İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU MODELLEMESİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zehra DENİZ

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Isı Akışkan

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurdil ESKİN

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU MODELLEMESİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Zehra DENİZ
(503071118)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nurdil ESKİN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Cem PARMAKSIZOĞLU (İTÜ)
Doç. Dr. Sebiha YILDIZ (YTÜ)

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Aileme, Tüm hocalarıma ve özellikle tez dönemim boyunca yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Nurdil ESKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2010

Zehra Deniz
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
SEMBOLLER ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Özeti 2
1.3 Bu Çalışmada Yapılanlar 3
2. AKIŞKAN YATAK VE AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCULAR **5**
2.1 Kurutma ve Kuruma Eğrisi 5
2.2 Akışkanlaştırmanın Tanımı 8
2.3 Akışkan Yataklı Kurutma 8
2.4 Akışkan Yatağın Hidrodinamik Yapısı 9
2.5 Akışkan Yataklı Kurutucularda Kurutma Modelleri 14
3. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU MATEMATİK MODELLLEMESİ **15**
3.1 Akışkan Yatağın Hidrodinamik Modeli 15
3.1.1 Çap dağılımı ve ortalama tane çapı 16
3.1.2 Kurutmadan kaynaklı çap değişimi 17
3.1.3 Boşluk oranı hesabı 17
3.2 Akışkan Yatak Basınç Kaybı 18
3.3 Minimum Akışkanlaşma Hızı 19
3.4 Terminal Hız 20
3.5 Akışkan Yataklarda Yatak Genişlemesi 20
3.6 Kurutma 21
3.6.1 Sabit oranlı kurutma 21
3.6.2 Difüzyon kontrollü kurutma (azalan oranlı kurutma) 21
3.7 Üç Fazlı Matematik Modelleme 22
3.7.1 Üç fazlı matematik modelleme için kabuller 22
3.7.2 Kütle ve ısı geçişi 22
3.7.3 Sınır koşulları ve başlangıç değerleri 26
4. SAYISAL ÇÖZÜMLEME VE-MODELİN GEÇERLİLİĞİNİN İRDELENMESİ **27**
4.1 Program Algoritması 27
4.2 Modelin Geçerliliğinin İrdelenmesi 28
5. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU PERFORMANSININ İNCELENMESİ **35**

5.1 Modelin Geçerliliğinin İrdelenmesi 35
5.2 Giriş Nem Miktarının Etkisi 38
5.3 Gaz Giriş Sıcaklığı 39
5.4 Yatak Boyutları 40
5.5 Ürün Cinsi 41
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 43
KAYNAKLAR 45

SEMBOLLER

A	Yüzey alanı (m^2)
a_i'	Belli bir i çapındaki tanelerin özgül yüzey alanı (m^{-1})
a	Gaz ve parçacıklar arasında özgül yüzeysel alan (m^{-1})
$\bar{a}_i'$	Ortalama tane yüzey alanı (m^{-1})
C_{Dt}	Sürükleme katsayısı
$C_{D\infty}$	Sürükleme katsayısı
C_p	Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kgK)
C_s	Sürtünme faktörü
D	Yatak çapı (m)
D_{eff}	Etkin difüzyon katsayısı (m^2/s)
D_{vg}	Su buharının gaz içindeki difüzyon katsayısı (m^2/s)
d	Çap (m)
$\bar{d}$	Ortalama çap (m)
f_{E1}	Katı ile yoğun faz arasında birim yatak hacminde dz boyunca anlık ısı geçiş miktarı ($kJ\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_{E2}	Yoğun faz ve kabarcıklı faz arasında birim yatak hacminde dz boyunca anlık ısı geçiş miktarı ($kJ\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_{E1T}	Katı ve yoğun faz arasında birim yatak hacminde tüm yükseklik boyunca anlık ısı geçiş miktarı ($kJ\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_{M1}	Katı ve yoğun faz arasında birim yatak hacminde dz boyunca anlık kütle geçiş miktarı ($kg\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_{M2}	Yoğun faz ve kabarcıklı faz arasında birim yatak hacminde dz boyunca anlık kütle geçiş miktarı ($kg\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_{M1T}	Katı ve yoğun faz arasında birim yatak hacminde tüm yükseklik boyunca anlık kütle geçiş miktarı ($kg\ s^{-1}\ m^{-3}$)
f_w	Tablo 2.4'de tanımlanan duvar etkisi faktörü,
G	Yatak kesit alanı başına düşen hava kütle debisi ($kg\ m^2 s^{-1}$)
g	Yerçekimi katsayısı (m/s^2)
H	Özgül entalpi (kJ/kg)
h	Katı ve yoğun faz arasında etkin geçiş katsayısı [$kg\ s^{-3}\ (^{\circ}C)^{-1}$]
h_{sb}	Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)

$h_b a_1$	Kabarcıklı ve yoğun faz arasında hacimsel geçiş katsayısı $[kg\ m^{-1}\ s^{-3}]$
J	Hacimsel akı (m/s)
J_{g0}	Gazın görünür hacimsel akısı (m/s)
J_{gt}	Gazın taneye göre hacimsel akısı (m/s)
K	Toplam ısı geçiş katsayısı (kW/m^2K)
k_g	Denklem 3.33 'deki gaz geçiş katsayısı ($kg\ s^{-3}$)
k_s	Katı ve yoğun faz arasında etkin kütle geçiş katsayısı ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)
$k_{s1} a_1$	kabarcık ve yoğun faz arasında hacimsel kütle geçiş katsayısı ($kg\ m^3 s^{-1}$)
L	Genişletilmiş yatak yüksekliği (m)
m	Kütle (kg)
P	Basınç (Pa)
$\dot{Q}_{duvar}$	Akışkan yataklı kurutucudan olan anlık ısı kaybı (kW)
RH	Bağıl nem (%)
T	Sıcaklık (K)
T_a	Ortam sıcaklığı (K)
T_g^M	Yatak yüksekliği boyunca gaz sıcaklığı ortalaması (K)
$\mathbf{T_R}$	Referans hal sıcaklığı (=273.15 K)
t	Zaman(s)
U	Yüzeysel gaz hızı (m/s)
U_∞	Terminal hız (m/s)
u_a	Ortalama kabarcık hızı (m/s)
u_b	Tek kabarcığın hızı (m/s)
V	Hacim (m^3)
V_{yat}	Yatak hacmi (m^3)
$\mathbf{X_i}$	d_i çapındaki tanelerin sistem içindeki kütlesel oranı
x_1	Denklem (3.28)'de tanımlanan parametre
Y_s	Katı nem oranı (kg-su buharı/ kg-kuru tane)
Y_g^*	Denge halindeki nem oranı(kg-su buharı/ kg-kuru tane)
Y_{scr}	Kritik nem oranı(kg-su buharı/ kg-kuru tane)
z	Yükseklik (m)

