaştırılmasını içeren bir süreci tanımlamak amacıyla kullanılır. Ancak, nemin uzaklaştırılma yöntemi, uzaklaştırılan nemin miktarı ve kurutma işlemi sonunda elde edilen ürünler göz önüne alınarak daha dikkatli bir tanım yapmak gerekmektedir. Örneğin (süt tozu ve hazır çorba üretiminde olduğu gibi) bir çözeltinin sıcak bir gaz akımı içerisinde damlacıklar halinde püskürtülmesi ve sıvının buharlaştırılarak alınması teknik anlamda kurutma sayılmasına rağmen, aynı çözeltinin kaynatılarak sıvısının buharlaştırılması bundan farklı bir olaydır ve bu işlem buharlaştırma olarak bilinir. Benzen gibi bir sıvı içerdiği az miktardaki sudan damıtma denen bir işlemle ayrılabilirken gazlar ve sıvıları içerdikleri az miktardaki sudan yutma işlemi ile ayırmak mümkündür. Islak bir katının merdaneler arasında sıkıştırılarak neminin bir kısmının alınması ise sıkma olarak adlandırılır. Bu tartışma kurutmanın aşağıdaki tanımı yapılarak bitirilecektir.

Kurutma katı bir ürün elde etmek amacı ile, bu katının içerdiği sıvının (genellikle su) kontrollü bir ısı işlem sonucu bir gaz fazına (genellikle hava) aktarılmasıdır.

Katı maddenin içerdiği nem, katıyı oluşturan moleküller arasındaki boşluklarda, kılcal borularda veya yüzey tarafından yutulmuş olarak bulunur. Böyle bir katı için, birim katı kütlesinin içerdiği neme “özellik nem” denir.

Kurutma hem günlük ev işlerimizde hem de büyük ölçekli endüstriyel işlemlerde yer alan bir prosesdir. İngiltere’ de endüstriyel enerji gereksiniminin %7’ si kurutma nedeniyle [1]. Lebedev ve Ginzburg Sovyetler Birliği’ nde kurutmada kullanılan yakıt tüketiminin daha da yüksek (%10) olduğunu kaydetmektedir [1]. Bugün ilaç, boya, deterjan, kağıt, yiyecek, tahıl, seramik, tekstil, orman... gibi birçok sanayi dalında kurutma, üretimdeki rolü ve enerji tüketimi açısından önemli bir yer tutmaktadır.

Ülkemizde kurutmada kullanılan enerjinin genel enerji tüketimindeki payını veren bir çalışma bulunmamakla birlikte sanayileşme sürecinde bulunan ülkemizde kurutmanın enerji tüketimi açısından önemli bir yer tuttuğunu söylemek mümkündür.

Kurutma prosesi tasarlanırken ekonomik olması yanında kaliteli ürün eldesi de göz önünde tutulur. Kaliteli ürün eldesi kontrollü kurutmayı, kontrollü kurutma ise sıcaklık ve nem kontrolünü zorunlu hale getirmektedir. Bu kontrolün yapılabilmesi ise sıcaklık ve nem dağılımının belirlenmesiyle mümkündür.

Akışkan yataklı sistemler, reaktörler, ısı değıştirgeçleri, yakıcı sistemler veya kurutucular gibi çeşitli işlemlerde gittikçe artan bir yoğunlukta kullanılmaktadır. Tüm bu işlemlerde ısı geçişı, akışkan sıcaklığı, ısı iletim katsayısı, taneciklerin yoğunluğu, büyüklüğü termofiziksel özellikleri, yatağın geometrik yapısı gibi bir çok değışkene bağılıdır. Değışken çokluğu ve ısı geçişı üzerine etkilerinin karmaşıklığı nedeni ile araştırmalar tarafından elde edilen ampirik bağıntılar genellikle kendi deney koşulları içerisinde geçerli olmaktadır.

Bu çalışmada Palancz B. [2]' nin sürekli akışkan yataklı bir kurutucu için verdiği matematik model çözümlenmiş ve sonuçlar çıkarılmıştır. Daha sonra deneysel çalışmada akışkan yataklı kurutucuda yonga kurutması incelenmiş ve kuruma hızı tespit edilmeye çalışılmıştır. Kuruma hızına etki eden parametreler modelin çözümü ile karşılaştırılmış ve uygun neticeler alınmıştır.

Bugün teknikte ısı değıştiricilerinde kömürün ve atık çöplerin yakıldığı sistemlerde veya kurutucularda kullanılan akışkan yatakların arzu edilen verimi sağlayacak şekilde tasarımının yapılması, ekonomik ve bilimsel olarak önemli bir mühendislik uygulamasıdır. Çalışmada akışkan yataklı kurutucu teorik ve deneysel olarak incelenmiş ve akışkan yataklarla ilgili özellikler aydınlatılmaya çalışılmıştır.

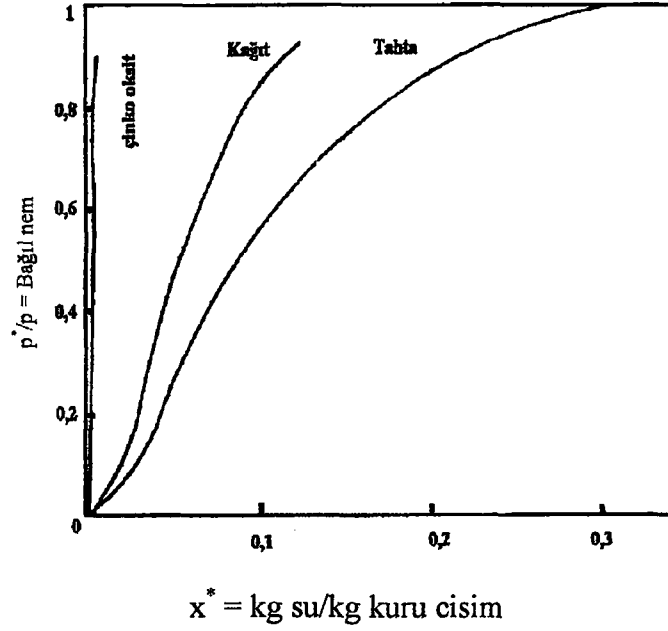
1. 1. Kurutma Mekanizması

Kurutulacak ortam içinde sıcaklık ve nem dağılımını belirleyebilmek kurutma mekanizmasının nasıl oluştuğunun belirlenmesi ile mümkündür.

1. 1. 1. Denge

Su hangi fazlarda olursa olsun bulunduğu koşullara bağlı olarak belli bir buhar basıncı gösterir. Buzun ve sıvı haldeki suyun buhar basıncına “su buharı basıncı” denir. Buna karşılık havadaki su buharı basıncına havanın toplam basıncı içindeki miktarını vurgulamak için “su buharı kısmi basıncı (p^*)” denir. Su buharlaşmasındaki itici güç suyun buhar basıncı ile kendisini çevreleyen havanın “su buharı kısmi basıncı” arasındaki farkıdır. Bu nedenle bir sıvı çözelti veya ıslak katının içerdiği nem, katının doğal yapısına, sıcaklığına ve nem derecesine bağlı olarak buharlaşmak ister. Eğer nemli katı, p^* kısmi basıncı altında sürekli taze gaz sağlayacak bir etkinin altında ise katı ya buharlaşma ile nem kaybeder veya katı neminin buhar basıncı p^* değerine eşit oluncaya kadar nem kazanır. Katı veya gaz dengeye ulaştığında katının içerdiği nem, mevcut koşullarda katının “denge nemi” diye isimlendirilir. Bazı ürünlerin tipik kurutma denge eğrileri Şekil 1.1’ de gösterilmiştir. Burada nemden kastedilen su’ dur. Grafikte, denge durumunda, hareketli gazın su buharının kısmi basıncı p^* , saf suyun buhar basıncı p' ye bölünerek gazın bağıl nemi veya bağıl doymuşluğu elde edilmiştir. Böylece eğriler sadece bir sıcaklık için faydalı olmak yerine en geniş sıcaklık bölgesine uygulanabilir hale getirilmiştir.

Özel durumlar dışında katıların çevre koşullarının belirlediği denge nem miktarı altındaki bir değere kurutulması gereksizdir çünkü, kurutucudan çıkan aşırı kurumuş katı bünyesindeki nem bir süre sonra çevresinden alacağı nem ile denge nem miktarına ulaşacaktır.



Şekil 1.1 Oda Sıcaklığında Bazı Katıların Denge Eğrileri [3].

Doymuş hava ile denge halinde bulunan maddenin sahip olabileceği en düşük su konsantrasyonuna “bağıl su” denir. Bağıl su içeren maddelere de “higroskopik maddeler” adı verilir.

Maddelerin içerdiği nemi tanımlamak için kullanılan belli terimler aşağıda özetlenmiştir:

1. Nem içeriği (kuru bazda) (x_k): 1 kg kuru maddenin içerdiği nemdir ve x_k ile gösterilir.
2. Nem içeriği (ıslak bazda) (x): 1 kg madde içindeki nemdir. Islak ve kuru bazda nem içeriği arasında

$$x = \frac{x_k}{1 + x_k} \quad (1)$$

bağıntısı yazılabilir.

3. Denge nemi (x^*): Verilen kısmi buhar basıncı ile denge sağlandığı zaman maddenin içerdiği nemdir.

4. Serbest nem: Bir maddenin içerdiği denge neminden fazla olan nemdir. ($x - x^*$). Yalnızca serbest nem buharlaştırılabilir ve katının içerdiği serbest nem, katının içinde bulunduğu ortamın buhar konsantrasyonuna bağlıdır.

1. 1. 2. Kurutma Hızı Eğrileri

Birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi “kurutma hızını” belirler. Kaliteli ürün eldesi ve ısı ekonomisi bakımlarından kurutma hızı büyük önem taşımaktadır. O halde, bir katı ürünü kuruturken en elverişli kurutma hızının ne olacağı sorusu öncelikle cevaplanmalıdır. Katı bir maddenin hava ile kurutulmasına dış koşulların etkisini inceleyen çalışmalardan elde edilen deneysel bilgiler, sabit kurutma koşulları (hava hızı, nem, sıcaklık ve basınç) altında katıya ait nem miktarının, zamanın bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur. Deney sonuçlarının ya grafik ya da sayısal yoldan türevi, kurutma hızını verir ve bu ya serbest nem ya da zaman karşıt olarak çizilir. Aşağıda verilen Şekil 1.2 zamanın fonksiyonu olarak elde edilebilecek yaklaşık bir kurutma hızı eğrisini göstermektedir. Eğri incelendiğinde kuruma sürecinin dört devreden oluştuğu görülür [3].

(1) Yükselen Hız Devresi (AB)

Bu devrede verilen ısı miktarı, malzemenin ve bu malzemenin bünyesinde bulunan sıvının sıcaklığını yükseltmeye yarar. Bu devrede buharlaşma hızı hemen hemen üssel değişkenli bir kanun uyarınca, sıcaklıkla birlikte artar. Buharlaşma oranının gitgide artması nedeniyle bu devreye söz konusu isim verilmiştir.

(2) Sabit Hız Devresi (BC)

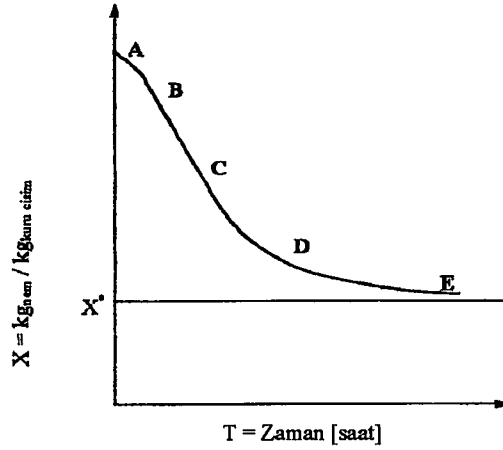
Bu devre boyunca malzemenin bütün açık yüzeyleri ıslaktır ve buharlaşma bu sıvı filmi yüzeyinden gerçekleşmektedir. Gerek buharlaşma hızı ve gerekse malzemenin ıslak yüzeylerinin sıcaklığı, bu süre boyunca maksimum düzeyde ve sabit değerdedir.

(3) Azalan Hız Ön Devresi (CD)

Malzeme yüzeyi üzerinde kuru lekeler görülmeye başladığı anda kritik nemlilik derecesine (x_c) erişilmiş ve bu devreye girilmiş demektir. Bu devrede katı yüzeyine difüze edebilen su buharlaşmaktadır. Malzemenin ıslak yüzey alanı derece derece azaldıkça buharlaşma hızıda düşer. Malzemenin tüm açık yüzeyi kuruduğu zaman bu devre de sona erer.

(4) Azalan Hız Son Devresi (DE)

Bu devre sırasında nemlilik kayıp oranı dış hava şartlarından çok az etkilenirken buharlaşma hızı ve sıvının malzeme içinde yaptığı dağılma hareketlerinin nem kaybı üzerindeki etkisi daha fazladır.



Şekil 1.2 Zamanın Fonksiyonu Olarak Kurutma Hızı Eğrisi [3]

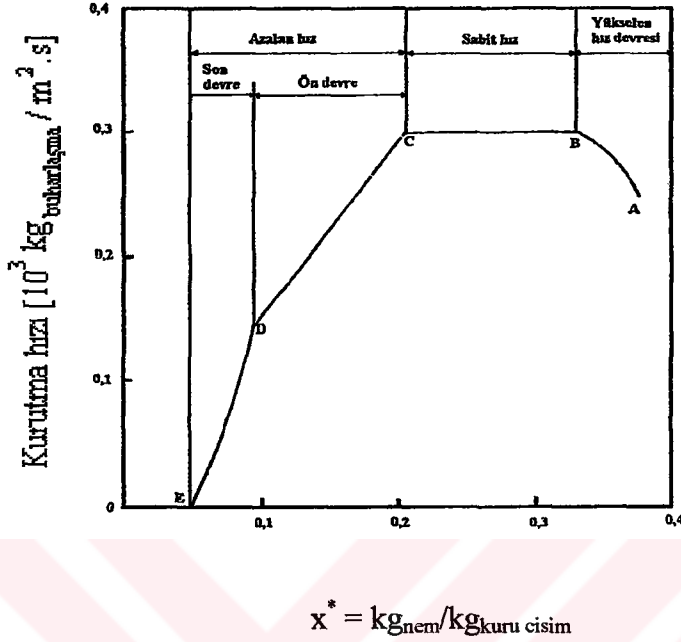
Birinci ve dördüncü bölge, gerek zaman gerekse tüketilen enerji bakımından diğer bölgeler göre önem taşımamaktadır. Bu nedenle ikinci ve üçüncü bölgeyi incelemek yeterli olmaktadır. Bu inceleme ilerleyen alt bölümlerde yapılacaktır.

Yukarıda birim zamanda birim alandan buharlaşan su kütlesi olarak tanımladığımız (ve kurutma prosesinin tasarımında çok kullanılan) kurutma hızının katının kuru bazda özgül nemine bağlı olarak değişimi ise Şekil 1.3’ de gösterilmiştir. Uygulamada daha çok kullanılan bu eğri Şekil 1.2’ deki eğriye çeşitli noktalarda çizilen teğetlerin eğimleri hesaplanarak çizilmiştir.

1. 1. 3. Sabit Kurutma Hızı Devresi

Higroskopik gözenekli bir katı madde kurutulmaya başladıktan ve kısa bir dengeye ulaşma durumundan (Şekil 1.3’ de AB arası) sonra “sabit kurutma” devresine girer.(Şekil 1.3’ de BC noktası). Bu devrede kurutma hızı sabittir ve sadece katı maddenin yüzeyine etki eden değişkenler tarafından kontrol edilir. Bu değişkenler genellikle hava akımının hızı, akım modeli, sıcaklığı ve nem yüzdesidir. Sabit kurutma devresinde bu değişkenler sabit kaldığı sürece kurutma hızı da sabit kalır. Sıcak havadan katı maddeye aktarılan ısı katının içindeki nemi buharlaştırmada dengeli bir biçimde kullanıldığı için sabit kurutma hızı devresinde ısı ve kütle transferi arasında dinamik bir denge kurulur. Bu süreç esnasında katının iç nem hareketi tüm dış yüzeyi yaş olarak korumaya yeter çabukluktadır.

Yani bu süreç boyunca dış yüzey her an neme doymuş durumdadır (Şekil 1.4a). Dolayısıyla yağ katının kütle transfer alanı ısı transfer alanına eşittir. Başka bir deyişle kurutma hızı ısı transferi tarafından kontrol edilir.



Şekil 1.3 Özgül Nemin Fonksiyonu Olarak Kurutma Hızı Eğrisi [3]

Katı maddenin fiziksel özellikleri kurutma hızını etkilemediği için bu devrede yüzey şartlarında Newton soğuma ifadesi yardımıyla ısı ve kütle transferi arasındaki denge şöyle yazılabilir:

$$-\frac{dx}{d\tau} = \frac{KA_H(t_G - t_s)}{\lambda} = k_k A_k (P_s - P_G) \quad (2)$$

Burada x katının nem miktarı, τ zaman, K radyasyon dahil toplam ısı transfer katsayısı, A_H ve A_K sırasıyla ısı ve kütle transfer yüzeyleri (hava akımı ile temasta olan ıslak yüzeyin alanı), t_G sıcak hava sıcaklığı, t_s ıslak yüzey sıcaklığı, λ (t_s sıcaklığındaki) suyun buharlaşma gizli ısı, k_k ıslak yüzeyden havaya kütle transfer katsayısı, P_s yüzey sıcaklığındaki sıvı buharının basıncı, P_G sıcak hava içindeki sıvının kısmi buhar basıncı ve $dx/d\tau$ kurutma hızıdır. Kurutma hızının hesaplanmasında (2) eşitliği her iki şekilde kullanılabilir. Bununla beraber, ısı transfer katsayısını kullanarak kurutma hızının hesaplanması daha güvenilir bir yol olarak önerilmektedir çünkü ıslak yüzey sıcaklığı t_s ' in bulunması esnasında yapılacak yanlışlık, itici güç olan $t_G - t_s$ üzerinde $P_s - P_G$ terimi

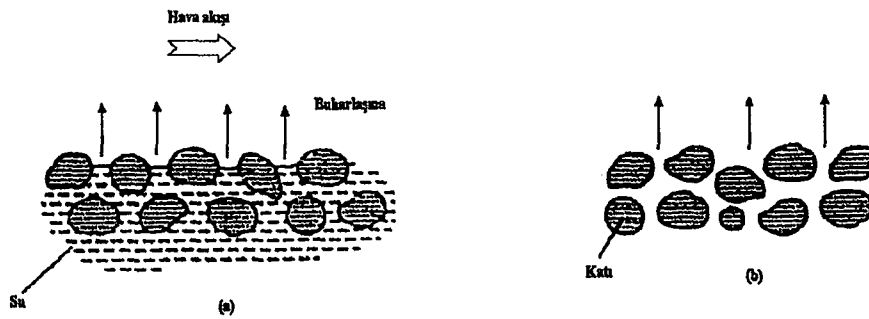
üzerindeki orana daha az etkili olur. Bu devre için önerilen (analitik ve ampirik) çeşitli bağıntılar Treybal [3] ve Keey [27] tarafından verilmiştir.

1. 1. 4. Sabit Kurutma Hızı Devresi Sonu

Sıcak havadan katı maddeye aktarılan ısı miktarında azalma olmamasına rağmen kurutma ilerledikçe katı içerisindeki nem miktarında devamlı olarak azalma meydana gelir. Bunun sonucu olarak da yüzeyin devamlı olarak ıslak kalması zorlaşır. Yüzeyde ilk kuru noktanın oluştuğu duruma “kritik nokta” adı verilir (Şekil 1.3’ de C noktası). Katının nemi de “kritik nem yüzdesi (x_c)” diye tanımlanır. Kritik nokta, “sabit kurutma devresi” nin sonunu ve “azalan kurutma devresi” nin başlangıcını simgeler. Kritik nokta katının cinsine, büyüklüğüne ve şekline bağlı olduğu kadar sabit kurutma devresindeki kurutma hızına da bağlıdır.

1. 1. 5. Azalan Kurutma Hızı Devresi

Kritik noktaya ulaşıldıktan sonra azalan kurutma hızı devresi başlar ve bu andan itibaren yüzeydeki ıslak alan miktarında devamlı bir azalma olur (Şekil 1.3’ de CE hattı). Bu durum Şekil 1. 4b’ de gösterilmiştir. Şekil 1.2’ deki kurutma hızı eğrisinde CD hattına “Azalan hız ön devresi”, hız eğrisinin geri kalan kısmına (DE) “azalan hız son devresi” adı verilir [27].



Şekil 1.4 Kurutmada Katı Maddede Ara yüzey

(a) Sabit kurutma hızı devresi

(b) Azalan kurutma hızı devresi

Bu devredeki kurutma hızı katı maddenin iç gözenek yapısının ve katının içindeki nemin yüzeye doğru akmasına neden olan kuvvetlerin etkisi altındadır. Sıcak havanın özelliklerinin artık kurutma hızına olan etkisi kaybolmuş, onun yerini katının iç yapı özellikleri almıştır. Azalan hız devresinde uzaklaştırılan nem miktarı az olmakla birlikte bu devre için gerekli olan zaman çoğunlukla oldukça uzundur [3, 39]. Diğer taraftan katı madde yüzeyindeki kuru alan gitgide arttığı için yüzeyin ve hatta katının yaş hava sıcaklığında kaldığı söylenemez. Bunun sonucu olarak da kurutma hızının hesaplanmasında katının nem dağılımının yanında sıcaklık dağılımının da göz önünde bulundurulması gereklidir. Katı maddenin yüzeyinde meydana gelen farklı sıcaklıktaki bölgeler mevcut problemi daha da karmaşık bir duruma sokar çünkü yüzey buharlaşmasını formüle eden Newton soğuma kanunu bu durumda tam olarak uygulanamaz [27, 40]. Yüzey sıcaklığı t_s , yüzey ıslak alanı A_K ve ısı transfer katsayısı K ve kütle transfer katsayısı k_K değişkendirler. Sonuç olarak, katı maddenin kurutulmasını (genellikle) azalan kurutma hızı devresi kontrol ettiği için azalan kurutma hızı hesaplanmasında pek çok araştırma yapılmış, değişik yaklaşımlar uygulanmış ve değişik kurutma modelleri bulunmuştur. Bu modeller Bölüm 2’de özetlenmiştir.

Azalan kurutma hızı devresinde kurutma hızının formüle edilmesi başlıca iki yoldan olabilir: (1) gözlemsel (ampirik) yaklaşım, (2) kuramsal yaklaşım. Bu devrede kurutma hızı maddenin büyüklüğüne ve şekline önemli ölçüde bağlı olduğu için birinci tip yaklaşım [çok sınırlı bir sonuç vermesi nedeniyle] genellikle tercih edilmez. Kuramsal yaklaşımın iyi bir sonuç vermediği durumlarda gözlemsel yaklaşım tercih edilmelidir. Kuramsal yaklaşımın başlıca özelliği kurutulması istenen maddenin iç yapısal özelliklerini doğru olarak ölçmek ve elde edilen bu değerleri kurutma hızının hesaplanmasında kullanmaktır. Böyle bir yöntemle elde edilen bu değerleri kurutma hızının hesaplanmasında kullanmaktır. Böyle bir yöntemle elde edilmiş kurutma hızı genellikle değişik katıların kurutulmasında kullanılabilir. Kuramsal yaklaşımla azalan kurutma hızının formüle edilmesinde karşılaşılan başlıca zorluklar şunlardır [4, 40]:

1. Katı maddenin neminin tümü serbest durumda olmayabilir. Serbest olmayan nemin buharlaştırılması için fazla enerjiye ihtiyaç vardır ve bu enerjinin hesaplanması ve model içinde formüle edilmesi zordur.

2. Katı maddenin iç gözeneklerinde bulunan nem, kurutma sürecinde katının içinde buharlaşabilir ve sıvı- buhar karışımı halinde katı yüzeyine çekilir.

3. Kurutma sırasında katı madde bazı şekil değişikliğine uğrar ve ayrıca katı yüzeyinde ince bir kabuk tabakası meydana gelir. Bunun sonucunda modelin geometrik açıdan büyük zorlukları olur. Katının yüzeyinde oluşan ince kabuk tabakasının fiziksel özellikleri de katının fiziksel özelliklerinden tamamen başka bir değerde olabilir.

4. Sonuncu ve belki de en büyük zorluk ise azalan kurutma hızı devresinde katının içindeki nemin yüzeye hangi mekanizmalar ile taşındığının belirlenmesidir. Fortes ve Okus [4] literatürde buldukları bu mekanizmaları aşağıdaki şekilde özetlemişlerdir :

1. Konsantrasyon gradyenleri nedeniyle oluşan sıvı difüzyonu,
2. Katının şekil değiştirmesi ya da iç buharlaşma nedeniyle gözeneklerde meydana gelen yüksek sıcaklıktaki bölgelerin yarattığı toplam basınç farkı nedeniyle meydana gelen buhar difüzyonu,
3. Kılcal akım mekanizmasıyla hareket eden sıvı nem,
4. Katı yüzeydeki gözeneklerde bulunan nem ile yüzeye absorbe olmuş sıvı nem arasında meydana gelen yüzeysel difüzyon,
5. Katının içinde buharlaşan nem ile sıvı nem arasında oluşan buharlaşma-yoğunlaşma mekanizmasıyla meydana gelen aktarım,
6. Büyük gözenekli katılarda yerçekimi etkisi ile meydana gelen sıvı aktarımı.

Bundan sonraki bölümde kurutma modellerinden en fazla rağbet görenler kısaca özetlenecek ve bu modellerin kullanıldığı teorik ve deneysel çalışmaların literatür taraması verilecektir.

2. KURUTMA ÇALIŞMALARI İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde çeşitli kurutma modelleri kısaca özetlenecek, bu modellerin kullanıldığı analitik ve sayısal çalışmaların bir literatür taraması verilecektir. Daha önceki yıllarda ilk adımları atılsa da kurutma teorilerinin ana yapıları 1930' lardan sonra kurulduğundan, çalışmalar 1930 öncesi ve sonrası olmak üzere iki ayrı devrede incelenecektir.

2. 1. 1930 Öncesi Kurutma Teorileri

İlk kurutucu patenti Almanya'da 1878' de alınmış ve bu kurutucunun tasarımına esas alınan teori yalnızca ısı transferi olmuştur. Bundan sonra 1920' lerde psikrometrinin gelişmesi ve kurutmanın uygun bir kinetik açıklamasının aranmaya başlamasından önce sıcaklık ve buharlaşma arasında matematiksel veya grafik bağıntılar olarak en kayda değer çalışmalar Grosvenor'un ve Mollier'in sıcaklık-entalpi-nem bağıntıları ve buna dayalı diyagramlardır.

1920' lerden çok önceleri Davies, buharlaşma hızının, sıvı buharı ve havanın 'buhar gerilimi' farkına eşit olduğunu ifade etmiş ve çeşitli sıvılarla ısıtılıp elle sıkılarak kurutulan yün kumaşın kurummasının gelişimine ait değerler vermiştir. Genellikle son % 10'luk rutubetin alınması için gerekli zaman ilk % 50 için gerekenden fazla çıkmıştır. Burada belirtileri izlenen ve kurutmada en önemli önerme olarak alınabilecek olan "kurutma etkisi ile nem azaldıkça kurutma hızı da giderek azalır" önermesi Luikov' a göre 1908'de Kossevitch tarafından bulunmuştur [1]. Bir tekstil teknolojistisi olan Fischer de boyanmamış tek bir yün elyafı ile yaptığı deneyler sonucunda kurutmayı 3 devreye ayırarak bunlarla ilgili bağıntıları verip deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Fischer' in maddelerin nem kayıp davranışlarını incelediği yıllarda ABD' de de Lewis kuruma sürecini belirlemeye çalışıyordu. Lewis bulgularını " bir katının kuruması iki bağımsız işlemde oluşur: (1) katının dış yüzeyinden nemin buharlaşması, (2) nemin katının içlerinden dış yüzeye doğru yayılması" şeklinde özetlemiştir. Lewis yayılmanın sıvı fazda oluştuğunu varsaymış ve bazen birinci, bazen ikinci sürecin kurumayı belirlediğini kabul ederek bunu doğrulayan deney sonuçları vermiştir.

2. 2. 1930' lardan Sonraki Kurutma Teorileri

Bu teorileri sıvı-difüzyon teorisi, kapiler teori, Krischer teorisi, Philip ve De Vries teorisi, Luikov teorisi ve Whitaker teorisi şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

2. 2. 1. Sıvı-Difüzyon Teorisi

Bu gruba giren çalışmalarda kurutmada esas alınan olay, nemin sıvı yayılması ile hareketidir. En genel haliyle;

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \nabla(K_L \nabla X) \quad (3)$$

şeklinde formüle edilen Fick denklemlerin değişik form ve varsayımlarla ifade edildiği bu süreçte x [kuru baz esas alınarak hesaplanan] nem oranı, K_L sabit-effektif difüzyon katsayısıdır. Bu yönde ilk çalışma Lewis' indir ama Lewis de "bazı hallerde kurumanın yayılma, bazı hallerde ise yüzeyden buharlaşmaya belirlendiğini" not etmiştir. Bu fikir sonradan Sherwood tarafından bir dizi makalede işlenmiştir. Sherwood, tuğla çamuru gibi bazı malzemelerde kurutma ilerledikçe, eğer deney sonuçlarına uyulmak isteniyorsa, yayılma katsayısının giderek küçüldüğünü kabul etmek gerekir" diyerek sıvı-difüzyon teorisinin sınırlılığını belirtmiştir. Sherwood ve Gilliland ve Sherwood' un sıvı difüzyon formülüyle çalıştığı yıllarda Newman da,

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4)$$

formundaki difüzyon eşitliğinin bir dizi çözümünü vermiştir [41, 42]. Burada C nem konsantrasyonu, τ zaman, D deneysel olarak belirlenmiş difüzyon katsayısı ve x koordinatıdır.

Sıvı-difüzyon teorisi özellikle yiyecek kurutmasında günümüzde de tercih edilerek kullanılmakta ve bu çalışmalarda difüzyon katsayısı ya sabit ya da sıcaklık ve/veya nem konsantrasyonunun doğrusal bir fonksiyonu kabul edilmektedir [4].

Bu teoride sıvı hareketinin kurutmanın her devresinde nem transferinin tek belirleyicisi olarak alınması eleştirilebilir. Sıvı difüzyon eşitliklerinin (4) nolu eşitlikteki gibi kullanılması, difüzyonun sabit sıcaklıkta olduğunun kabulü ve böylece katı içindeki sıcaklık gradyanlerinin ihmal edilmesiyle özdeştir. Difüzyon teorisi büzüşmeyi, yüzey

sertleşmesini göz önüne almamaktadır; bu nedenle daha yeni teorilerde difüzyon katsayısı ya anlamını yitirmiş ya da nem konsantrasyonu ve sıcaklığa bağlı ve değişik etkilerin ortak karşılığı bir değer haline dönüşmüştür.

2. 2. 2. Kapiler Teori

Kapilerite, sıvının, bir katının çatlaklarından ve üst yüzeyinden sıvı ve katı arasındaki moleküler çekim nedeni ile akımı anlamına gelir. Bu kavram ilk defa Buckingham tarafından analiz edilerek doymamış kılcal akımın itici güç olarak “kapiler potansiyel” kavramı öne sürülmüştür [6].

Kapiler potansiyel veya emme ψ , kılcal bir çatlakta eğrisel hava-su ara yüzeyinde hava ve su arasındaki basınç farkıdır. Ara yüzeyin eğriliği suyun yüzey geriliminden oluşur. Kılcal sıvı akım eşitliği,

$$J_L = -K_H \nabla \psi \quad (5)$$

şeklinde dir. Burada K_H doymamış hidrolik iletim katsayısı, ψ kapiler potansiyelidir.

İzotermal koşullarda ise kapiler potansiyelin genellikle nem konsantrasyon gradyeniyle orantılı olduğu varsayılır ve (5) ifadesi,

$$J_L = -K_H \rho \nabla X \quad (6)$$

şeklini alır [43, 44]. Burada ρ katının özgül kütlesi, X nem miktarıdır.

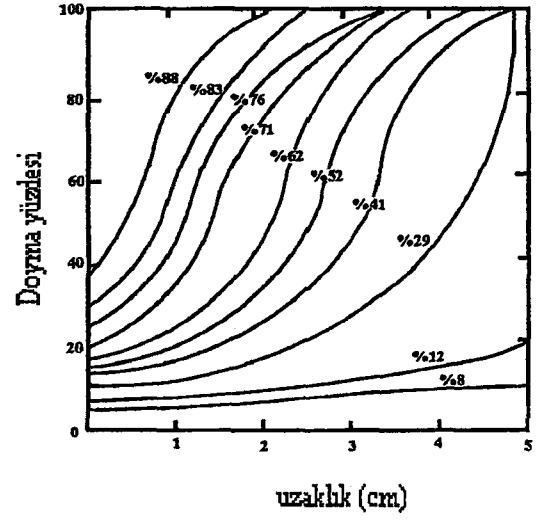
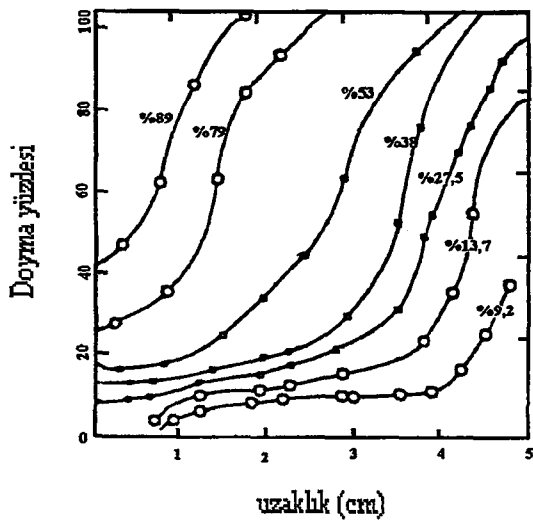
Doymamış gözenekli ortamda sıvı hareketlerinin incelenmesinde yüzey gerilim etkilerinin göz ardı edilmeyeceğinin araştırmacılar tarafından ifade edilmesinden sonra Comings ve Sherwood da bu etkiyi çabucak anlamışlar ve kılcal olay sonucu sıvı hareketinin ve moleküler yayılma sonucu buhar hareketinin açıklanmasını içeren kısa bir not yayınlayıp kilin kurumasıyla ilgili bir dizi deney yapmışlardır. Ceaglske ve Hougan Haines’ in kılcal basınç ve sıvı miktarı arasındaki bağıntı üzerine ayrıntılı çalışmasını kullanarak 2 inç kalınlığındaki bir kum tabakasının kuruması esnasındaki yoğunluk dağılımını hesaplayabilmişlerdir. Şekil 2.1 bu sonuçları göstermekte ve söz konusu bu özel durum için, gözenekli bir katının kuruması esnasında nem hareketinde, kılcal etkinin hakim bir rol oynadığını açıkça sergilemektedir.

Bu çalışmaları Hougan VÇA’ [6] nın, çok uygun bir isimle “Kurutmada Difüzyon Eşitliklerinin Kullanımındaki Sınırlamalar” diye adlandırdıkları geniş araştırmaları izlemiştir. Burada deney bulguları ile difüzyon eşitliğinin çözümleri ve kılcal basınç-

yoğunluk eğrilerine dayanan hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Kum için yapılan karşılaştırma Şekil 2.2' de görülmektedir.

Burada sonuçlar belirli bir şekilde kapiler teori lehinedir. Araştırmada ayrıca kil, sabun, kağıt, kağıt hamuru, kurşun saçmasının kurumasi ile ilgili sonuçlar verilmiş ve bunlarda sabit difüzyon katsayısı kullanılarak difüzyon eşitliğini deney bulguları ile karşılaştırmanın mümkün olmadığı vurgulanmıştır. Tahta için ise durum farklıdır; nem miktarı belirli bir değerin altında olduğu sürece deneysel değerlerle difüzyon eşitliği arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmektedir. Tahta kurumasi esnasında nem dağılımı için Tuttle tarafından elde edilen değerler ile difüzyon eşitliğinden hesaplanan değerler Şekil 2.3' de karşılaştırılmıştır.

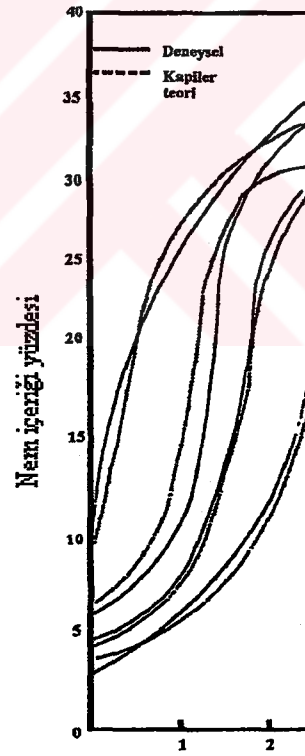
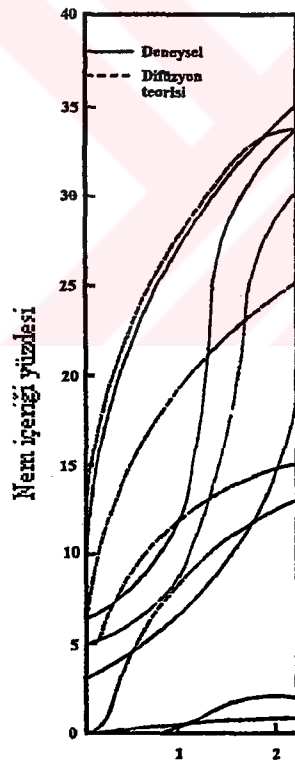




Şekil 2.1 Kum Tabakasının Kuruması Esnasında Nem Dağılımı [5].

(a) Deneysel

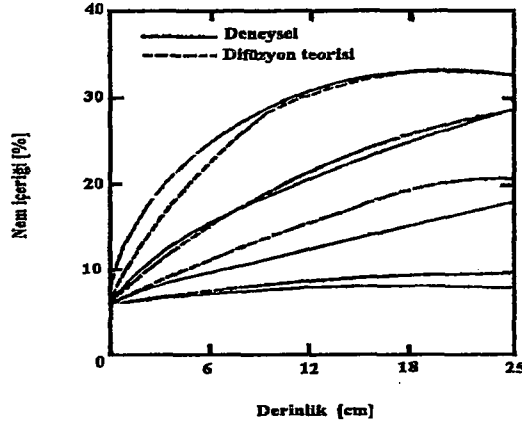
(b) Teorik



Şekil 2.2 Kumun Kuruması Esnasında Nem Dağılımı [6].

(a) Difüzyon Teorisiyle;

(b) Kapiler Teori ile karşılaştırma



Şekil 2.3 Tahta Kurutması Esnasında Nem Dağılımı [6].

Kapiler teori kurutma mekanizmasını difüzyon modeline göre daha iyi bir biçimde tanımlamasına rağmen modelin matematiksel formülasyonu oldukça karmaşıktır. Dolayısıyla elde edilen kurutma hızı modelleri birbirlerinden oldukça değişiktir ve uygulamaları da o oranda zordur [40].

2. 2. 3. Krischer Teorisi

Değişik gözenekli ortamlarda ısı ve kütle transferini analiz eden Krischer, kurutmada ısı transferinin rolünü açıklayan ilk bilim adamlarındandır ve O' nun çalışmaları geliştirilen kurutma teorilerinin çoğu için temel oluşturmuştur [1].

Krischer, nemi yüzeye ulaştıran etkinin difüzyonal etki ile kapiler etkinin toplamı olduğunu düşünmüş ve buhar fazındaki hareketin difüzyonla, sıvı fazdaki hareketin ise kılcal boru etkisi ile olduğunu ve her iki fazda hareketin tek yönlü olduğunu kabul etmiş ve Henry' nin yazmış olduğu sıcaklık ve nem içeriği arasındaki lineer bağıntıyı kullanarak sıcaklık ve nem yoğunluğunu zamanın bir fonksiyonu olarak ifade etmiştir. Ancak, teorinin kurutma zamanını doğru bir biçimde hesaplayabilmesi için gözenekli cismin iki fiziksel özelliğinin bilinmesi gereklidir. Bunlardan birincisi kapiler geçirgenlik, ikincisi difüzyonal direnç katsayısıdır. Bu iki katsayı genellikle gözenekli cisimde gözeneklerin yapısına, sıcaklığına ve nem dağılımına bağlıdır [7].