Yunan Harfleri

δ	Kabarcık yoğunluğu(-)
ε	Boşluk oranı (-)
$\emptyset$	Küresellik Katsayısı (Şekil faktörü)
μ	Vizkozite ($kg\ s^{-1}\ m^{-1}$)
ρ	Yoğunluk(kg/m^3)

Alt indisler

0	Giriş değeri
a	Akışkan
b	Kabarcık, kabarcık fazı
g	Gaz
i	Yoğun faz
l	Su
ma	Minimum akışkanlaşma
mb	Minimum kabarcıklaşma
s	Katı
sür	Sürtünme
t	Katı tane
v	Su buharı
yat	Yatak

Boyutsuz sayı

$\mathbf{Re_t}$	Katı tanenin Reynolds sayısı
$\mathbf{Re_\infty}$	Terminal hız Reynolds sayısı
Na	Arşimet sayısı (Ar)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Geldart B ve D ürün gruplarına ait taneler için akış rejimleri.....12
Çizelge 3.1 : Tasarımda kullanılan model parametreleri.....26
Çizelge 4.1 : Simülasyonda kullanılan deney giriş verileri. 28
Çizelge 4.2 : Simülasyonda kullanılan ürün giriş değerleri. 29

ŞEKİL LİSTESİ

……..Sayfa

Şekil 2.1 : Bir parçadaki kurutma sürecinin şematik diyagramı - Ön-ısıtma Sabit Kurutma Hızı Azalan Kurutma Hızı Kuru Yüzey Dağılımı 5
Şekil 2.2 : Liptak'ın kabul ettiği; A-B'nin ön-ısıtma, B-C'nin sabit hız, C-D'nin azalan hız ve D-E'nin difüzyon aşamalarını gösterdiği kuruma eğrisi diyagramı ……6
Şekil 2.3 : Kuruma hızı bölgeleri diyagramı 7
Şekil 2.4 : Geldart parçacık diyagramı 11
Şekil 2.5 : Değişen faz boşluk oranlarıyla birlikte faz dağılımı.....13
Şekil 3.1 : Akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilmiş deneyler neticesinde elde edilmiş tohum kuruma eğrisi.....21
Şekil 4.1 : Simülasyonla hesaplanan çim tohumunun nem oranının zamanla değişiminin deneysel verilerle karşılaştırılması; $(Y_s - Y_s^*)/(Y_{s0} - Y_s^*)$...30
Şekil 4.2 : Deneysel ve simülasyonla hesaplanan tane nem miktarının zamanla değişimi……..……..……...31
Şekil 4.3 : Havanın nem miktarının deney 2 değerleriyle karşılaştırlması.....32
Şekil 4.4 : Hava sıcaklığının zamanla değişimi: Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması 32
Şekil 4.5 : Akışkan yataklı kurutucuda tohumun nem oranının zamanla değişimi: Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması 33
Şekil 4.6 : Havanın nem miktarının zamanla değişiminin deneysel verilerle karşılaştırılması 33
Şekil 4.7 : Sıcaklık değişiminin deney 1 ile karşılaştırılması 34
Şekil 5.1 : Zamana bağlı minimum akışkanlaşma hızı ve yatak hızı değişimi 35
Şekil 5.2 : Kabarcık çapının z boyunca değişimi – dz=H/5.....36
Şekil 5.3 : Çim tohumunun simülasyondan Çap (a) ve kütle (b)değişimi 36
Şekil 5.4 : Boşluk oranı (a) ve Minimum akışkanlaşma hızı (b) değişimi .....…….37
Şekil 5.5 : Basınç kaybının zamanla değişimi 37
Şekil 5.6 : Çizelge 4.1'deki deney 2'nin giriş değerleriyle tohum nem miktarının değişimi.....38
Şekil 5.7 : Sıcaklık değişiminin deney 1 ile karşılaştırılması 39
Şekil 5.8 : Yatak yüksekliğinin boşluk oranındaki etkisi 40
Şekil 5.9 : Ürün cinsi değişerek kurutma modellerinin karşılaştırılması……...41

AKIŞKAN YATAKLI KURUTCU MODELLEMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, çim tohumunu kurutmak için tasarlanmış bir akışkan yataklı kurutucunun üç fazlı modeli ve simülasyonu geliştirilmiştir. Bu yeni modelde, kinetik kurutma denklemi ile nem oranındaki değişim, sabit oranlı ve azalan oranlı (difuzyon kontrollü) olarak incelenmiş ve modele dahil edilmiştir. Tohumun su kaybından kaynaklanan şekil ve çap değişikliği akışkan yataklı kurutucuda meydana gelen kurutma işlemi boyunca dikkate alınmıştır. Akışkan yataklı kurutucu, katı ve gaz fazının homojen olarak dağıldığı yoğun faz ve gaz fazının kabarcıklar halinde olduğu kabarcıklı faz olarak iki bölgede modellenmiş ve buna ek olarak kurutulan katı tanelerin kütle ve enerji dengeleri ise ayrıca modellenmiştir. Yoğun faz ile kabarcıklı faz arasında ısı ve kütle geçisinin belirlenmesi sırasında kabarcık hızı ve boyutu göz önüne alınmıştır. Yoğun faz ve katı faz arasındaki ısı ve kütle geçişi ile kurutucu duvarından ortamdaki havaya olan ısı kaybı bilgisayar programının içine dahil edilmiştir. Modelin geçerliliğinin irdelenmesi amacıyla simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçları ile deney sonuçları iyi uyum göstermiştir. Geçerliliği ispatlanan model, farklı kurutucu parametreleri altında incelenmiştir.