Modelin kullanılabilmesi için gerekli katsayıların fazlalığı, deneysel yöntemlerle elde edilebilme mecburiyeti, sıcaklık ve nem yoğunluğunun fonksiyonu olması ve hatta tüm

bunlar sağlansa bile kurutma zamanını hesaplamak için çok karmaşık ve uzun hesaplama yöntemine ihtiyaç göstermesi Krischer teorisinin başlıca arzu edilmeyen tarafıdır [5].

2. 2. 4. Philip ve De Vries Teorisi

Krischer teorisine benzer bir yolu izleyen Philip ve De Vries [44], gözenekli ortamda sıvı ve buhar hareketinde sıcaklık gradyanlarının etkisini açıklayan bir denklem grubu türetmişlerdir. Bu yazarların yaklaşımı da temel olarak nemin hem buhar difüzyonu hem de kılcal olaylarla hareket ettiğini varsayan bir yaklaşımdır.

Bu teori daha sonraları nemlendirme ısısının ve duyulur ısı transferinin katılması ve sıvı ve buhar fazlarında nem içeriğinin değişimlerinin ayırt edilmesiyle De Vries [45] tarafından daha da geliştirilmiştir.

Kolay algılanabilir fiziksel temeline rağmen difüzyon denklemlerine benzeyen denklemlerin katsayılarının hem ancak dikkatli deneyler sonucu saptanabilmesi hem de bu yaklaşımla gerçek proses koşullarındaki kurutma olayını açıklamanın zorluğu bu teorisin çok fazla rağbet görmemesinin başlıca nedenlerindendir [1].

2. 2. 5. Whitaker Teorisi

Gözenekli ortamda kurutma sürecini fizik kanunlarından çıkarak en genel hali ile çözmeye çalışan Whitaker; katı, gaz ve sıvı fazlarından meydana gelen gözenekli ortam modeline hacimsel ortalama uygulamış ve 4' ü kısmi diferansiyel denklem olan 12 adet denkleme ulaşırken aşağıdaki kabulleri yapmıştır:

Herhangi bir fazın ısı geçirgenliği sabit; entalpiler basınçtan bağımsız olup sıcaklığın fonksiyonudur. Sıvı fazda sürtünme, gaz fazda kimyasal reaksiyon ihmal edilir. Sıvı fazın yoğunluğu sabittir ve gaz fazı ideal gaz gibi davranır.

Sonuç bölümünde yazarında belirttiği gibi bu sınırlamaların geçerliliği ve kabullerin doğruluğu teorik ve deneysel olarak sınanmalı ve kanıtlanmalıdır. Ancak bunun zorluğuna kendisi de işaret eden Whitaker bu parametrelerin tahmini için değişik kurutma proseslerini uygun şekilde açıklayan özel teorilerin gerektiğini söylemektedir.

2. 3. Diğer Çalışmalar

Krischer teorisini esas alan Berger ve Pei [46], çeşitli iç ve dış fiziksel parametrelere bağlı olarak kurutma hızını incelerken Schadler ve Kast [47] higroskopik olmayan cisimleri sıvılarla doyurduktan sonra bir deney düzeneğinde kurutmuş; kurutucunun, sıvılardaki ve değişik yapılarıdaki örnekleri sistematik bir şekilde değiştirerek deneysel ve teorik bulgularını karşılaştırmışlardır.

Somasundaram VÇA [48], Philip ve De Vries teorisinden hareketle iki boyutlu doymamış gözenekli ortamda ısı ve kütle transferi problemini Laplace transformasyon tekniğini kullanarak çözmüşlerdir. Masmoudi ve Prat [49] ise yine doymamış gözenekli ortam ve dış hava arasındaki ısı ve kütle transferini hesaba katan sayısal bir yöntem sunmuşlardır.

Kumar'ın [50] Luikov denklemlerinin genişletilmiş bir varyasyonel formülasyonunu vermesinden sonra Gupta [51], Cho [52], Mikhailov [53] ve Palancz [54] hareketli buharlaşma cephesi tekniğini kullanarak kurutma probleminin sayısal çözümlerini vermişlerdir. Luikov [55], kapiler gözenekli cisimlerde nem ve sıcaklığın zaman ve kurutulan malzemenin içindeki konumuna bağlı olarak değişimini gösteren kısmi diferansiyel denklemlerini tekrar gözden geçirerek bu denklemlerin sınırlamaları üzerinde durmuştur. Sıcak levha ile temasta olan nemli malzemelerin kurutulmasını inceleyen Mikhailov ve Shishedjiev [56] sıcaklık ve nem potansiyel dağılımları üzerine boyutsuz parametrelerin etkisini sayısal kurutma mekanizması üzerinde durarak sıcaklık ve nem içeriğinin yanı sıra basıncın da yerel değerini en genel sınır şartları altında analitik olarak hesaplayıp Laplace transformasyon tekniğini kullanarak çözmüşlerdir. Luikov' un ısı ve kütle transferi teorisindeki bazı genel teoremleri üzerinde duran Wyrwal [58] bu tür problemlerde karşılaşılabilecek bazı sınır ve başlangıç şartlarını incelemiştir. Comini ve Lewis [57] tuğla, seramik elektrik izalatörü ve soğuk depo duvar ve döşemesinde sıcaklık ve nem dağılımı problemini; Thomas VÇA [59] ise fiziksel özellikleri sıcaklık ve neme bağlı olarak değişen tahta kurutma problemini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal olarak çözmüş ve sıcaklık ve nem dağılımı diyagramlarını vermişlerdir. Liu ve Cheng [60] ise tahtada kakarsız kurutma problemini kompleks özdeğerleri de göz önünde tutularak çözmüş ve bulgularını hem deneysel sonuçlarla hem de Thomas VÇA' [59] nın verdiği sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Whitaker denklemlerini kullanan Kaviany ve Mittal [61] higroskopik olmayan ve başlangıçta sıvı ile doyurulmuş tanecikli gözenekli ortam (cam boncuk) kurutmasını inceleyerek teorik ve deneysel bulguları karşılaştırmış ve sonuçların uyum içinde olduğunu göstermiştir. Tahta ve tuğla kurutmasında sıcaklık, nem ve basınç hesabı sonlu farklar yöntemi kullanılarak Nasrallah ve Perre [62] tarafından yapılmıştır. Shonnard ve Whitaker [63] nokta temaslı gözenekli ortam için efektif ısıl geçirgenliği deneysel olarak ölçmüş; Ilic ve Turner [64] ise nemli gözenekli malzemelerin sıcak kuru havayla sağlanan cebri konveksiyon yardımıyla kurutma sürecini tasvir için kullanılan kısmi diferansiyel denklemleri sonlu farklar yöntemiyle çözmüşlerdir. Tao VÇA [65] cam yünü tabakasında tek boyutlu kararsız nem ve don toplamasını analiz etmişlerdir.

Kurutma için matematiksel modellerin geliştirildiği çalışmalarda Kolesnikov [66] ısı ve kütle transferinin genelleştirilmiş sınır şartlarını incelemiş; Chen ve Pei [67] higroskopik olan veya olmayan malzemelerin kuruma davranışlarını tasvirde kullanabilecek bir kurutma modeli önermiş, sabit hız devresini ve azalan hız ön devresi ve son devresini ayrı ayrı ele almış, bu modelin geçerliliğini değerlendirebilmek için nem emme özellikleri değişiklik gösteren yün, tuğla ve hububat gibi üç sistem seçip diferansiyel eşitliklerin sayısal çözümü için hareketli sonlu elemanlar yöntemini kullanıp elde edilen sonuçların deneysel bulgularla uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır. Smirnov ve Lysenko [68] deneysel verileri kullanarak hata fonksiyonları yardımıyla kurutma eğrilerinin nasıl belirleneceği üzerinde durmuş, Polyanin ve Dil'man [69] difüzyon akışları için basit cebirsel denklemler bulmayı mümkün kılan yeni yaklaşık bir analitik metod sunmuş, Stanish VÇA [70] ise higroskopik gözenekli ortam için geliştirdikleri modellerini örnek bir kurutma problemine uygulayarak teorik ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır.

Kurutmada ısı ve kütle transfer katsayılarını deneysel olarak belirleyen Shah VÇA [71] nemli ve doymamış iki çeşit toprak için ölçüm yaparken Zumbunnen VÇA [72] gözenekli katı ortamda ısı transferi için bir termal geçirgenlik modeli oluşturarak geniş bir sıcaklık aralığında değişik gözenekli katıların ısıl geçirgenliklerini tüm yapı boyunca ölçebilmek için özel bir yöntem geliştirerek kullanmışlardır. Dutta VÇA [73] küresel taneciklerin, Wang ve Yu [74] ise yağ kumun transfer katsayılarını belirlemişlerdir.

Kurutmada ısı transferinin etkisini inceleyen Haber VÇA [75] yarı sonsuz gözenekli bir maddenin yüksek bir dış sıcaklığın etkisi altına girmesi halinde faz değişikliklerini de

içeren değişik hızlı süreçlerin analitik incelemesini yapmış; Mori VÇA [76] ise düz levha yüzeyinden levha üzerindeki laminar sınır tabakaya buharlaşmayı teorik olarak analiz etmişlerdir.

Kereste kurutmasını inceleyen Plumb VÇA [77] kapiler hareket nedeni ile sıvı transferini içeren bir model geliştirerek hesaplanan sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu belirtmiş, Motakef ve El-Masri [78] kerestede aynı anda oluşan faz değişimli ısı ve kütle transferini analitik olarak incelemişlerdir. Shapiro ve Motakef [79] gözenekli tahta diliminde faz değişimli kararsız bir boyutlu ısı ve kütle transferini analitik olarak incelemiş ve çözümlerin deneysel verilerle uyum içinde olduğunu vurgulamışlardır.

Rubin ve Schweitzer [80] faz değişimi olan gözenekli ortamda ısı transferini inceleyerek kağıt kurutmasında sıvı ve buhar bölgesini ayıran hareketli buharlaşma cephesi üzerine çalışıp sabit fiziksel özellikli gözenekli ortamda kararsız problemin yaklaşık bir çözümünü bulmuştur. Gözenekli higroskopik cisimlerin terleme kurutmasını deneysel ve teorik olarak inceleyen Raj ve Emmons [81] da kağıt kurutmasını ele almış ve analitik ve deneysel sonuçların uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Gözenekli ortamda basit bir kurutma modeli düşünen Cross VÇA [82], küresel kurutma için analitik çözüm sunarak maksimum basıncı hesaplamış ve analizde demir cevherini göz önüne almışlardır. Ilic ve Turner [83] ise, nemli tabakalardan oluşan büyük ölçekli stoklarda zorlanmış sıcak havanın konveksiyon etkisi ile sağladığı kurutmayı formüle eden bir modeli sunarak ızgaralı fırın sisteminde demir cevherinin kurutmasına uygulamışlardır.

Dinulescu ve Eckert [84] kum tabakasında bir boyutlu nem dağılımı için analitik çözüm vererek güneşin etkisi altındaki kısımda nem dağılım problemini çözmüşlerdir.

Rogers ve Kaviany [85] cam küre ve etanolden meydana gelmiş tanecikli yatağın konveksiyon kurutmasında hareketli buharlaşma cephesi tekniğiyle kütle transfer hızı, sıcaklık ve basınç değerlerini hesaplamış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Lyons VÇA [86] iç ısı üretimli gözenekli ortamı kurutma probleminde mikrodalga ısıtmasıyla desteklenmiş (pamuk gibi) absorbent malzemelerin aksiyal, radyal ve her iki yönden kurutulmasını deneysel olarak incelemişlerdir.

Gibson VÇA [87] sonlu kalınlıkta gözenekli şekillerin kurutulmasında ortaya çıkan basınç gradyanlarını açıklamak için matematiksel bir model oluşturarak refrakter malzeme kurutmasına uygulamışlardır.

Huang VÇA [88] bitişik duvarlarda nem dağılımını zamanın fonksiyonu olarak belirlemek için geliştirdiği matematiksel modeli kullanmış ve çimento macununu analiz ederek sıcaklık, nem ve basıncın zamanla değişimini hesaplamışlardır.

Ateşe maruz gözenekli ortamda ısı ve kütle transferini inceleyen Sahota ve Pagni [89] oluşturdukları ısı ve kütle transfer denklemlerini alüminyum toz için sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak çözmüş ve sonuçları ASTM limitleri ile karşılaştırılmıştır.

Eckert ve Faghri [90] bir yüzeyin sıcaklığının aniden daha yüksek bir değere çıkması durumunda, doymamış gözenekli malzeme tabakasında nem hareketini açıklayan genel bir analiz vermişlerdir.



3. KURUTMA TERMODİNAMIĞI

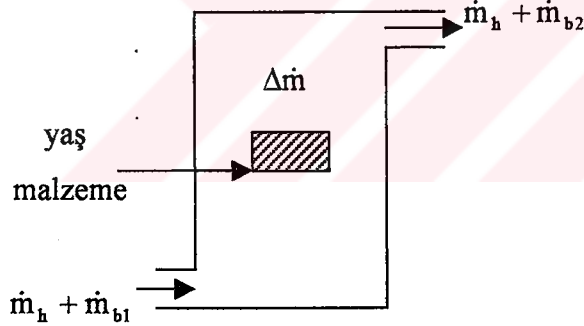
3. 1. Kurutmada Kütle ve Enerji Balansı

Uygulamada önemli olan belirli bir zamanda belirli bir miktardaki malzemenin, belirli bir değere kadar kurutulmasıdır. Bunun için sisteme enerji vermek gerekecektir. Kurutulacak malzemeye verilecek ısıнын ve buna bağlı olarak malzemedan alınan buhar miktarının hesaplanması, kurutmada kullanılan gazın ve kurutulan malzemenin kurutucuya giriş ve çıkış koşullarına göre kurutucu için kütle ve enerji balanslarının yazılmasıyla mümkündür.

3. 1. 1. Kütle Balansı

Kurutucular çalışma rejimi bakımından, sürekli ve süreksiz kurutucular olmak üzere iki türe ayrılır.

Süreksiz kurutucunun, çalışma şekli Şekil 3.1’ de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Süreksiz kurutucuda madde akışı [7].

Belirli bir kurutma süresinde kurutucudan $\dot{m}_h$ kadar kuru hava geçecektir. Bu hava kurutucuya girişte $\dot{m}_{b1}$ kadar su buharını beraberinde getirecek ve çıkışta $\dot{m}_{b2}$ kadar su buharını götürecektir. Bu süre içinde kurutulacak malzemenin miktarında Δm kadar azalma olur. Kurutucuda basınç ve sıcaklığın sabit kaldığı kabul edilirse kütle balansı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\dot{m}_{b1} - \dot{m}_{b2} = -\Delta \dot{m} \quad (7)$$

Şekil 3.2' de gösterilen sürekli kurutucudan belirli bir sürede, $\dot{m}_k$ kadar kuru malzeme geçerken bu malzemenin sıvı miktarı $\dot{m}_{s1} - \dot{m}_{s2}$ kadar azalacaktır. Sürekli rejimde kütle balansı aşağıdaki gibi yazılır:

$$\dot{m}_{s1} - \dot{m}_{s2} = \dot{m}_{b2} - \dot{m}_{b1} \quad (8)$$

$$x = \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_h} \text{ (kg Buh/kg Kuru hava)}$$

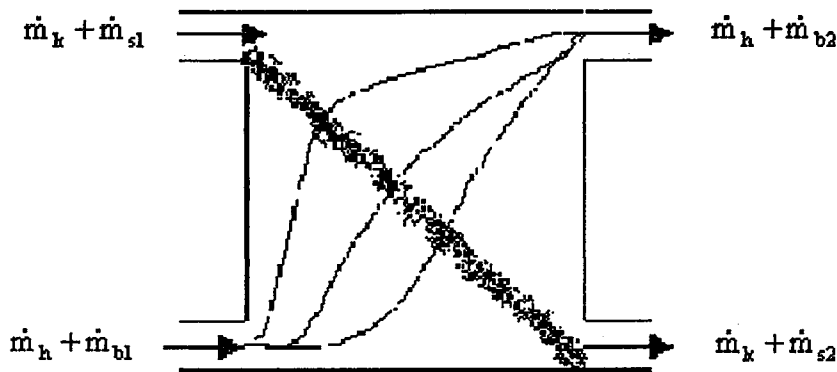
$$x_k = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_k} \text{ (kg Su/ kg Kuru katı)}$$

$$\dot{m}_k (x_{k1} - x_{k2}) = \dot{m}_h (x_2 - x_1) \quad (9)$$

$$\text{Mal yükü} = \frac{\dot{m}_k}{\dot{m}_h} = \mu \text{ (kg kuru katı debisi / kg kuru hava debisi)} \quad (10)$$

$$\mu(x_{k1} - x_{k2}) = x_2 - x_1$$

$$\mu = \frac{x_2 - x_1}{x_{k1} - x_{k2}}$$



Şekil 3.2. Sürekli kurutucuda kütle akışı [7].

3. 1. 2. Enerji Balansı

Termodinamiğin 1. kanuna göre, bir sistem sınırları içinde bulunan madde topluluğunun enerji değişmesi, sistemin çevresi ile yaptığı ısı ve iş alışverişlerinin cebirsel toplamına eşit olur. Buna göre kurutma işleminde enerji balansı,

$$\Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{W} = \Sigma \dot{E}_2 - \Sigma \dot{E}_1 - \Delta \dot{E} \quad (11)$$

şeklinde yazılır. Burada

$\Sigma \dot{Q}$: Birim zamanda kurutucu ile çevresi arasındaki toplam ısı alışverişi

$\Sigma \dot{W}$: Birim zamanda kurutucuya dışarıdan verilen toplam iş

$\Sigma \dot{E}_1$: Birim zamanda kurutucuya giren maddelerin toplam enerjileri

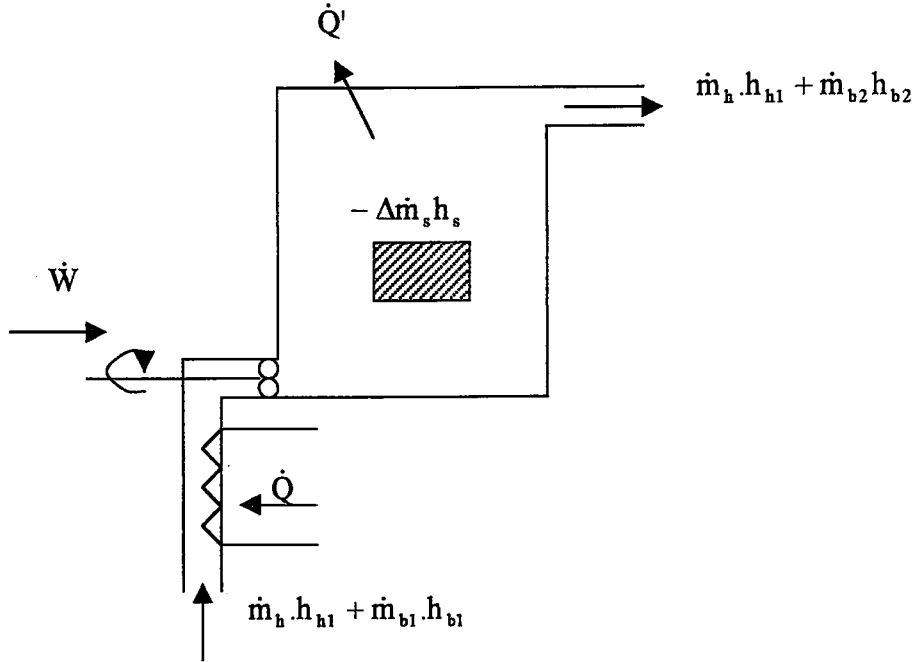
$\Sigma \dot{E}_2$: Birim zamanda kurutucudan çıkan maddelerin toplam enerjileri

$\Delta \dot{E}$: Sistemin enerji değişimi

Sistemin enerji değişimini hesaplayabilmek için kurutucuya giren ve çıkan maddelerin entalpilerini bilmek yeterlidir. Kurutma olayına giriş ve çıkıştaki kinetik enerji değişimi ihmal edilir.

Şekil 3.3' de ki süreksiz kurutucuda, kurutma havasına $\dot{Q}$ ısısının verildiği, havanın hareketini sağlamak için fan kullanılarak $\dot{W}$ işi yapıldığı ve çevreye olan ısı kayıplarının $\dot{Q}'$ olduğu kabul edilirse, enerji balansı aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\dot{Q} + \dot{W} - \dot{Q}' = \dot{m}_h (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} \cdot h_{b2} - \dot{m}_{b1} \cdot h_{b1} - \Delta \dot{m}_s \cdot h_s \quad (12)$$



Şekil 3.3 Süreksiz kurutucuda enerji akışı [7].

Burada ;

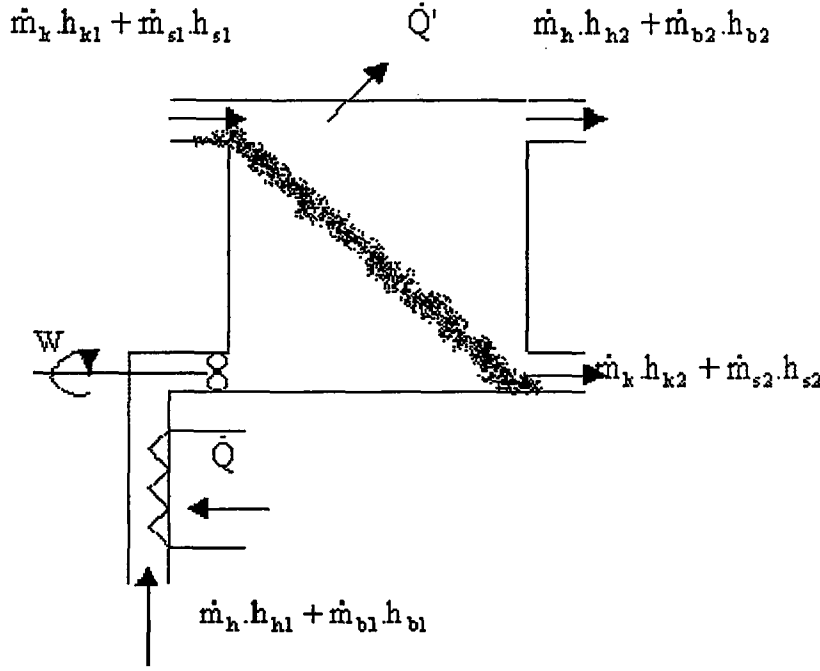
h_h : Havanın özgül entalpisi

h_b : Buharın özgül entalpisi

h_s : Sıvının özgül entalpisi' dir.

Kurutucuda sıcaklıkların sabit kalınca sistemin enerji değişmesi, malzemeden çekilen $\Delta \dot{m}_s$ kadar sıvının ısisına, yani $\Delta \dot{m}_s . h_s$ ' e eşit olur.

Şekil 3. 4' deki sürekli kurutucuda, denge koşulları altında belirli bir süre içinde sistemin enerji değişimi olmaz ve $\Delta \dot{E} = 0$ olur.



Şekil 3. 4 Sürekli kurutucuda enerji akışı [7].

Sürekli kurutucuda enerji balansı aşağıdaki gibi yazılır,

$$\dot{Q} + \dot{W} - \dot{Q}' = \dot{m}_h (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} h_{b2} - \dot{m}_{b1} h_{b1} + \dot{m}_k (h_{k2} - h_{k1}) + \dot{m}_{s2} h_{s2} - \dot{m}_{s1} h_{s1} \quad (13)$$

Eğer 1 ve 2 durumlarındaki havanın sıcaklıkları ve nem miktarı bilinirse (kurutucu giriş ve çıkışında kolaylıkla ölçülebilir), o zaman h , x -diyagramı ile nemli havanın entalpileri

$h_{1+x)1}$ ve $h_{1+x)2}$ kolaylıkla bulunur ve havanın kurutucudan çıkış ve kurutucuya giriş enerjileri farkı için;

$$\dot{m}_h (h_{h2} - h_{h1}) + \dot{m}_{b2} h_{b2} - \dot{m}_{b1} h_{b1} = \dot{m}_h (h_{1+x)2} - h_{1+x)1})$$

yazılabilir. O halde süreksiz kurutucunun enerji balansı,

$$\dot{Q} + \dot{W} - \dot{Q}' = \dot{m}_h (h_{1+x)2} - h_{1+x)1}) - \Delta \dot{m}_s h_s \quad (14)$$

ve sürekli kurutucunun enerji balansı;

$$\dot{Q} + \dot{W} - \dot{Q}' = \dot{m}_h [h_{1+x)2} - h_{1+x)1}] + \dot{m}_k (h_{k2} - h_{k1}) + \dot{m}_{s2} h_{s2} - \dot{m}_{s1} h_{s1} \quad (15)$$

şeklini alırlar.

4. AKIŞKAN YATAK

Küçük katı tanecikler ile doldurulmuş uzun dik bir kaptan gaz veya sıvı geçirildiğinde, belirli bir akışkan hızının üzerinde akışkanlaşma denilen bir sıvısal davranış gözlenir. Bu durumda akışkan ile katı tanecikler arasındaki temas diğer temas yöntemlerine göre daha iyi olarak sağlanır. Bu özelliğinden dolayı akışkanlaşma endüstride taşınım, ısıtma ve absorpsiyon gibi fiziksel işlemler ile bazı kimyasal işlemlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir [8].

4. 1. Akışkan Yatakta Akışkanlaşma Aşamaları

Serbest olarak yığılmış küçük katı taneciklerden oluşmuş bir yatak içerisinde bir akışkan örneğin hava geçirilsin. Düşük akış hızlarında hava molekülleri tanecikler arasındaki boşluklardan süzülerek geçerler. Bu yatağa “Sabit yatak” denir.

Eğer akışkanın hızı biraz artırılırsa, tanecikler birbirinden çok az olarak ayrılırlar ve bazıları titreşirler. Bu yatağa “genleşmiş yatak” denir.

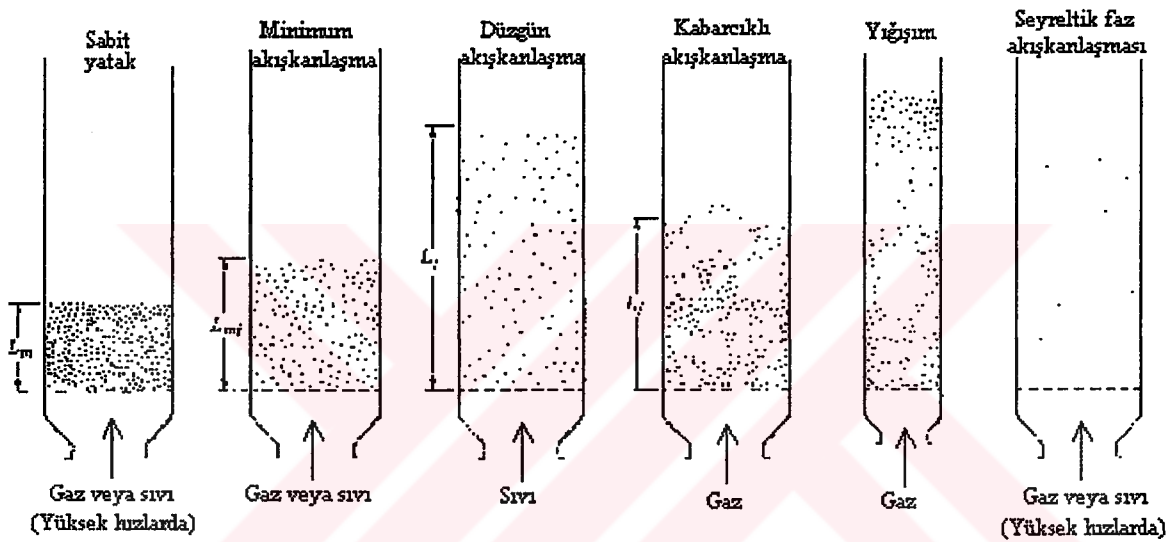
Akışkan hızı daha da fazla olursa aşağıdan yukarı doğru akan akışkan içerisinde katı tanecikler asılı halde kalırlar. Yatağın herhangi bir yerindeki basınç kuvveti o bölgedeki akışkan ve katı taneciklerin ağırlığına yaklaşık olarak eşittir. Yani birbirini dengelerler. Başka bir deyişle akışkan ve katı taneciklerin arasındaki sürtünme kuvveti taneciklerin ağırlığına eşitlenir. Bu durumdaki yatağa “minimum akışkanlaştırılmış yatak” denir.

Akışkanlaştırıcı olarak gaz kullanılırsa ve akışkanın hızı minimum akışkanlaşma hızı üzerine çıkarsa gaz kabarcıklaşır ve kanallaşır. Daha yüksek akış hızlarında dalgalanmalar daha şiddetli olur ve tanecik hareketi şiddetlenir. Bununla beraber, yatak minimum akışkanlaştırmadaki hacminin üzerine pek çıkmaz. Bu tip yataklara “kabarcıklı veya gaz-akışkan yatak” adı verilir.

Eğer kabarcıklar birleşerek büyür ve özellikle derin yataklarda kabın bütün kesitini kaplarsa, oluşan boşluğun üzerinde kalan bölümüne bir piston gibi vurur. Vuru boşluklarının oluşması kabın geometrisine çok sıkı bir biçimde bağlıdır. Buna “Vuruntulu yatak” denir ve istenmeyen bir durumdur.

Gaz hızı daha fazla artırıldığında tanelerin hava akımına kapılarak yatakta taşınması durumuna gelmeden önceki hız durumunda olunmamasına rağmen yatak taneciklerini yitirir. Yatağın yüzeyinde patlayan kabarcıklar taneleri özellikle küçük yataklarda, yatak yüzeyinin üzerindeki serbest bölgeye fırlatır ve taneciklerin küçük olanları hızlı hava akımı tarafından sürüklenerek götürülür. İşte bu bölgede çalışan yataklara “girdaplı ve hızlı akışkan yataklar” adı verilir. Bu tip yataklara tanecik beslemesi yapılmalıdır.

Yatağın üst yüzeyi belli olması halinde bu tip yataklara “yoğun - faz akışkan yatak” adı verilir. Yatağın terminal hızını aşan yüksek hızlarda yatak üst yüzeyi ortadan kalkar. Bu durumda “seyreltik-faz akışkan yatak” söz konusudur. Açıklanan aşamaların bir kısmı Şekil 4.1’ de görülmektedir.



Şekil 4.1 Akışkan yatakta akışkanlaştırma aşamaları [9].

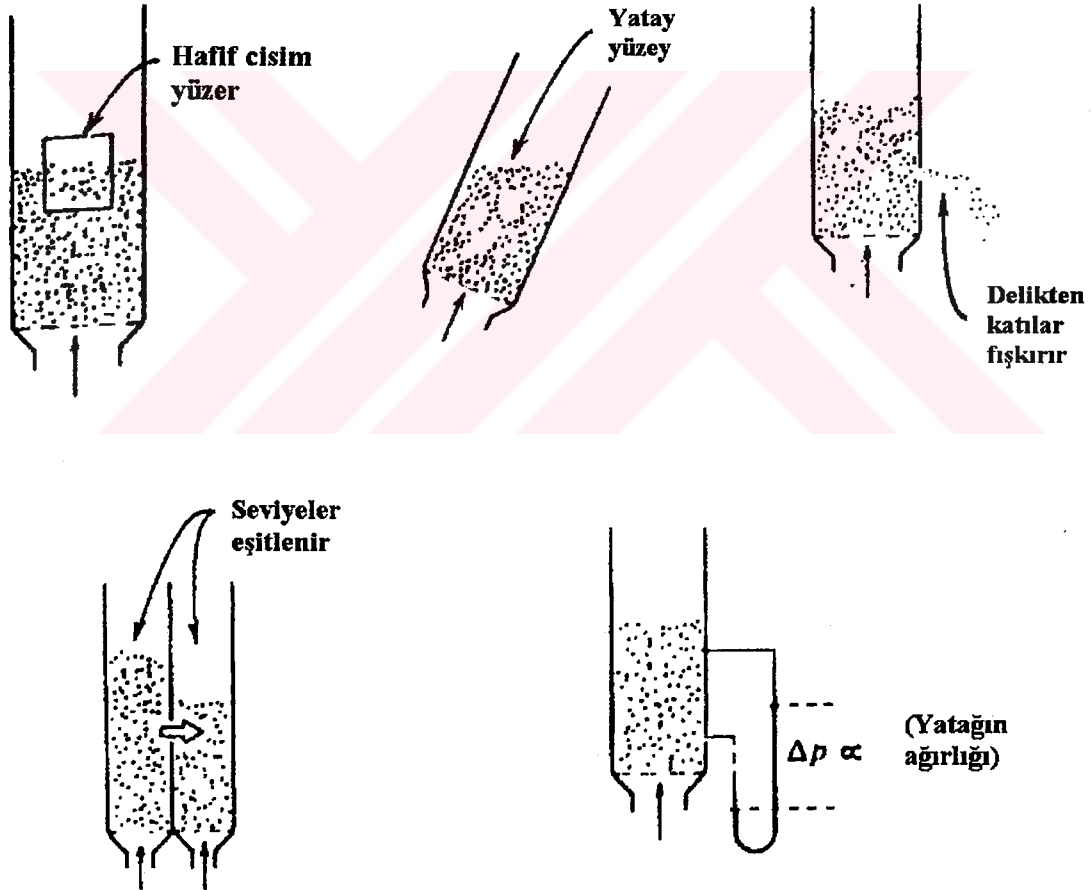
Akışkanlaştırmanın düzenli veya kabarcıklı olması katı taneciklerin ve akışkanın özelliklerine bağlıdır. Yatak geometrisi, gaz hızı, dağıtıcı elek tipi, yatak içindeki bölmeler, taneciklerin karışım hızına, kabarcıkların büyüklüğüne tesir ederler.

Yatak geometrisinin en çok etkilediği bir olay da yataktaki yığılma olayıdır. Gaz kabarcıkları yükselirken birleşip büyürler ve yukarıda bahsedilen vuru oluşur. Üst taraf yukarı doğru itilir. Tanecikler büyük kabarcıkların kenarından aşağıya doğru yağar ve sonunda dağılırlar. Bu sırada diğer bir yığılma oluşur ve bu kararsız hal tekrar eder. Yığılma yada vuru yatağın fonksiyonunu hem fiziksel hem de kimyasal açıdan azalttığından ve bunun yanında işletme sorunlarını da arttırdığından istenmeyen bir durumdur. Yığılma ya da vurunun dar ve uzun yataklarda oluşma ihtimali daha fazladır.

4. 2. Akışkanlaşma Özellikleri

Yoğun faz gaz akışkan yatak kaynamakta olan bir sıvı özelliklerini gösterir. Büyük hafif bir cisim kolayca yatak içinde yüzebilir. Akışkan yatak yana eğildiğinde yatağın üst yüzü sıvılarda olduğu gibi yatay olur.

İki yatak bileştirildiğinde seviyeleri birleşik kaplar kanununa uyar, yani eşitlenir. Yatak içindeki herhangi iki nokta arasındaki basınç farkı yaklaşık olarak bu iki nokta arasındaki statik ağırlığa orantılıdır. İçinde yatak bulunan kapta bir delik açıldığında katı tanecikler gazla birlikte bir akışkan gibi dışarı fırlarlar. Bir sıvı gibi kaptan kaba aktarılabilirler.



Şekil 4.2 Akışkan yatağın sıvısal davranımı [9].

4. 3. Akışkan Yatağın Avantajları

Mühendislik alanında bir reaktör tipi olarak akışkan yatak sağladığı avantajları nedeniyle çok geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Özetlenirse,

1- Akışkanlaştırılmış katıların bir sıvı davranışı göstermesi bu tekniğin pek çok sürekli işleme uygulanabilmesini mümkün kılar. Sürece ait değişkenlerin otomatik ve kesin kontrolünü, benzer ürünler elde edilmesini sağlar. İşgücü masrafını azaltır.

2- Diğer metotlarla karşılaştırıldığında, akışkanlaştırılmış katı taneciklerden oluşmuş bir yatak, izotermik koşulları çok daha kolay gerçekleştirebilir. Yatakta sıcaklığın kontrol edilebilmesi aşağıdaki avantajları sağlar.

- a) Şiddetli türbülans nedeniyle yatak içinde sıcak yada soğuk bölge dağılımı yoktur.
- b) Yatağın ısı kapasitesi yüksek olduğundan yatak sıcaklığı kararlıdır.
- c) Akışkan yataklarda, ısı transfer yüzeyinin küçüklüğüne rağmen, yüksek ısı transfer katsayıları nedeniyle, oluşan ani sıcaklık dalgalanmaları hızlı bir şekilde sönümlenir.

3- Büyük kapasitedeki sistemler için uygundur.

4- İki akışkan yatak arasındaki katıların sirkülasyonu büyük reaktörlerde üretilen veya ihtiyacı duyulan ısının taşınımını mümkün hale getirir.

4. 4. Akışkan Yatakların Kullanıldıkları Yerler

Bu çalışmada akışkan yatakta kurutma ele alınmıştır. Ancak Dünya teknolojisinde fiziksel veya kimyasal işlem olarak, oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir.

4. 4. 1. Fiziksel İşlemler

Akışkan yatakların kullanıldığı fiziksel işlemleri şu şekilde sıralayabiliriz:

1. Akışkanlaştırılmış katıların sıvı gibi davranma özelliğinden faydalanarak, bir boru boyunca yerleştirilmiş havayı geçiren kumaştan yapılmış bir hava dağıtıcısı üzerindeki katılar, sık bir yatak halinde akışkanlaştırılarak taşınırlar. Bu tip konveyörlerin

enerji tüketimi yatayla 30° den daha büyük açı yapan durumlarda düşüktür ve hareket eden parçası yoktur. Kuru küçük taneciklerin taşınması için uygundur.

2. Geleneksel tekniklerle pudra kıvamındaki maddelerin karıştırılması zordur. Ancak akışkanlaştırılan katı taneciklerin sirkülasyonu iyi bir karışma sağlar.

3. Plastik kaplanması istenen metal parça, plastiğin ergime sıcaklığının üzerine kadar ısıtılarak, iki yada üç saniye akışkanlaştırılmış plastik taneciklerin bulunduğu yatağa daldırılır. Bu süre zarfında plastik ergiyerek metali kaplar. Bu yöntemle düzgün olmayan fazla girintili yüzeyler kaplanabilir. Klasik usüldeki gibi çözücü kullanılmadığından ekonomik olmaktadır.

4. Yüksek sıcaklıktaki buharın çözücü veya hem akışkanlaştırıcı hem kurutucu olarak kullanıldığı yatakta, kuruyan küçük parçacıkların yataktan sürüklenmesi sonucunda kütlelerine göre sınıflandırılabilir. Diğer kurutucu tiplerine göre daha kaliteli ürün verir ve daha az yakıt tüketimi olur.

5. Kuru taneciklerin sıcak gazlarla akışkanlaştırıldığı bir yatağa $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ve NaCN gibi tuz çözeltisi püskürtülürse tuzlar tanecik etrafına yapışarak büyümesini sağlar. Bu çekirdek genellikle tuzun kendisi olmaktadır. İnert bir gaz içerisine taşınan buhar halindeki madde kendi süblime maddesi üzerine kaplanabilir.

6. Akışkanlaştırılmış bir yatağa karışmış olarak gönderilen gaz fazı arasından belirli bir gazın alınması mümkündür. İstenmeyen gazı tutucu malzemenin akışkanlaştırıldığı yatak, istenmeyen gazın karışım içinde az olması halinde ekonomik olur, aksi halde gaz fazla miktarda tüketilmiş olur.

4. 4. 2. Kimyasal İşlemler

Akışkan yataklar aşağıdaki kimyasal işlemlerde kullanılabilir:

1. Hassas sıcaklık kontrolünün sağlandığı akışkan yatak dar bir sıcaklık aralığı dışında, patlayıcı olabilen durumlarda ve istenen ürünün yan ürünlere dönüşme verimi işlem sıcaklığına bağlı olabilen durumlarda, sabit yatağa tercih edilir. Etilenin oksidasyonu, olefinlerden alkil klorür elde edilmesi, naftalinden ftalikanhidrid elde edilmesi, propilen ve amonyaktan aksilonitril elde edilmesi gibi kuvvetli egzotermik reaksiyonlar akışkan yatakta söz konusu hassas sıcaklık kontrolü ile gerçekleştirilebilir.