MODELING AND ANALYSIS FLUIDIZED BED DRYER

SUMMARY

In this study, the dry grass seeds designed to model and simulate developed three-phase fluidized bed dryer. In this new model, changes of moisture ratio has been reviewed and incorporated into the to the kinetic drying equation model as constant speed and decreasing fast (diffusion controlled). The changes of shape and diameter of the seed, is caused by water loss, is taken into account in all drying process. Fluidized bed dryers are modeled as bubble phase and interstitial phase which solid and gas phase homogeneously distributed. Solid particles of mass and energy balances are also modeled separately. At determining heat and mass transfer between the bubble and dense phase, bubble velocity and size were taken into consideration. Heat and mass transfer between interstitial phase and solid phase and heat loss from the wall to the ambient air has been incorporated into computer programs. In order to examine the validity of the model, simulation results are compared with experimental results and simulation results showed good agreement with the experimental results. Prove the validity of the model is examined under different drying parameters.

1. GİRİŞ

Endüstriyel ve tarım ürünleri gibi bünyesinde nem bulunduran ürünlerin korunmasında önemli metotlardan biri de kurutmadır. Çoğu gıda alanındaki endüstriyel uygulamalarda, ürünün içerisindeki sıvının alınarak istenen nem seviyesine ulaşması için en az bir kurutma basamağı gerçekleşir. Kurutma genellikle ürün içindeki nemin katıdan gaz fazına taşıyarak alınması olarak ifade edilir. Katılar için çeşitli kurutma metotları geliştirilmiştir ve her biri kendi karakteristiğine sahiptir. Tanecikli malzemelerin kurutulması için akışkan yatak ve sabit yatak kurutması gibi çeşitli kurutma teknikleri geliştirilmiştir. Kurutma işleminin termal etkinliği düşünüldüğünde akışkan yatak tekniği katı tanecikli maddeler için daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Isıl etkenlik göz önünde bulundurulduğunda ise kurutucu akışkan yatak uygulamaları en etkili yöntemlerden biridir ve çeşitli kurutma uygulamalarına da uygundur. Zira akışkan yataklarda katı tane ile gaz fazının temas alanı çok fazla olup, yoğun ısı ve kütle geçişiyle tanenin tüm yüzeyinden kısa sürede nemin çekilmesine olanak vermektedir. Bilhassa gıda sektörünün yanı sıra, kimya, metalürji ve ilaç endüstrisinde de akışkan yataklar yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Kurutma işlemini karakterize eden herhangi bir işlem kaçınılmaz şekilde malzemenin fiziksel yapısına yani şekil değişimine ve öz kütlesine bağlıdır. Kurutulan maddeler su kaybından kaynaklı olarak hacimsel değişime maruz kalırlar. Bu değişim kurutma işlemi boyunca sürer ve katının fiziksel özelliklerini ve iletim özelliklerini de etkiler.

Çoğu meyve ve sebze kurutulmasında gerek hacimlerinde gerekse ısı ve kütle geçiş alanlarında önemli değişim oluşur. Bu işlem esnasındaki değişim, tane yüzeyinin altındaki dokudan kısmı su kaybı ile gerçekleşir.

1.1 Tezin Amacı

Akışkan yataklı kurutucular hakkında bugüne kadar çeşitli çalışmalar yapılmakla birlikte tüm çalışmaların ortak noktası yığın kütle aralığı şeklindedir.

Bu çalışmanın amacı nemli bir katı maddenin kabarcıklı akışkan yatak ile kurutulmasında katı, katı+gaz ve gaz fazının ayrı ayrı ele alarak zamana bağlı modellenmesidir. Model kapsamında hazırlanan bünye denklemleri ayrıklaştırılarak bir bilgisayar programı hazırlanmış ve MATLAP ile çözülmüştür.

Elde edilen modelin, simülasyon sonuçları farklı cins katı maddeler ile yapılmış deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak geçerliliği irdelenmiştir. Daha sonra farklı işletme parametrelerinin değişimi de irdelenerek tasarıma katkı sağlayacak öneriler getirilmiştir.

1.2 Literatür Özeti

1950'lerin sonunda J.F Davidson temel mühendislik prensiplerini akışkan yatak profiline uygulayarak önceki çalışmalara teorik bir açıklama getirdi.

Gaz akışkanlaştırılması ticari olarak ilk Fritz Winkler tarafından kömür tozunda metan elde etmek için kullanıldı. Kömürün gazlaştırılması 1922 yılında patentleşmesine karşın ilk ticari amaçlı üretimine 1926 yılında başlanır [21].

Akışkan yataklı kurutucular hakkında bugüne kadar çeşitli deneysel [1,2] ve teorik [3] çalışmalar yapılmıştır. Teorik çalışmalar genel olarak homojen model esas alınarak gaz ve katı ortalama değerleri üzerinden modelleme yapılmıştır. Bazı modeller ise hidrodinamik ve termodinamik koşulların enerji etkinliği ve ekserji etkinliği üzerindeki etkisi analiz edilmiştir[4,5].

Bazı çalışmalarda, yapılan modellemelerde sistem katı faz, yoğun faz ve kabarcıklı faz olarak üç faz olarak ele alınmış ve gaz hareketinin modellenmesi amacıyla yatak yüksekliği boyunca olan değişim kontrol hacimlerine bölünerek hesap edilmiştir [1,2].

Akışkan yatak süreçlerini örneklemek amacıyla; kütle, momentum ve ısı geçişi için taşınım olayları prensipleri Mikami ve ark. [6], Hjertager [10], Wang ve Chen'in modelleri [7,8] ile Seibert ve Burn'ün [9] daha gelişmiş modeli gibi pek çok çalışmada kullanılmıştır. Ancak; bunların matematiksel karmaşıklığı, hesapsal yükü ve deneysel sonuçların tamamen teorik bir temelde kesin öngörülerde bulunmaya imkan vermemesi sebebiyle, bu alternatifler endüstriyel uygulamalar için hala uygun değildirler.

1.3 Bu Çalışmada Yapılanlar

Bu çalışmada literatürde yayınlanan çalışmalara da katkı sağlayacak şekilde üç fazlı ve zamana bağlı modelleme yapılmış ve literatürde yayınlanan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Katı fazın kurutulması sabit oranlı kuruma ve azalan oranda kuruma olmak üzere iki kademeli olarak ele alınmıştır.

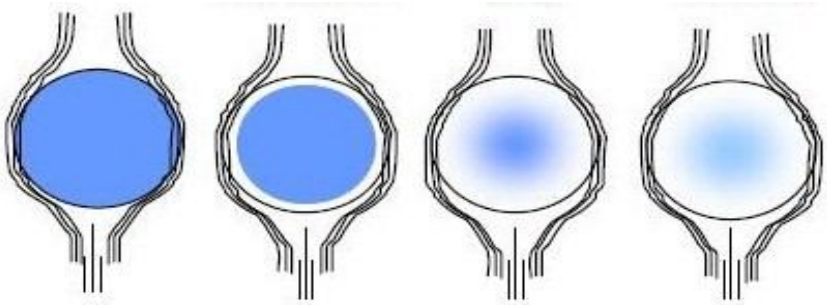
Kurutucu üç faza ayrılarak incelenmiştir. Akışkan yataklı kurutucu öncelikle yoğun faz ve kabarcıklı gaz fazı olarak ele alınmıştır. Bunun yanı sıra, kurutulan üründeki nem, sıcaklık, yoğunluk gibi termofiziksel özelliklerini, yatak özellikleriyle değişimini de incelemeye alarak vermesi için katı taneler ayrıca modellenmiştir. Bu çalışmanın amacı nemli bir katı maddenin kabarcıklı akışkan yatak ile kurutulmasında katı, katı+gaz ve gaz fazının ayrı ayrı ele alarak zamana bağlı modellenmesidir. Model kapsamında hazırlanan bünye denklemleri ayrıklaştırılarak bir bilgisayar programı hazırlanmış ve MATLAP ile çözülmüştür. Kurutma işlemini modellemek amacıyla parametreler içeren linear olmayan diferansiyel denlemler kullanılmıştır. Yatak yüksekliği boyunca gazın kütle ve enerji değişimi eşit kontrol hacimlerine bölünerek hesap edilmiştir. Kontrol hacminde bu denklemlerin çözümü için numerik kodlar geliştirilmiştir.

2. AKIŞKAN YATAK VE AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCULAR

2.1 Kurutma ve Kuruma Eğrisi

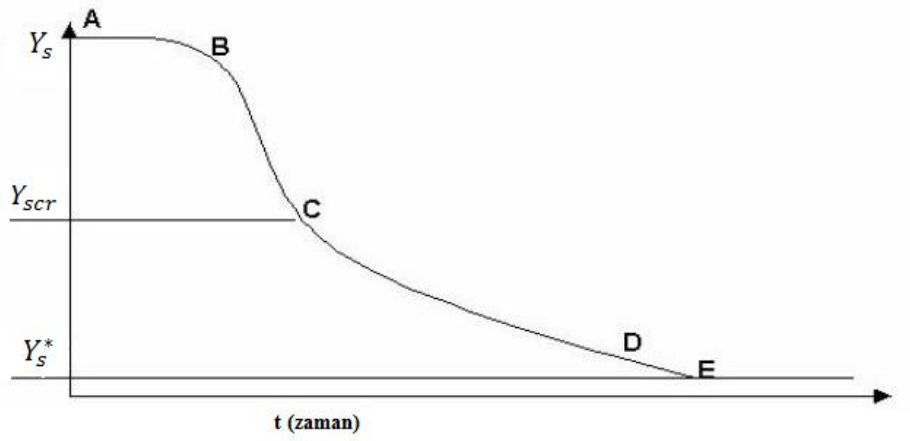
Kurutma terimi, aynı anda gerçekleşen ısı ve kütle geçişiyle sıvının buharlaştırılarak katıdan uzaklaştırılması olarak tanımlanır. Kurutma işlemi sırasında buharlaştırma için gerekli olan ısı ürüne sağlanır ve içerdiği nemin bir kısmı buharlaşarak kuru ortam tarafından alınır. Isı, taşınım yoluyla çevreden tane yüzeyine, oradan da yine konveksiyon yoluyla katı tanenin daha da içlerine taşınır. Nem ise önce ürün yüzeyine taşınıp buharlaştırılır ve taşınım ve iletimle yoluyla çevreye geçer. Isı geçişi hava sıcaklığına, bağıl neme, hava akışına, ortama ve basınca bağlıdır.

Katı tane bünyesinde bulunan nem kurutmaya etkisi itibariyle iki ayrı şekilde ele alınır. Bunlar tanenin yıkanması ya da her hangi başka bir nedenden kaynaklı olarak yüzeyinde bulunan nem ile katı tanenin içine nüfus etmiş olarak bulunan nemdir. Katı taneler kurutucu türüne bakılmaksızın, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi dört aşamada kurutulur. Öncelikle, tane gereken sıcaklığa dek ısıtılır, sonrasında ıslak yüzeydeki nem buharlaştırılır. Böylece tane kısmen kuru hale gelir. Son olarak; tane buharlaşma ve difüzyon yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla tamamen kurutulur [20]. Şekil 2.1'de tanelerin iç kısımlarında kullanılan mavi rengi ile tanenin içerisindeki nem miktarı gösterilmiştir



Şekil 2.1 Bir katı tanenin kurutma sürecinin şematik diyagramı – (a) Ön-ısıtma (b) sabit oranlı kurutma (c) azalan oranda kurutma (d) kuru yüzey dağılımı.