2. Karbonizasyon ve gazlaştırma işlemlerinde de akışkan yatak kullanılabilir:

i. İçinde petrol bulunan şistlerin petrol oranı az olduğundan bunlardan petrol alınması ekonomik olmamaktadır. Akışkan yatakta şistlerin uçucu maddeleri uçurulduktan sonra geriye kalan artık madde yakıt olarak kullanılır.

ii. Pudra halindeki kömür veya kömür kökenli maddeler yatağa beslendikten sonra buhar, hava ve oksijen karışımıyla akışkanlaştırılırlar. Sıcak ortamda uçucu maddelerin gazlaştırılmasından ya yakıt olarak ya da kimyasal sentez hammaddesi olarak kullanılır.

iii. Odun gibi maddeler 800-900°C' de buhar veya CO₂ ile gazlaştırılırlar.

4. 5. Akışkan Yatakta Kullanılan Terimler

4. 5. 1. Minimum Boşluk Oranı (ϵ_{mf})

Akışkanlaşmanın en önemli özelliği, yatağı oluşturan taneciklerin yerçekimi etkisinden kurtularak kararsız bir hareket biçimine kavuşturulmasıdır. Akışkan hızının etkisi altında taneciklerin böyle bir harekete geçebilmesi için yatağın yükselerek belirli bir boşluk değerine sahip olması ve akışkanın geçiş kesitini arttırması gerekmektedir. Minimum akışkanlaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan bu boşluk değerine minimum boşluk oranı adı verilir ve şu şekilde ifade edilir [10].

$$\epsilon_{mf} = \frac{\text{Yatak Boşluğu}}{\text{Yatak Hacmi}} = \frac{\text{Yatak Hacmi-Parçacıkların Hacmi}}{\text{Yatak Hacmi}} \quad (15)$$

4. 5. 2. Şekil Faktörü (ξ)

Küresel olmayan taneler için eşdeğer çap tanımlanmıştır. Taneler küre şeklinde ise şekil faktörü 1 taneler küreden farklı ise şekil faktörü 0 ile 1 aralığındadır. Şu şekilde ifade edilir [10].

$$\xi = \frac{\text{Taneciğin hacmine eşit hacme sahip kürenin yüzey alanı}}{\text{Taneciğin Yüzey Alanı}} \quad (16)$$

Akışkan yataklarda taneciklerin küresel formda olduğunu kabul etmek problem çözümünü kolaylaştırdığı için yapılan çalışmalarda şekil faktörü dikkate alınmamaktadır.

4. 5. 3. Minimum Akışkanlaşma Hızı (U_{mf})

Akışkanlaşmanın ilk başladığı hız minimum akışkanlaşma hızı olarak adlandırılır. Bunun için genelde Ergun'un denklemi kullanılmaktadır [10].

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\mu_g U_{mf}}{(\xi \cdot d_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3} \frac{\rho U_{mf}^2}{\xi \cdot d_p} \quad (17)$$

4. 5. 4. Akışkan Yatakta Basınç Düşmesi

Minimum akışkanlaşma anında,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Yatak Boyunca} \\ \text{Basınç Düşmesi} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Yatak Kesit} \\ \text{Alanı} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Yatak} \\ \text{Hacmi} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taneciklerin} \\ \text{Yataktaki Oranı} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{Taneciklerin Özgül} \\ \text{Ağırlığı} \end{array} \right\}$$

$$\Delta p \cdot S = (S \cdot L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_g) \cdot g$$

4. 5. 5. Akışkan Yatakta Tanecik Terminal Hızı

Gaz hızı minimum akışkanlaşma hızı üzerine arttırıldığında, yatakta akışkanlaşma başlar. Gaz hızı terminal hızı denilen bir değere ulaştıktan sonra katı tanecikler yataktan taşınmaya başlar. Terminal hızı U_t akışkanlar mekaniği kanunları ile hesaplanabilir [9].

$$U_t = \frac{4 \cdot g \cdot d_p (\rho_p - \rho_g)^{0.5}}{3 \cdot \rho_g \cdot C_d} \quad (18)$$

Burada C_d deneysel olarak bulunan sürtünme katsayısıdır. Kunii ve Levenspiel C_d için şu değerleri vermişlerdir:

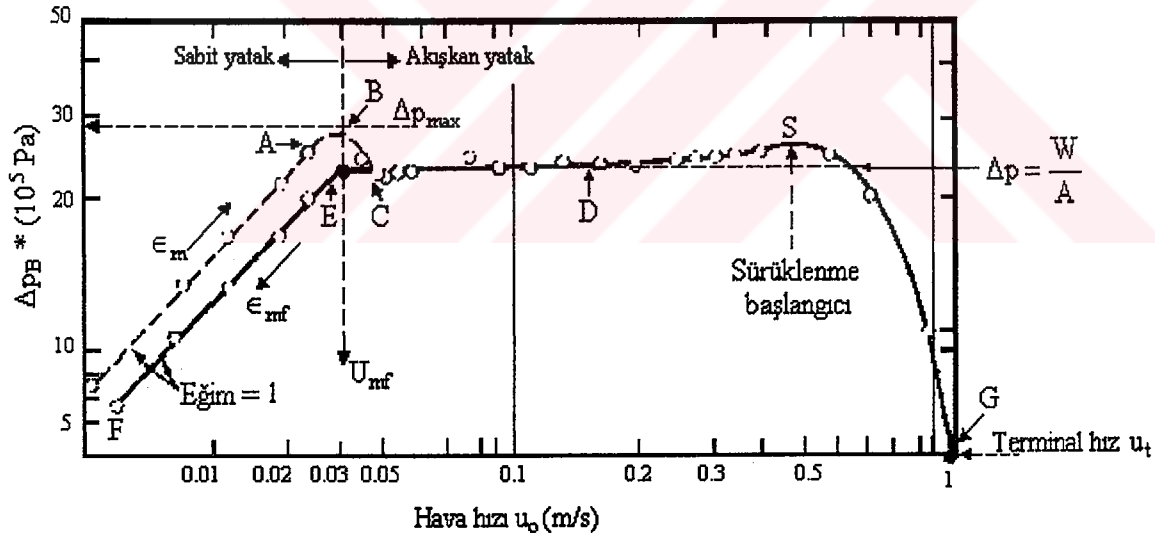
$C_d = 24/Re_p$, $Re_p < 0.4$ için (laminer bölge)

$C_d = 10/Re_p$, $0.4 < Re_p < 500$ için (geçiş bölgesi)

$C_d = 0.43$, $500 < Re_p < 200.000$ için (türbülanslı bölge)

Burada Re_p : tanecikler için Reynolds sayısıdır.

4. 6. Akışkan Yatakta Basınç Aşamaları



Şekil 4. 3 Belirli bir büyüklükteki kum tanecikleri için basınç düşüşü ile gaz hızı ilişkisi [9].

Yaklaşık aynı boyuttaki küçük taneciklerden meydana gelen ve ideal davranış gösteren bir akışkan yatakta, tüm yatak boyunca ölçülen basınç düşüşüne karşı gaz akış

hızları logaritmik olarak değişirse Şekil 4. 3' teki gibi bir eğri elde edilir.

Burada A noktasına kadar olan doğru parçası, sabit yatakta genişleme olduğunu gösterir. Hız biraz arttırılınca, basınç düşüşü B ile gösterilen maksimum bir noktaya gelir, sonra yavaşça düşer ve akışkanın hızında artma olduğu halde kararlı değere varır (CD). Eğer gaz akış hızı azaltılırsa katı parçacıkları birbiri üstüne yerleşene kadar alçalır. Gaz akış hızı daha da azaltılırsa, yeniden oluşan sabit yatakta basınç düşüşü daha önce aynı gaz akış hızında elde edilenden daha az olur (EF). B noktasındaki hıza minimum akışkanlaştırma hızı denir (U_{mf}). D noktasındaki gaz akış hızı çok daha fazla arttırılsa basınç düşüşü biraz yükselir ve S noktasından sonra yatak içindeki tanecikler sürüklenmeye başlar. Bu durumda kararlılığın sağlanabilmesi için ya geri besleme ya da dışarıdan taze besleme gerekir. G' de ki hıza terminal hızı denir. Akışkan yatakta tanecik taşınmasının istenmediği durumlarda gaz akış hızları bir taraftan minimum akışkanlaştırma hızı ile diğer taraftan terminal hızı ile sınırlandırılmıştır.

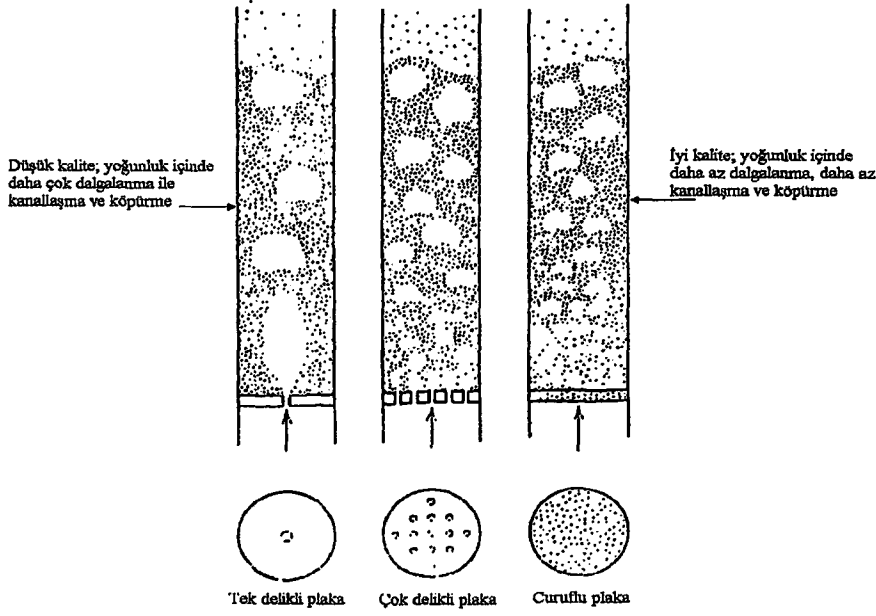
4. 7. Akışkan Yatakta Dağıtıcı Elek

Dağıtıcı elek, akışkan yatağın en önemli parçalarından biridir. Tanecik yığılmasına meydan vermeden düzenli bir dağılım sağlaması için, akışkan yatakta elek tasarımı, üzerinde en çok durulan konudur.

4. 7. 1. Dağıtıcı Elek Özellikleri

Genelde konik olarak imal edilen bir lülenin üzerine monte edilen dağıtıcı elek yatak malzemesini taşıyan, akışkanlaştırıcı gazın düzenli dağılımını ve işlemin kararlı olmasını sağlayan, akışkan yatakta fiziksel ve kimyasal parametreleri etkileyen bir elemandır.

İyi bir dağıtıcı elek düzenli bir dağılım yapmalı ve kararlı akışkanlaşma sağlamalıdır. Uzun süren çalışmalarda katı tanecikler gaz giriş deliklerini kapatarak büyük basınç düşüşlerine sebep olmamalıdır. Yatak çalışmaya başlarken, çalışırken ve durma halinde katı tanecikleri eleğin altına düşürmemelidir.



Şekil 4. 4 Dağıtıcı elekte deliklerin yerleşim düzeni [11].

Elek yüksek sıcaklıklarda genleşmeye ve korozif etkilere dayanabilmeli, yığılma ve sıcak noktaların oluşmasından dolayı gaz giriş noktalarının civarlarında durgun katı bölgeler oluşturmamalıdır. Elek tasarımında göz önüne alınacak parametreler şunlardır:

1. Dağıtıcı eleğin gaz giriş noktalarındaki şekli ve dağıtıcı elek üzerine yerleştirilmiş deliklerin geometrisi,
2. Deliklerin büyüklüğü ve merkezler arası mesafe,
3. Dağıtıcı elek yakınında gaz hızı ve yönü,
4. Dağıtıcı eleğin sağladığı tüm direnç ve elek kullanım oranı burada,

$$\Phi = \frac{\text{Deliklerin toplam alanı}}{\text{Elek alanı}} \text{ şeklinde tanımlanmıştır [11].} \quad (19)$$

Bu faktörlerin çokluğu yüzünden akışkan yatakta dağıtıcı elek tasarımı henüz ampirik yaklaşımlarla yapılabilmektedir.

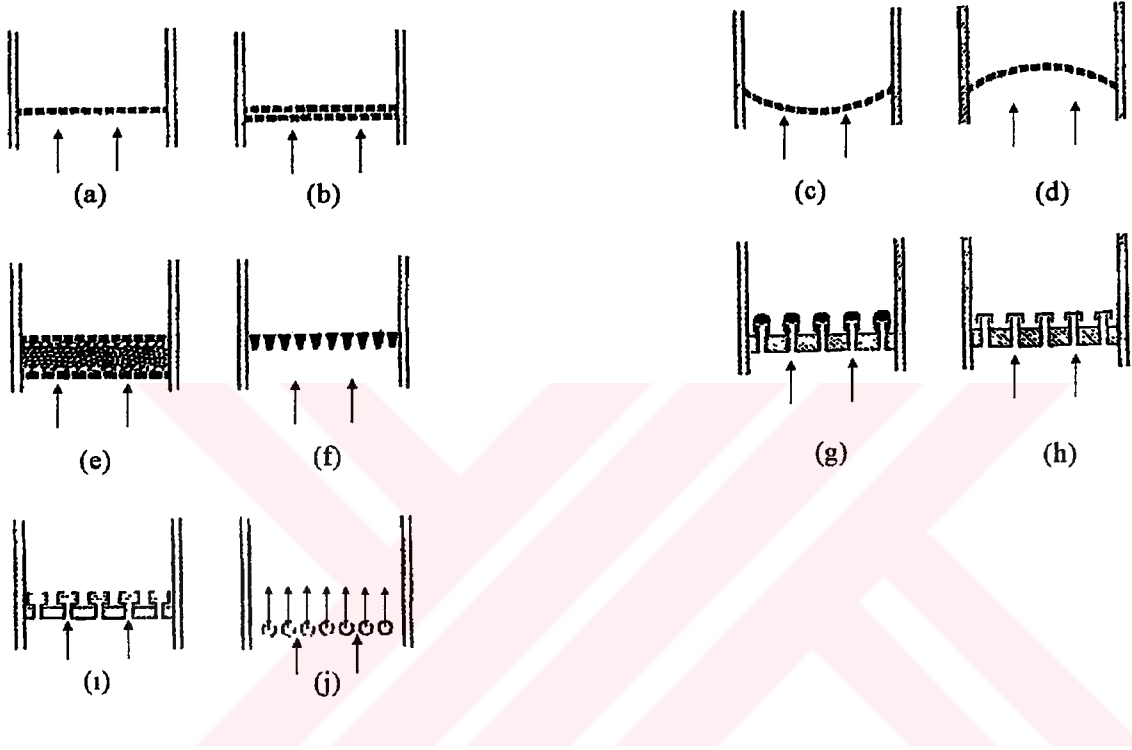
4. 7. 2. Dağıtıcı Elek Çeşitleri ve Seçimi

Akışkan yatağın tasarımı sırasında, çalışma şartları göz önüne alınır ve elek türü ile malzemesine karar verilir. Genel olarak ekonomik olması ve dayanıklılığı nedeni ile metaller tercih edilir. Metal elek, akışkanlaştırma gazının soğutucu etkisine ve yüksek

yatak sıcaklığına, korozyon etkilere dayanabilir. Kolay işlenebilir, delme, kaynak ve diğer işlemler kolay olduğundan ilk yatırım masrafı az olur.

Seramik malzemeden yapılan dağıtıcı elekler yüksek sıcaklığa ve korozyon etkilere dayanıklıdır, fakat ısı şok ve genleşme gerilimine dirençleri küçüktür.

Tamamen temiz ve gaz gereksinimi duyulduğunda gözenekli levha kullanılır. Değişik tipteki elekler ve özellikleri Şekil 4. 5' te gösterilmiştir.



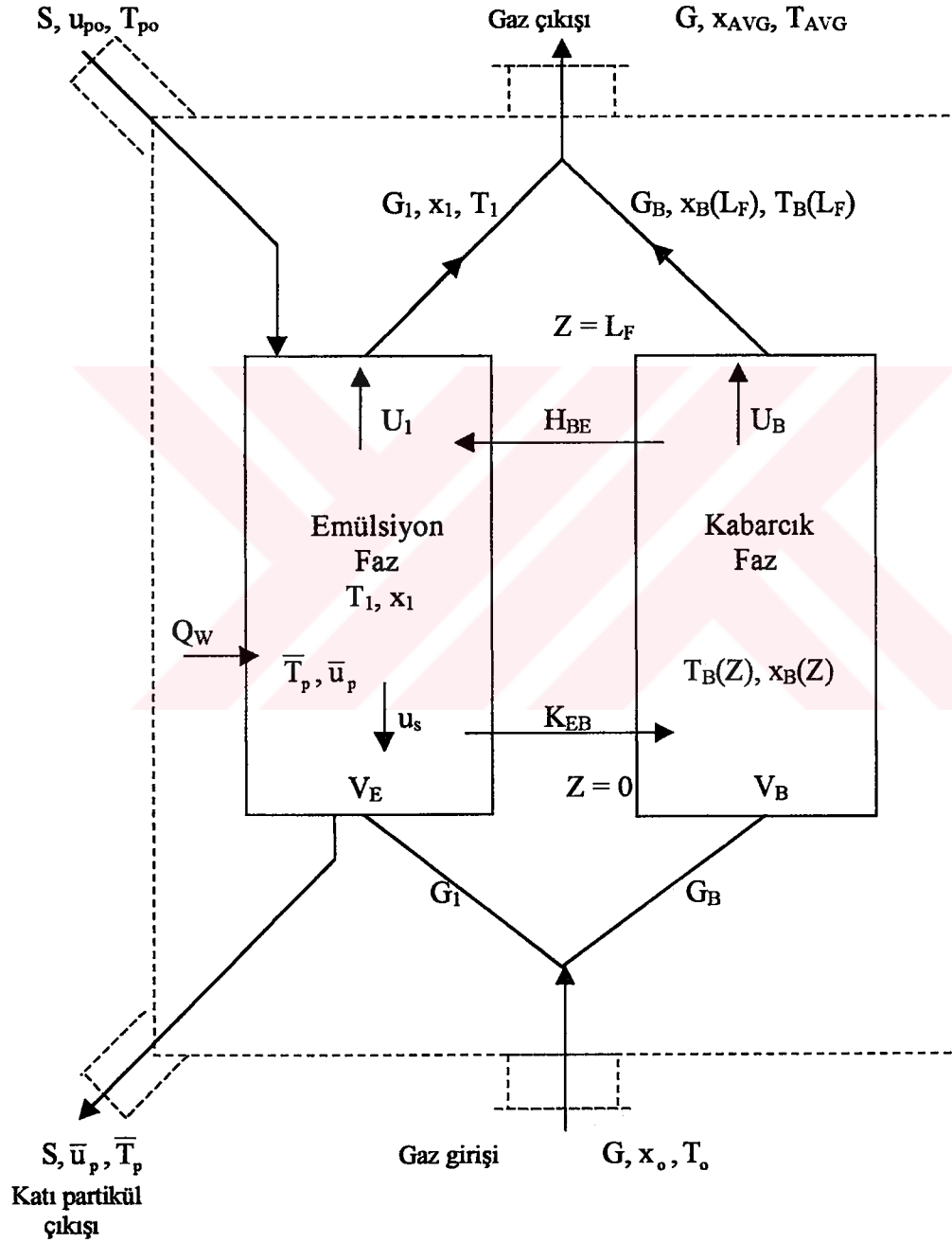
Şekil 4. 5 Dağıtıcı elek tipleri

- a- Delikli plaka,
- b- Çapraz delikli plaka,
- c- İç bükey delikli plaka,
- d- Dış bükey delikli plaka
- e- Dolgulu yatak tipi,
- f- Mazgal tipi delikli plaka,
- g- Nozul tipi plaka
- h- Kampana tipi,
- ı- Çok filtreli plaka
- j- Delikli borular

5. SÜREKLİ AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA İÇİN MODELLEME

Gaz ile katı parçacıkların tamamen karıştığı ve kararlı bir fazın oluştuğu kabul edilen sürekli akışkan yataklı kurutma modeli aşağıda verilmiştir.

Katı partikül
girişi



Şekil 5. 1 Sürekli akışkan yataklı kurutucu modeli [2].

Bu modelin nümerik çözümün yapılmasıyla partikül ve kabarcık boyutu, gaz hızı, giriş gazı sıcaklığı ve besleme süresi gibi proses parametrelerin çıkan katının nem oranı üzerindeki etkileri tahmin edilebilir.

Akışkan yataklı kurutma prosesinde katı ve gaz arasındaki yoğun ısı ve kütle transferi kurutma prosesi için bir avantajdır.

5. 1. Akış Modeli

Bu modelde kurutucunun 3 faza bölündüğü kabul edilir. Bunlar kabarcık fazı, gaz fazı ve katı fazdır. Ancak gaz ve katı fazı genellikle tek bir faz olarak düşünülür ve yoğun faz veya emülsiyon faz olarak adlandırılır.

Katı faz fiziksel özellikleri, şekli ve boyutu üniform olan ve tamamen karışmış katı partiküllerden meydana gelmiştir. Katı partiküllerin yükleme fonksiyonu kararlı halde,

$$f(\theta) = \frac{1}{\theta_p} \exp\left(-\frac{\theta}{\theta_p}\right) \quad (20)$$

ile verilmiştir. Bununla birlikte, sıcaklık ve her bir partikül içindeki nemin partikülün kurutucu içindeki kalış süresi θ ' ya bağlı olduğu kabul edilir.

Buna ilâveten, ısı ve kütle transferinde iç direncin ihmal edilebilmesi için partiküllerin yetirence küçük olacağı ve partikülün nem ve sıcaklığının partikül pozisyonundan bağımsız olduğu kabul edilir.

Kabarcık fazı üniform boyutlu kabarcıklardan meydana gelmiştir. Kabarcık fazının partikül içermediği ve yükselen kabarcıkların etrafının çok ince olduğu ve bu yüzden kabarcık fazının sadece gaz fazı ile kütle ve ısı alış verişi yaptığı kabul edilir. Bu kabul şu durum için doğrulanır.

$$U_o \geq 2 U_{mf} \quad (21)$$

Yani giriş gaz hızı, minimum akış hızının 2 katına eşit veya büyük olmalıdır.

Kabarcık fazı içinde nem ve sıcaklığın aynı olması için kabarcık fazı içindeki gaz tamamen karışmıştır. Kabarcık fazı içindeki sıcaklık ve nem sadece kurutucu z boyutuna bağlıdır.

Gaz fazının tamamen karıştığı düşünülür. Gaz ile kabarcık ve katı faz arasında ısı ve kütle transferi vardır. Ayrıca kurutucu duvarı ile gaz arasında ısı transferi olabilir.

Kurutucu duvarı sabit sıcaklıkta tutulur. Sıcaklık ve nemden dolayı gaz fazındaki fiziksel özelliklerin değişimi ihmal edilebilir.

Gaz akışının giriş bölümü ve yatak genişlemesi, herhangi bir akış hızında emülsiyon fazı içindeki koşulların minimum akışkanlaşma koşuluyla aynı olduğu yani gaz fazı akış hızının,

$$G = A_{\text{tot}} U_{\text{mf}} \rho_g \quad (22)$$

$$V_i = V_e \in_{\text{mf}} \quad (23)$$

olarak tanımlandığı tahminiyle saptanır.

Diğer taraftan kabarcık fazındaki akış hızı,

$$G_b = U_b A_b \rho_b = U_b \rho_g \frac{V_b}{V_{\text{tot}}} A_{\text{tot}} = U_b \rho_g \delta A_{\text{tot}} \quad (24)$$

Bu akış hızlarının sabit olduğunu ve ayrıca yatağın pozisyonundan bağımsız olduğunu kabul ederiz.

Davidson ve Harrison' a göre emülsiyon fazındaki tek bir kabarcığın yükselme hızı,

$$U_{\text{br}} = 0,711 (g \cdot d_b)^{1/2} \quad (25)$$

Bu yatak içindeki kabarcık kümesinin mutlak hızı,

$$U_b = U_o - U_{\text{mf}} + U_{\text{br}} \quad (26)$$

Yatak içindeki kabarcık hacminin oranı, toplam akış oranından ifade edilebilir.

$$G = A_{\text{tot}} U_o \rho_g = A_{\text{tot}} U_{\text{mf}} \rho_g + A_{\text{tot}} U_b \rho_g \delta \quad (27)$$

$$\text{Böylece } \delta = \frac{U_o - U_{\text{mf}}}{U_b} \quad (28)$$

Şimdi eğer U_{mf} ve $\in_{\text{mf}}$ biliniyorsa giriş gaz fazı ve kabarcık fazındaki gaz akış oranlarını bilinen parametreler cinsinden ifade edilebilir. Bu fazlar için kütle ve enerji dengesi kurulabilir.

Minimum akışkanlaşma hızı aşağıdaki formülle yaklaşık olarak bulunabilir.

$$U_{\text{mf}} = 0,7 d_p^{1.82} \frac{[\rho_g (\rho_{\text{ws}} - \rho_g)]^{0.94}}{\rho_g \cdot \mu_g^{0.88}} k_c \quad (29)$$

Burada k_c ,

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{Re}_p < 10 \\ 0,93 - 3.75 (\log \text{Re}_p - 1) & \end{cases} \quad (30)$$

$$200 > \text{Re}_p > 10$$

$$\text{Re}_p = \frac{U_{mf} \cdot d_p \cdot \rho_g}{\mu_g}$$

Emülsiyon fazının boşluk oranı ölçme ile saptanmalıdır. Yada aşağıdaki formülle yaklaşık olarak bulunabilir.

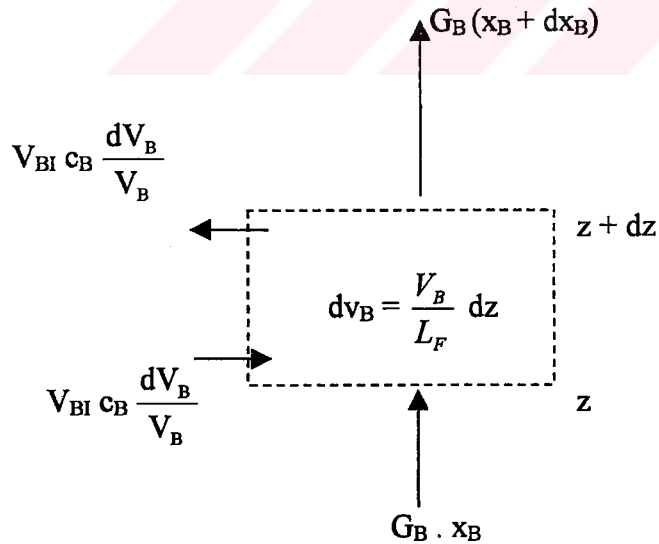
$$\epsilon_{mf} = 0,586 \zeta^{-0,72} \left[\frac{\mu_g^2}{\rho_g (\rho_{ws} - \rho_g) g \cdot d_p^3} \right]^{0,029} \left(\frac{\rho_g}{\rho_{ws}} \right)^{0,021} \quad (31)$$

Şimdi gaz gazı için ısı ve kütle dengesi kurulabilir.

5. 2. Kütle Balansı

5. 2. 1. Kabarcık Faz

Gaz ile kabarcık arasındaki hacim değişimi bu fazlar arasında kütle transferine sebep olur.



Şekil 5. 2 Kabarcık faz kütle balansı [2].

$$G_b \cdot dx_b = (\dot{V}_{ib} C_i - \dot{V}_{bi} C_b) \frac{dV_b}{V_b} \quad (32)$$

$$A_b \cdot U_b \cdot \rho_g \frac{dx_b}{dz} = (\dot{V}_{ib} C_i - \dot{V}_{bi} C_b) \frac{1}{L_f} \quad (33)$$

$$\dot{V}_b = A_b \cdot L_f \quad \text{ve} \quad C_{(i)} = \rho_g \cdot x_{(i)} \quad (34)$$

$$U_b \cdot \frac{dx_b}{dz} = \frac{1}{V_b} = (\dot{V}_{ib} x_i - \dot{V}_{bi} x_b) \quad (35)$$

Kütle transfer katsayısı,

$$K_{ib} \cong \frac{\dot{V}_{ib} x_i - \dot{V}_{bi} x_b}{V_b (x_i - x_b)} \quad \text{olarak tanımlanırsa} \quad (36)$$

$$U_b \frac{dx_b}{dz} = K_{ib} (x_i - x_b) \quad (37)$$

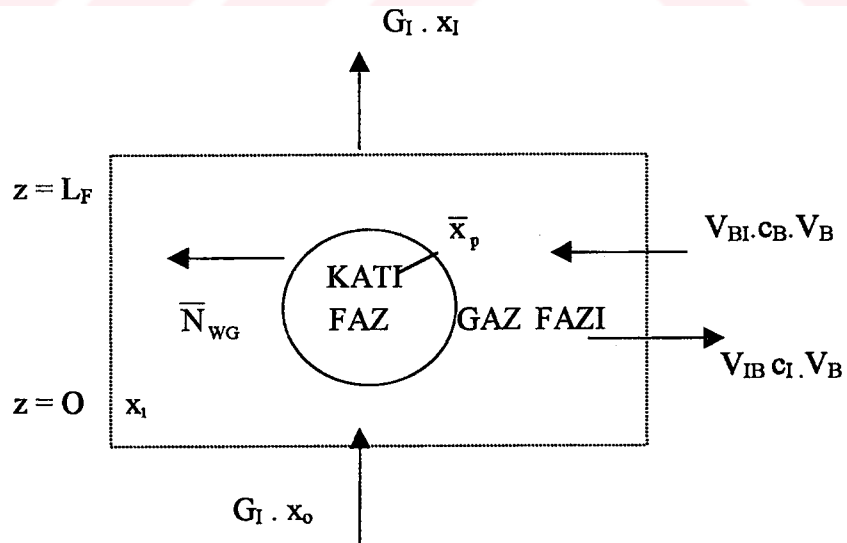
Sınır Şartları

$z = 0 \quad x_b = x_o$ ile denklem çözülürse

$$x_b = x_i - (x_i - x_o) \exp\left(-\frac{K_{ib}}{U_b} z\right) \quad (38)$$

5. 2. 2. Gaz Faz

Gaz fazı ile kabarcık ve katı partikül arasında kütle alış verişi vardır.



Şekil 5. 3 Katı partikül ile giriş gazı arasındaki kütle transferi [2].

Kabarcıktaki nem konsantrasyonu z pozisyonuna bağlı olduğu için, kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$G_i \cdot x_o + \dot{V}_{bi} \int_{(vb)} C_b(z) \frac{dV_b}{V_b} + \bar{N}_{wg} S_{exp} = G_i x_i + \dot{V}_{ib} \cdot C_i \quad (39)$$

Ortalama konsantrasyon $\tilde{C}_b$ cinsinden yazılırsa,

$$A_{tot} \cdot U_{mf} \cdot \rho_g (x_i - x_o) = (\dot{V}_{bi} \cdot \tilde{C}_b - \dot{V}_{ib} \cdot C_i) + \bar{N}_{wg} S_{exp} \quad (40)$$

Burada,

$$\tilde{C}_b = \frac{1}{V_b} \int_{(vb)} C_b(z) dV_b = \frac{1}{L_f} \int_0^{L_f} C_b(z) dz \quad (41)$$

Denklem (40)' da ki $\bar{N}_{wg} S_{exp}$ terimi nemin ortalama kütle akış hızıdır ve katı partikül besleme süresi dağılım ifadesi ile belirtilebilir.

$$\bar{N}_{wg} = \frac{1}{\theta_p} \int_0^\infty f(\theta) N_{wg}(\theta) d\theta \quad (42)$$

Yada buharlaşma katsayısı σ_p ile,

$$\bar{N}_{wg} = \frac{1}{\theta_p} \int_0^\infty \sigma_p (x_p^* - x_i) f(\theta) d\theta \quad (43)$$

Burada sadece denge durumundaki nem oranı x_p^* zamana bağımlı olarak düşünülür.

$$\bar{N}_{wg} = \sigma_p (\bar{x}_p^* - x_i) \quad (44)$$

Burada,

$$\bar{x}_p^* = \frac{1}{\theta_p} \int_0^\infty x_p^*(\theta) \exp\left(-\frac{\theta}{\theta_p}\right) d\theta \quad (45)$$

$$\frac{S_{exp}}{V_b} = \frac{S_{exp}}{V_s} (1 - \epsilon_{mf}) \frac{V_e}{V_b} = \frac{6}{d_p} (1 - \epsilon_{mf}) \frac{1 - \delta}{\delta} \quad (46)$$

Şeklinde düşünüldükten sonra denklem (40) aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\frac{U_{mf}}{L_f} (x_i - x_o) = K_{ib} (\tilde{x}_b - x_o) + \frac{6\sigma_p (1 - \epsilon_{mf}) (1 - \delta)}{\rho_g d_p} (\bar{x}_p^* - x_i) \quad (47)$$

Buradan $\tilde{x}_b$ denklem (38)' den hesaplanabilir. Denklem (34) ve (41) göz önüne alınırsa,

$$\tilde{x}_b = x_i + (x_i - x_o) \frac{U_b}{K_{ib} L_f} \left[\exp\left(-\frac{K_{ip}}{U_b} L_f\right) - 1 \right] \quad (48)$$

Kabarcık etrafındaki bulut çok incedir bu yüzden bulut hacmi ihmal edilebilir. Bulut gaz fazı ile kabarcık fazı arasındaki kütle ve ısı transferine engel olur. Bu yüzden kabarcık ile bulut ve bulut ile gaz arasındaki direnci içeren katsayıyı göz önüne alınmak zorundadır.

Kabarcık ile bulut arasındaki katsayı,

$$K_{bc} = 4,5 \frac{U_{mf}}{d_b} + 5,85 \frac{D_g^{1/2} \cdot g^{1/4}}{d_b^{5/4}} \quad (49)$$

Bulut ile giriş gazı arasındaki katsayı

$$K_{ci} \cong 6,78 \left(\frac{\epsilon_{mf} \cdot D_{geff} U_b}{d_b^3} \right)^{1/2} \quad (50)$$

Gazın etkin difüzivitesi

$$D_{geff} = \epsilon_{mf} \cdot D_g \quad (51)$$

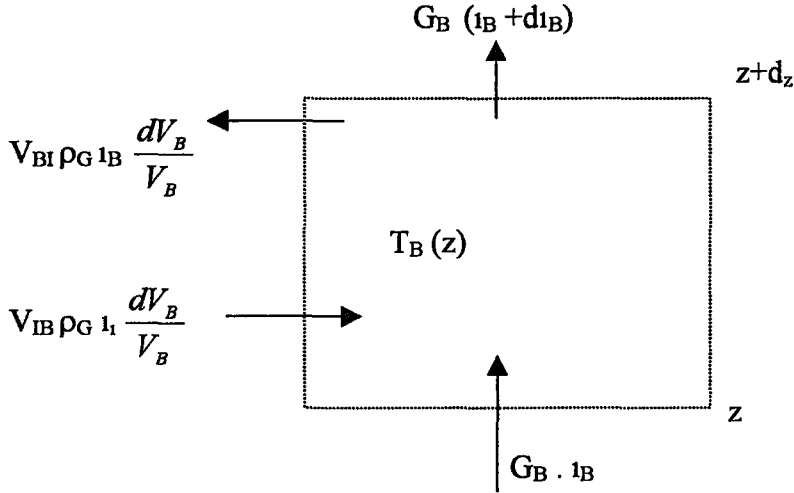
Böylece kabarcık ve giriş gaz fazı arasındaki tüm katsayı,

$$\frac{1}{K_{ib}} \cong \frac{1}{K_{bc}} + \frac{1}{K_{ci}} \quad (52)$$

5. 3. Isı Balansı

5. 3. 1. Kabarcık Faz

Kabarcık ve gaz fazları arasında kütle değişimi olan hacim, bu fazlar arasında ısı transferine sebep olur.



Şekil 5. 4 Kabarcık fazı ile gaz fazı arasındaki ısı transferi [2].

$$G_b \cdot di_b = \rho_g (\dot{V}_{ib} i_i - \dot{V}_{bi} i_b) \frac{dV_b}{V_b} \quad (53)$$

$$U_b \cdot \rho_g \cdot \frac{di_b}{dz} = (\dot{V}_{ib} i_i - \dot{V}_{bi} i_b) \frac{\rho_g}{V_b} \quad (54)$$

Nem içeren bir gazın entalpisi,

$$i_{(.)} \equiv c_{pg} T_{(.)} + x_{(.)} (r_o + c_{pwg} T_{(.)}) \equiv c_{wg} T_{(.)} + x_{(.)} r_o \quad (55)$$

Burada

$$c_{wg} = c_{pg} + x_{(.)} c_{pwg} \quad (56)$$

Denklem (54)' e bu tanım uygulanırsa,

$$U_b \rho_g (c_{wg} \frac{dT_b}{dz} + r_o \frac{dx_b}{dz}) = \rho_g \left[\frac{r_o}{V_b} (\dot{V}_{ib} x_i - \dot{V}_{bi} x_b) + \frac{c_{wg}}{V_b} (\dot{V}_{ib} T_i - \dot{V}_{bi} T_b) \right] \quad (57)$$

Eğer kabarcık ile gaz fazı arasında ısı transfer katsayısı,

$$H_{ib} = C_{wg} \rho_g \frac{\dot{V}_{ib} T_i - \dot{V}_{bi} T_b}{V_b (T_i - T_b)} \quad (58)$$

olarak tanımlanırsa, o zaman denklem (57) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$U_b \rho_g c_{wg} \frac{dT_b}{dz} = H_{ib} (T_i - T_b) + \rho_g \cdot r_o \left[K_{ib} (x_i - x_b) - U_b \frac{dx_b}{dz} \right] \quad (59)$$

Denklem (59)' un sağ tarafındaki 2. terim sıfıra eşittir (Bak denklem 37)

Böylece,

$$U_b \cdot \rho_g c_{wg} \frac{dT_b}{dz} = H_{ib} (T_i - T_b) \quad (60)$$

Sınır Şartları,

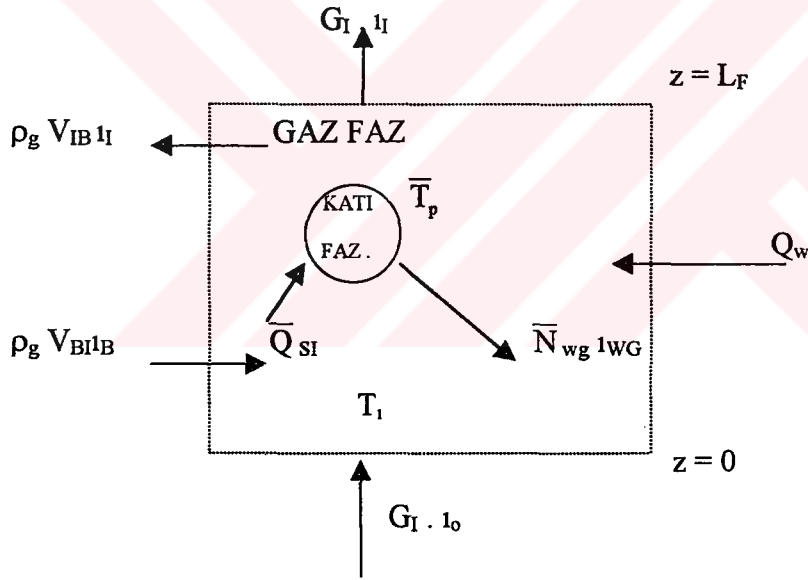
$$T_b = T_o \text{ da } z = 0$$

için denklem çözülürse,

$$T_b = T_i + (T_o - T_i) \exp \left(- \frac{H_{ib}}{\rho_g c_{wg} u_b} z \right) \quad (61)$$

5. 3. 2. Gaz Fazı

Gaz ile kabarcık fazı arasında ve giriş gazı ile katı partikül arasında ısı transferi vardır. Ayrıca gaz kurutucu duvarı ile ısı alış veriş yapabilir.



Şekil 5. 5 Katı partikül ve giriş gazı arasındaki ısı transferi [2].

$$G_i i_o + \rho_g \dot{V}_{bi} \int_{(V_b)} i_b(z) \frac{dV_b}{V_b} + q_w S_{exw} + \bar{N}_{wg} i_{wg} = G_i i_i + \rho_g \dot{V}_{ib} i_i + \bar{q}_{si} S_{exp} \quad (62)$$

$$G_i (i_o - i_i) = \rho_g \left[c_{wg} (\dot{V}_{ib} T_i - \dot{V}_{bi} \tilde{T}_b) + r_o (\dot{V}_{ib} x_i - \dot{V}_{bi} \tilde{x}_b) \right] - h_w (T_w - T_i) S_{exw} - \sigma_p (\bar{x}_p^* - x_i) \cdot (r_o + c_{pwg} T_i) S_{exp} + h_p (T_i - \bar{T}_p) S_{exp} \quad (63)$$

Denklem (62) de ki $N_{wg} i_{wg}$ yerine $\overline{N_{wg} i_{wg}}$ yazılımı daha sonra tek bir katı partikül için ısı balansı hesaplanması sırasında bulunabilir.