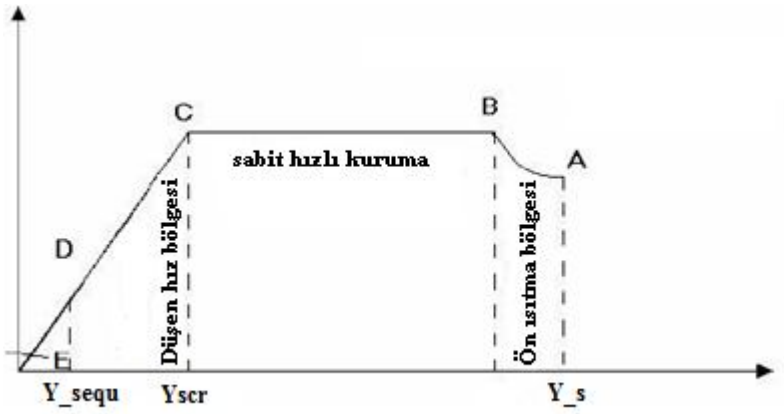
Kurutulan madde ile kurutan ortam arasındaki eş zamanlı ısı ve kütle geçişi, genel olarak madde nem oranının zamana bağlı değişimini gösteren bir kuruma eğrisi ile gösterilir. Bir başka deyişle, Kuruma Eğrisi tanenin sıvı kütle miktarının kuru katı kütle miktarına oranı olan nem oranının (Y_s) zamanla değişimini veren diyagramdır. Şekil 2.2'de, tipik kuruma eğrisi örneği verilmiştir [20]. Buradaki Y_s kurutulan ürünün ilk nem oranını, Y_{scr} kritik nem oranını, Y_s^* ise dengeye ulaştığındaki nem oranını gösterir. Şekil 2.2'deki A-B zaman adımı, ürünün ön-ısıtma yapılan süreyi temsil etmektedir. Bu işlem esnasında ilk Y_s nem oranında bir miktar azalma gözlenir. Bu azalma, katı tanenin dış yüzeyinde bulunan sıvı haldeki nemin uzaklaştırılmasından kaynaklanır. Maddeyi ilk kurutma sıcaklığına getirmek için bir miktar ısı gerektiğinden, buharlaşma bu aşamada yavaş olur. Sonraki B-C zaman adımında, yüzey nemi sabit bir hızda buharlaşır. Bu esnada katı yüzeyinin film sıcaklığı, ürünle doğrudan temasta olan havanın yaş termometre sıcaklığıdır [20]?. Tanenin yüzey nemi buharlaştığında buharlaşma hızı düşer (kısım C-D). Bu olay, kısmen yüzeyin sertleşmesinden, kısmen de suyun tanenin gövdesinden difüzyonla yüzeye taşınmasında esnasında mesafenin uzamasından kaynaklanır. Eğrinin D-E kısmında da gösterildiği gibi; katı, bağıl nem bulunduruyorsa, bağıl nem yüzeye dağıldığından, bu hız daha da düşecektir.



Şekil 2.2: Kuruma eğrisi diyagramı.: A-B ön-ısıtma, B-C sabit oranda kurutma C-D azalan oranda (difüzyon kontrollü) kurutma D-E düşük hızda (difüzyon kontrollü) kurutma.

Nem oranının zamana bağlı türevi, kuruma hızı olarak bilinir. Şekil 2.3'te kuruma hızı dört aşamada gösterilmiştir. Kuruma hızı, (A-B) döneminde kurutma için gerekli olan sıcaklığa kadar ısıtılır ve istenen sıcaklığa gelinceye kadar nem oranında bir miktar azalma gözlemlenir. Sabit dönemde (B-C) ise, parça yüzeyi ve kurutma aracı arasındaki ısı ve kütle geçişinin hızı gibi dış faktörlerce kontrol edilir. Azalan oran (C-D) döneminde ise ısı iletimi ve parça içindeki nemin dağılımı hız belirleyici bir olaydır. Bu bölgede kuruma hızı, uygulamada akışkanlaştırmadan etkilenemeyecek olan iç kuruma faktörlerine bağlıdır. Kuruma zamanı genellikle, *sabit* ve *azalan oranlar* olarak adlandırdığımız iki süreçtir.

Yaş katının kuruma hızı; katı tane ve tanenin içerdiği sıvı yüzey alanı, kütle transfer katsayısı ve nem oranı arasındaki farklılığın bir fonksiyonudur.



Şekil 2.3: Kuruma hızı bölgeleri diyagramı.

Kurutma işlemi kurutulacak malzemenin sürekli olarak kurutucuya beslenmesi ya da tüm kurutulacak malzemnin kurutucuya yerleştirilerek istenen nem oranına ulaşıncaya kadar kurutucuda tutulduğu süreksiz (kesintili) kurutma olarak iki yöntemle uygulanabilir. Süreksiz kurutmada, k_g gazın kütle geçiş katsayısının kurutma aşamalarının her biri için sabit olması beklenebilir. Ancak bu tüm süreç için beklenemez. Bunun sebeplerinden biri, nem oranı kritik noktaya ulaştığında, nem yüzey filminin buharlaşma ile oldukça azaltılmış olmasıdır. Daha fazla kurutma yapıldığında yüzeyde kuru lekeler oluşur. Bu noktada, difüzyon ile kütle geçişi tüm sürece hakim olur.

A-B zaman adımında ön ısıtma gerçekleşir. Zamanla sıcaklıktaki artış ile A-B zaman adımında tanenin yüzeyinden buharlaşma görülmeye başlar. Şekil 2.3'te A'dan B'ye doğru kuruma hızında görülen artış sıcaklığın sabit olmayışı nedeniyle buharlaşma hızının giderek sıcaklıkla beraber artmasından kaynaklıdır. B-C aralığında kuruma hızı sabittir ve bu periyotta kurutma, katı tanenin kurutucu ortam ile temas eden yüzeyi boyunca meydana gelen ısı ve kütle geçişinin hızına bağlı olarak kontrol edilir. Bu periyotta hava istenen sıcaklığa ulaşmıştır ve kuruma tanenin yüzeyindeki suyun buharlaşmasıyla gerçekleştiği için kuruma hızı sabittir. D-C aralığında kuruma hızı azalır. Bu süreçte difüzyon kontrollü kurutma gerçekleşir. Bu nedenle kuruma hızında azalma gözlenir.

2.2 Akışkanlaştırmanın Tanımı

Kurutma gibi pek çok teknolojik işlemde, çoğu zaman taneli materyali bir akışkan (gaz ya da sıvı) ile yakın temasa geçirmek gerekir. En basit uygulama şekilerinde; akışkan, birbirleri üzerinde oturmuş ve birbirlerine göre veya kanalın duvarlarına göre statik durumda olan parçacıklardan oluşan taneler arasından geçirilir. Akışkan geçerken taneler sabit kalıyorsa bu duruma *sabit yatak* adı verilir. Taneler arasındaki boşluklardan akan akışkanın hızı; serbest kesitteki, yüzey hızı olarak bilinen hızından daha büyüktür. Akışkan hızının tanelere sıvılarınkine benzer özellikler kazandırmaya başladığı hıza "minimum akışkanlaştırma hızı", ve bu durumdaki tane yatağına da *akışkan yatak* adı verilir. Akışkanlaşmış bir yatakta bulunan katı taneler akışkan içerisinde yüzerek karışırlar.

2.3 Akışkan Yataklı Kurutma

Akışkan yatak teknolojisi kurutma, akışkanlaştırarak ufalama ve kaplama aşamalarında sıklıkla kullanılır. Vojitech'in de belirttiği gibi; akışkan yataklı kurutucu, tepsili kurutucu ya da vakumlu kurutucuya oranla çok daha hızlı kurutur [11]. Ayrıca akışkan yataklı kurutucu, ürünün tüm yüzeyini büyük hacimli bir hava akımına maruz bırakır. Böylelikle ısı, taşınım yoluyla ürüne geçer. Ancak; giriş hava hızı iyi ayarlanmadığında sabit ve eşit bir kuruma elde edilemez. Robinson, akışkan yataklı kurutuculardaki eşitliğin elde edilebilmesinde giriş noktasındaki hava hızının öneminden bahsetmiştir [12].

Akışkan yataklı kurutucular, yatay ve düşey olmak üzere iki çeşittir. Akışkan yataklılı kurutma süreksiz ya da sürekli olarak yapılabilir. Akışkan yataklı kurutucularda, ısıtılmış hava fan aracılığı ile altından tel örgü ile desteklenen bir kurutma odasında bulunan ıslak maddenin arasından yukarıya doğru hareket eder. Bu kurutma tipinde taneler hareket etmez ve istenilen nem oranına ulaşıldığında hava akımı kesilir ve kurutucudan ürün dışarı alınır. Sürekli kurutmada ise ıslak madde sürekli olarak kurutucuya girer; istenen nem oranına gelen kuru madde ise sürekli olarak kurutucudan dışarıya alınır. Bu sistemde akışkan yataklı kurutucu hiç durdurulmaz. Sürekli yatay kurutucuların, katı taneleri birim boyunca hareket ettirecek titreşimli bir taşıyıcısı bulunur. Hava akımı ve sıcaklığın bağımsız kontrolüyle bu kurutucu pek çok bölüme ayrılabilir. Ayrıca; Kurutucuda havanın hızı genellikle katıların iyice karışmasını ve gaz ile tanelerin sürekli temas halinde olmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. Bu durum akışkan yataklı kurutmanın temel bir özelliğidir.

2.4 Akışkan Yatağın Hidrodinamik Yapısı

Akışkanın hızı, akışkan yatağın davranışını şekillendirir. DiMattia et al. akışkanlaşma hızının büyük taneler üzerindeki etkisini göstermiştir [14]. Yatağı yüksek akışkan hızında çalıştırmaya gerek yoktur. Akışkan yatak, düşük akışkan hızında daha etkin çalışır ve kurutma süresi kısaldığı için daha az enerji harcar.

Fazla nem oranına sahip bir ürün akışkanlaşma işlemi esnasında ürünün davranışını etkileyebilir. Minimum akışkanlaşma hızı ürünün nem oranına bağlıdır ve nem oranındaki artış minimum akışkanlaşma hızını da arttırır.

Akışkanlaşacak malzemenin şekli ve ölçüleri akışkanlaşmanın kalitesine ve akışkanlaştırmak için gerekli olan gaz akış oranına etki edecektir. Küçük parçacıklar (10μm'den küçük) toplanabilir ve nemliymiş gibi hareket edebilir. Büyük parçalar (0.25mm'den büyük) tıkaç akışa ve yatak kararsızlığına neden olabilir. Bu iki değer arasındaki tanelerin akışkanlaştırma için en iyi ölçü aralığında oldukları düşünülebilir. Yatağa en uygun ve iyi parçayı koymak tabi ki en iyi akışkanlaşma sonucunu verecektir [13]. Parçaların şekli, akışkanlaşma seviyesi ve yatağın boşluk oranını etkileyecektir. Küresel olmayan malzemeler daha iyi akışkanlaşırlar. Kurutulacak tanelerin çap ve yoğunluğuna bağlı olarak sınıflandırılmaları ve

akışkanlaşma şeklinin analizi çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmış olmakla beraber en yaygın ve en doğru sonuç veren Geldart [19] modelidir.

Kurutma işlemlerinde çoğu durumda kurutulacak taneler şekilsizdir. Bu nedenle taneyle aynı hacme sahip kürenin çapına eşdeğer tane çapı ve şekil faktörü tanımlanır. Bu yöntemde şekil faktörü aynı hacme sahip kürenin yüzey alanının tanenin yüzey alanına bölünmesi ile bulunan bir orandır. Küresellik katsayısı da şekil faktörü küre için 1 iken diğer şekiller için 0 ile 1 arasında bir değer alır. [15]?.

Akışkanlaştırılan taneler eğer eş boyutlara sahip değilse "çap dağılımının" tanımlanması gerekir. Bu sürekli akış ya da süreksiz akış için tanımlanabilir. Süreksiz akış durumu için x_i, i'inci boyut grubundaki tanelerin ağırlık oranını temsil etmektedir. Akışkan yatak hesabında tanenin yüzey alanı önemli olduğundan tüm dağılım için ortalama bir yüzey dağılımı tanımlamak gereklidir. Tüm x_i ağırlık sınıfları için a'değerleri eklenerek elde edilebilir.