Isı ve kütle transfer katsayılarını kullanarak denklem (63)' ü

$$\rho_g U_{mf} A_{tot} (i_o - i_i) = H_{bi} (T_i - \tilde{T}_b) V_b + r_o \rho_g K_{bi} (x_i - \tilde{x}_b) V_b - h_w (T_w - T_i) S_{exw} + [h_p (T_i - \bar{T}_b) - \sigma_p (\bar{x}_p^* - x_i) (r_o + C_{pwg} T_i)] S_{exp} \quad (64)$$

olarak yazılabilir veya,

$$\frac{\rho_g U_{mf}}{\delta L_f} [c_{wg} (T_o - T_i) + r_o (x_o - x_i)] = H_{bi} (T_i - \tilde{T}_b) + r_o \rho_g K_{bi} (x_i - \tilde{x}_b) - h_w (T_w - T_i) \frac{a_{ex}}{\delta} + \frac{6}{d_p} (1 - \epsilon_{mf}) \frac{1 - \delta}{\delta} [h_p (T_i - \bar{T}_p) - \sigma_p (\bar{x}_p^* - x_i) (r_o + c_{pwg} T_i)] \quad (65)$$

Fakat denklem (47)' ye kütle balansı uygulayarak, denklem (65) sadeleştirilebilir.

$$\frac{c_{wg} \rho_g U_{mf}}{\delta L_f} (T_o - T_i) = H_{bi} (T_i - \tilde{T}_b) + \frac{6(1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta)}{d_p \delta} [h_p (T_i - \bar{T}_p) - \sigma_p (\bar{x}_p^* - x_i) c_{pwg} T_i] - h_w (T_w - T_i) \frac{a_{ex}}{\delta} \quad (66)$$

Buradan a_{ex} ısı transferi için özgül duvar yüzeyi,

$$a_{ex} = \frac{S_{exw}}{V_{tot}} \quad (67)$$

ve kabarcık fazı ortalama sıcaklığı

$$\tilde{T}_b = T_i + (T_i - T_o) \frac{\rho_g c_{wg} U_b}{H_{ib} L_f} [\exp(-\frac{H_{ib} L_f}{\rho_g c_{wg} U_b}) - 1] \quad (68)$$

Kütle transferine benzer şekilde kabarcık ve giriş gaz fazı arasındaki ısı transfer katsayısı amprik ifadeden hesaplanabilir.

Kabarcık ve bulut arasında,

$$H_{bc} = 4,5 \frac{U_{mf} \rho_g c_{wg}}{d_b} + 5,85 \frac{(\lambda_g \rho_g c_{pg})^{1/2}}{d_b^{5/4}} g^{1/4} \quad (69)$$

Bulut ve gaz faz arasında,

$$H_{ci} = 6,78 (\rho_g c_{pg} \lambda_g)^{1/2} \left(\frac{\epsilon_{mf} U_b}{d_b^3} \right)^{1/2} \quad (70)$$

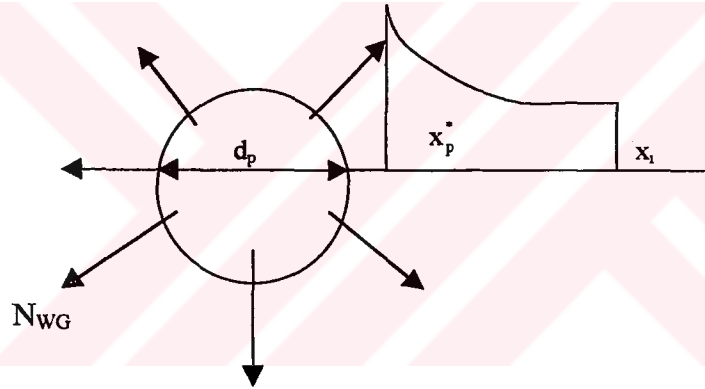
Böylece toplam ısı transfer katsayısı

$$\frac{1}{H_{ib}} \cong \frac{1}{H_{bc}} + \frac{1}{H_{ci}} \quad (71)$$

$\bar{u}_p$, $\bar{x}^*$ ve $\bar{T}_p$ yi bulmak için tek bir katı partikül için ısı ve kütle balansı kurulabilir (Şekil 5. 6).

5. 4. Tek Bir Katı Parçacık İçin Isı Ve Kütle Balansı

5. 4. 1. Kütle Balansı



Şekil 5. 6 Katı Partikül İçin Kütle Balansı [2].

Tek bir katı partikülün nem oranı, normal kurutma koşulları altında giriş gazı içine buharlaşarak azalır. (Şekil 5. 6)

$$m_{ps} \frac{du_p}{d\theta} = -N_{WG} f_p \quad (72)$$

$$m_{ps} = \frac{d_p^3}{6} \frac{\rho_{ws}}{1 + u_p} \pi \text{ ve } f_p \cong d_p^2 \pi \quad (73)$$

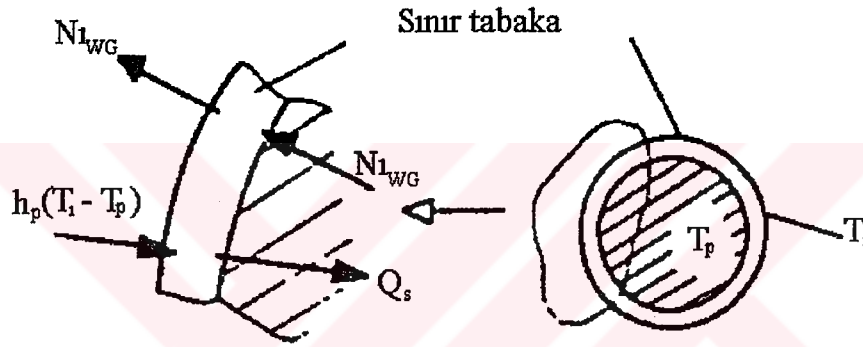
$$-\frac{\rho_{ws}}{1+u_p} \frac{du_p}{d\theta} = \frac{6\sigma_p}{d_p} (x_p^* - x_i) \quad (74)$$

$$\rho_{ws} = \frac{m_{ps} + m_{pw}}{(V_{ps} + V_{pw})_0} = \rho_s \frac{1+u_p}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}} \quad (75)$$

Kütle balansının son şekli,

$$-\frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}} \frac{du_p}{d\theta} = \frac{6\sigma_p}{d_p} (x_p^* - x_i) \quad (76)$$

5.4.2. Isı Balansı



Şekil 5. 7 Katı partikül için ısı balansı [2].

$$m_{ps} \frac{d}{d\theta} (i_p) = (q_s - N_{i_{ws}}) f_p \quad (77)$$

Nem içeren katı bir partikülün entalpisi

$$i_p = (c_s + c_{wup}) T_p = c_{ws} T_p \quad (78)$$

Olarak ifade edilir ve partikülün yüzeyi üzerindeki kurutma gazının doymuş olduğunu kabul ederek

$$i_{ws} \cong r_o + c_{pwg} \cdot T_p \quad (79)$$

Böylece denklem (77) aşağıdaki formda yazılabilir.

$$\frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}} \frac{d}{d\theta} (c_{ws} T_p) = \frac{6}{d_p} (q_s - N_{i_{ws}}) \quad (80)$$

Bir partikülün yüzeyindeki ısı akısı (q_s) partikülü saran sınır tabaka için yazılan ısı balansından bulunabilir. (Şekil 5. 7)

$$h_p (T_i - T_p) + \dot{N}i_{ws} = \dot{N}i_{wg} + q_s \quad (81)$$

$$i_{wg} \cong r_o + c_{pwg} T_i \quad (82)$$

Böylece,

$$q_s - \dot{N}i_{ws} = h_p (T_i - T_p) - \dot{N}i_{wg} \quad (83)$$

Denklem (78) ve (76)da ki ısı balansından ,

Denklem (80) aşağıdaki formu alır.

$$(c_s + c_w u_p) \frac{dT_p}{d\theta} = \frac{6}{d_p} \frac{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}}{\rho_s} [h_p (T_i - T_p) - \sigma_p (x_p^* - x_i)(r_o + c_{pwg} T_i - c_w T_p)] \quad (84)$$

Denklem (76) ve (84) tek bir partikül için ısı ve kütle balansını yeniden göstermektedir.

Başlangıç şartları

$$u_p = u_{po} \text{ ve } T_p = T_{po} \quad \theta = 0 \text{ da} \quad (85)$$

Katı partikülün etrafındaki doymuş kurutma ortamının nem oranı, partikülün nem oranına ve sıcaklığına bağlıdır.

$$x_p^* = \phi(T_p, u_p) \quad (86)$$

bu fonksiyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$x_p^* = \phi_1(T_p) \phi_2(u_p) \quad (87)$$

Burada $\phi_1(T_p)$ nemin genleşme eğrisinden bulunabilir ve ϕ_2 katı-nem sistemin sorpiyon karakterine bağlı bir düzeltme fonksiyonudur.

Aşağıdaki formüller $0 < T_p < 100^\circ \text{C}$ için hava-su sisteminde $\phi_1(T_p)$ için yaklaşık olarak kullanılabilir.

$$\ell \log P_{wg} = 0,622 + \frac{7,5T_p}{238 + T_p} \quad (88)$$

$$x_p = 0,622 \frac{P_{wg}}{760 - P_{wg}} \phi_2(u_p)$$

Burada $\phi_2 (u_p)$ aşağıdaki gibi yaklaşık bir fonksiyon tipi ile gösterilebilir.

$$\phi_2 (u_p) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } u_p > u_c \\ [u_p^n / (u_p^n + K)] & \text{eğer } u_p \leq u_c \end{cases} \quad (89)$$

Transfer katsayıları h_p , σ_p ve h_w aşağıdaki ifadelerden hesaplanabilir.

$$h_p = C_{pg} U_o \rho_g J_h Pr_g^{-2/3} \quad (90)$$

Burada,

$$J_h = \frac{Nu_p}{Re_o Pr_g^{1/3}} = \begin{cases} 1,77 Re_o^{-0.44} & \text{eğer } Re_o \geq 30 \\ 5,70 Re_o^{-0.78} & \text{eğer } Re_o < 30 \end{cases} \quad (91)$$

$$Nu_p = \frac{h_p d_p}{\lambda_g}, \quad Pr_g = \frac{c_{pg} \mu_g}{\lambda_g}, \quad Re_o = \frac{d_p U_o \rho_g}{(1 - \epsilon_{mf}) \mu_g} \quad (92)$$

Türbülanslı sınır tabaka halinde buharlaşma katsayısı,

$$\sigma_p = h_p / (c_{wg} Le) \quad (93)$$

Burada,

$$Le = \lambda_g / (c_{wg} \rho_g D_g) \quad (94)$$

Giriş gazı ile kurutucu duvarı arasındaki ısı transfer katsayısı,

$$Nu_{max} = 8.86 Ar^{0.2} \quad (95)$$

Burada,

$$\left. \begin{aligned} Ar &= \frac{d_p^3 (\rho_{sw} - \rho_g) \rho_g g}{\mu_g^2} \\ Re_{max} &= 0,2 \cdot Ar^{1/2} \\ Nu_{max} &= \frac{h_{wmax} d_p}{\lambda_g} \\ h_{wmax} &> h_w \text{ eğer } Re_{max} \neq Re_o \end{aligned} \right\} \quad (96)$$

Böylece denklem (76) ve (84)'ü (85) koşulu altında çözmek için besleme süresi değerleri hesaplanabilir. Yani (97, 98, 99)

$$\bar{T}_p = \int_0^\infty f(\theta) T_p(\theta) d\theta \quad (97)$$

$$\bar{u}_p = \int_0^{\infty} f(\theta) u_p(\theta) d\theta \quad (98)$$

$$\bar{x}_p^* = \int_0^{\infty} f(\theta) x_p^*(\theta) d\theta \quad (99)$$

Bu değerlerin katı çıkışına ait olduğu düşünülür. Besleme süresi katı besleme hızı esasına göre tahmin edilebilir.

$$V_s = (1 - \epsilon_{mf}) (1 - \delta) V_{tot} = (1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} A_{tot} \quad (100)$$

$$\theta_p = \frac{V_s}{S} \rho_s = (1 - \epsilon_{mf}) L_{mf} A_{tot} \rho_s / S \quad (101)$$

Ortalama nem oranı x_{avg} ve çıkış gaz sıcaklığı T_{avg} aşağıdaki kütle ve ısı balansından hesaplanabilir.

Kütle Balansı,

$$G_i x_i + G_b x_b (L_f) = G x_{avg} \quad (102)$$

(22),(24),(27) ve (38) denklemleri kullanılarak

$$x_{avg} = \frac{U_{mf}}{U_o} x_i + \frac{U_b}{U_o} \delta \left[x_i - (x_i - x_o) \exp\left(-\frac{K_{ib}}{U_b} L_f\right) \right] \text{ yazılabilir.} \quad (103)$$

Isı Balansı,

$$G_i i_i + G_b i_b (L_f) = G i_{avg} \quad (104)$$

(22), (24), (27) ve (56), (61), (102) denklemleri kullanılarak,

$$T_{avg} \cong \frac{U_{mf}}{U_o} T_i + \frac{U_b}{U_o} \delta \left[T_i + (T_o - T_i) \exp\left(-\frac{H_{ib} L_f}{\rho_g c_{wg} U_b}\right) \right] \quad (105)$$

Şimdi matematik model kurulabilir. Model kompleks ve hassastır. Deneme yanılma metoduna gereksinim vardır. Fakat problem basitleştirilebilir.

5. 5. Çözüm Metodu

Normalde eğer giriş fazındaki sıcaklık ve nem oranı x_o , T_o ve u_{po} , T_{po} ve U_o minimum akışkanlaşma koşulundaki akışkan yatağın yüksekliği L_{mf} ayrıca katı partikülün besleme süresi θ_p verilirse o zaman katı çıkışının ortalama nem oranı $\bar{u}_p$ hesaplanabilir.

Çözüm olarak birinci adımda giriş gazının nem oranı x_i^k ve sıcaklığı T_i^k tahmin edilebilir. Böylece (76) ve (84) denklemleri integre edilebilir. Yani $\bar{T}_p^k, \bar{u}_p^k$ ve $(\bar{x}_p^*)^k$ öncelikle hesaplanabilir. Şimdi denklem (47) ve (48) dan $(\bar{x}_p^*)^k$ ile x_i^{k+1} 'i alalım, daha sonra T_i^{k+1} denklem (66) ve (68)' den $(\bar{x}_p^*)^k$, $\bar{T}_p^k$ ve x_i^{k+1} ile saptanabilir. Tahmin eğer,

$$\begin{aligned} |x_i^{k+1} - x_i^k| / x_i^k &< \epsilon_x \\ |T_i^{k+1} - T_i^k| / T_i^k &< \epsilon_t \end{aligned} \quad (106)$$

olursa kabul edilebilir. Burada ϵ_x ve ϵ_t $10^{-2} \approx 10^{-4}$ arasındadır. Bu prosedürü sistematik bir şekilde uygulamak için çok değişkenli bir araştırma metodu kullanılabilir. Bununla birlikte daha basit bir çözüm metodu bulmak daha elverişlidir. Çünkü T_i ve x_i için birçok fiziksel kısıtlamalar bilinse bile, T_i^{k+1} ve x_i^{k+1} için gerekli olan yaklaşımlar çok zamanı alır. Gerçek kurutmada,

$$\begin{aligned} T_{po} &< T_i < \max(T_o, T_w) \\ x_o &< x_i \leq \phi_1(T_i) \end{aligned}$$

5. 6. Yaklaşık Çözüm

Hatfield ve Amondson böyle bir problemi çözmek için önerdikleri uygun bir metot vardır. Bu metodun amacı ψ nin fonksiyonu olan x_i ve T_i ' yi kesin bir şekilde çözmektir. Burada,

$$\psi \equiv \bar{u}_p / u_{po} \quad (107)$$

ortalama nem miktarının, giriş nem miktarına oranı olarak tanımlanır. Normal şekilde,

$$0 \leq \psi \leq 1 \quad (108)$$

Böylece , $\psi \in [0,1]$ kapalı aralığında uygulamak üzere nümerik çalışmada (T_i, x_i) iki boyutlu olan çözüm bir boyuta indirilebilir.

ψ terimindeki x_i yi elde etmek için $f(\theta)$ ile denklem (76)' ı çarpılır ve 0'dan ∞ 'a kadar integre edilirse, denklem (109) 'u bulunur.

$$-\frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}} (\bar{u}_p - u_{po}) = \frac{6\sigma_p}{d_p} (\bar{x}_p^* - x_i) \theta_p \quad (109)$$

Denklem (47) ve (48) birleştirildikten sonra

$$\frac{U_{mf}}{\delta L_f} = \frac{U_b}{L_f} \left[\exp\left(-\frac{K_{ib}}{U_b} L_f\right) - 1 \right] + \frac{6\sigma_p (1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta)}{\rho_g d_p \delta} \frac{\bar{x}_p^* - x_i}{x_i - x_o} \text{ bulunur.} \quad (110)$$

Bu denklem kullanılarak x_i , ψ nin fonksiyonu olarak denklem (109)'dan bulunabilir.

$$x_i = x_o + R (1 - \psi) \quad (111)$$

Burada,

$$R = \frac{(1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta) \rho_s u_{po} L_f}{\rho_g \theta_p \left(1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po} \right) \left\{ U_{mf} + U_b \delta \left[1 - \exp\left(-\frac{K_{ib}}{U_b} L_f\right) \right] \right\}} \quad (110)$$

T_i ' ye bağlı ψ teriminin fonksiyonel değerlendirilmesi daha az karışıktır. Denklem (66), (68), ve (105)' birleştirilirse, denklem (113) yazılabilir.

$$E_p \bar{T}_p + E_i T_i = E_c \quad (113)$$

$$\text{Burada, } E_p = E_1 h_p \quad (114)$$

$$E_i = E_1 \left[c_{pwg} \frac{u_{po} (1 - \psi) \rho_s}{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}} \frac{d_p}{6\theta_p} - h_p \right] + E_2 - E_3 \quad (115)$$

$$E_c = E_2 T_o - E_3 T_w \quad (116)$$

$$E_1 = \frac{6(1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta)}{d_p} \quad (117)$$

$$E_2 = \frac{c_{wg} \rho_g}{L_f} \left\{ U_b \left[\exp\left(-\frac{H_{bi} L_f}{\rho_g c_{wg} u_b}\right) - 1 \right] - \frac{U_{mf}}{\delta} \right\} \quad (118)$$

$$E_3 = \frac{a_{ex}}{\delta} h_w \quad (119)$$

Şimdi ayrıca, $\bar{T}_p$ ve T_i terimlerini içinde bulunduran bağımsız bir denkleme ihtiyaç vardır. Bu denklem, denklem (84)' ten türetilir. Fakat bir sadeleştirme gereklidir. Katı fazın yaklaşık özgül ısı kapasitesini denklem (120) olarak kabul edip,

$$c_s + c_w u_p \cong c_s + c_w \bar{u}_p = Sbt \quad (120)$$

Benzer şekilde,

$$c_w T_p \cong c_w \bar{T}_p = sbt \quad (121)$$

Böylece denklem (120) ve (121) ile daha önce verilen sadeleştirmeler düşünülerek Denklem (84) için denklem (76)' ya uygulanan benzer işlemler uygulanabilir ve böylece (122) elde edilir.

$$(c_s + c_w \bar{u}_p)(\bar{T}_p - T_{po}) = \frac{6}{d_p} \frac{1 + \frac{\rho_s}{\rho_w} u_{po}}{\rho_s} h_p (T_i - \bar{T}_p) \theta_p \quad (122)$$

$$+ (\bar{u}_p - u_{po})(r_0 + c_{pwg} T_i - c_w \bar{T}_p)$$

Bu denklemler aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$H_p \bar{T}_p + H_i T_i = H_c \quad (123)$$

5. 7. Nümerik Örnek

Aşağıdaki datalar göz önüne alınırsa;

$$U_o = 1 \text{ m/s},$$

$$T_o = 250^\circ \text{ C},$$

$$x_o = 0,015,$$

$$\rho_g = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_g = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms},$$

$$\lambda_g = 2.93 \cdot 10^{-2} \text{ W/m } ^\circ \text{ C},$$

$$c_{wg} = 1.9 \cdot 10^3 \text{ Ws/kg } ^\circ \text{ C}$$

$$c_w = 4.19 \cdot 10^3 \text{ Ws/kg } ^\circ \text{ C},$$

$$r_o = 2.5 \cdot 10^6 \text{ Ws/kg},$$

$$c_{pwg} = 1.93 \cdot 10^3 \text{ Ws/kg } ^\circ \text{ C}$$

$$\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3,$$

$$u_{po} = 0.35,$$

$$\theta_p = 300 \text{ s},$$

$$L_{mf} = 0.5 \text{ m},$$

5. 8 Nümerik Örnek Çözümü

(111) ve (128) denklemlerini kullanarak Ψ' nin farklı deneme değerleri Ψ^* lara karşı gelen x_i (Ψ^*) ve T_i (Ψ^*) değerleri hesaplanır. Bu değerler Microsoft Visual FoxPro 5.0 bilgisayar programı kullanılarak bulunmuştur. Program ve çıktısı Ek – 1 de verilmiştir. Burada $\Psi^* \in [0,1]$. $\Psi^* = 0.55$ olduğu durumda $x_i = 0.155$ ve $T_i = 78.37$ °C. (Bkn. Şekil 5. 8) x_i ve T_i nin bu değerlerini kullanarak denklem (76) ve (84)' yi çözülebilir. Böylece denklem (98)' den ya da doğrudan $u_p(\theta)$ nin boyutsuz değerinden ($\Psi = \bar{u}_p / u_{p0}$), $u_p(\theta)$ nin ortalama değeri $\bar{u}_p$ bulunabilir.

$\Psi = 0.548$ olduğu durumda (bak. Şekil 5. 9). Ψ değeri ile Ψ' nin deneme değeri Ψ^* karşılaştırılabilir. $\Delta\Psi = \Psi - \Psi^* = -0.002$. Daha çok $\Psi^* \in [0,1]$ için bu prosedür uygulanırsa, o zaman $\Delta\Psi = \Delta\Psi(\Psi^*)$ eğrisi elde edilebilir. (Şekil 5. 10)

Denklem $\Delta\Psi(\Psi^*) = 0$ ın kökü bu model denklemlere karşılık gelen nem oranının boyutsuz ortalama değerini verir. Diğer durumlarda ki bütün değişkenler bu değerlerin ışığında hesaplanabilir.

Çıkıştaki katının nem oranına model parametrelerindeki değişimin etkisini araştırmak için, aşağıdaki model parametreleri göz önüne alındı.

- Kurutulacak katı partikülün çapı (d_p)
- Giriş gazının nem oranı (x_0), sıcaklığı (T_0), lineer hızı (U_0)
- Akışkan yatak içindeki gaz kabarcıklarının çapı (d_b)
- Katı partiküllerin besleme süresi (θ_p)
- Akışkan yataklı kurutucunun duvar sıcaklığı (T_w)

Sonuçlar Şekil 5. 11, Şekil 5. 17 arasında verildi.

Şekil 5. 11' de partikül çapındaki küçük bir artmanın daha yüksek, çıkış nem oranı ile sonuçlanabildiği görülür. Çünkü Reynolds sayısı ve buna bağlı olarak partiküller ve giriş gazı arasındaki ısı ve kütle transferi azalır.

Şekil 5. 12, giriş gazının nemindeki bu artışın kuruma hızını çok az azaltabildiğini göstermektedir. Kabarcık fazında ve ayrıca ara gaz içindeki daha yüksek neme sahip giriş gazının daha yüksek ortalama nem konsantrasyonu ile sonuçlandığı uygun bir açıklama olabilir. Fakat bu kurutma hızında azalmaya ve indirek olarak da kabarcık faz

konsantrasyonunda azalmaya sebep olur. Bu karşı etkilerden dolayı kuruma hızındaki bileşke değişim çok küçük olabilir.

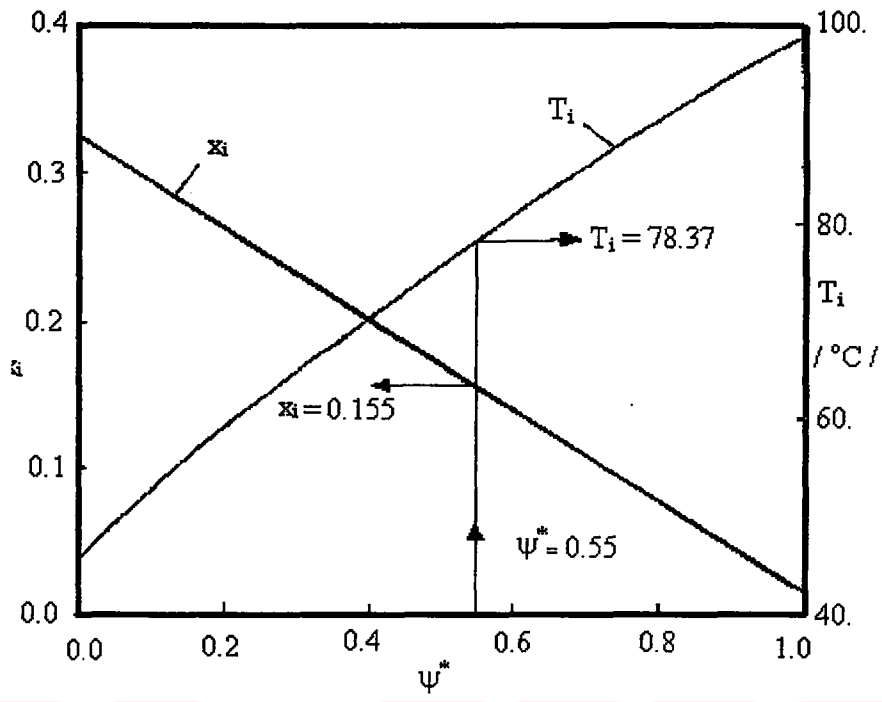
Daha yüksek giriş gaz sıcaklığı indirek olarak partikül sıcaklığını arttırabilir ve bu yolla da kuruma hızı artar. Bunun sebebi daha düşük çıkış nem oranı elde etmemizdir (Şekil 5. 13).

Daha yüksek giriş gaz hızı kabarcık fazı ve ara gaz arasında olduğu gibi, aynı zamanda ara gaz ile katı partikül arasındaki ısı ve kütle transferini arttırır. Bir başka deyişle, akışkan yatak içindeki gaz akış hızının büyüdüğü, ara gaz içindeki nem konsantrasyonunun azaldığı düşünülür. Bu etkiler katı çıkışında daha düşük nem oranı ile sonuçlanabilir (Şekil 5. 14).

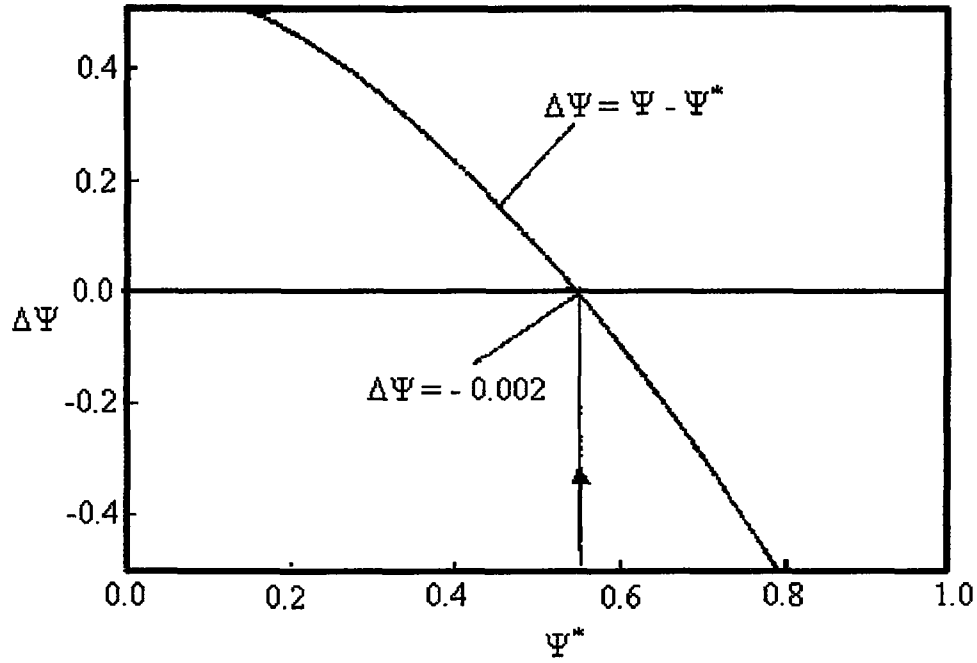
Daha büyük kabarcık olması halinde, kabarcık faz ile ara gaz arasındaki ısı ve kütle transferi azalır, bu da ara gaz arasında daha büyük nem konsantrasyonuna sebep olur. Sonuç, kuruma hızında azalma ve daha yüksek çıkış nem oranıdır. Büyük kabarcıkların oluşumuna mani olmak için, uygun bir gaz dağıtıcısının görevi önemlidir (Şekil 5. 15).

Partikülün besleme süresinin büyümesi, kuruma süresini etkileyen temas süresini arttırır ve böylece katı çıkışındaki ortalama nem oranı azalır. (Şekil 5. 16)

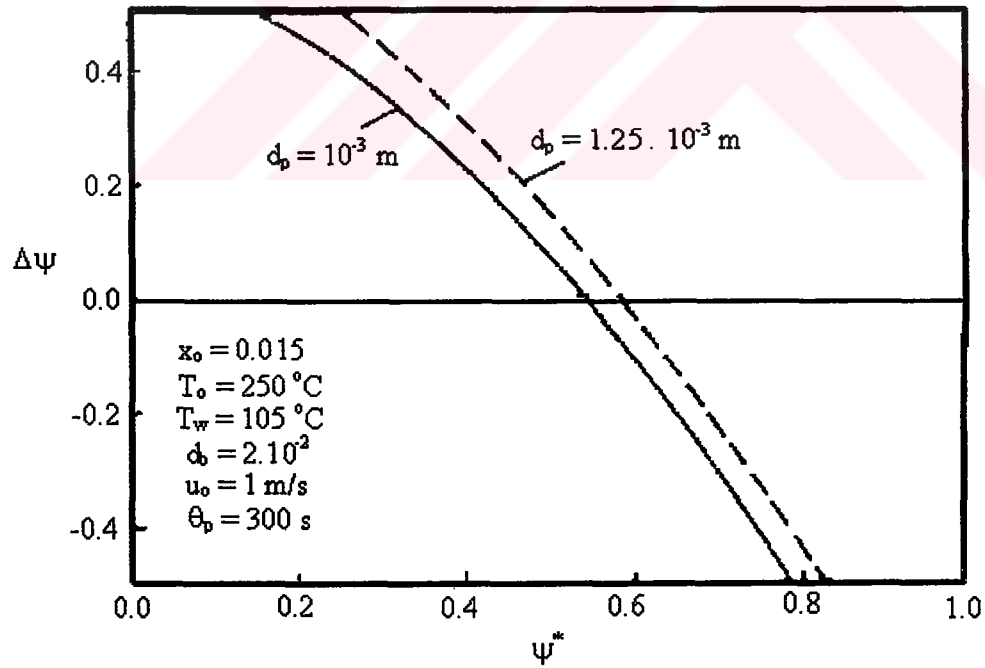
Partikülün daha düşük çıkış nem oranı demek olan kurutucu duvarının yüksek sıcaklığı, hem partikül sıcaklığını hem de kurutma hızını arttırabilir (Şekil 5. 17).



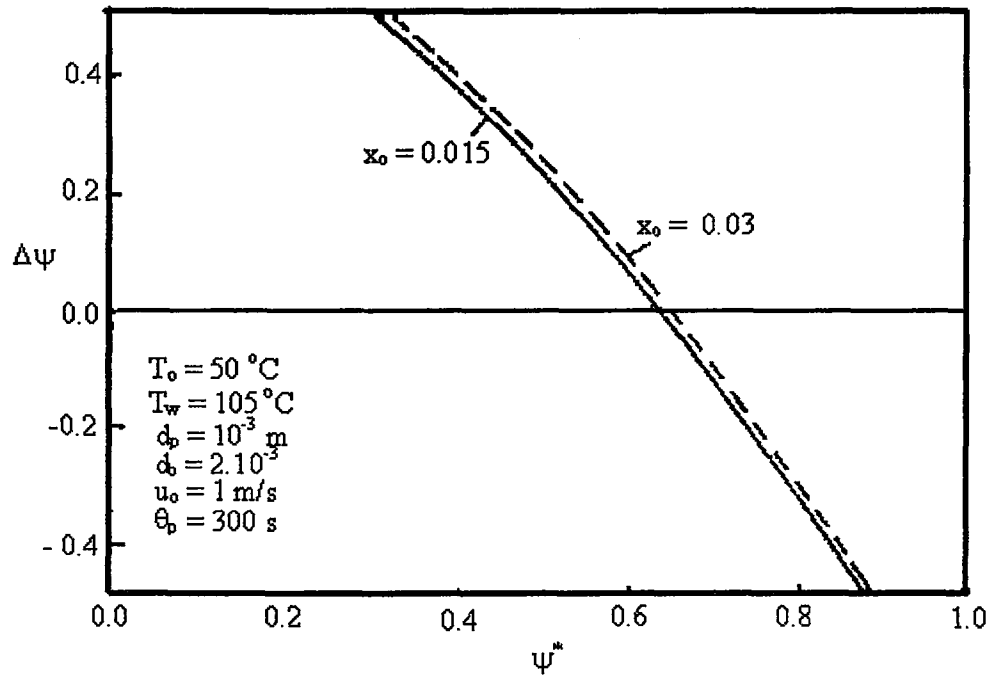
Şekil 5. 8 Ψ' nin fonksiyonu olarak giriş gazının sıcaklığı ve nem oranı



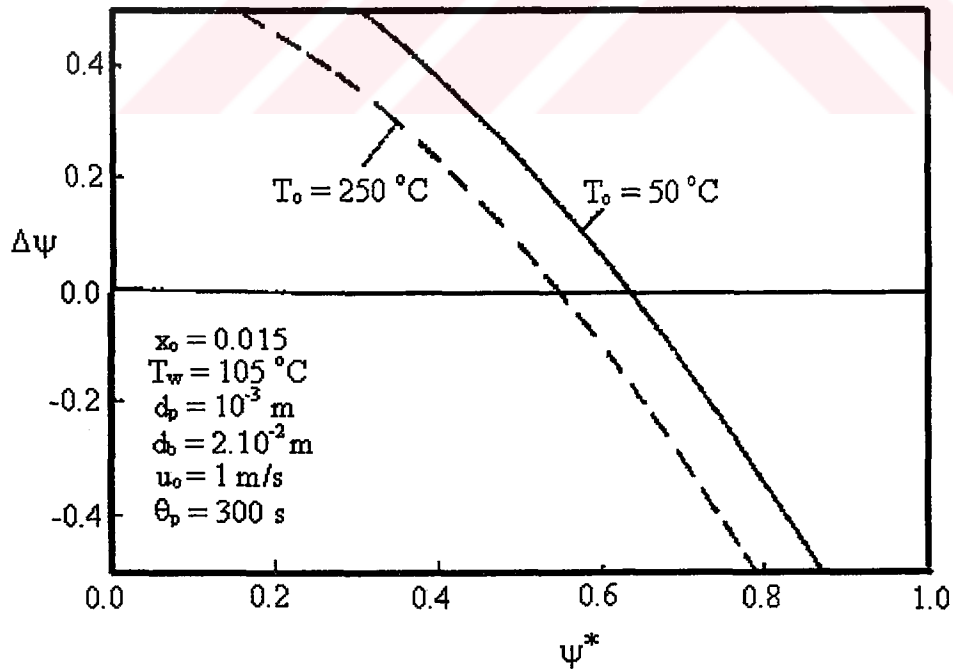
Şekil 5. 10 Ψ' nin fonksiyonu olan hesaplanmış Ψ ile Ψ' nin deneme değeri Ψ^* arasındaki fark



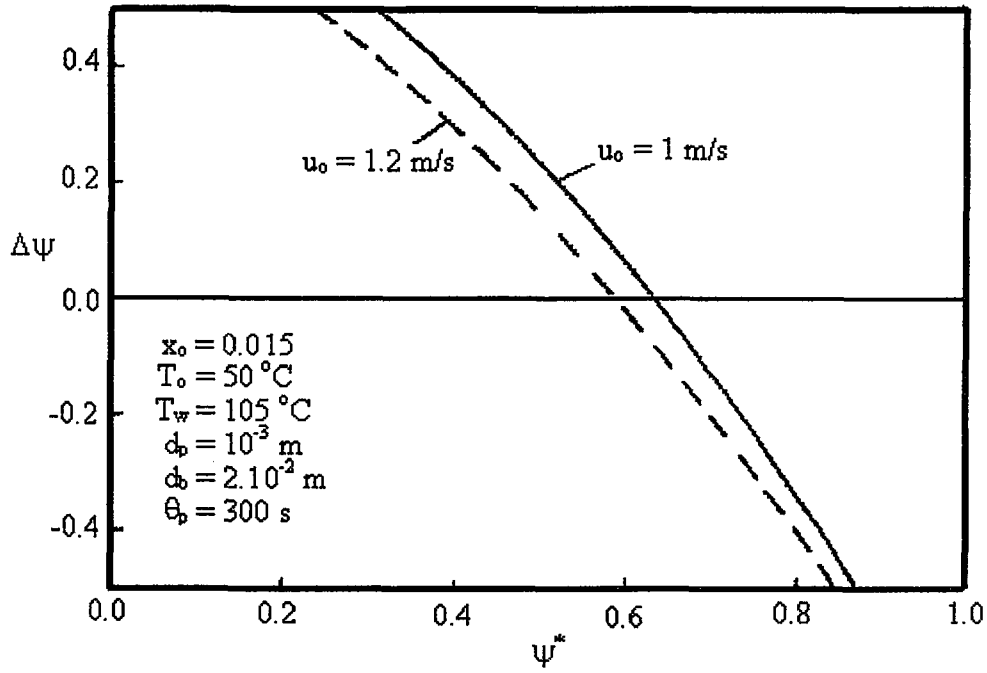
Şekil 5. 11 Partikül çapının etkisi



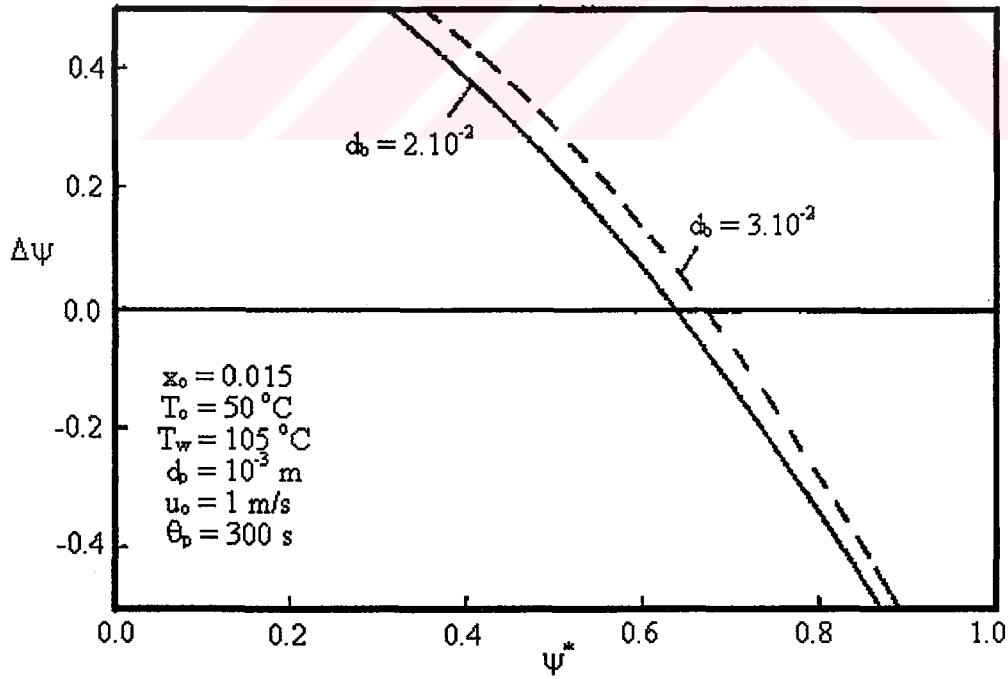
Şekil 5. 12 Giriş gazı neminin etkisi



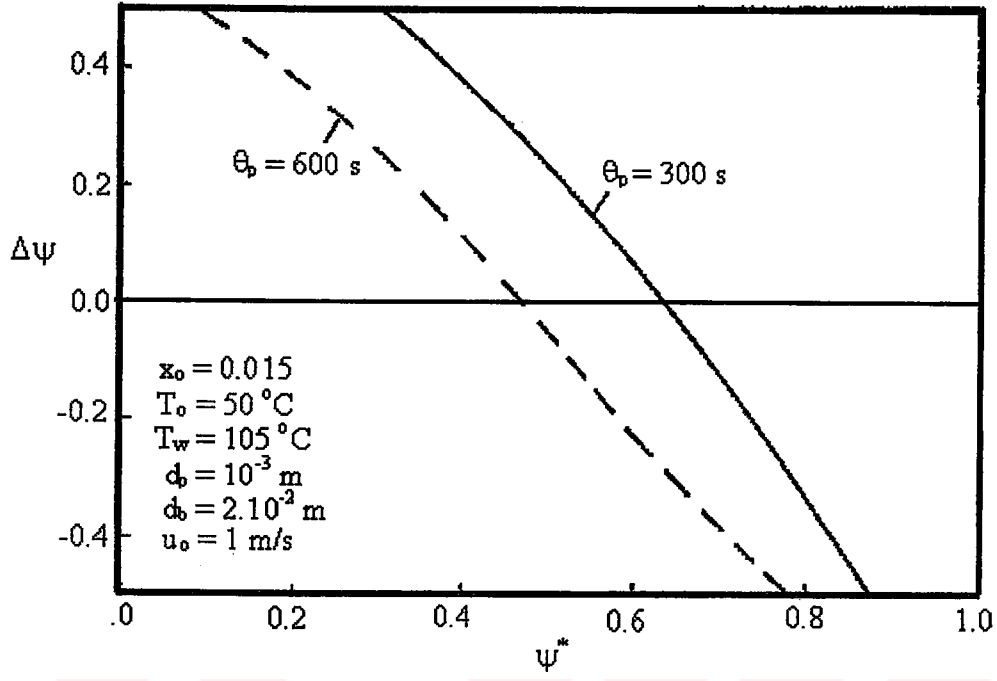
Şekil 5. 13 Giriş gaz sıcaklığının etkisi