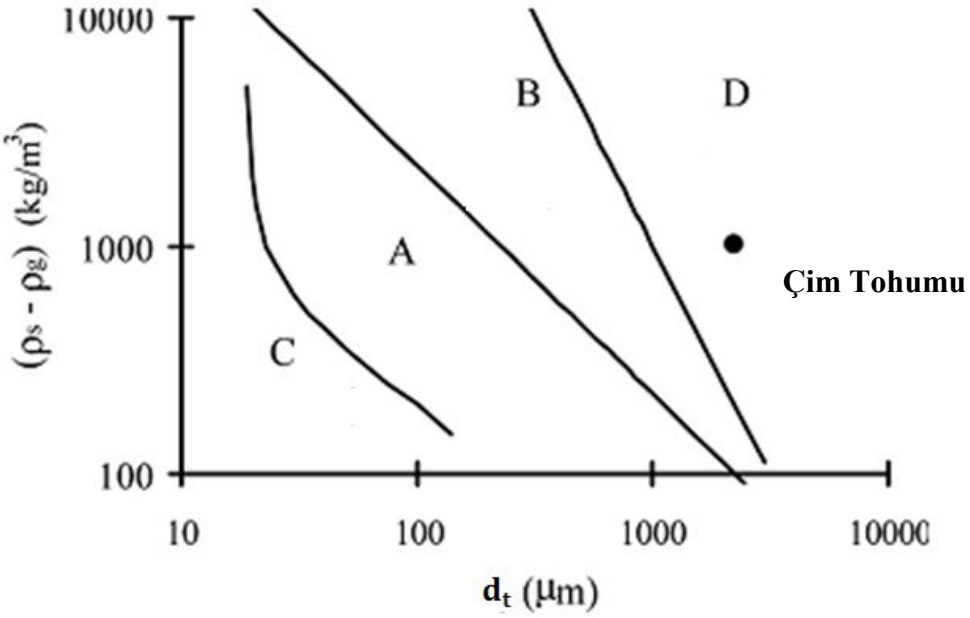
$$\bar{a}' = \Sigma^i \; a'_i x_i = \Sigma^i \; \frac{6x_i}{(\emptyset d_t)_i} \qquad \textbf{(2.1)}$$

$$a'_i = 6/(\emptyset d_t) \qquad \textbf{(2.2)}$$

$$\bar{d}_t = \Sigma^i \; \{(x_i/d_t)_i\}^{-1} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Akışkan yatak boşluk oranı çeşitli korelasyonlar aracılığıyla tahmin edilebilmektedir [16, 12?]. Ancak, bunlar ölçüleri değişken malzemeler için uygun değildirler.

Geldart tane diyagramında taneler boyutları, yoğunlukları ve akışkanlaştıklarındaki davranışlarına göre değişik kategorilere ayrılır. Şekil 2.4'deki diyagram Geldart tarafından tanelerin sınıflandırılması için önerilmiştir [19]. Bu diyagramda parçalar A, B, C, D olmak üzere dört farklı grupta gösterilir.



Şekil 2.4: Geldart tane diyagramı.

A grubu tanelerin çapları 75~150μm ve yoğunlukları 1 ile 1.4g/cm³ arasında değişmektedir. Bu taneler kolaylıkla akışkanlaştırılacak özelliktedirler. A grubu tanelerden farklı olarak B grubu tanelerin yataklarında kabarcık oluşabilmesi için gaz hızının minimum akışkanlaşma hızına ulaşması gerekmektedir. C grubu taneler un, nişasta gibi ince ve toz halindedirler. Taneler arasındaki güçlü çekim kuvveti nedeniyle akışkanlaştırılmaları oldukça zordur. D grubu taneler diğer gruplara göre daha büyük ve yoğun tanelerdir. D grubu tanelerin çapları 500μm'den büyüktürler.

Genellikle kurutmada tane çap ve yoğunlukları ile akışkanlaştırılan gazın özellikleri incelendiğinde geldart ölçeğinde B ve D grubuna uygun olduğu gözlenmektedir. Aşğağıdaki tabbloda bu gruplara düşen katı taneler için akışkanlaştırma ve akışkan yatak özellikleri görülmektedir.

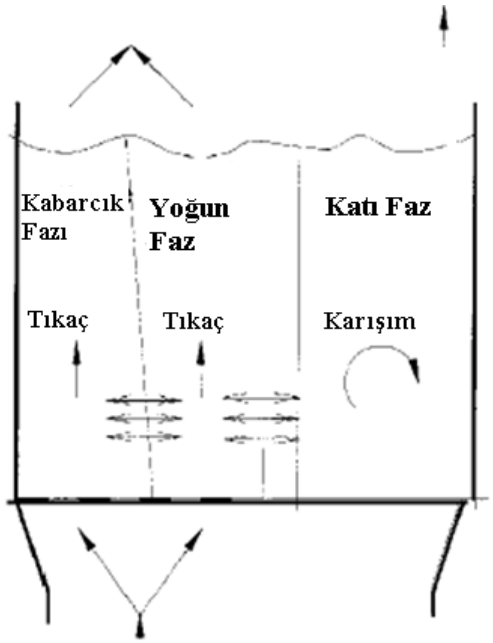
Çizelge 2.1: Geldart B ve D ürün gruplarına ait taneler için akış rejimleri.