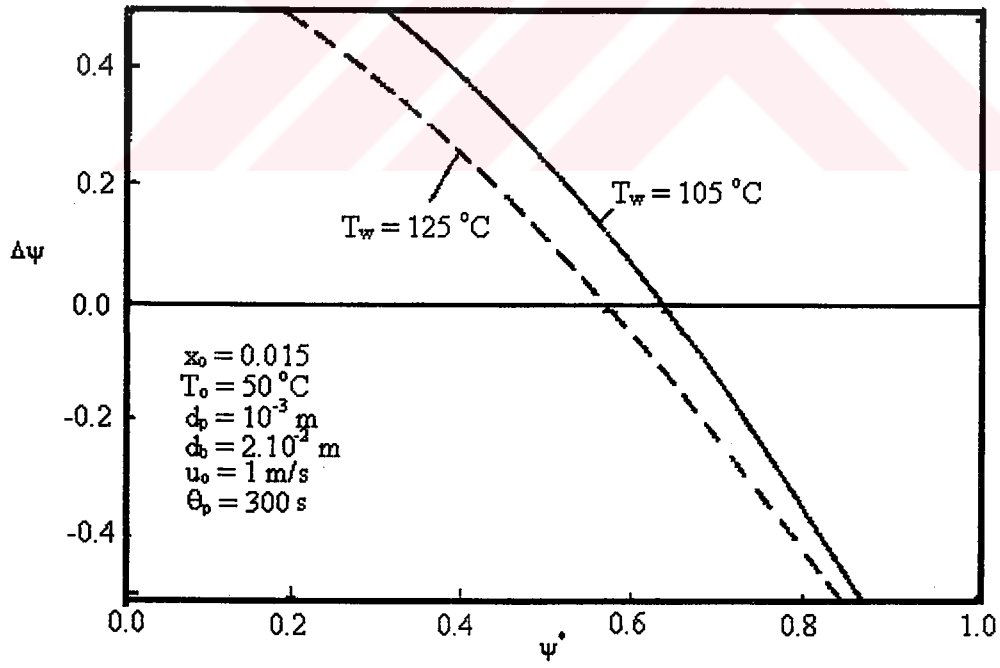
Şekil 5. 14 Giriş gaz hızının etkisi



Şekil 5. 15 Kabarcık çapının etkisi



Şekil 5. 16 Besleme süresinin etkisi



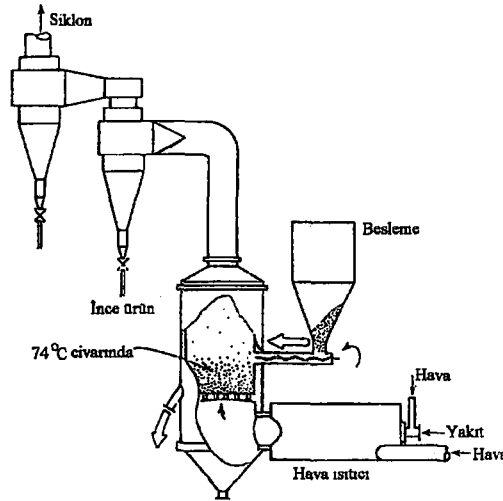
Şekil 5. 17 Kurutucu duvar sıcaklığının etkisi

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6. 1. Materyal ve Metod

Deneysel çalışmada sunta imalatında önemli olan yongaların kurutulması amaçlanmıştır. Yongaların kurutulması klasik metotlarla endüstriyel tesislerde genellikle dönel silindirik kurutucularda yapılmaktadır. Döner silindirik kurutucuların iç kısmında yelkovan şeklinde ve pervane vazifesi görecekt levhalar tespit edilmiştir. Silindir döndürüldüğünde bu levhalar yongaların silindir boşluğu içinde eksene paralel yönde ve sıcak gaz akımı boyunca hareket ederek boşaltma ucuna doğru ilerlemesini sağlarlar. Kurutma için gerekli sıcak gazları elde etmede otomatik bir brülörden faydalanılır. Brülör yakıtı olarak fuel - oil ve zımpara tozu kullanılabilir. Bu tip kurutucularda saatte 60 kg su buharlaştırılabilir. Çalışma sıcaklığı yaklaşık 300 °C dir ve 1 kg suyun buharlaştırılabilmesi için 750 kcal ısı gereklidir.

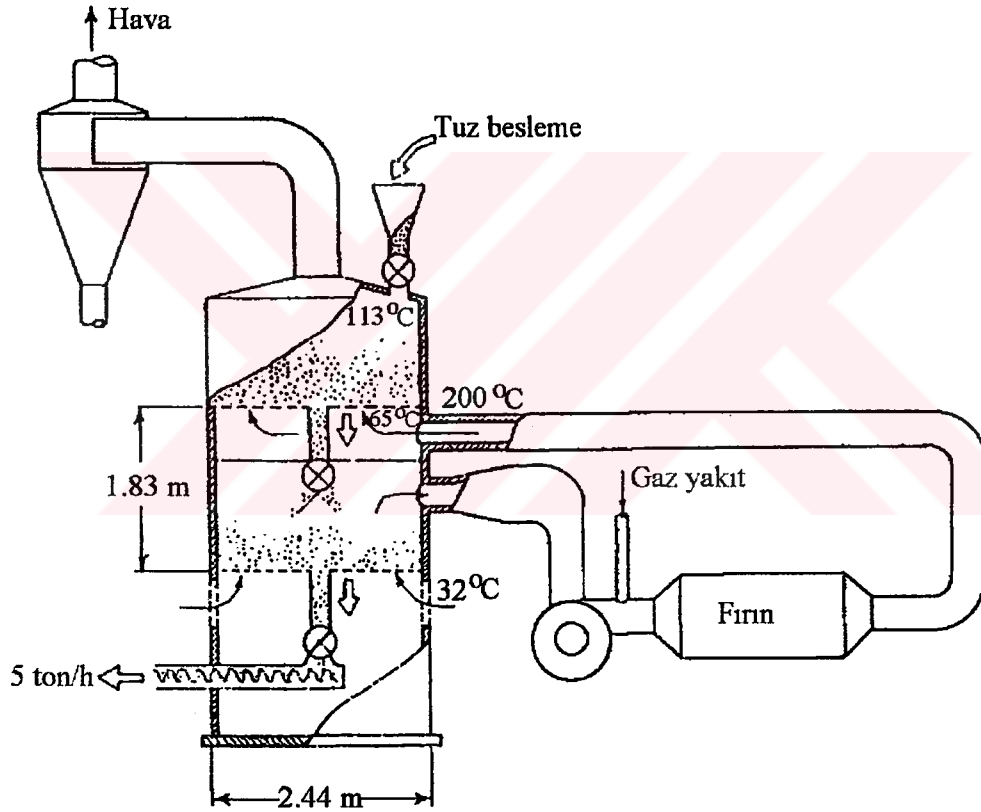
Akışkan yataklı kurutucular tanecikli ve partikül şeklindeki katıların kurutulması ve tane büyüklüğüne göre ayrılması için kullanılır. İlk ticari kurutuculardan biri Dorr – Oliver akışkan yatak kurutucu sistem Şekil 6. 1. de görülmektedir. Bu ünitenin çapı 1.7 m dir ve saatte 50 ton dolomit malzemeyi kalın bir ürün elde etmek için inceleri süzdükten sonra işleminden geçirir. Bu tip kurutucu konvansiyonel kurutuculardan daha az yakıt tüketimi ve daha iyi ürün kalitesi verir [13].



Şekil 6. 1. Dorr – Oliver Akışkan Yatak Kurutucu [13].

Ürünün kalın ve ince olarak kesin bir şekilde sınıflandırılması çok kademeli akışkan yatak kurutucularda yapılabilir. Bu kurutucularda kireç taşı, dolomit, kömür, yüksek fırın cürufu, plastikler v.s. gibi malzemelerin kurutulmasında yaygın bir şekilde kullanılır.

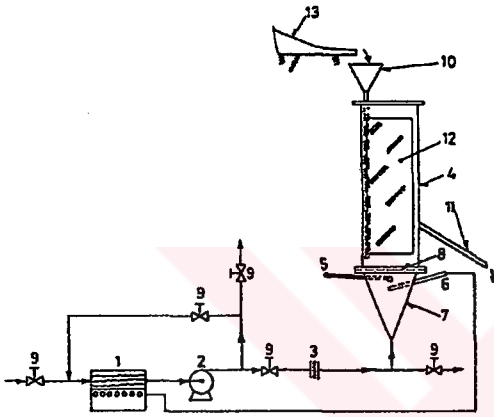
Yüksek ısı verim buharlaşmanın meydana geldiği yatağın içindeki üniform düşük sıcaklık ve sıcak giriş gazları arasındaki büyük sıcaklık farkının sonucudur. Bununla birlikte, sıcaklığa duyarlı belli malzemeler için giriş gaz sıcaklığı düşürülmelidir. Isıl verimdeki bileşke azalmayı karşılamak için, ısı boşaltılmış kurumuş katılardan geri kazanılabilir. Böyle bir düzenlemeye örnek Şekil 6. 2. de Carey tuz şirketinin yaptığı iki kademeli tuz kurutucusudur [13].



Şekil 6. 2. Carey tuz şirketinin yaptığı iki kademeli akışkan yataklı tuz kurutucusu [13].

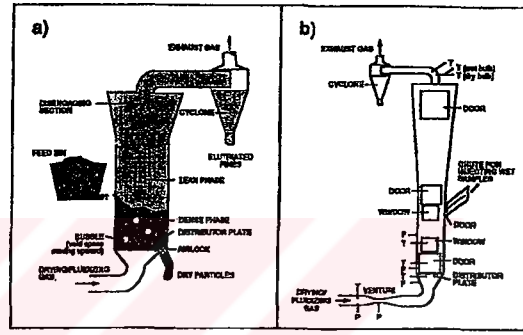
P. P. Thomas ve Y. B. G. Varma, granül halindeki gıda maddelerinin kurutulması adlı çalışmalarında Şekil 6. 3. de gözüken 100 x 100 mm² kesitinde ve 300mm yüksekliğinde akışkan yatak tasarlanmışlardır [14]. Michael R. Milota ve James B. Wilson,

odun partiküllerinin akışkan yatakta kurutulmasının analizi adlı çalışmalarında Şekil 6. 4. de gözüken bir laboratuvar kurutucusunu 2.5 m boy ve 0.21 m² kesitinde dizayn etmişlerdir [18]. M. Abid, R. Gibert, C. Laguerie, mısır taneciklerinin akışkan yatakta kurutulmasında ısı ve kütle transfer mekanizmasının teorik ve deneysel analizi adlı çalışmalarında Şekil 6. 5. de görüldüğü gibi bir deney seti yapmışlardır [21]. C. Srinivasa Kannan, S. Subba Rao ve Y. B. G. Varma, süreksiz akışkan yatakta katıların kurutulması için kinetik bir model adlı çalışmalarında Şekil 6. 6. da ki gibi 600 x 600 x 400 mm ölçülerinde paslanmaz çelik tanktan oluşan bir akışkan yatak kurutucu dizayn etmişlerdir [22].

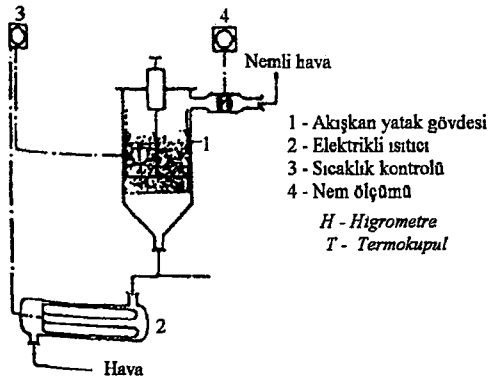


Şekil 6. 3. P. P. Thomas ve Y. B. G. Varma deney seti [14].

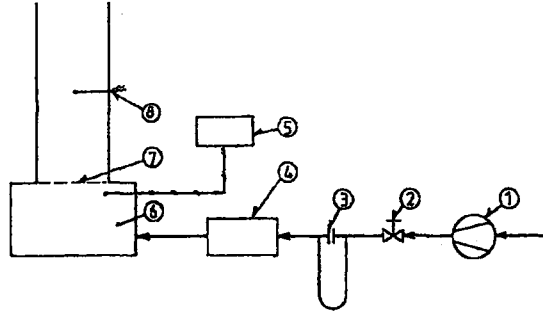
1. Hava ısıtıcı, 2. Fan, 3. Debi ölçer, 4. Akışkan yatak
5. Termometre, 6. Termokupul, 7. Genişleme, 8. Gaz distribütörü,
9. Kontrol valfleri, 10. Huni, 11. Katı çıkışı, 12. Görüş camı,
13. Titreşim besleyici.



Şekil 6. 4. Michael R. Milota ve James B. Wilson' un deney seti [18].



Şekil 6. 5. M. Abid, R. Gilbert, C. Laguerie nin deney seti [21].



Şekil 6. 6. Subba Rao ve Y.B.G.Varma- nın deney seti [22].

1. Hava kompresörü, 2. Kontrol valfi, 3. Orifis metre, 4. Hava ısıtıcı, 5. Sıcaklık kontrolü, 6. Hava odası, 7. Dağıtıcı elek, 8. Termokupul.

Sunta (yonga levha) yapımının en önemli safhalarından birini kurutma yani yongaların kurutulması teşkil eder. Çünkü elde olunan yonga levhanın rutubet miktarı ve kullanılışı esnasında deforme oluşu bu yongaların iyi kurutulmuş olmasına bağlıdır. Yongaların rutubet miktarı tutkal tipi ve miktarı ile presten önce yüzey tabakalarının ıslanma derecesine bağlı olarak değişik bulunmaktadır. Kurutma makinelerine gönderilen yongaların rutubetleri kavak ağacı için %70, çam ağacı için %30-45 olabilmektedir. Yongaların kalınlıkları da 0.04-0.02 mm civarındadır. Bundan dolayı yongaların sınıflandırılması gerekmektedir. Pres tekniği bakımından orta ve dış tabaka yonga rutubetlerinin farklı olması faydalıdır. Kurutucularda orta ve dış tabaklar aynı anda kurutucudan geçirilerek aynı rutubete %2 ye indirilir. Daha sonra ise yongaların tutkallanması sırasında dış tabakalar %14-15, iç tabakalar ise %10-11 oranında rutubetlendirilir.

Sunta imalatında önemli bir yeri olan kurutma çeşitli tip kurutucularla yapılabilmektedir. Bu alanda akışkan yatak kurutucularının kullanılabileceğini göstermek ve akışkan yatakta yonga kuruma özelliklerinin belirlenmesi önemlidir. Bu sebeple akışkan yatakta yonga kurutma deneyleri yapılmıştır.

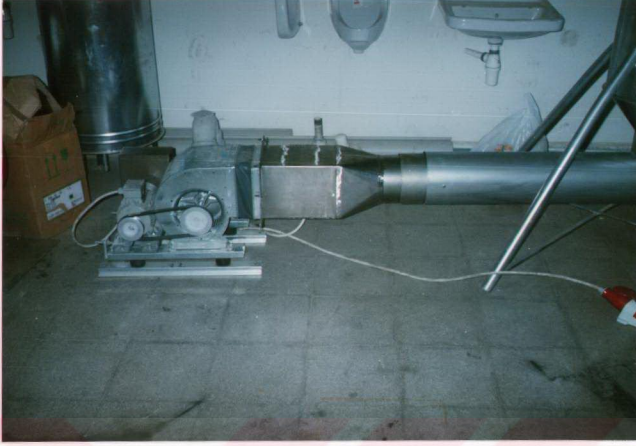
Sistemde ortamdan alınan hava bir hava ısıtıcısında ısıtılarak kurutucuya girmekte ve kurutucuya yüklenen yongalar akışkanlaştırılmakta ve bu sırada hava ve yongalar arasındaki ısı ve kütle transferi sonucu kurutma olayı gerçekleşmektedir.

Şekil 6. 7 ve Şekil 6. 8 de fotoğrafları ve Şekil 6. 9 da şeması gösterilen akışkan yataklı kurutma deney seti, Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Laboratuvarında tesis edilmiştir.



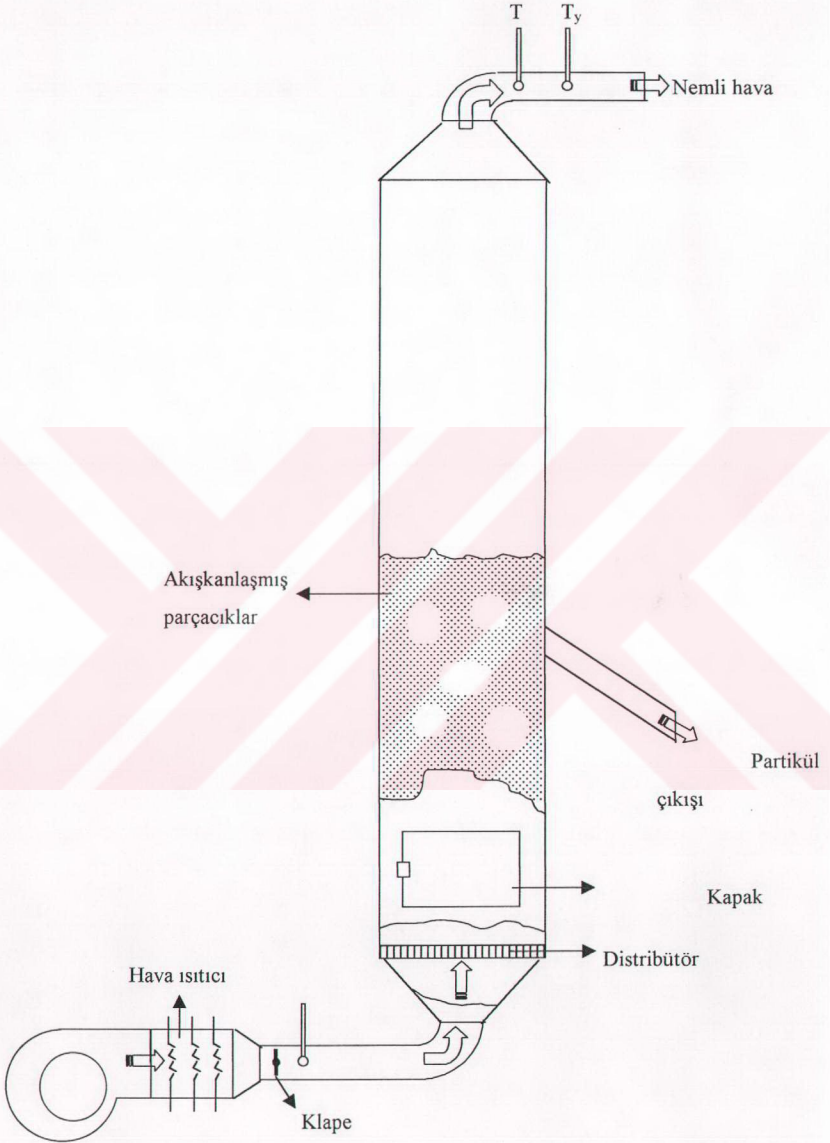
Şekil 6. 7. Deney setinin fotoğrafları

- a. Deney seti kapak fotoğrafı
- b. Deney seti sıcaklık ölçüm fotoğrafı



Şekil 6. 8. Deney setinin fotoğrafları

- a. Deney seti fan fotoğrafı
- b. Deney setinin komple fotoğrafı



Şekil 6. 9 Akışkan yataklı yonga kurutucu deney seti şeması

6. 2. Materyal

Deney seti fan, elektrikli ısıtıcı, sıcak hava iletim borusu, distribütör, gövde, çıkış borusu, katı partikül çıkış borusu, kapak, kumanda panosu kısımlarından oluşmuştur. Deney seti yapılırken literatürde incelenen deneysel çalışmalar esas alınmıştır. Aşağıda deney seti kısımlarının özellikleri verilmiştir.

Fan

Fan radyal tipte olup 1 HP gücünde trifaze elektrik motorludur ve radyal fan kayış ksnak mekanizmasından hareket almaktadır. Fan ortam havasını alarak ısıtıcı üzerine göndermektedir. Fandan ısıtıcıya gönderilen havanın miktarı ancak iletim borusundaki klape ile ayarlanabilmektedir. Fan çıkışının ısıtıcıya bağlanabilmesi için dikdörtgen kesitte esnek malzemeyle tutturulmuştur.

Isıtıcı

Fandan sonra bağlanan ısıtıcı toplam 6 kW gücünde olup trifaze bağlantılıdır. Isıtıcılar 2 kW, 4 kW ve 6 kW şeklinde 3 kademe olarak kullanılabilmektedir. Isıtıcıdan çıkan havanın sıcaklığı iletim borusunda termometre vasıtasıyla ölçülmektedir. Ayrıca gövde içerisine yerleştirilen termostat bulbu gövde içindeki sıcaklığı hissederek ısıtıcıya kumanda etmekte ve ayarlanan sıcaklığı sabit tutmaktadır. $\pm 2^{\circ}$ C farkla sıcaklık ayarı yapılmaktadır.

İletim Borusu

Isıtıcıdan çıkan hava iletim borusundan geçerken klape vasıtasıyla debisi ayarlanabilmektedir. İletim borusunun çapı 200 mm dir. Hava sıcaklığı önce iletim borusunda ölçülmektedir. İletim borusunda hava akışkan yatak kurutucu gövdesine doğru bir dirsek ile dönmektedir. Burada dönme esnasında türbülansın olmaması önemlidir. Çünkü dağıtıcı plakaya havanın düzgün bir şekilde girmesi gerekmektedir. İletim borusuyla gelen sıcak havanın dağıtıcı plakaya homojen bir şekilde girebilmesi için genişleyen bir kısım yapılmıştır. Bu kısım 200 mm den 500 mm ye genişlemiştir ve uzunluğu 300 mm dir.

Dağıtıcı Plaka (Distribütör)

Akışkan yatak kurutucularının belkide en önemli parçalarındandır. Dağıtıcı plakanın dizaynı için özel yöntemler vardır. Bu çalışmada iki farklı tip distribütör kullanılmıştır. Bunlardan 1 nolu distribütör 3 mm delikli ve % 70 açıklıktadır. 2 nolu distribütör ise 1.5 mm delikli ve % 80 açıklıktadır. Distribütör iletim borusuyla gövdenin bağlantı kısmına kelepçe ile bağlıdır. Kelepçe sökülüp, iletim borusu çıkarılıp distribütör değiştirildikten sonra tekrar takılabilmektedir. Distribütörde gövde çapı gibi 500 mm çapındadır.

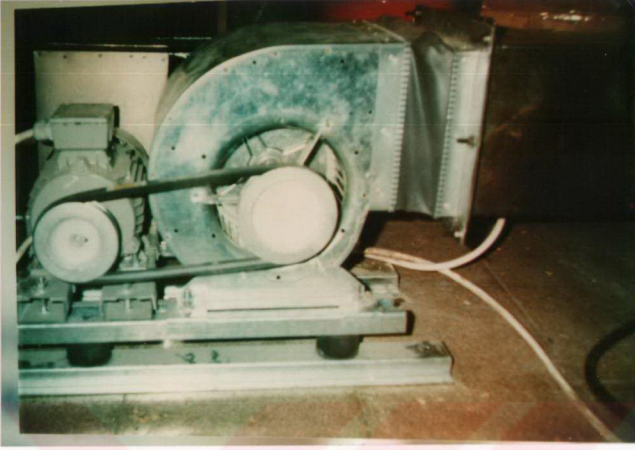
Gövde

Akışkan yatak gövdesinin uzunluğunun ne olması gerektiği bazı kriterlere bağlıdır. Öncelikle minimum akışkanlaşma hızındaki boy L_{mf} den büyük olmalıdır. Yeterli kuruma hacmini sağlamalıdır. Yatakta katı ve sıcak hava karışımından oluşan hacmi kapsmalıdır. Yoğunluğu az olan maddelerin kurutulmasında gövdenin uzun olması gerekmektedir. Ayrıca küresellikten uzak malzemeler için de gövdenin uzun olması lazımdır. Ancak ince ve uzun akışkan yataklarda kanallaşma problemleri oluşmaktadır. Bu deney setinin gövdesi 1.5 m lik 2 kısımdan oluşmaktadır. 1. kısımda kapak ve katı partikül çıkış borusu bulunmaktadır. Gövde 0.5 mm kalınlığında sacdan yapılmıştır. 2. kısım 1. kısma kelepçe ile tutturulmaktadır.

Çıkış Borusu

Çıkış borusu, giriş borusunda olduğu gibi 200 mm çapındadır ve 500 mm den 200 mm ye konik olarak daralmaktadır. Uzunluğu 300 mm dir. Çıkış borusu üzerine yerleştirilebilen termometreler ile kuru ve yaş termometre sıcaklıkları ölçülebilmektedir. Çıkış borusu ikinci gövde üzerine kelepçe ile bağlanmaktadır.

Deney setine ait fan ve dağıtıcı plaka fotoğrafları Şekil 6. 10 da verilmiştir.



Şekil 6. 10. Deney setinin fotoğrafları

- a. Radyal fan
- b. Dağıtıcı plaka

6. 3. Metod

Akışkan yatağa yüklenecek olan yongadan sabit ölçekli kap ile bir numune alınarak etüvde 100 °C de 30 dakika tutulmuştur. Bu tartı sonucu elde edilen değer yonganın kuru haldeyken kütleini vermektedir. Bu değer m_{KK} ile gösterilecektir ve 10.77 gr olarak ölçülmüştür.

Daha sonraki adımda etüvden çıkarılan numune kurutmanın yapılacağı ortama yayılarak 6 saat beklenmiş ve tartılmıştır. Bu değer yonganın ortamdan nem alarak denge nemine ulaşmış haldeki kütleini vermektedir. Bu değer 11.30 gr olarak bulundu ve m_{ort} ile gösterilecektir.

Bundan sonra kurutucuya yüklenecek olan yongaya su serpmek suretiyle nemlendirilmiştir. Nemlendirilmiş olan yonga tartılarak kurutucuya yüklenecek miktar kadar ayarlama yapılmıştır ve bu nemlendirilmiş yongadan aynı ölçekli kapla numune alınarak tartılmış ve nemlendirilmiş yonganın kütlei bulunmuştur. Bu değer ıslak yonganın kütleini göstermek üzere m_{is} olarak belirtilmiştir. m_{is} miktarı 1. deneyde 31.1 gr, 2. deneyde 31.2 gr, 3. deneyde 31.42 gr, 4. deneyde 35 gr, 5. deneyde 48.13 gr, 6. deneyde 29.69 gr, 7. deneyde 27.45 gr, 8. deneyde 30.10 gr, 9. deneyde 31.42 gr olarak ölçülmüştür.

Rejim haline getirilmiş akışkan yataklı kurutucunun kapağı açılarak nemlendirilmiş olan yonga doldurulmuştur. Kurutucuda sıcaklık ayarı, klape ayarı, distribütör tipi belirlendikten sonra fan çalıştırılmıştır. Her 30 saniyede sistem durdurulmuş ve sabit ölçekli kap ile alınan numune tartılarak kütlei kaydedilmiştir. Bu işlemin çok kısa sürede yapılmasına dikkat edilmiştir. 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, nolu deneylerde 1.5 kg, 4, 5 nolu deneylerde 3 kg lık ıslak yonga yüklemesi yapılmıştır.

Deney 1, Deney 2 ve Deney 3 de 1 nolu distribütör kullanılmıştır. Yükleme miktarı her üç deneyde de 1.5 kg nemli yonga olarak verilmiştir. Bu yonga yüklenmeden önce sabit ölçekli kap ile m_{is} miktarı ölçülmüştür. Bu değerler her üç deneyde de farklı olmakla beraber birbirine çok yakındır. Bu üç deney esnasında klape açık olarak çalıştırılmıştır.

1. Deneyde $T = 303$ K, 2. Deneyde $T = 323$ K ve 3. Deneyde de $T = 343$ K sıcaklık ayarı yapılarak m_{is} miktarının zamana göre değişimi kaydedilerek diyagram haline getirilmiş ve sıcaklığın kuruma süresine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Dördüncü deneyde yüklenen nemli yonga miktarı 3 kg, 1 nolu distribütör. Klape yarım açık olarak $T = 303$ K sıcaklık ayarında deney yapılarak $m_{is} = 35.00$ gr olarak ölçülen miktarının ve yonga özgül neminin zamana göre değişimi incelenmiştir.

Beşinci deneyde nemli yonga miktarı 3 kg, 1 nolu distribütör, $T = 303$ K sıcaklıkta çalıştırılmıştır. Beşinci deneyde nemli yonganın miktarı 3 kg olarak alınmasına rağmen nem oranı artırılmıştır. Bu yongadan sabit ölçekli kapla alınan numunenin kütlesi $m_{is} = 48.13$ gr olarak ölçülmüştür ve m_{is} miktarının ve yonga özgül neminin zamana göre değişimi belirlenmiştir.

Altıncı deney, 1. deneyle aynı şartlarda yapılmıştır. Ancak damper yarım açılarak hava miktarının etkisinin kuruma süresine etkisi araştırılmaya çalışılmıştır.

Yedinci deney 1. deneyle aynı şartlarda yapılarak yonga tipi daha küçük ve daha az nemlendirilmiş yonga kullanılarak yonga tipinin ve nem oranının etkisi araştırılmıştır.

Sekizinci deneyde birinci deneyle aynı şartlarda yapılmasına karşın yüklenen yonganın nem oranının daha az olmasının kurutma süresine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Dokuzuncu deney 1. deneyle aynı şartlarda yapılmış ancak 1 nolu distribütör sökülerek, 2 nolu distribütör takılmıştır ve bu şekilde distribütör tipinin kuruma süresine etkisi belirlenmiştir.

Yapılan deneylerin değişen parametreleri Tablo 6. 1. de verilmiştir.

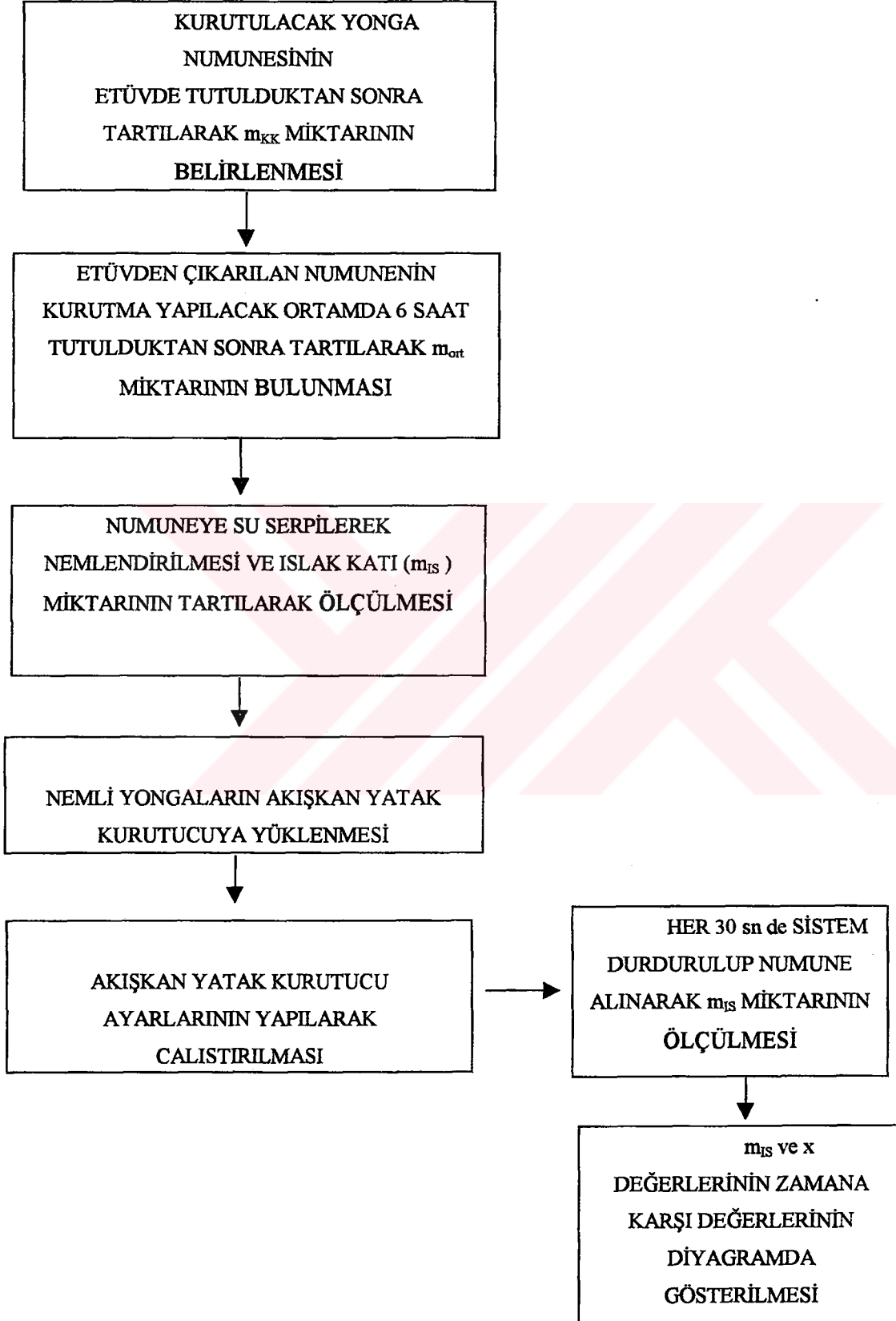
Tablo 6. 1. Deneylerde değişen parametreler

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Deney 5	Deney 6	Deney 7	Deney 8	Deney 9
Sıcaklık	303 K	323K	343 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K	303 K
Yükleme Miktarı	1.5 kg	1.5 kg	1.5 kg	3 kg	3 kg	1.5 kg	1.5 kg	1.5 kg	1.5 kg
Klape Ayarı	TAM AÇIK	TAM AÇIK	TAM AÇIK	YARIM AÇIK	TAM AÇIK	YARIM AÇIK	TAM AÇIK	TAM AÇIK	TAM AÇIK
Islak Yonga Kütlesi	31.1 gr	31.2 gr	31.42 gr	35 gr	48.13 gr	29.69 gr	27.45 gr	30.10 gr	31.42 gr
Distribütör tipi	1 NOLU DİST.	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	1 NOLU DİST	2 NOLU DİST
Yonga tipi	KALIN	KALIN	KALIN	KALIN	KALIN	KALIN	İNCE	KALIN	KALIN

Yapılan bu deneysel çalışmanın akış şeması aşağıda verilmiştir.

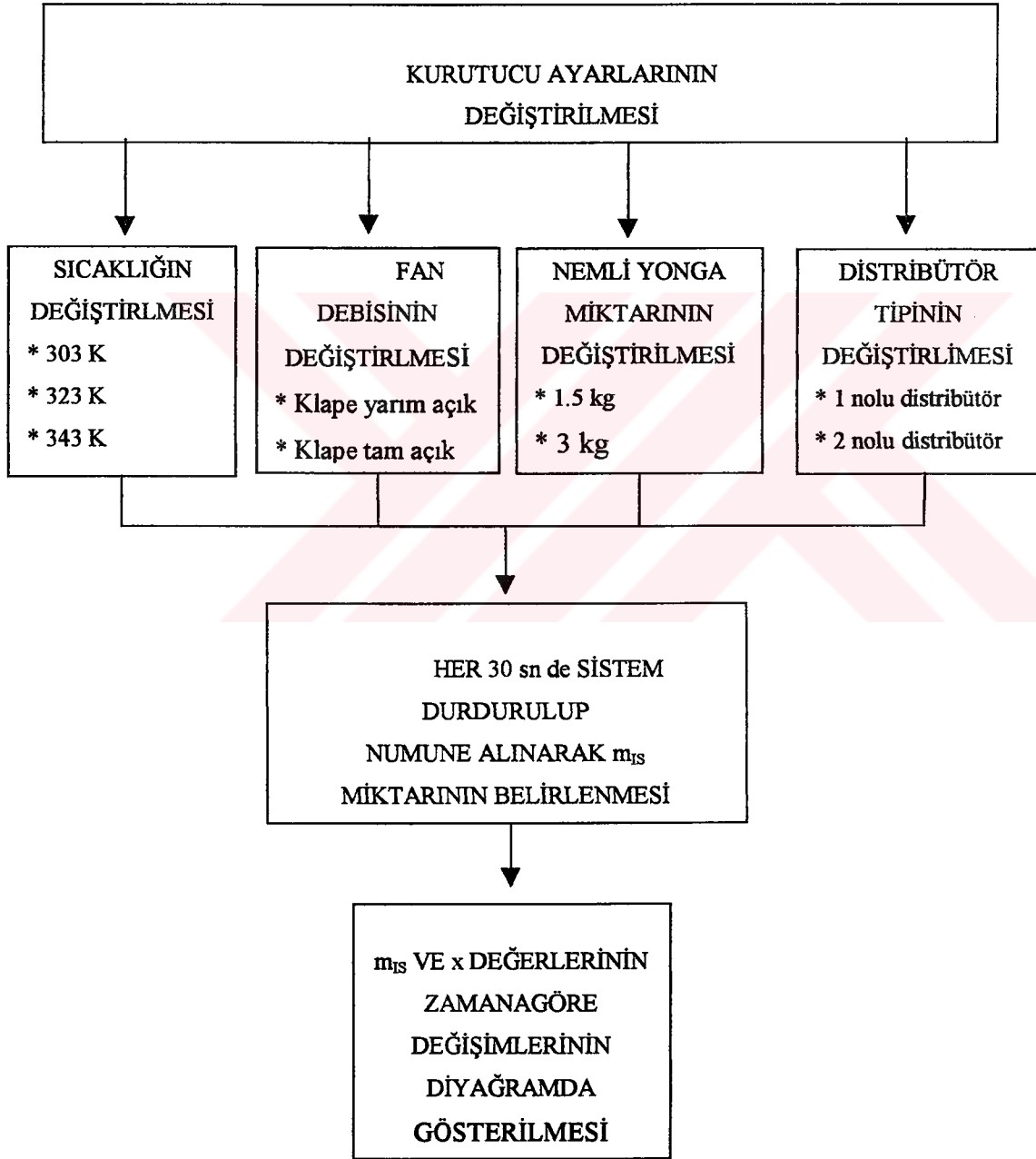


6. 4. Akışkan Yatak Kurutucu Deneyi Akış Şeması



Kurutucu ayarı dört safhadan oluşmaktadır. Bunlar sıcaklığın, fan debisinin, nemli yonga miktarının ve distribütör tipinin değiştirilmesidir. Bu parametrelerin değiştirilmesi suretiyle dokuz farklı deney yapılarak bunların etkileri görülmeye çalışılmıştır. Aşağıda kurutucu ayarlarının akış şeması görülmektedir.

6. 5. Akışkan Yatak Kurutucu Ayarlarının Değiştirilmesi Akış Şeması



6. 6. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyler sırasında zamana göre, ıslak yonga numunesinin kütlesinin (m_{IS}) değişimi ölçüldükten sonra ıslak yonganın içindeki suyun kütlesi hesaplandı. Bunun için ıslak yonganın kütlesinden, kuru yonga kütlesi çıkarıldı. Böylece ıslak yonganın içindeki su miktarı bulundu ($m_{SU} = m_{IS} - m_{KK}$).

Daha sonra yonganın kuru bazda özgül nemini bulabilmek için ıslak yonga içindeki suyun kütlesi (m_{SU}), kuru yonga kütlesine ($m_{KK} = 10.77 \text{ gr}$) oranlandı ve yonganın özgül nemi $x \text{ kg H}_2\text{O/kg}_{\text{kuru yonga}}$ olarak bulundu. Bulunan bu değer zamana karşıt olarak Excel 7.0 bilgisayar programında çizildi.

Islak yonganın denge neminden fazla olan nemini yani serbest nemini (x_s) bulabilmek için öncelikle denge nemi (x_d) bulundu. Denge nemi kurutulacak ortamda 6 saat tutulan yonganın ölçülen kütlesi olan $m_{ot} = 11.30 \text{ gr}$ değerinden kuru yonga kütlesinin $m_{KK} = 10.77 \text{ gr}$ değeri çıkartılıp, bu değere oranlanması suretiyle elde edildi.

$x_d = \frac{m_{ot} - m_{KK}}{m_{KK}}$ [24]. Buna göre $x_d = 0.0492 \text{ kg H}_2\text{O/kg}_{\text{kuru yonga}}$ olarak belirlendi. Serbest nem ise yonga özgül neminden, denge neminin çıkarılmasıyla bulundu ($x_s = x - x_d$). Bulunan bu değerler zamana karşıt olarak deney sonuçları tablolarına aktarıldı.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde önemli bir kriter olan kurutma hızı ($\dot{m}$), birim zamanda buharlaştırılabilen su miktarını ifade etmektedir. Kurutma hızı kurutulacak maddenin birim yüzeyinden veya kurutma cihazının birim kesitinden birim zamanda buharlaştırılabilen su miktarı olarak da ifade edilebilir. Deneysel çalışmada kurutma hızı kurutma prosesi başladıktan sonra ıslak yonga kütlesinin ilk değerine göre olan farkı, zamana oranlanarak bulundu. Bunun için $\dot{m} = \frac{(m_{IS})_{t+\Delta t} - (m_{IS})_t}{\Delta t}$ formülü kullanıldı [24].

Bu çalışmada kurutma hızı 30 saniye aralıklarla değişen m_{IS} değerleri arasındaki farkın 30 saniyenin eşdeğeri saate oranlanması neticesinde elde edildi. Kurutma hızının yükselen, sabit ve azalan periyotları vardır. Ancak deneyde yonga numunesinin kütlesinin çok hassas ölçülememesinden dolayı bu periyotlar belirgin değildir. Kurutma hızının değişimi bulunan kurutma hız değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edildi.

Neticede yapılan dokuz adet deneyin ölçülen ve hesaplanan değerleri tablolar halinde verildi ve deney sonuçları ($t - m_{is}$) ve ($t - x$) diyagramlarında gösterildi.

Tablo 6. 2. Deney 1 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t Zaman (s)	m_{is} Islak yonga kütle (gr)	m_{su} Yonga bünyesindeki su kütle (gr)	x Yonga özgül nemi ($\text{kgH}_2\text{O}/$ $\text{kg}_{\text{kuru yonga}}$)	x_s Yonga serbest nemi ($\text{kgH}_2\text{O}/$ $\text{kg}_{\text{kuru yonga}}$)	$\dot{m}$ Kurutma hızı (gr/h)
0	31.1	20.33	1.8876	1.8384	-
30	30.95	20.18	1.8737	1.8245	18
60	28.89	18.12	1.6824	1.6332	247.29
90	27.65	16.88	1.5673	1.5181	148.85
120	28.62	17.85	1.6573	1.6081	-
150	29.00	18.23	1.6926	1.6434	-
180	26.20	15.43	1.4326	1.3834	336.13
210	24.50	13.73	1.2748	1.2256	204.08
240	25.20	14.43	1.3398	1.2906	-
270	22.45	11.68	1.0844	1.0352	330.13
300	20.17	9.4	0.8727	0.8235	273.70
330	18.05	7.28	0.6759	0.6267	254.5
360	15.42	4.65	0.4317	0.3825	315.72
390	16.17	5.4	0.5013	0.4521	-
420	13.01	2.24	0.2079	0.1587	379.35
450	11.41	0.64	0.0594	0.0102	192
480	11.45	0.68	0.0631	0.0139	-

Tablo 6. 3. Deney 2 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	31.2	20.43	1.8969	1.8477	-
30	31.00	20.23	1.8783	1.8291	24
60	31.17	20.4	1.8941	1.8449	-
90	29.13	18.4	1.7084	1.6592	244.89
120	27.42	16.65	1.5459	1.4967	205.28
150	28.15	17.38	1.6137	1.5645	-
180	26.65	15.88	1.4744	1.4252	180.07
210	23.10	12.33	1.1448	1.0956	426.17
240	25.40	14.63	1.3584	1.6092	-
270	17.35	6.58	0.6109	0.5617	966.38
300	14.42	3.65	0.3389	0.2897	351.74
330	13.20	2.43	0.2256	0.1764	146.45
360	11.48	0.71	0.0659	0.0167	206.48
390	11.45	0.68	0.0631	0.0139	3.6
420	12.01	1.24	0.1151	0.0659	-
450	11.46	0.69	0.0640	0.0148	66

Tablo 6. 4. Deney 3 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	31.42	20.65	1.9173	1.8681	-
30	31.22	20.45	1.8987	1.8495	24
60	27.10	16.33	1.5162	1.467	494.59
90	28.40	17.63	1.6369	1.5877	-
120	24.40	13.63	1.2655	1.2163	480.13
150	21.80	11.03	1.0241	0.9749	312.12
180	23.40	12.63	1.1727	1.1235	-
210	17.15	6.38	0.5923	0.5431	750.30
240	14.10	3.33	0.3091	0.2599	366.19
270	11.42	0.65	0.0603	0.0111	321.73
300	12.17	1.4	0.1299	0.0807	-
330	11.60	0.83	0.0770	0.0278	68.9
360	11.50	0.73	0.0677	0.0185	12.03

Tablo 6. 5. Deney 4 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	35	24.23	2.2497	2.2005	-
30	33.73	22.96	2.1318	2.0826	152.46
60	32.91	22.14	2.0557	2.0065	98.43
90	29.39	18.62	1.7288	1.6796	422.56
120	35.59	24.82	2.3045	2.2553	-
150	29.35	18.58	1.7251	1.6759	749.09
180	28.59	17.82	1.6545	1.6053	91.23
210	30.26	19.49	1.8096	1.7604	-
240	28.69	17.92	1.6638	1.6146	188.47
270	31	20.23	1.8783	1.8291	-
300	28.17	17.4	1.6155	1.5663	339.73
330	26.1	15.33	1.4233	1.3741	248.49
360	28.21	17.44	1.6193	1.5701	-
390	28.79	18.02	1.6731	1.6239	-
420	24.35	13.58	1.2609	1.2117	533.01
450	26.34	15.57	1.4456	1.3964	-
480	25.41	14.64	1.3593	1.3101	111.64
510	24.03	13.26	1.2311	1.1819	165.66
540	26.54	15.77	1.4642	1.415	-
570	25.74	14.97	1.3899	1.3407	96.03
600	23.69	12.92	1.1996	1.1504	246.09
630	22.61	11.84	1.0993	1.0501	129.65
660	21.39	10.62	0.9860	0.9368	146.45
690	22.71	11.94	1.1086	1.0594	-
720	22.60	11.83	1.0984	1.0492	13.20
750	25.47	14.7	1.3649	1.3157	-
780	20.92	10.15	0.9424	0.8932	546.21
810	21.50	10.73	0.9962	0.947	-
840	15.29	4.52	0.4196	0.3704	745.49
870	18.27	7.5	0.6963	0.6471	-
900	20.39	9.62	0.8932	0.844	-
930	18.14	7.37	0.6843	0.6351	270.10
960	18.09	7.32	0.6796	0.6304	6
990	17.35	6.58	0.6109	0.5617	88.8

Tablo 6. 6. Deney 5 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	48.13	37.36	3.4688	3.4196	-
30	40.54	29.77	2.7641	2.7149	911.16
60	48.12	37.35	3.4679	3.4187	-
90	39.52	28.75	2.6694	2.6202	1032.41
120	41.23	30.46	2.8282	2.779	-
150	40.60	29.83	2.7697	2.7205	75.63
180	37.51	26.74	2.4828	2.4336	370.94
210	31.54	20.77	1.9285	1.8793	695.07
240	40.41	29.64	2.752	2.7028	-
270	39.03	28.26	2.6239	2.5747	165.66
300	35.82	25.05	2.3259	2.2767	385.35
330	35.76	24.99	2.3203	2.2711	7.20
360	32.56	21.79	2.0232	1.974	384.15
390	33.87	23.1	2.1448	2.0956	-
420	31.55	20.78	1.9285	1.8793	278.51
450	33.5	22.73	2.1104	2.0612	-
480	32.6	21.83	2.0269	1.9777	108.04
510	26.88	16.11	1.4958	1.4466	686.67
540	29.67	18.9	1.7548	1.7056	-
570	29.52	18.75	1.7409	1.6917	18.00
600	30.11	19.34	1.7957	1.7465	-
630	24.93	14.16	1.3147	1.2655	621.84
660	28.2	17.43	1.6183	1.5691	-
690	27.44	16.67	1.5478	1.4986	91.23
720	22.94	12.17	1.1299	1.0807	540.21
750	25.18	14.41	1.3379	1.2887	-
780	24.15	13.38	1.2423	1.1931	123.64
810	23.14	12.37	2.1485	2.0993	121.24

Tablo 6. 7. Deney 6 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{js}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	29.69	18.92	1.7567	1.7075	-
30	26.26	15.49	1.4382	1.389	411.76
60	23.56	12.79	1.1875	1.1383	324.12
90	25.46	14.69	1.3639	1.3147	-
120	22.01	11.24	1.0436	0.9944	414.16
150	21.96	11.19	1.0389	0.9897	6.00
180	21.47	10.7	0.9935	0.9443	58.82
210	20.89	10.12	0.9396	0.8904	69.62
240	19.36	8.59	0.7975	0.7483	183.67
270	17.26	6.49	0.6025	0.5533	252.10
300	19.45	8.68	0.8059	0.7567	-
330	17.59	6.82	0.6332	0.584	223.28
360	16.73	5.96	0.5533	0.5041	103.24
390	16.77	6	0.5571	0.5079	-
420	14.54	3.77	0.35	0.3008	267.70
450	14.53	3.76	0.3491	0.2999	1.20
480	15.00	4.23	0.3927	0.3435	-
510	13.62	2.85	0.2646	0.2154	165.66
540	11.80	1.03	0.0956	0.0464	218.48
570	11.30	0.53	0.0492	0	60.02

Tablo 6. 8. Deney 7 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

t	m _{js}	m _{su}	x	x _s	ṁ
0	27.45	16.68	1.5487	1.4995	-
30	27.30	16.53	1.5348	1.4856	18
60	24.25	14.47	1.3435	1.2943	366.14
90	22.35	11.58	1.0752	1.026	228.09
120	22.01	11.24	1.0436	0.9944	40.81
150	19.05	8.28	0.7688	0.7196	355.34
180	18.7	7.93	0.7363	0.6871	42.01
210	22.17	11.4	1.0584	1.0092	-
240	16.31	5.54	0.5143	0.4651	703.48
270	13.78	3.01	0.2794	0.2302	303.72
300	14.43	3.66	0.3398	0.2906	-
330	13.84	3.07	0.285	0.2358	70.82
360	11.44	0.67	0.0622	0.013	288.11
390	12.02	1.25	0.1160	0.0668	-
420	11.57	0.8	0.0742	0.25	54.02
450	11.41	0.64	0.05940	0.0102	19.2

Tablo 6. 9. Deney 8 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

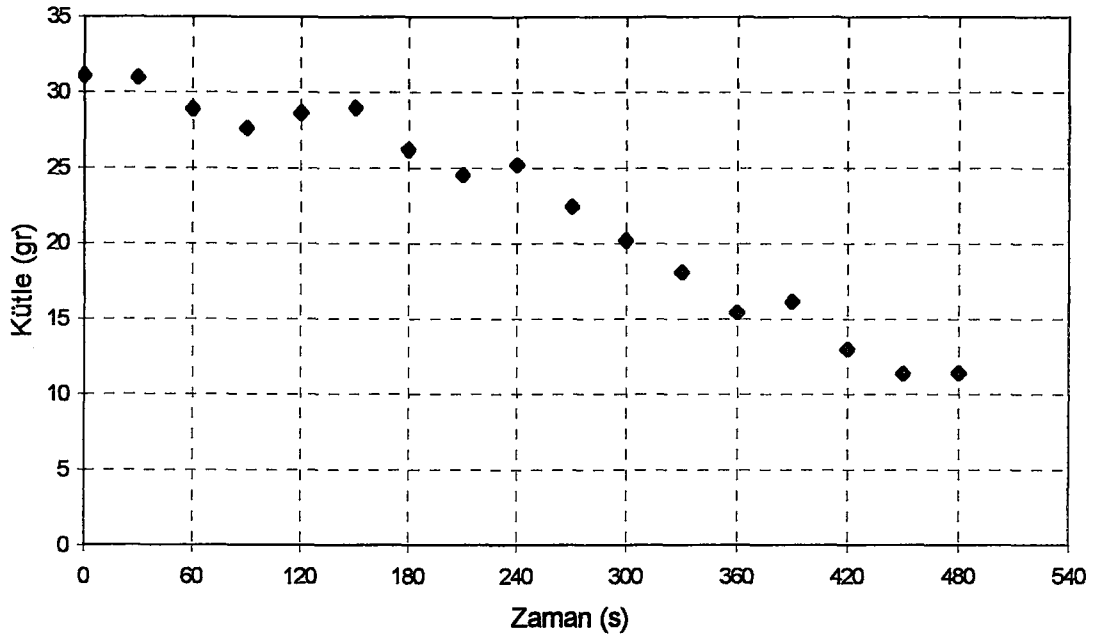
t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	m
0	30.1	19.33	1.7948	1.7456	-
30	30.05	19.28	1.7901	1.7409	6.00
60	28.87	18.1	1.6805	1.6313	141.65
90	27.6	16.83	1.5626	1.5134	152.46
120	28.52	17.75	1.648	1.5988	-
150	28.3	17.53	1.6276	1.5784	26.41
180	26.15	15.38	1.428	1.3788	258.10
210	24.4	13.63	1.2655	1.2163	210.08
240	25.15	14.38	1.3351	1.2859	-
270	24.4	13.63	1.2655	1.2163	90.03
300	20.14	9.37	0.87	0.8208	511.40
330	18.02	7.25	0.6731	0.6239	254.5
360	15.4	4.63	0.4298	0.3806	314.52
390	16.1	5.33	0.4948	0.4456	-
420	13.02	2.25	0.2089	0.1597	369.74
450	11.4	0.63	0.0584	0.0092	194.47
480	11.43	0.66	0.06128	0.012	-
510	11.41	0.64	0.0594	0.0102	1.2

Tablo 6. 10. Deney 9 şartlarında ölçülen ve hesaplanan deney verileri

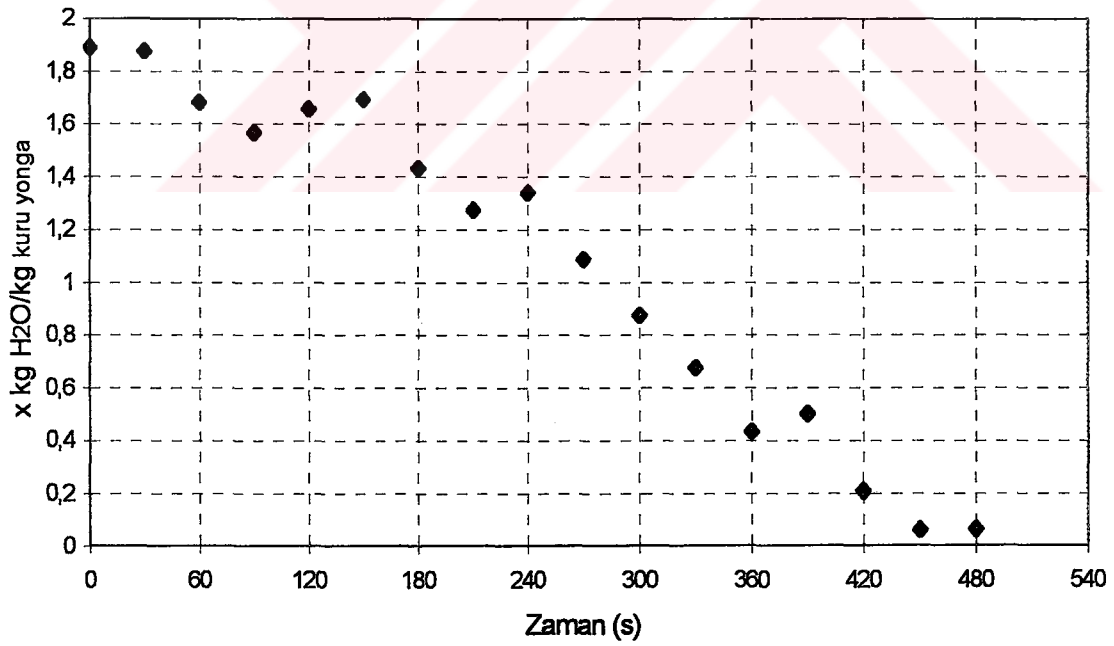
t	m _{is}	m _{su}	x	x _s	m
0	31.42	20.65	1.9173	1.8681	-
30	31.35	20.58	1.9108	1.8616	8.4
60	31.45	20.68	1.9201	1.8709	-
90	28.60	17.83	1.6555	1.6063	342.13
120	25.45	14.68	1.363	1.3138	378.15
150	27.10	16.33	1.5162	1.467	-
180	24.10	13.33	2376	1.1884	360.14
210	21.70	10.93	1.0148	0.9656	288.11
240	17.60	6.83	0.6341	0.5849	492.19
270	18.80	8.03	0.7455	0.6963	-
300	19.10	8.33	0.7734	0.7242	-
330	17.35	6.58	0.6109	0.5617	210.08
360	15.42	4.65	0.4308	0.3817	231.69
390	11.48	0.71	0.0659	0.0167	472.98
420	11.45	0.68	0.0631	0.0139	3.6
450	11.49	0.72	0.0668	0.0176	-

Tablo 6. 11 Kabin kurutucu deney sonuçları

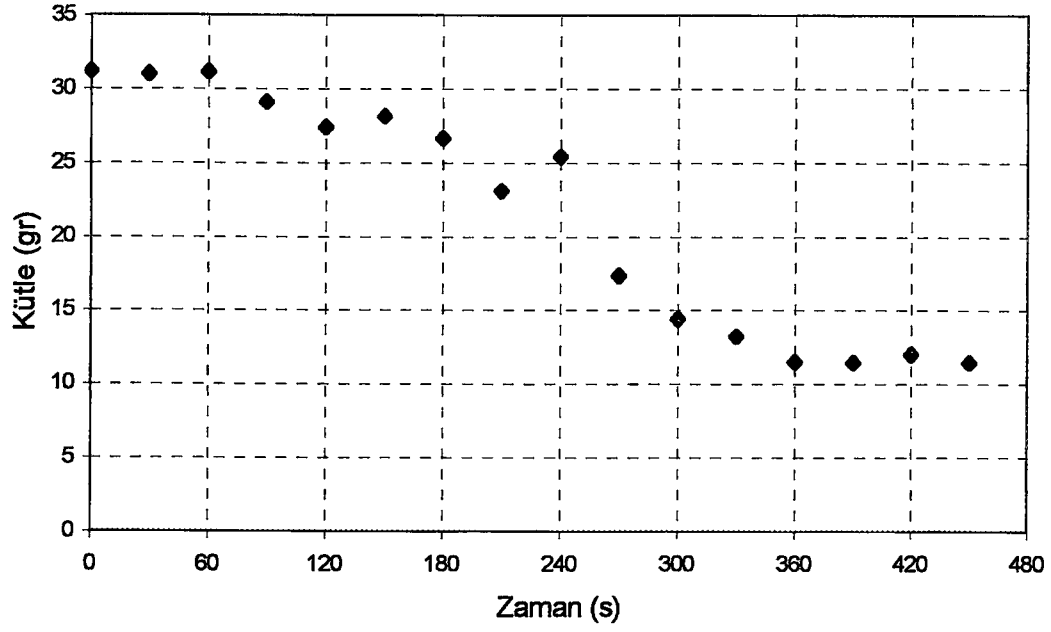
t (dak.)	M _{is}	x	t (dak.)	m _{is}	x	t (dak.)	m _{is}	x
0	30.9	1.8690	40	24.7	1.2934	80	18.5	0.7177
1	30.67	1.8477	41	24.6	1.2841	81	19.12	0.7753
2	30.46	1.8282	42	25.22	1.3416	82	18.63	0.7298
3	29.4	1.7298	43	24.5	1.2748	83	17.01	0.5793
4	29.1	1.7019	44	24.31	1.2571	84	17.1	0.5877
5	28.94	1.6870	45	24.16	1.2432	85	16.77	0.5571
6	30.7	1.8505	46	23.82	1.2116	86	16.42	0.5246
7	29.06	1.6982	47	25.15	1.3351	87	15.07	0.3992
8	29.5	1.7390	48	25.05	1.3259	88	15.23	0.4141
9	29.49	1.7381	49	23.85	1.2144	89	14.45	0.3416
10	28.84	1.6778	50	24.98	1.3194	90	13.6	0.2627
11	28.26	1.6239	51	23.73	1.2033	91	13.65	0.2674
12	28.48	1.6443	52	23.38	1.1708	92	12.4	0.1513
13	27.21	1.5264	53	23.95	1.2237	93	12.44	0.1550
14	28.52	1.6480	54	22.93	1.1290	94	11.65	0.0817
15	27.6	1.5626	55	22.01	1.0436	95	11.6	0.0770
16	27.47	1.5506	56	22.37	1.0770	96	11.42	0.0603
17	27.34	1.5385	57	23.32	1.1652	97	11.5	0.0677
18	27.76	1.5775	58	22.74	1.1114	98	11.43	0.0612
19	26.3	1.4441	59	23.41	1.1736	99	11.4	0.0584
20	27.84	1.5849	60	22.33	1.0733	100	11.41	0.0594
21	27.83	1.5840	61	22.2	1.0612			
22	27.96	1.5961	62	21.92	1.0352			
23	27.43	1.5468	63	23.07	1.1420			
24	27.57	1.5598	64	22.11	1.0529			
25	25.8	1.3955	65	21.69	1.0139			
26	26.87	1.4951	66	21.5	0.9962			
27	25.16	1.3361	67	22.1	1.0519			
28	27.03	1.5097	68	21.4	0.9870			
29	26.71	1.4800	69	20.7	0.9220			
30	25.86	1.4011	70	21.2	0.9684			
31	25.81	1.3964	71	21.43	0.9897			
32	26.02	1.4159	72	20.7	0.9220			
33	26.32	1.4438	73	20.64	0.9164			
34	25.8	1.3955	74	20.81	0.9322			
35	24.65	1.2887	75	19.93	0.8505			
36	25.85	1.400	76	19.8	0.8384			
37	25.88	1.4029	77	19.62	0.8217			
38	25.51	1.3686	78	19.2	0.7827			
39	25.91	1.4057	79	18.7	0.7363			



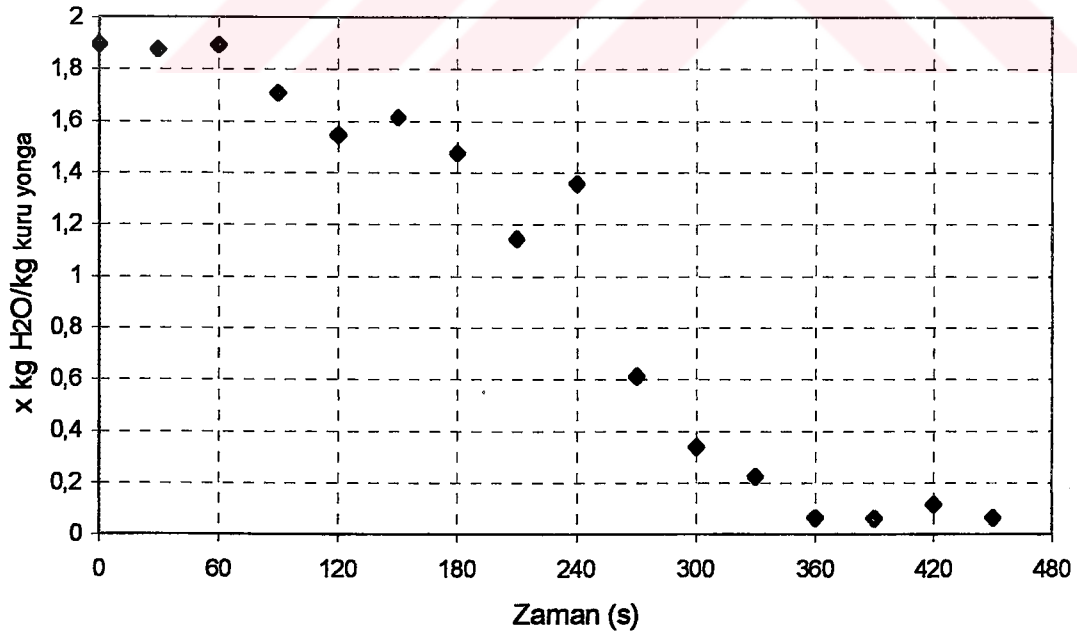
Şekil 6. 11. Deney 1 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



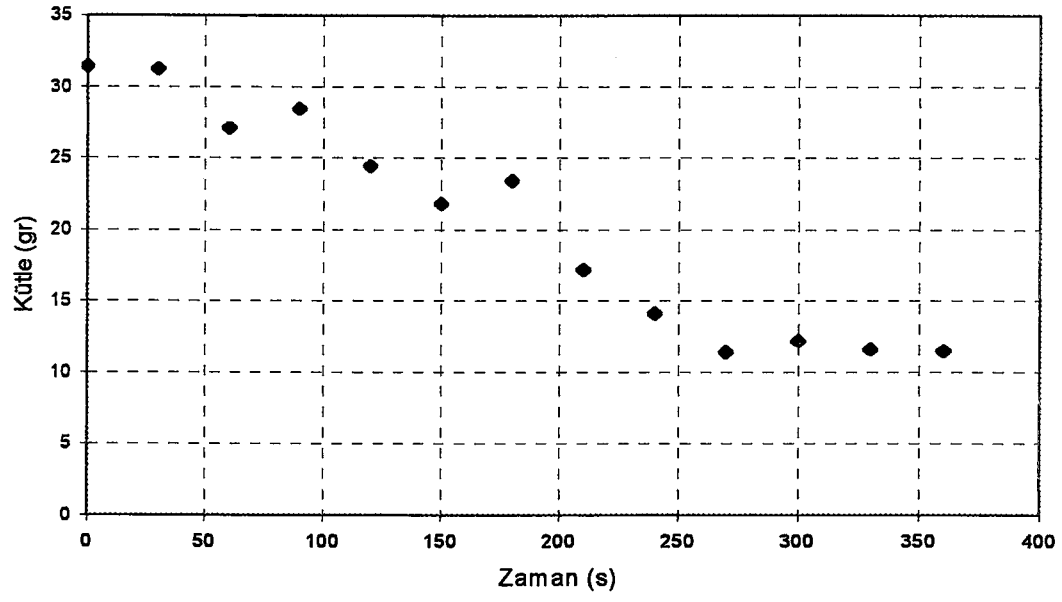
Şekil 6. 12 Deney 1 şartlarında yonga özgül neminin değişimi



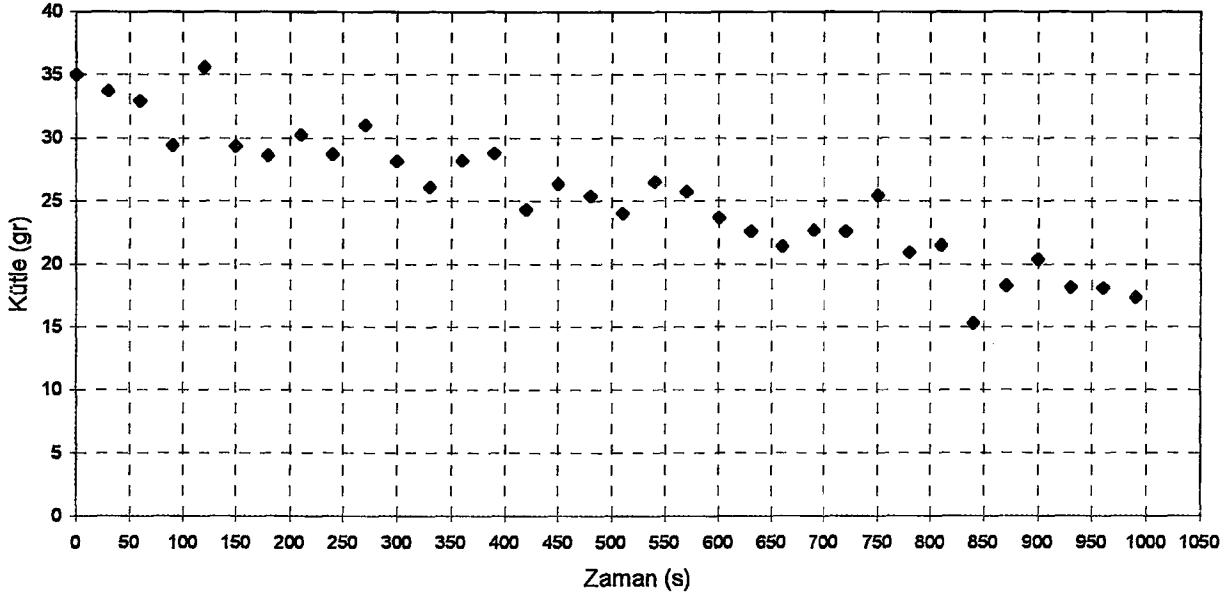
Şekil 6. 13 Deney 2 şartlarında ıslak katı kütesinin değişimi



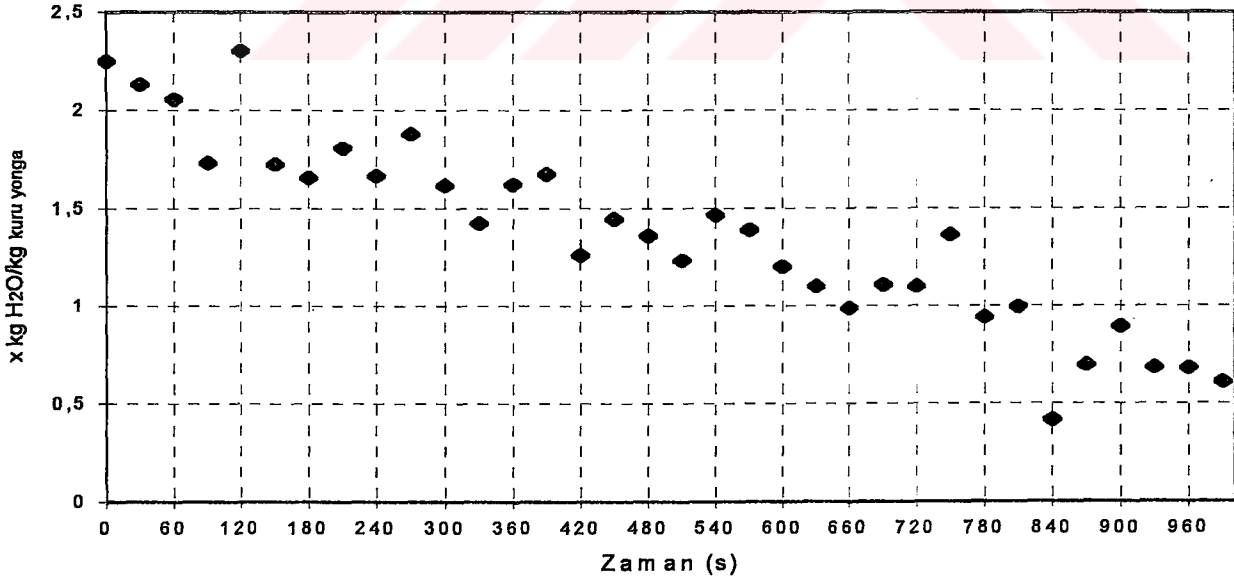
Şekil 6. 14 Deney 2 şartlarında yonga özgül neminin değişimi



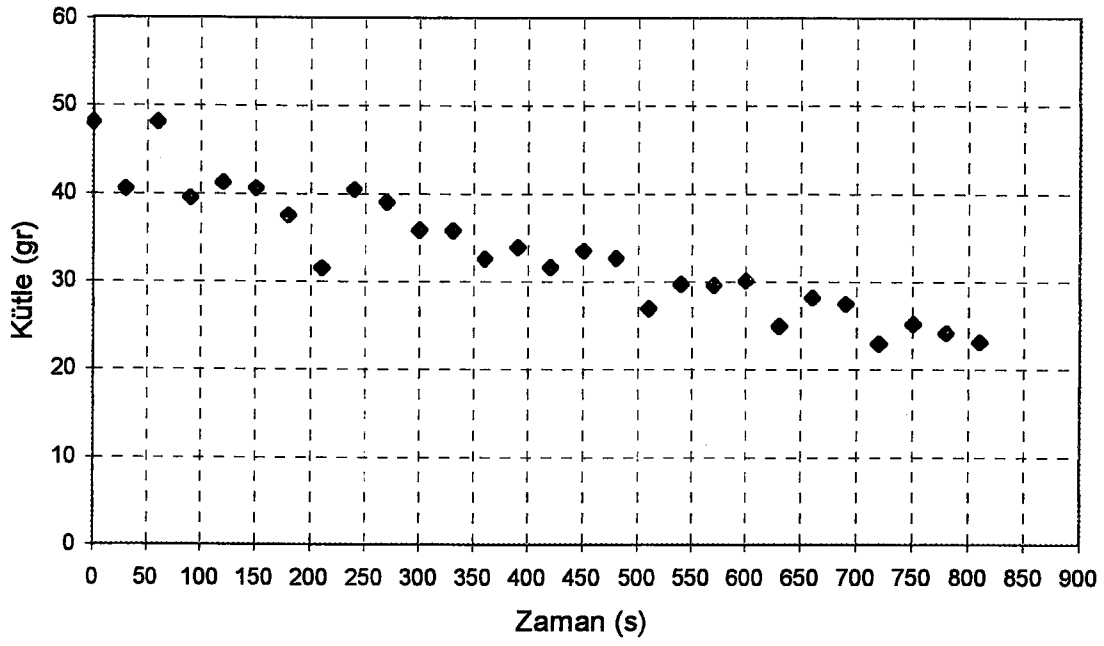
Şekil 6. 15 Deney 3 şartlarında ıslak katı kütlesinin değişimi



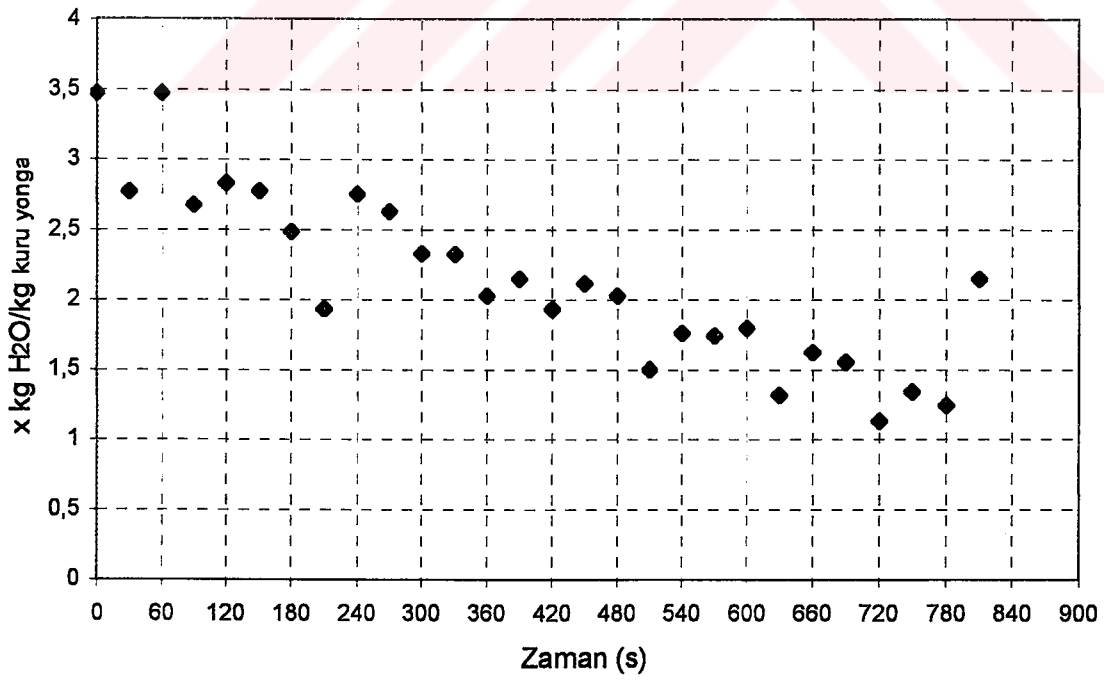
Şekil 6. 17 Deney 4 şartlarında ıslak katı kütesinin değişimi



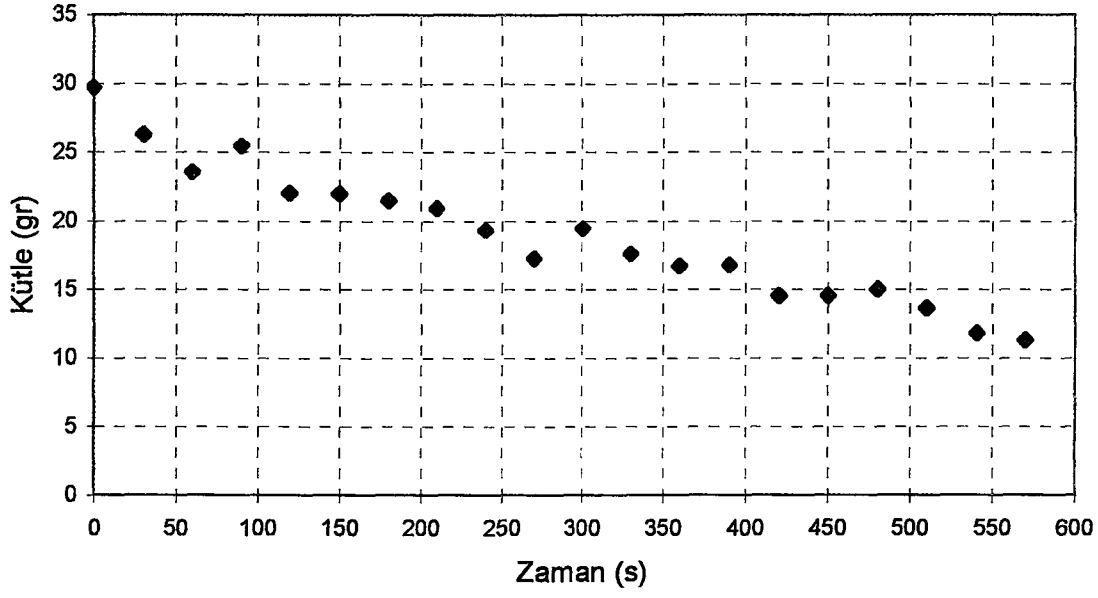
Şekil 6. 18 Deney 4 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



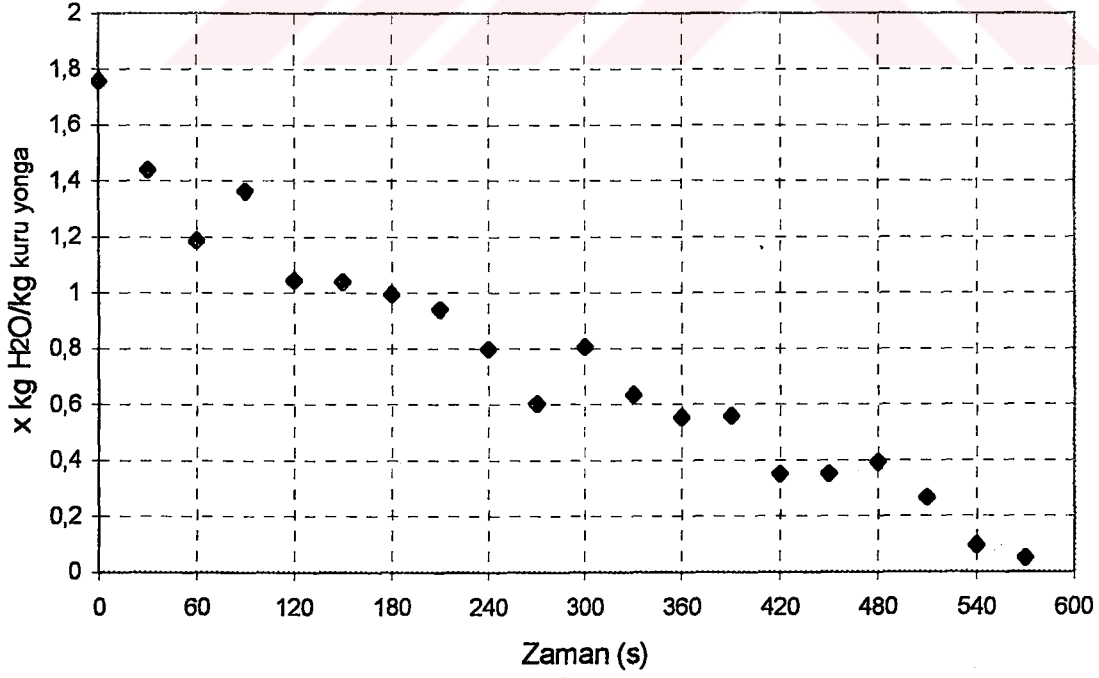
Şekil 6.19 Deney 5 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



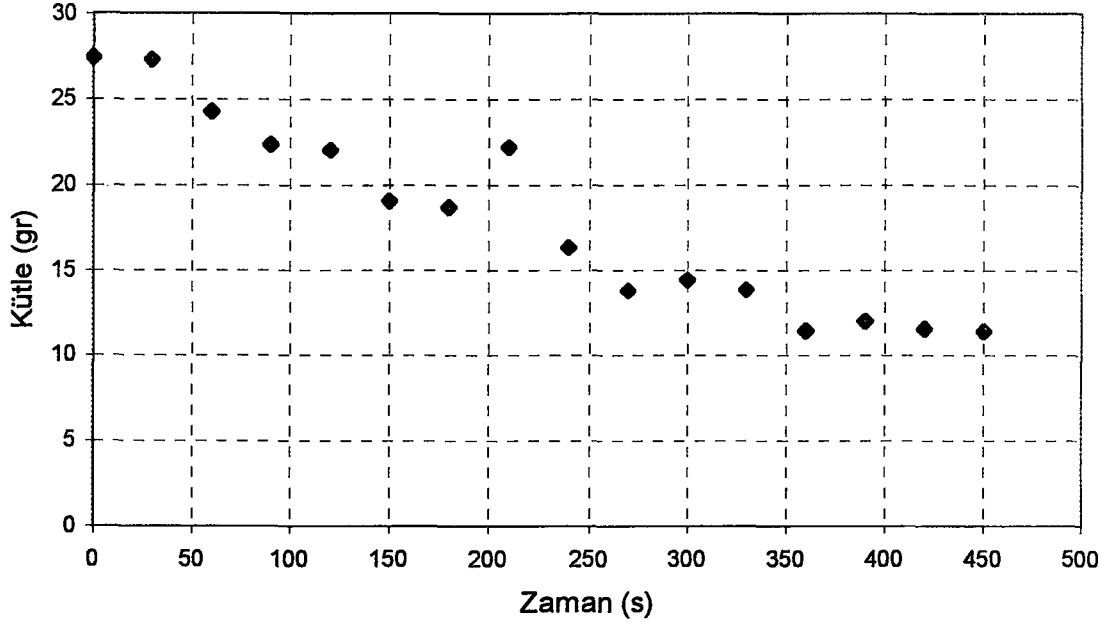
Şekil 6.20 Deney 5 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



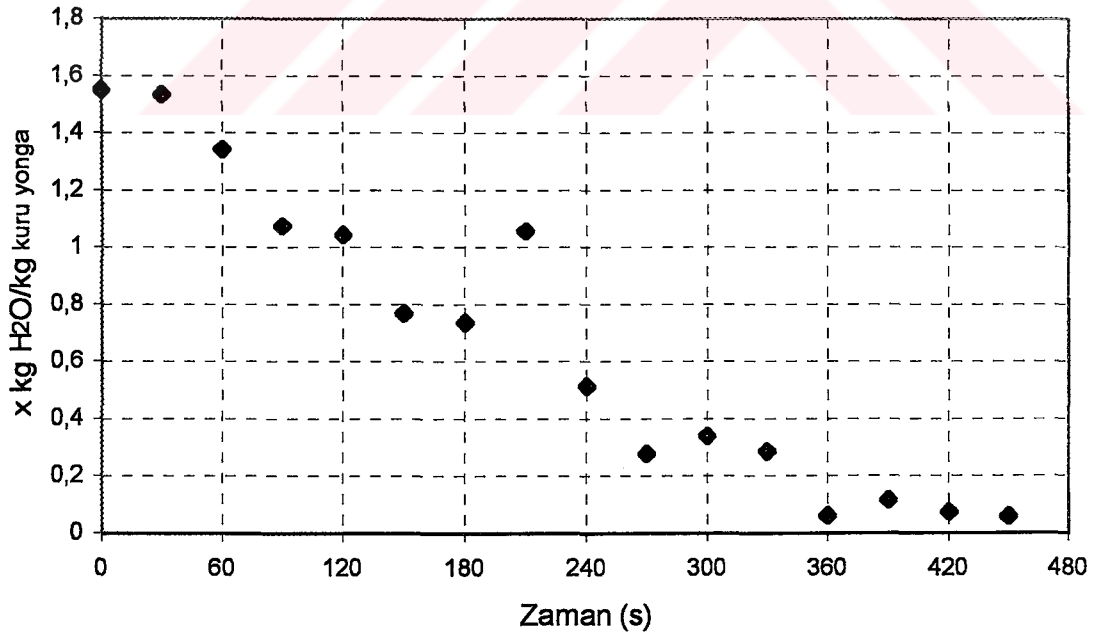
Şekil 6.21 Deney 6 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



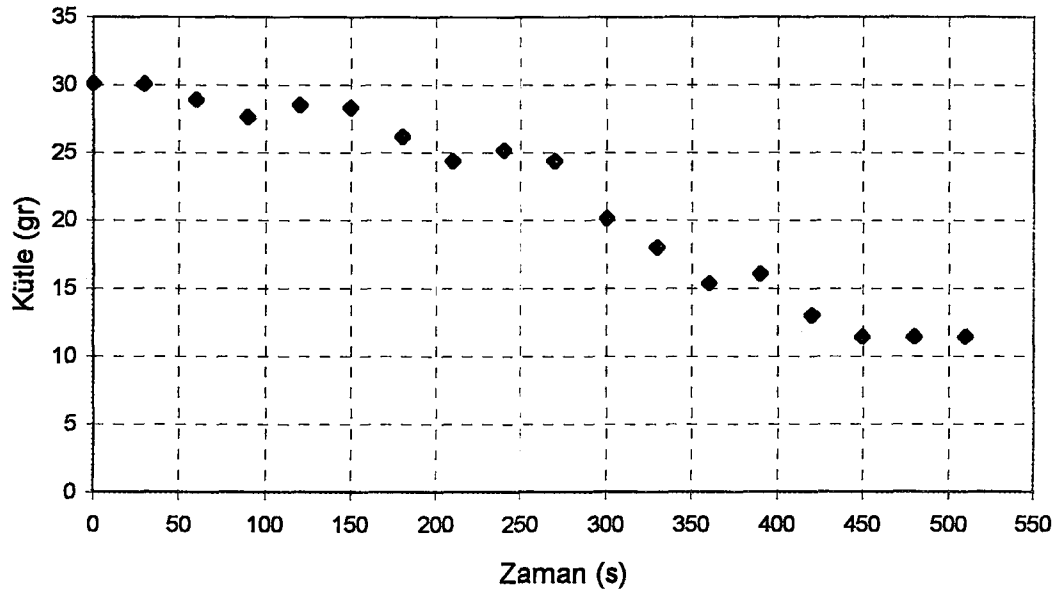
Şekil 6. 22 Deney 6 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



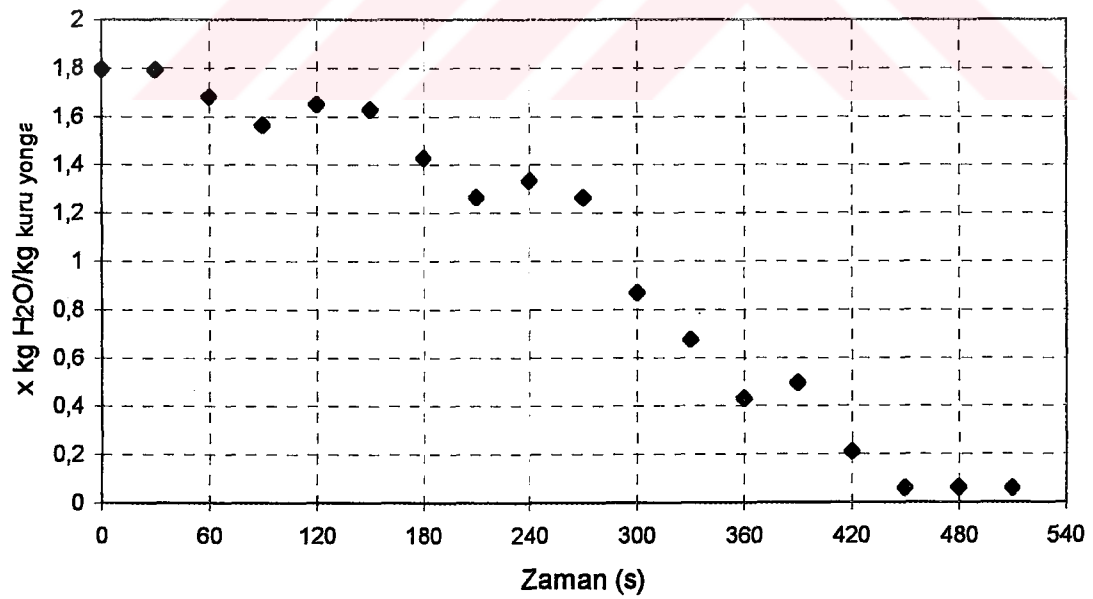
Şekil 6. 23 Deney 7 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



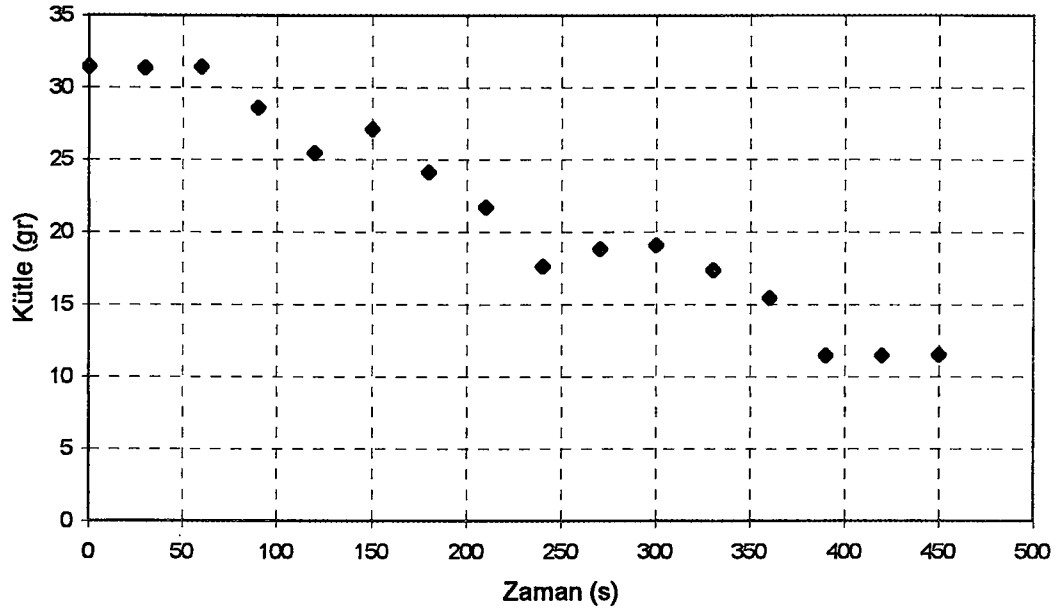
Şekil 6. 24. Deney 7 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



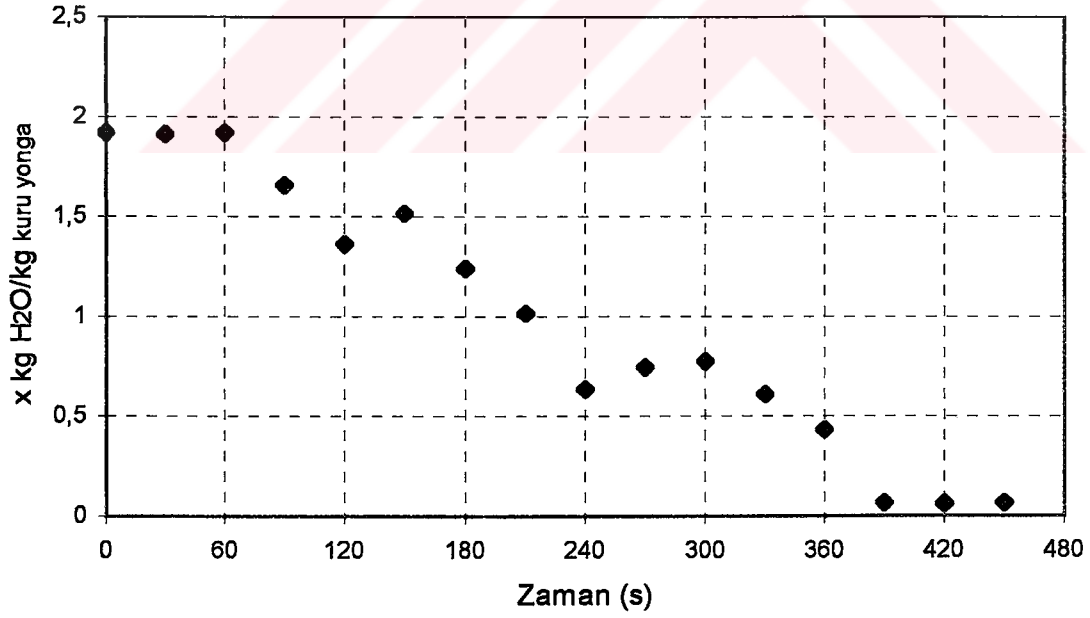
Şekil 6.25 Deney 8 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



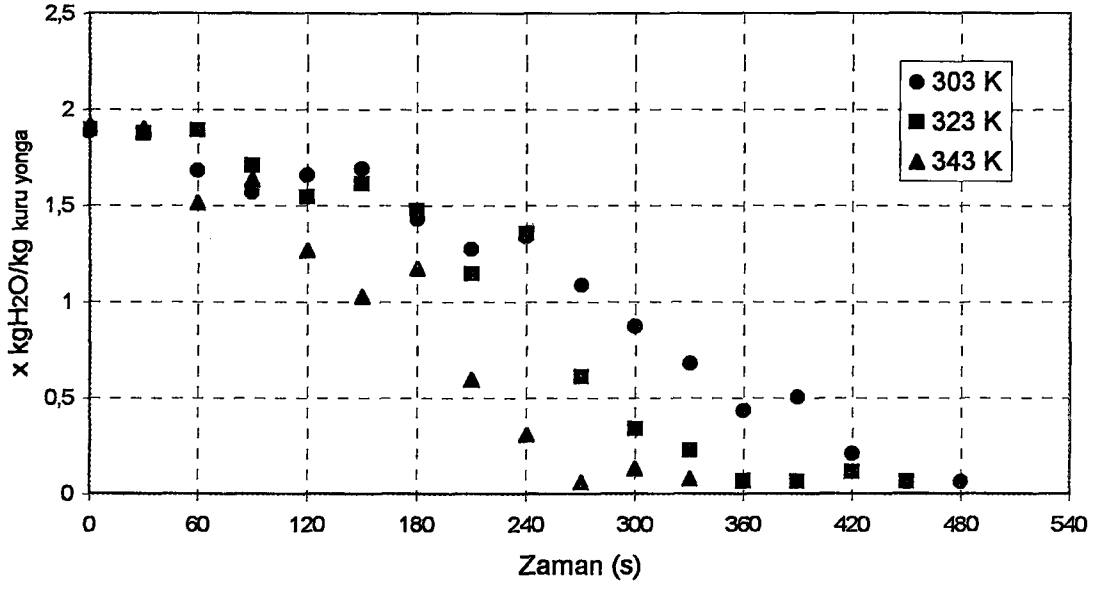
Şekil 6.26 Deney 8 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



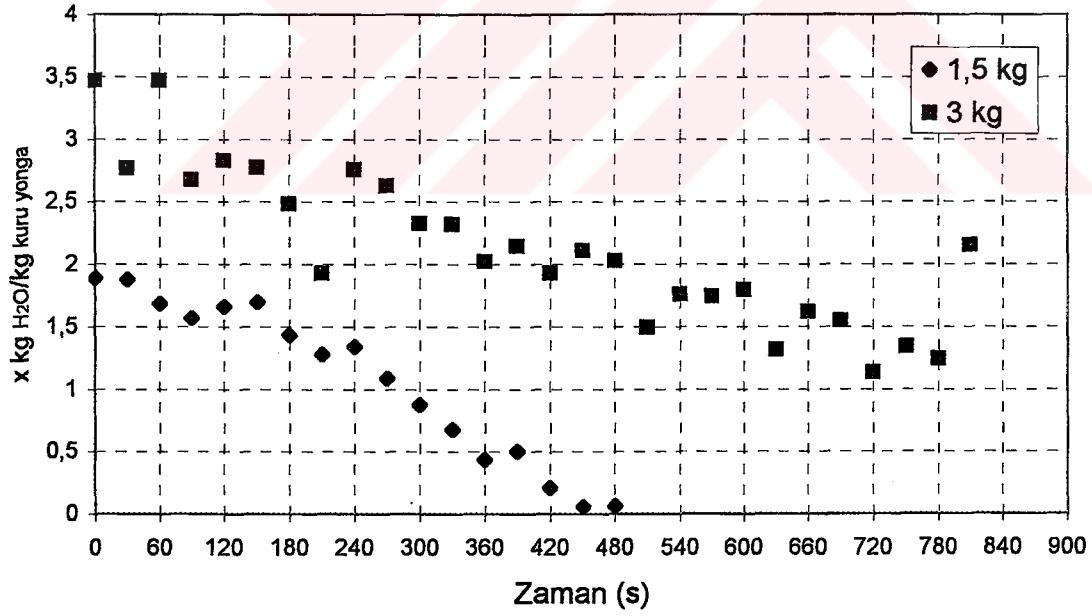
Şekil 6.27 Deney 9 şartlarında ıslak katı kütesinin zamana göre değişimi



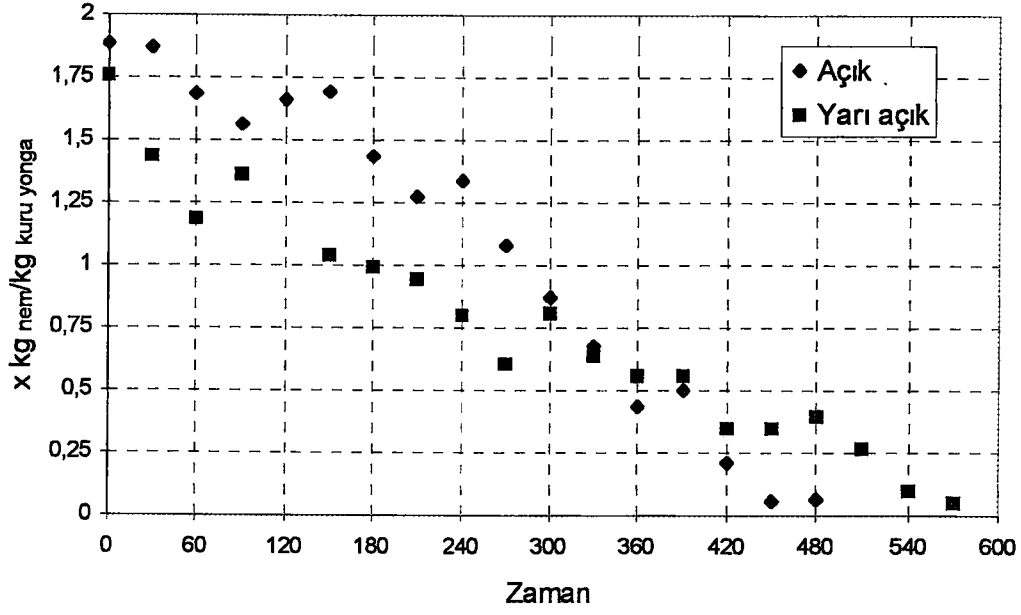
Şekil 6.28 Deney 9 şartlarında yonga özgül neminin zamana göre değişimi



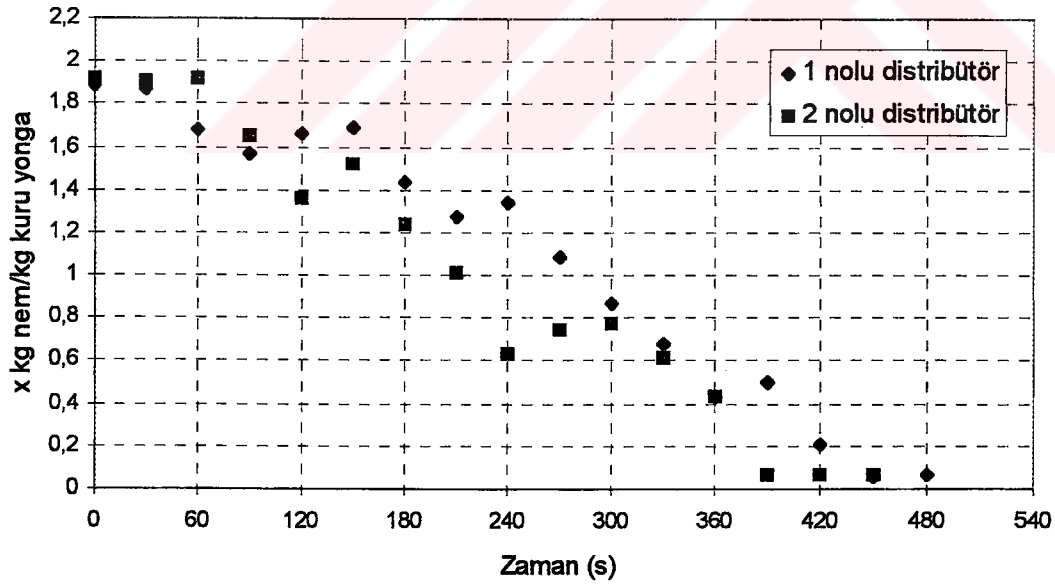
Şekil 6. 29. Sıcaklığın etkisi ile nem oranının zamana göre değişiminin Deney 1, 2 ve 3 için karşılaştırılması



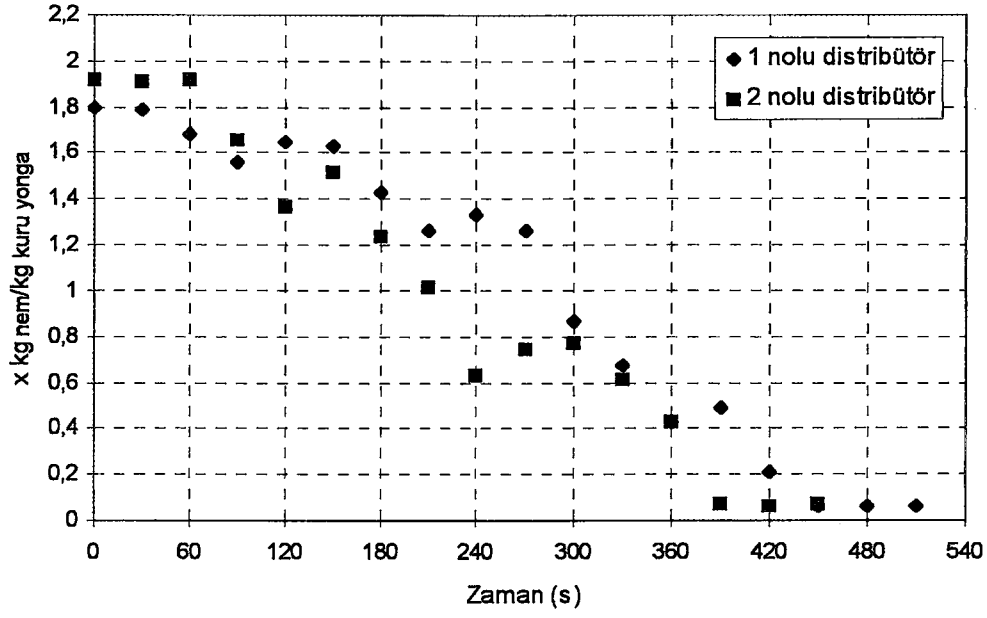
Şekil 6. 30. Yükleme miktarı ve nem oranının değişiminin etkisinin Deney 1 ve Deney 5 için karşılaştırılması



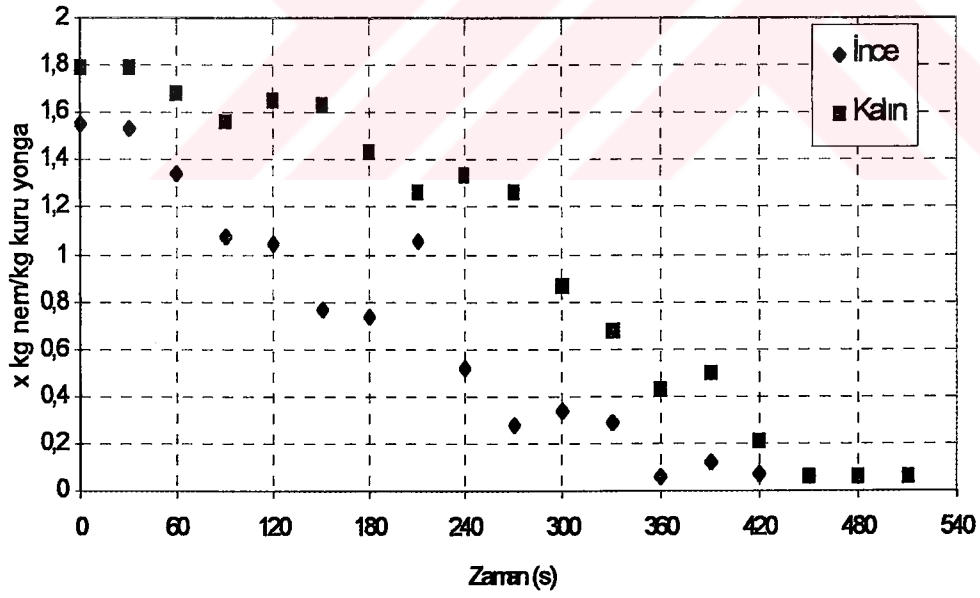
Şekil 6. 31. Klapenin açık ve yarı açık konumuna göre nem oranının zamana göre değişiminin Deney 1 ve 6 için karşılaştırılması



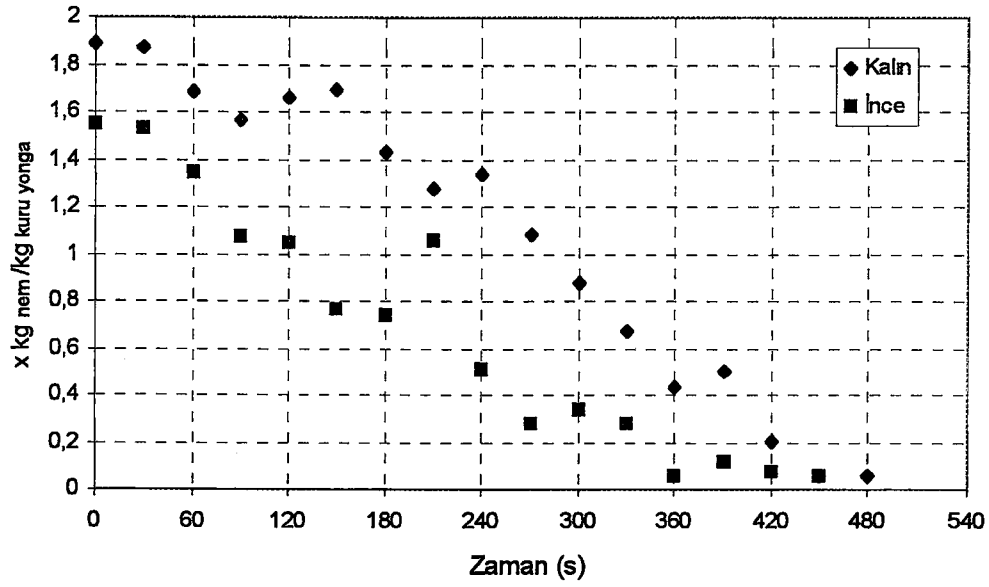
Şekil 6. 32. Dağıtıcı eleğin etkisinin Deney 1 ve 9 için karşılaştırılması



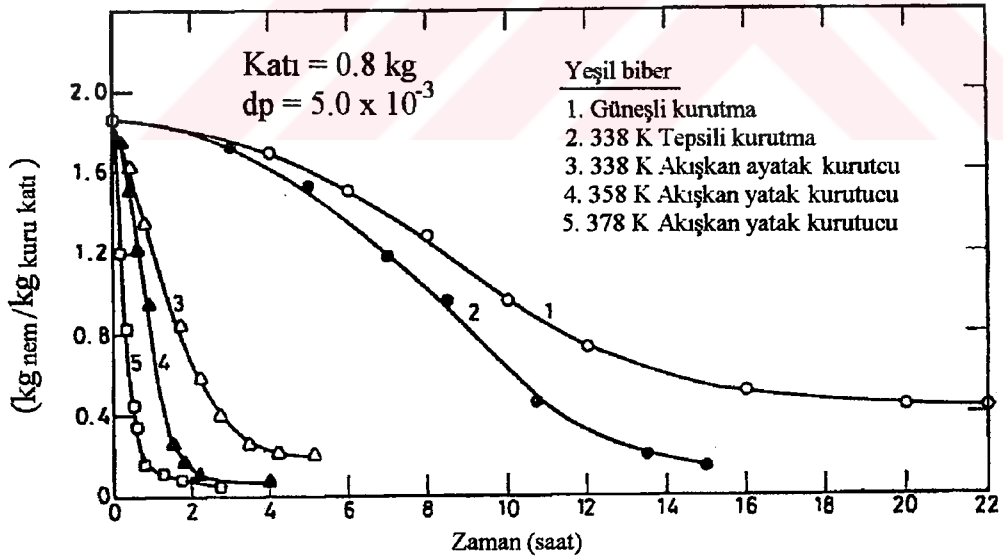
Şekil 6. 33. Dağıtıcı eleğin etkisinin Deney 8 ve 9 için karşılaştırılması



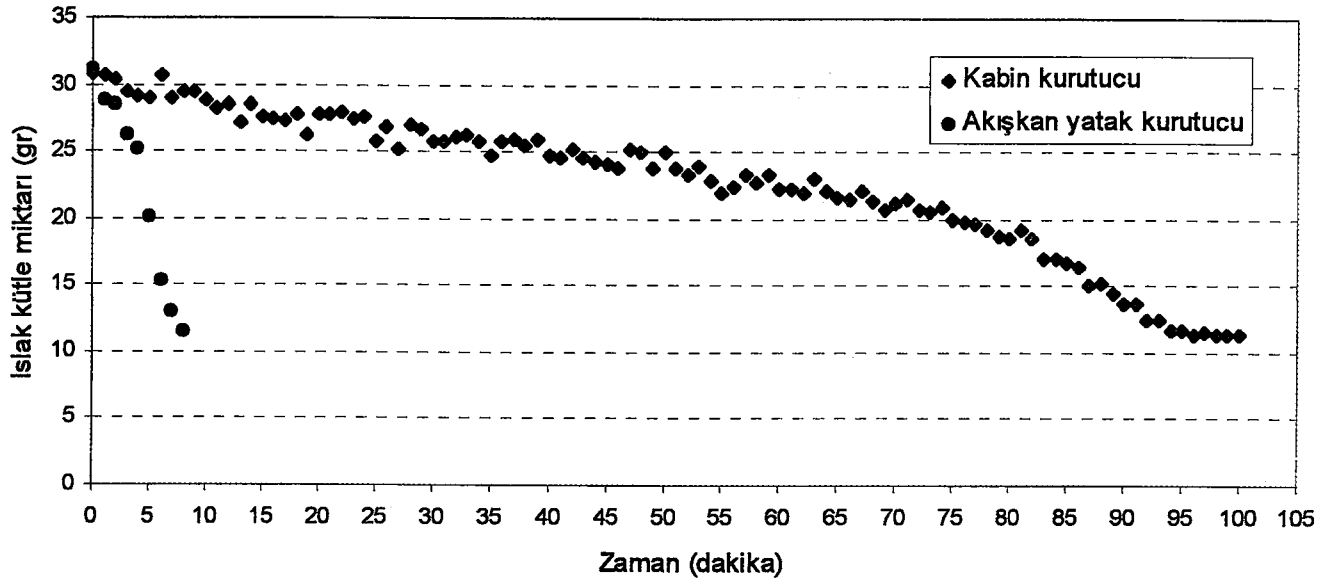
Şekil 6. 34. Yonga tipinin değişiminin etkisinin Deney 7 ve 8 için karşılaştırılması



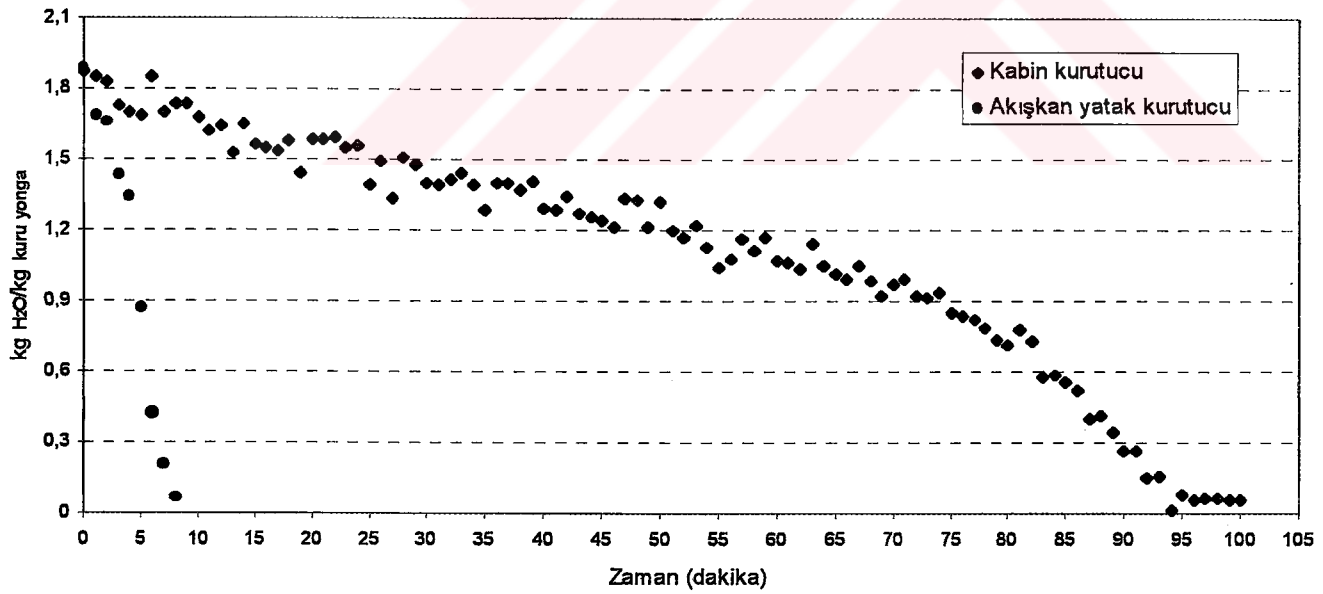
Şekil 6. 35. Yonga tipinin değişiminin etkisinin Deney 1 ve 7 için karşılaştırılması



Şekil 6. 36 P. P. Thomas ve Y. B.G. Varma' nın yeşil biberin kurutulması ile ilgili deney sonuçları [14].



Şekil 6. 37 Kabin ve akışkan yatak kurutucuda ıslak kütlenin zaman göre değişiminin karşılaştırılması.



Şekil 6. 38 Kabin ve akışkan yatak kurutucuda yonga özgül neminin zamana göre değişiminin karşılaştırılması.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Akışkan yataklarda kurutma prosesinde hız yükselen ve alçalan kurutma hızı periyotlarında etken değildir. Sabit kurutma hızı etkilidir. Bunun sebebi akışkan yatak içinde oluşan izotermal koşullar sayesinde sıcak hava ve partikül arasındaki ısı ve kütle transferinin kısa sürede denge haline gelmesinden kaynaklanmaktadır. Yapılan deneylerde dizayn edilen kurutucu için kurutma hızlarının aritmetik ortalaması 250 gr/h mertebesindedir.

Kurutma prosesinde sıcaklığın artırılması ile kurutma hızının artması doğaldır. Akışkan yatak deney setinde 3 farklı sıcaklık kademesinde yapılan deneylerde de kurutma hızının sıcaklıkla arttığı ve kurutma süresinin kısaldığı görülür. Sıcaklığın artması kurutucu duvar sıcaklığının fazlaşması ve yonga sıcaklığının yükselmesi neticesinde artan ısı transferinin sonucu olarak kurutma hızı yükselmiştir. 1. Deneyde $T = 303$ K sıcaklıkta yapılan deneyde kurutma hızının aritmetik ortalaması 245 gr/h iken 2. Deneyde 323 K sıcaklıkta yapılmış ve kurutma hızının aritmetik ortalaması 256 gr/h' e yükselmiştir. 3. Deney 343 K sıcaklıkta yapılmış ve kurutma hızının aritmetik ortalaması 314 gr/h' e yükselmiştir. 1. Deneyde nem oranı $x = 1.8876$ kg/kg_{kuru yonga} değerinden $x = 0.0631$ kg/kg_{kuru katı} değerine 8 dakikada (Şekil 6. 12), 2. Deneyde nem oranı $x = 1.8969$ kg/kg_{kuru katı} değerinden $x = 0.064$ kg/kg_{kuru katı} değerine 6.5 dakikada (Şekil 6. 14), 3. Deneyde nem oranı $x = 1.9173$ kg/kg_{kuru katı} değerinden $x = 0.0677$ kg/kg_{kuru katı} değerine 4.5 dakikada (Şekil 6. 16) ulaşarak sıcaklığın etkisi ile kurutma süresinin kısaldığı görülmüştür. Bu durum Şekil 6.27 de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Yapılan deneylerde deney setine 1.5 kg veya 3 kg ıslak yonga yüklenmiştir. Yükleme miktarının ve nem oranının artması ile kurutma hızının düşmesi ve kurutma süresinin uzaması gözlenmiştir. Akışkan yatakta yükleme miktarının ve nem oranının artması ile yongalar arasındaki mesafenin azalması yani boşluk oranının azalması ve bu sebepten yongaların akışkanlaştırılması için daha fazla fan gücünün gerekmesi ve bundan dolayı oluşan kabarcıkların ısı transferini ve akışkanlaşmayı kötüleştirerek kurutma hızının azalmasına ve kuruma süresinin uzamasına sebep olmuştur. Dördüncü ve beşinci deneyde 3 kg lık yükleme yapılmıştır ve netice olarak kurutma sürelerinin uzadığı görülmüştür. Şekil 6.28 de Deney 1 ve Deney 5 karşılaştırılmış ve bu durum açıkça gözlenmiştir.

Akışkan yataklı kurutucuda hava hızının kurumaya etkisi iletim borusundaki klape'nin tam açık veya yarım açık konumuna getirilmesi neticesinde elde edilmiştir. Hava hızının artırılması ile ısı ve kütle transfer katsayılarının büyümesi kurutma hızını yükselterek kurutma süresini kısaltmıştır. 7. Deneyde klape açık iken kurutma hızı 207 gr/h ve özgül nem $x = 1.5487 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ değerinden $x = 0.0592 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ değerine 7 dakikada (Şekil 6. 23), 6. Deneyde ise klape yarım açık iken kurutma hızı 183 gr/h' e ve özgül nem değeri $x = 1.7567 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ değerinden $x = 0.0492 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ değerine 10 dakikada (Şekil 6. 22) düşmüştür. Aynı şekilde Deney 1 ve Deney 6 karşılaştırıldığında, Deney 1 in nem oranı Deney 6 ninkinden büyük olmasına karşın Deney 1 deki kuruma süresi daha kısadır. Bu durum Şekil 6.29 da görülmektedir.

Akışkan yataklı kurutucuların en önemli parçalarından biri dağıtıcı elektir. Kurutma materyalinin yığılmasına meydan vermeden homojen bir hava akışı sağlamalıdır. Dağıtıcı elek deliklerinden fişkıran havanın hızı yükselir. Dağıtıcı elek üzerinde kararsız bir yapı ve türbülans, kurutucu performansını kötü yönde etkileyecektir. Bu çalışmada iki farklı dağıtıcı elek kullanılmıştır. Bunlardan 1 nolu dağıtıcı elek 3 mm delikli ve % 70 açıklıktadır. 2 nolu dağıtıcı elek 1.5 mm ve % 80 boşluk değerindedir. Dokuzuncu deneyde iki nolu distribütör kullanılmıştır ve kurutma hızı 278 gr/h ve nem oranı $x = 1.9173 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ den $x = 0.06 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ ya 6.5 dakikada (Şekil 6. 26) düşmüştür. Sekizinci deneyde ise 1 nolu distribütör kullanılmış kurutma hızı 194 gr/h, nem oranı $x = 1.7948 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ dan $x = 0.0594 \text{ kg/kg}_{\text{kuru yonga}}$ değerine 8 dakikada (Şekil 6. 25) düşmüştür. Bu sonuçlar iki nolu distribütörün daha çok sayıda hava akış deliğine sahip olması ve homojen hava akışı sağlaması sayesinde kabarcık oluşumunu engellemiş olmasındandır. Aynı zamanda Şekil 6. 23 de Deney 1 ve 9, Şekil 6. 31 de Deney 8 ve 9 karşılaştırılarak dağıtıcı eleğin kurutma süresine etkisi gösterilmiştir.

Yonga büyüklüğünün azalmasıyla, kurutma süresi kısalmıştır. Bunun sebebi yongaların küçülmesiyle, küresellik faktörünün büyümesi ve dolayısıyla daha iyi bir akışkanlaşma neticesinde ısı ve kütle transfer katsayılarının büyümesi sonucu kısa sürede kurutulmalarıdır. Bu durum Şekil 6. 32 de Deney 7 ve 8 ve Şekil 6. 33 de Deney 1 ve 7 nin karşılaştırılmalarında görülmektedir.

Akışkan yatak kurutucularında görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda kurutma olayı gerçekleşebilmektedir. Bu husus hem kurutma için harcanan enerjiyi azaltacak hem de bu

sistemlerin kullanılacağı yerlerde bulunan atık ısı kaynaklarının bu kurutucularda kullanılması neticesinde büyük oranda tasarruf yapılacaktır. Sunta imalatında kurutma için harcanılan enerji sunta maliyetine etki etmektedir. Bu endüstride bulunan pres, levha soğutulması gibi ünitelerden sağlanacak atık ısıların akışkan yatak kurutmada kullanımı ile kurutma maliyetlerinden büyük oranda tasarruf edilecektir.

Yonga levha fabrikalarının yangın bakımından en tehlikeli yeri kurutma makineleridir. Kurutma hızı bakımından genellikle odunun tutuşma noktasının üstündeki bir sıcaklıkta çalışılır. Bilindiği gibi odunun tutuşma noktası 200 °C civarındadır. Ekzotermik reaksiyonlarla 150 °C hatta 100 °C de tutuşma başlayabilir. Çam reçinesi 2 saat içerisinde 80 °C de tutuşmaktadır. Klasik kurutma makinelerinde ise kurutma havası sıcaklığı 300 °C ye ulaşmaktadır. Bu sıcaklıkta yongaların tutuşmamasının sebebi buharlaşma olduğu sürece yonga sıcaklığının 100 °C' nin altında olmasıdır. Ancak yongaların makinenin hareketsiz kısımlarında uzun süre kalarak aşırı süre kuruması tehlikelidir. Yangın tehlikesi kurutma işleminin durmasına sebep olacaktır. Ayrıca kullanılan dönel kurutucuların içindeki ateş tuğlalarının zaman zaman dökülmesi neticesinde sistem bakıma alınmaktadır. Ancak akışkan yatak kurutucularda düşük sıcaklıkların kullanılması neticesinde yangın tehlikesiyle karşılaşılmaz ayrıca bakım ve servis güçlükleri yoktur.

Yonga levha fabrikalarında yongaların elenerek sınıflandırılması gerekmektedir. Yongalama makinelerinde homojen boyutlarda yonga üretimi yapılamamaktadır. Bu ise yonga levha üretiminde yüzey düzgünlüğünün bozulmasına ve porozitenin artmasına sebep olur. Keza çok kaba yongaların levhanın orta kısmında aşırı şekilde kullanılması, levhaların daha sonraki kullanılış yerlerinde kenarlarının masiflenmesini zorlaştırır. Çok küçük parçalar ve tozlar ise tutkallama, serme ve yapıştırma sırasında sorunlar yaratabilir. Bu nedenle yongaların homojen duruma getirilmesi gerekmektedir. Akışkan yatak kurutucularında kademeli kurutma sayesinde hem kuruyacak ve hem de sınıflandırabilecektir. Dolayısıyla yongaların sınıflandırılması için ayrıca zaman harcanmayacaktır.

Akışkan yataklar, kurutuma prosesi için çok uygun doğal özelliklere sahiptir. Karışma olayı, yatağın dışına göre iyi sıcaklık kontrolü, hava ve katılar arasındaki

mükemmel ısı ve kütle transferi, sürekli doldurma kolaylığı ve yataktan partiküllerin uzaklaştırılması hemen hemen izotermal koşullarda oluşur.

Akışkan yatak kurutucular klasik dönel kurutuculara göre daha az hidrokarbon emisyonu ortaya çıkarır. Benzer kapasitedeki akışkan yatak kurutucular daha küçüktür ve ucuza yapılırlar.

Bu kurutucularla 2000 kg/hm² den daha büyük hızlarda su buharlaştırılabilmektedir[18]. Dolayısıyla klasik kurutuculara göre çok daha kısa zamanda kurutma prosesini gerçekleştirebilirler. Buna örnek olarak P. P. Thomas ve Y. B. G. Varma, Gıda maddelerinin akışkan yatakta kurutulması adlı çalışmalarında tepsili ve Güneş’ te kurutma prosesiyle akışkan yatak kurutucuyu karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde akışkan yatak kurutucularda kurutma süresinin çok kısa olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma Şekil 6. 34 de verilmiştir.

Bu çalışmada Akışkan yatak kurutucu deney setinin performansının karşılaştırılabilmesi amacıyla S. D. Ü. Makine Müh. Termodinamik laboratuvarında bulunan bir kabin kurutucusuyla, Deney 1 verileriyle aynı şartlarda yonga kurutuldu. Kabin kurutucuya ince elek üzerinde konan yongadan 60 s aralıklarla, akışkan yatak deney setinde kullanılan sabit ölçekli kapla numune alınarak tartıldı ve sonuçlar Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 da akışkan yatak kurutucu deney setinde yapılan 1. Deneyle karşılaştırmalı olarak verildi. Bu karşılaştırma incelendiğinde kabin kurutucuda kurutma süresinin çok uzun olduğu görüldü. Bunun sebebinin ıslak yongaların hareketsiz ortamda sıcak hava akışını kapatması sonucu, sadece yüzeylerden kuruması ve derinliğine kuruması için çok uzun zaman gerekmesi olarak açıklanabilir.

Bu çalışmada süreksiz akışkan yatak kurutucuda yonga kurutması deneysel olarak incelenmiştir. Bu konuda literatürde teorik ve deneysel veriler olmadığı için karşılaştırma yapılamamıştır.

Bu çalışmanın adı “Akışkan Yataklı Kurutma Sistemlerinin Analizi ve Sunta Kurutulmasında Uygulanabilirliğinin Araştırılması” olarak verilmiştir. Ancak burada sunta yerine suntanın hammaddesi yonga kastedilmiştir. Dolayısıyla sunta kelimesi yerine yonga kelimesinin kullanılması daha uygun olur.

KAYNAKLAR

- [1] GÜNEŞ M.; “Gözenekli Ortamda Kurutma Probleminin Formülasyonu”, Doktora Tezi, Yök. No: 33567, Ankara, 1994
- [2] PALANCZ B.; “A Mathematical Model For Continuous Fluidized Bed Drying”, Chemical Engineering Science Vol 38, No:7, Pp 1045 – 1059, 1983, Great Britain.
- [3] TREYBAL R. E.; Mass Transfer Operations, Mc Graww – Hill, New York, 1980.
- [4] FORTES M. VE OKOS M. R.; “Drying Theorises: Their Bases And Limitations As Applied To Foods And Grains, Advances İn Drying, Ed., A. S. Mujumdar, Vol 1, Pp 119 – 154, 1980.
- [5] WHITAKER S.; “Simultaneous Heat, Mass And Momentum Transfer İn Porous Media: A Theory Of Drying İn Advances İn Heat Transfer, Vol 13, Pp 119 – 203, 1977.
- [6] HOUGEW D. A.; MC CAULEY H. J., MARSHALL M. R.; “Limitations Of Diffusion Equations İn Drying, Trans. Am. Fnst.Chem.Eng.Vol 36, Pp 183 – 210, 1940.
- [7] KRISCHER O.; “Wissenschaftlichen Grundlagen Der Trocknungstechnik”, Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg New York 1978.
- [8] MANDIRACILAR L.; “Atık Baca Gazlarından Isı Geri Kazanımında Akışkan Yatak Sistemlerinin Kullanımı Ve Isı Transferi Açısından Optimizasyonu”, Y. Lisans Tezi, 9 Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1990.
- [9] KUNİİ D.; LEVENSPİEL O., “Fluidization Engineering”, Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1977.
- [10] GENCELİ O. F.; Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları Denklem Matbaası, 1988.
- [11] KÖSE R.; “Akışkanlaştırma Hızı İle Akışkan Yataklı Yakıcılar Arasındaki İlişkinin İncelenmesi”, 4. Yanma Sempozyumu, Sayfa 286 – 295, Kirazlıyayla Bursa, 1995.
- [12] ORMA A. Ş. Notları, Isparta.

[13] ROBERT H. PERRY, CECIL H. CHILTON; "Chemical Engineers Handbook", Mc Graw – Hill, Tokyo, 1973.

[14] P. P. THOMAS, Y. B. G. VARMA.; "Fluidised bed drying of granular food materials" Powder Technology, 69 (1992) pp 213 – 222.

[15] J. H B. J. HOEBINK, K. RIETEMA.; "Drying Granular Solids in Fluidised Bed – I" (Description on Basis of mass and heat transfer coefficients) Chemical Engineering Science Vol 35 pp 2135 – 2140 Pergamon Press Ltd., Great Britain, 1980

[16] J. H B. J. HOEBINK, K. RIETEMA.; "Drying Granular Solids in Fluidised Bed – II" (The influence of mass and heat transfer coefficients) Chemical Engineering Science Vol 35 pp 2135 – 2140 Pergamon Press Ltd., Great Britain, 1980.
(Diffusion Limitation on the gas – solid contacting around bubbles)

[17] LOTHAR MÖRL; "Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wirbelschichttrocknung am Wissenschaftsbereich Thermische Apparate und Umwelttechnik der TU Magdeburg" Chemische Technik 42. Jahrgang, Heft 5, Seiten 186 bis 230 – Mai 1990.

[18] MICHAEL R. MINOLTA, JAMES B. WILSON; "Analysis of the fluidised bed drying of wood particles" Wood and Fiber Science 22 (2), 1990, pp 193 – 203, 1990.

[19] RAMES C. PANDA, VADAREVU S. RAMACHANDRA RAO; "Fluidised bed dryers: Modelling and Control" Chem. Eng. Technol, 14. (1991), pp 307 – 310, Weinheim, 1991.

[20] L. KRELL, H. J. KÜNNE, L. MÖRL; "Flow regimes and heat mass transfer in gas – fluidised beds of solids" International Chemical Engineering Vol 30 No: 1, pp 45 – 46 January, 1990

[21] M. ABID, R. GIBERT, C. LAGUERIE; “An experimental and theoretical analysis of the mechanisms of heat and mass transfer during the drying of corn grains in a fluidised bed” International Chemical Engineering Vol 30, No: 4, pp 632 – 641 October, 1990.

[22] C. SRINIVASA KANNAN, S. SUBBA RAO, Y.B.G. VARMA.; “A Kinetic Model for Drying of solids in Batch Fluidised Beds” Ind. Eng. Chem. Res. 1994, 33 pp 363 – 370.

[23] V.V. KAFAROV, I. N. DOROKHOV; “Modelling and optimization of drying process” International Chemical Engineering Vol 32 No:3 July, pp 475 – 524, 1992.

[24] Z. KAZIM TELLİ; “Termodinamik” Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 19, Isparta, 1984.

[25] FRIEDRICH KNEULE; “Das Trocknen” Copyright 1975 by Sauerlander A.G., Aarau München, 1974.

[26] K. KRÖLL; “Trockner und Trocknungsverfahren” Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978.

[27] R. B. KEEY; “Drying Principles and Practice” Pergamon Press, New York, 1972.

[28] HANZADE H., “Sanayide Kullanılan Bazı Akışkan Yataklı Yakma Sistemlerinin İncelenmesi” Sayfa 278 – 285, 4. Yanma Sempozyumu, 1995 İstanbul.

[29] KÖSE R., “Akışkan Yataklı Yakıcıların Matematik Modellemelerine Bakış” Sayfa 227 – 236, 4. Yanma Sempozyumu, İstanbul, 1995

[30] KÖSE R., “Akışkan Yatakta Yanma Verimini Etkileyen Parametreler”, 4. Yanma Sempozyumu, Sayfa 216 – 226, İstanbul, 1995.

[31] J. HIGHLEY and W. G. KAYE, "Fluidized Bed Industrial Boilers and Furnaces", National Coal Board, Coal Research Establishment, Cheltenham W. K.

[32] YILDIRIM A. M., "Akışkan Yataklı Kazanların Tanıtımı, Fabrika Atıklarının Yakılmasının İncelenmesi ve Atık Yakan Pilot Boyutta Bir Akışkan Yatağın Projelendirilmesi" Balıkesir Müh. Mim. Fak. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir, 1990.

[33] TOLAY M., "Akışkan Yataklı Boyler Tasarımı" Isı Bilimi ve Tekniği 4. Kongresi, Sayfa 83- 95, 1983

[34] ACAR M., "Sıvı Akışkan Yataklı Isı Değiştiricilerinin Afyon İli Jeotermal Sularına Uygulanarak boru Yüzeylerinde Oluşan Kabuklaşma Sorununun Araştırılması" Akdeniz Üniversitesi Isparta Müh. Mim. Fak. Araştırma Projesi.

[35] EĞRİCAN N., "Isı Transferinin Kritik Üstü Bölgede Gerçekleştiği Akışkan Yataklı Bir Kazanın Minimum Entropi Artımını Amaçlayan Tasarımı" Termodinamik Dergisi, sayfa 31 – 38, Kasım 1992.

[36] CAN A., "Akışkan Yatak Tekniği ve Tasarım Esasları" Trakya Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Makine Müh. Böl. Yayını.

[37] UÇKAN G., "Akışkan Yatakla Tanecikli Gaz Arasındaki Isı ve Kütle Geçişi" Mühendis ve Makine, Cilt 28, Sayı 332, sayfa 21 – 24, Eylül 1987.

[38] VDI – WARMEATLAS "Berechnungsblätter Für den Wärmeübergang", VDI – Verlag GmbH, Düsseldorf 1991.

[39] İ. ÇATALTAŞ, "Kimya Mühendisliğine Giriş", İnkılap Kitapevi, İstanbul, 1986.

[40] B. KISAKÜREK, "Kurutma Modelleri", Isı Bilimi ve Tekniği, C 2, S. 3, 37 – 40, 1979.

[41] A. B. NEWMAN, "The Drying of Porous Solids: Diffusion Calculations", Trans. Am. Inst. Chem. Eng.; Vol 27, sayfa 310 – 333, 1931.

[42] A. B. NEWMAN, "The Drying of Porous Solids: Diffusion and Surface Emission Equation", Trans. Am. Inst. Chem. Eng., Vol 127, sayfa 203 – 220, 1931.

[43] A. V. LUIKOV, "Heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies", Pergann, Oxford, 1966.

[44] J. R. PHILIP ve D. A. DE VRIES, "Moisture Movement In Porous Materials Under Temperature Gradients", Trans. Am. Geophys. Union, Vol 38, sayfa 222- 232, 1957.

[45] D. A. DE VRIES, "Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media", Trans. Am. Geophys. Union, Vol 397, sayfa 909 – 916, 1958.

[46] D. BERGER ve D. C. T. PEI, "Drying of Hygroscopic Capillary Porous Solids: A Theoretical Approach", IJHMT, Vol 16, sayfa 293 – 302, 1973.

[47] N. SCHADLER ve W. KAST, "A Complete Model of The Drying Curve For Porous Bodies – Experimental and Theoretical Studies", IJHMT, Vol 30,

[48] S. SOMASUNDARAM, N. K. ANAMD, Y. B. SUH, "Analysis of Moisture Migration in Two – Dimensional Unsaturated Porous Media With Impermeable Boundaries", IJHMT, Vol 32, No: 9, sayfa 1733 – 1739, 1989.

[49] W. MASMOUDI ve M. PRAT, "Heat and Mass Transfer Between a Porous Medium and a Parallel External Flow. Application to Drying of Capillary Porous Materials", IJHMT, Vol 34, No: 8, sayfa 1975 – 1989, 1991.

[50] I. J. KUMAR, "An Extended Variational Formulation of The Non – Linear Heat and Mass Transfer in a Porous Medium", IJHMT, Vol 14, sayfa 1759 – 1770, 1971.

[51] L. N. GUPTA, "An Exact Solition of The Coupled Phase Change Problem in a Porous Medium", IJHMT, Vol 18, sayfa 1139 – 1142, 1975.

[52] S. W. CHO, "An Exact Solution of The Coupled Phase Change Problem in a Porous Medium", IJHMT, Vol 18, sayfa 1139 – 1142, 1975.

[53] M. D. MIKAHAILOV, "Exact Solution of Temperature and Moisture Distributions in a Porous Half – Space With Moving Evaporation Front", IJHMT, Vol 18, sayfa 797 – 894, 1975.

[54] B. PALANCZ, "Solution of The Pen Entrating Evaporation Front Model For Finite Porous Medium Using Orthogonal Collocation Method", IJHMT, Vol 30, No: 9, 1871 – 1878, 1987.

[55] A. V. LUIKOV, "Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies (Rewiev)", IJHMT, Vol 18, sayfa 1 – 14, 1975.

[56] M. D. MIKHAILOV ve B. K. SHISHEDDIEV, "Temperature and Moisture Distrubitions During Contact Drying of a Pnoist Porous Heat", IJHMT, Vol 18, sayfa 15 – 24, 1975.

[57] G. COMINI, ROW. LEWIS, "A Numerical Solution at Two – Dimensional Problems İncloving Heat and Mass Transfer", IJHMT, Vol 19, sayfa 2387 – 1392, 1976.

[58] J. WYRWAL, "Some Theorems in Luikov's Theory of heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies", Vol 31, No: 12, sayfa 2543 – 2546, 1988.

[59] H. R. THOMAS, K. MORGAN, R. W. LEWIS, "A Fully Non Linear Analysis of Heat and Mass Transfer Problems in Porous Bodies", Int. J. Num, Moth. Eng. Vol 15, sayfa 1381 – 1393, 1980.

[60] J. Y. LIU, S. CHENG, "Solutions of Luikov Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary – Porous Bodies", IJHMT, Vol 34, Wo 7, sayfa 1747 – 1754, 1991.

[61] M. KAVIANY, M. MITTAL, "Finicular State in Drying of a Porous Slab", IJHMT, Vol 30, No: 7, sayfa 1407 – 1418, 1987.

[62] S. B. NASRALLAH, P. PERRE, "Detailed Study of a Model of Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Media", IJHMT, Vol 32, No: 5, sayfa 957 – 967, 1988.

[63] D. R. SHONNARD, S. WHITAKER, "The Effective Thermal Conductivity for a Point – Contact Porous Medium an Experimental Study", IJHMT, Vol 32, NO: 5, sayfa 503 – 512, 1989.

[64] M. ILIC, I. W. TURNER, "Convective drying of a Consolidated Slab of Wet Porous Material", IJHMT, Vol 32, No: 12, SI – 2362, 1989.

[65] Y. X. TAO, R. W. BESANT, K. S. REZKALLAH, "Unsteady Heat and Mass Transfer With Phase Changes in an Insulation Slab: Trosting Effect", IJHMT, Vol 34, No: 7, sayfa 1593 – 1603, 1991.

[66] P. M. KOLESNIKOV, "Generalized Boundary Conditions of the Heat and Mass Transfer", IJHMT, Vol 30, No: 1, sayfa 85 – 92, 1987.

[67] P. CHEN, D. C. T. PEI, "A Mathematical Model of Drying Process", IJHMT, Vol 32, No: 2, sayfa 297 – 310, 1989.

[68] M. S. SMIRMOV, L. I. LYSENKO, "Equations of Drying Curves", IJHMT, vol 32, No: 5, sayfa 837 – 841, 1989.

[69] A. D. POLYAMIN, V. V. DIL'MAN, "An Algebraic Method For Heat and Mass Transfer Problems", IJHMT, Vol 33, No: 1, sayfa 183 – 201, 1990.

[70] M. A. STANISCH, G. S. SCHAJER, F. KAYIHAN, "A Mathematical Model of Drying For Hygroscopic Porous Media", *AIChE Journal*, Vol 32, No: 8, sayfa 1301 – 1311, 1986.

[71] D. J. SHAH, J. W. RAMSEY, M. WANG, "An Experimental Determination of the Heat and Mass Transfer Coefficients In Moist Unsaturated Solids", *IJHMT*, Vol 27, No: 7, sayfa 1075 – 1085, 1984.

[72] D. A. ZUMBURUNNEN, R. VISKANTA, F. P. INCROPERA, "Heat Transfer Through Porous Solids With Complex Internal Geometries", *IJHMT*, Vol 29, No: 2, sayfa 275 – 284, 1986.

[73] S. K. DUTTA, V. K. NEMA, R. K. BHARDWAJ, "Drying Behaviour of Spherical Grains", *IJHMT*, Vol 31, No: 4, sayfa 855 – 861, 1988.

[74] B. X. WANG, W. P. YU, "A Method For Evaluation of Heat and Mass Transport Properties of Moist Porous Media", *IJHMT*, Vol 31, No: 5, sayfa 1005 – 1009, 1988.

[75] S. HABER, A. SHAVIT, J. DAYAN, "The Effect of Heat Convection on Drying of Porous Semi – Infinite Space", *IJHMT*, Vol 27, No: 12, sayfa 2347 – 2353, 1984.

[76] S. MORI, H. NAKAGAWA, A. TONIMATO, SAKAKIBARA, "Heat and Mass Transfer With A Boundary Layer Flow Past A Flat Plate of Finite Thickness", *IJHMT*, Vol 34, No: 11, sayfa 2899 – 2909, 1991.

[77] O. A. PLUMB, G. A. SPOLEK, B. A. OLMSTEAD, "Heat and Mass Transfer In Wood During Drying", *IJHMT*, Vol 28, No: 9, sayfa 1669 – 1678, 1985.

[78] S. MOTAKET, M. A. EL – MASRI, "Simultaneous Heat and Mass Transfer With Phase Change In A Porous Slab", *IJHMT*, Vol 29, No: 10, sayfa 1503 – 1512, 1986.

[79] A. P. SHAPINO, S. MOTAKET, "Unsteady Heat and Mass Transfer With Phase Change In Porous Slabs; Analytical Solutions and Experimental Results", IJHMT, Vol 33, No: 1, sayfa 163 – 173, 1990.

[80] A. RUBIN, S. SCHWEITZER, "Heat Transfer In Porous Media With Phase Change", IJHMT, Vol 15, sayfa 43 – 60, 1972.

[81] P. P. K. RAJ, H. W. EMMONS, "Transpiration Drying of Porous Hygroscopic Materials", IJHMT, Vol 18, sayfa 623 – 634, 1975.

[82] M. CROSS, R. D. GIBSON, R. W. YOUNG, "Pressure Generation During The Drying of A Porous Half Space", IJHMT, Vol 22, sayfa 47 – 50, 1979.

[83] M. ILIC, I. W. TURNER, "Drying of A Wet Porous Material", Appl. Math. Modelling, Vol 10, sayfa 16 – 24, 1986.

[84] H. A. DINULESCU, E. R. G. ECKERT, "Analysis of The One – Dimensional Moisture Migration Caused by Temperature Gradients In A Porous Medium", IJHMT, Vol 23, sayfa 1069 – 1078, 1980.

[85] J. A. ROGERS, M. KAVIANY, "Fincular and Evaperative – front Regimes In Convective Drying of Granular Beds", IJHMT, No: 2, sayfa 469 – 480, 1992.

[86] U. W. LYONS, J. D. HATCHER, J. E. SUNDERLAND, "Drying of a Porous Medium With Internal Heat Generation", IJHMT, Vol 15, sayfa 897 – 905, 1972.

[87] R. D. GIBSON, M. CROOS, R. W. YOUNG, "Pressure Gradients Generated During of Porous Shape", IJHMT, Vol 22, sayfa 827 – 830, 1979.

[88] c. L. HUANG, H. H. SIANG, C. H. BEST, "Heat and Moisture Transfer In Concrete Slabs", IJHMT, Vol 22, sayfa 257 – 266, 1979.

[89] M. S. SAHOTA, P. J. PAGNI, "Heat and Mass Transfer In Porous Media Subject to Fires", IJHMT, Vol 22, sayfa 827 – 830, 1979.

[90] E. R. G. ECKERT, M. FAGHRI, "A General Analysis of Moisture In A Unsaturated Porous Medium", IJHMT, Vol 23, sayfa 1613 – 1623, 1980.



www.ijhmt.com

Form1 Load Event()

set decimals to 3

create cursor hesap(deger n(3,1),sonuc n(4,2))

create cursor hesap1(deger n(3,1),sonuc n(4,2))

Command1 click Event()

*Cursor oluşturuluyor

select hesap

zap

*-----

$$*umf = (7,169e-4 * dp^{(1.82)} * (rop-rog)^{(0.94)} * g) / ((rog)^{(0.006)}) * ((mg)^{(0.88)})$$

$$umf1 = (7.169e-4) * (thisform.txt_dp.value)^{(1.82)}$$

$$umf2 = (thisform.txt_rp.value - thisform.txt_rg.value)^{(0.94)} * thisform.txt_g.value$$

$$umf3 = (thisform.txt_rg.value)^{(0.006)}$$

$$umf4 = (thisform.txt_mg.value)^{(0.88)}$$

$$umf = (umf1 * umf2) / (umf3 * umf4)$$

*-----

$$*Ubr = 0.711 * (g * db)^{(1/2)}$$

$$Ubr = 0.711 * (thisform.txt_g.value * thisform.txt_db.value)^{(1/2)}$$

*-----

$$*Ub = Uo - Umf + Ubr$$

$$Ub = thisform.txt_uo.value - umf + ubr$$

*-----

$$*ro = (Uo - Umf) / Ub$$

$$ro = (thisform.txt_uo.value - umf) / ub$$

*-----

$$*Kbc = (4.5 * (umf / db)) + ((5.85 * (dg)^{(1/2)} * (g)^{(1/2)}) / (db)^{(1/4)})$$

$$Kbc1 = 4.5 * (umf / thisform.txt_db.value)$$

$$Kbc2 = 5.85 * (thisform.txt_dg.value)^{(1/2)} * (thisform.txt_g.value)^{(1/4)}$$

$$Kbc3 = thisform.txt_db.value^{(5/4)}$$

$$Kbc4 = Kbc2 / Kbc3$$

$$Kbc = Kbc1 + Kbc4$$

*-----

$$*Dgeff = Emf * Dg$$

$$Dgeff = thisform.txt_emf.value * thisform.txt_dg.value$$

*-----

$$*Kci = 6.78 * (Emf * Dgeff * Ub / db^3)^{(1/2)}$$

$$Kci1 = (thisform.txt_emf.value * Dgeff * ub) / ((thisform.txt_db.value)^3)$$

$$Kci = 6.78 * (Kci1^{(1/2)})$$

*-----

*1/Kib=1/Kbc+1/Kci
 Kib=(Kbc*Kci)/(Kbc+Kci)

*-----

*(1-ro)=Lmf/Lf
 *Lf=Lmf/(1-ro)
 Lf=(thisform.txt_lmf.value)/(1-ro)

*-----

*R hesaplanıyor
 R1=(1-thisform.txt_emf.value)*(1-ro)*thisform.txt_rs.value*thisform.txt_upo.value*Lf
 R2=thisform.txt_rg.value*thisform.txt_qp.value
 R3=(1+(thisform.txt_rs.value/thisform.txt_rw.value)*thisform.txt_upo.value)
 R4=R2*R3
 R5=Ub*ro
 R6=(-Kib*Lf)/Ub
 R7=1-exp(R6)
 R8=umf+(R5*R7)
 R9=R4*R8
 R=R1/R9

*-----

*Sonuçlar hesaplanıyor
 xi=xo+R(1-fi)
 for i=0 to 1 step 0.2
 xi=thisform.txt_xo.value+(R*(1-i))
 select hesap
 append blank in hesap
 replace hesap.deger with i
 replace hesap.sonuc with xi

endfor
 select hesap
 go top in hesap

*-----

*-----

*-----2. KISIM HESAPLAR YAPILIYOR-----

-

*hp'nin bulunması
 *hp=Cpg*Uo*rog*Jh*Prg^(-2/3)
 *Prg=(Cpg*mg)/lg
 *Reo=(dp*Uo*rog)/(1-Emf)*mg
 *Reo>30 ise Jh=1.77*Reo^(-0.44)
 *Jh=Nup/(Reo*Prg^(1/3))
 *Nup=Reo*Prg^(1/3)*Jh
 *hp=(Nup*lg)/dp
 Prg=(1000*thisform.txt_mg.value)/thisform.txt_lg.value&&Prg hesaplandı

*-----

Reo1=(thisform.txt_dp.value*thisform.txt_uo.value*thisform.txt_rg.value)

Reo2=(1-thisform.txt_emf.value)*thisform.txt_mg.value

Reo=Reo1/Reo2&&Reo hesaplandı

*-----

Jh=1.77*Reo^(-0.44)&&Jh hesaplandı

*-----

Nup=Reo*Prg^(1/3)*Jh&&Nup Hesaplandı

*-----

hp1=(Nup*thisform.txt_lg.value)/thisform.txt_dp.value&&hp hesaplandı

*-----

*E1'nin bulunması

E1=(6(1-Emf)*(1-ro))/dp

E1=(6*(1-thisform.txt_emf.value)*(1-ro))/thisform.txt_dp.value&&E1 hesaplandı

*-----

*Ep'nin bulunması

*Ep=Ei*hp

Ep=E1*hp1&&Ep hesaplandı

*-----

*hw'nin bulunması

Ar=(dp^(3)(rosw-rog)*rog*g)/mg^2

*Remax=0.2*Ar^(1/2)

*Numax=8.86*Ar^(0.2)

*hwmax=Numax.lg/dp

*Remax<>Reo ise hwmax>hw

*hwmax>hw

*hw=1514.3 ALINACAK

hw=1514.3

*-----

*E3'ün bulunması

*aex=Sexw/Vtot

*Sexw=pi*Dk*lf

*Vtot=((pi*Dk^2)/4)*Lf

*aex=4/Dk

*E3=(aex/ro)*hw

aex=4/thisform.txt_dk.value

E3=(aex/ro)*hw&&E3 bulundu

*-----

*Hbi'nin bulunması

Hbc=(4.5(Umf*rog*cwg))/db+((5.85*(lg*rog*cpg)^(1/2))/db^(5/4))*g^(1/4)

Hci=6.78(rog*cpg*lg)^(1/2)*((emf*ub)/db^3)^(1/2)

*1/Hbi=1/Hbc+1/Hci

Hbc1=(4.5*thisform.txt_rg.value*umf*thisform.txt_cwg.value)/thisform.txt_db.val
ue

Hbc2=5.85*(((thisform.txt_g.value)^(1/4))

```

*Hbc3=(thisform.txt_lg.value*thisform.txt_rg.value*thisform.txt_cpg.value)^(1/2)
Hbc3=(thisform.txt_lg.value*thisform.txt_rg.value*1000)^(1/2)
Hbc4=(Hbc2*Hbc3)/(thisform.txt_db.value^(5/4))
Hbc=Hbc1+Hbc4&&Hbc hesaplandı
*_____
*Hci1=6.78*((thisform.txt_rg.value*thisform.txt_cpg.value*thisform.txt_lg.value)^(1/2))
Hci1=6.78*((thisform.txt_rg.value*1000*thisform.txt_lg.value)^(1/2))
Hci2=((thisform.txt_emf.value*Ub)/((thisform.txt_db.value^3))^(1/2)
Hci=Hci1*Hci2&&Hci Hesaplandı
*_____
Hbi=(Hbc*Hci)/(Hbc+Hci)&&Hbi Hesaplandı
*_____
*E2'nin bulunması
*E2=(Cwg*rog)/Lf{Ub*[exp(-(Hbi*Lf)/(rog*Cwg*Ub))-1]-(Umf/ro)}
E21=(thisform.txt_cwg.value*thisform.txt_rg.value)/Lf
E22=exp(-(Hbi*Lf)/(thisform.txt_rg.value*thisform.txt_cwg.value*Ub))
E23=(Ub*(E22-1))-(umf/ro)
E2=E21*E23&&E2 hesaplandı
*_____
*H1'in bulunması
*H1=(6/dp)*((1+(ros/row)*Upo))/ros)*hp*tetap
H11=6/thisform.txt_dp.value
H12=(1+((thisform.txt_rs.value/thisform.txt_rw.value)*thisform.txt_upo.value))/thisform.txt_rs.value
H1=H11*H12*hp1*thisform.txt_qp.value&&H1 hesaplandı
*_____
for s=0 to 1 step 0.2
    *Hi'nin bulunması
    *Hi=((1-fi)*Upo*Cpwg)-H1
    Hi=((1-s)*thisform.txt_upo.value*thisform.txt_cpwg.value)-H1&&Hi Hesaplandı
    *_____
        *Hp'nin bulunması
        *Hp=H1+((2fi-1)*cw*upo)+Cs
        Hp=H1+((2*s-1)*thisform.txt_cw.value*thisform.txt_upo.value)+thisform.txt_cs.value
        *_____
            *Hc'nin bulunması
            *Hc=fi*Cw*Upo*Tpo-(1-fi)*Upo*ro+Cs
            Hc1=(s*thisform.txt_cw.value*thisform.txt_upo.value*thisform.txt_tpo.valu

```

e)

$$Hc2=(1-s)*thisform.txt_upo.value*thisform.txt_ro.value$$

$$Hc=Hc1-Hc2+thisform.txt_cs.value\&\&Hc\text{ bulundu}$$

*-----

*Ei'nin bulunması

$$*Ei=E1[Cpwg*((Upo*(1-fi)*ros)/(1+(ros/row)*upo))*(dp/6tetap)-hp]+E2-E3$$

$$Ei1=thisform.txt_upo.value*(1-s)*thisform.txt_rs.value$$

$$Ei2=1+((thisform.txt_rs.value/thisform.txt_rw.value)*thisform.txt_upo.value$$

)

$$Ei3=thisform.txt_dp.value/(6*thisform.txt_qp.value)$$

$$Ei4=(thisform.txt_cpwg.value*(Ei1/Ei2)*Ei3)-Hp1$$

$$Ei=(E1*Ei4)+E2-E3\&\&Ei\text{ bulundu}$$

*-----

*Ec'nin bulunması

$$*Ec=E2*To-E3*Tw$$

$$Ec=(E2*thisform.txt_to.value)-(E3*thisform.txt_tw.value)\&\&Ec\text{ hesaplandı}$$

*-----

*Ti'nin bulunması

$$*Ti=((Hc*Ep)-(Ec*Hp))/((Hi*Ep)-(Ei*Hp)$$

$$Ti=((Hc*Ep)-(Ec*Hp))/((Hi*Ep)-(-737798.152*Hp))\&\&Ti\text{ Hesaplandı}$$

*-----

select hesap1

append blank in hesap1

replace hesap1.deger with s

replace hesap1.sonuc with Ti

endfor

select hesap1

go top in hesap1

thisform.refresh()

-15701

Akışkan Yatak Kurulucu Xi ve Ti Değerlerinin Hesabı

İşlemler Dosya

Akışkan Yatak Kurulucu Xi ve Ti Değerlerinin Hesabı

VERİLER

Lmf	5.0000E-1	m	dp	1.0000E-3	m
db	2.0000E-2	m	xo	1.5000E-2	
Emf	6.0000E-1	m/s	upo	3.5000E-1	
Uo	1.0000E+0		δ_w	1.0000E+3	kg/m3
δ_g	1.0000E+0	kg/m3	δ_s	2.5000E+3	kg/m3
μ_g	2.0000E-5	w/mC	θ_p	3.0000E+2	
δ_p	2.5000E+3	kg/m3	g	9.8100E+0	m/sn2
dg	2.0000E-5	m2/s	Tpo	20	°C
To	250	°C	Tw	105	°C
Cpwg	1.9300E+3	Ws/kg°C	Cs	1.2600E+3	Ws/kg°C
Cw	4.1900E+3	Ws/kg°C	Cwg	1.0900E+3	Ws/kg°C
λ_g	2.9300E-2	Ws/kg°C	ro	2.5000E+6	Ws/kg°C
Dk	1.5000E-1	m	n	3	
K	1.0000E-2		Uc	2.0000E-1	

SONUÇLAR

ψ	Xi
0.0	0.33
0.2	0.26
0.4	0.20
0.6	0.14
0.8	0.08
1.0	0.02

SONUÇLAR

ψ	Ti
0.0	76.60
0.2	76.80
0.4	77.90
0.6	79.00
0.8	80.20
1.0	81.30

Hesapla Kapat

1 replacements NUM

EC.1 - BERÖĞKE
DOĞRU YAKLAŞIM

ÖZGEÇMİŞ

3.3.1963 tarihinde Isparta' da doğdu. 1970-1981 yılları arasında ilk, orta ve lise tahsilini Isparta' da bitirdi. 1987 yılında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 1989 tarihinde Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünden yüksek lisans derecesini aldı. 1990 yılında Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı. 1993 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında doktora eğitimine başladı. Şu anda Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evlidir. Almanca bilmektedir.



2022-2023
2022-2023
2022-2023