Geldart Tane Grubu	Akış Özelliği
Geldart B	$\frac{U_{mb}}{U_{ma}} < 1$ ise akışkanlaşma normal Yatak Genişlemesi: makul $\frac{U_{mb}}{U_{ma}} < 1$ ise akışkanlaşma normal
Geldart D	$\frac{U_{mb}}{U_{ma}} = 1$ ise akışkanlaşma normal Yatak Genişlemesi: Düşük $d_b = 2.25 * z^{0.81}(U - Umb)^{1.11}$
Akış parametreleri	Kabarcıklı ve tıkaç akış için hızlar Kabarcıklı akış $u_b = f_w(c_1\sqrt{g} * d_b)$ $u_a = (U_g - U_{ma}) + u_b$ Geldart B grubu için $c_1 = 0.50$ Geldart D grubu için $c_1 = 0.71$ Eğer $\frac{d_b}{D} < 0.125$ ise $f_w = 1$ Eğer $0.125 < \frac{d_b}{D} < 0.6$ ise $f_w = 1.13 * \exp\left(\frac{d_b}{D}\right)$ Eğer $\frac{d_b}{D} < 0.6$ ise $u_b = 0.35(\sqrt{g} * d_b)$ $u_a = (U_g - U_{ma}) + u_b$ Kabarcık yoğunluğu $\delta = 1.0 - \frac{L_{ma}}{L} = \frac{\psi(U_g - U_{ma})}{u_a}$

Geldart'ın B grubuna ait taneler için katı varlığını, kabarcık fazı hesabına katan bir parametreden modelinde faydalanmıştır [18]. Ayrıca, modelinde sabit kuruma ve azalan oranda kuruma eğrilerini de içine alan bir kuruma eğrisi kullanmıştır. Bu model kabarcıklı gaz fazında gazın akışını açıklar niteliktedir.

D grubu taneler diğer gruplara nispeten daha büyük boyutludurlar. Bu grubun hidrodinamiği iki fazlı akış tekniğiyle elde edilen bazı sapmalara işaret etmiştir. Kabarcıklar çok hızlı büyür ve herhangi bir yolu takip etmez. A ve B tipi toz parçaları için durum biraz daha farklıdır. Kabarcık yatak boyunca yükseldikçe çapı ve hızı da buna bağlı olarak yatak yüksekliğiyle artar. Bu çalışmada ortalama kabarcık çapı alınmış ve kabarcıkların boyutunun yatak boyunca yükseldikçe ortalama kabarcık çapında sabit olduğu kabul edilmiştir.

Fazların boşluk oranları, sabit kabarcık çapı kabulüne uygun olarak yatak boyunca sabit alınmıştır. Ancak D grubu parçacıkları için sabit kabarcık çapı kabulü uygulanamaz. Kabarcıklı faz boyunca gaz debisi ortalama bir zaman periyodunda sabit düşünülebilir ve kabarık hızı yukarı çıkıldıkça artar. Süreklilik denklemi yatak yüksekliği boyunca kabarcık boşluk oranının azalmasını gerektirir. (Şekil 2.5). Katı faz boşluk oranı yatak boyunca sabit olarak alınabilir. Faz boşluk oranlarının, Şekil 2.5'te katı fazda sabit, kabarcıklı fazda azalan ve yoğun gaz fazında da artan bir oranda yatak boyunca ilerlediği gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Değişen faz boşluk oranlarıyla birlikte faz dağılımı.

Yukarıdaki düşünceler ışığında akış düzeninin modellenmesi için akış korelasyonları kullanılmıştır.

2.5 Akışkan Yataklı Kurutucularda Kurutma Modelleri

Akışkan yatak süreçlerini örneklemek amacıyla; kütle, momentum ve ısı geçişi için taşınım olayları prensipleri Mikami ve ark. [6], Hjertager [10], Wang ve Chen'in modelleri [7,8] ile Seibert ve Burn'ün [9] daha gelişmiş modeli gibi pek çok çalışmada kullanılmıştır. Ancak; bunların matematiksel karmaşıklığı, hesapsal yükü ve deneysel sonuçların tamamen teorik bir temelde kesin öngörülerde bulunmaya imkan vermemesi sebebiyle, bu alternatifler endüstriyel uygulamalar için hala uygun değildirler.

S. Syahrul tarafınfan, büyük taneli ürünlerin akışkan yataklı kurutucular sürecinde termodinamik analizinin giriş ve çıkış durumlarına gerçekleştiren bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada buğday ve mısır olamk üzere iki malzeme incelenmiş ve incelenen bu ürünlerin giriş nem oranı, giren havanın sıcaklığı, ve akış hızı gibi termodinamik ve hidrodinamik ekserji ve enerji etkinliği analizi yapılmıştır. Bu çalışmada giren havanın sıcaklığının termodinamik özellikleri üzerinde bir etkisi gözlenmiştir. Bu etki farklı ürünlerin fiziksel durumlarına göre de değişebilmiştir [5]. Bir başka modelde de yine kurutma işleminin termodinamik analizi yapılırken ekserji hesabı kullanılarak işmenin etkinliği ve performansı ele alınmıştır [4].

Akışkan yataklı kurutucunun termal analizi ile ilgili bir çalışmada, D grubu taneler katı faz, kabarcıklı faz ve yoğun faz olarak modellenmiş ve kabarcıklı faz esnasında kabarcıkların yatak boyu yükseldiği, ancak kabarcık çapının sabit kaldığı kabul edilmiştir.[3]

Muhtelif sıcaklık ve hava akış hızlarında yapılan çalışmalarda nem oranındaki azalmanın hava akış hızı ve sıcaklığı artıkça artmakta olduğu gözlemlenmiştir [2].

3. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU MATEMATİK MODELLLEMESİ

Kurutma eş zamanlı ısı ve kütle geçişi sürecidir. Buharlaşma için tanelere gerekli olan ısı sağlanarak buharlaşan su kuru ortamdan alınır. Isı taşınım yoluyla çevreden tanelerin yüzeyine iletilir ve buradan iletim ve taşınım yoluyla tanenin içine ulaşır. Nem sıvı ya da buhar olarak aksi yolla taşınır ve yüzeyden buharlaşarak taşınım yoluyla çevreye geçer.

Bu çalışmada sunulan akışkan yataklı kurutucunun modellenmesinde, akışkan yataklı kurutucu hidrodinamik modeli ve katı tanelerin kurutulması ve kurutucu modeli olmak üzere iki aşamada modelleme tamamlanmıştır:

Yatak içinde kabarcıklı akışın modellenmesi için ilk adım olarak yatağın hidrodinamik yapısı incelenmiş ve modellenmiştir.

3.1 Akışkan Yatağın Hidrodinamik Modeli

Akışkan yatak hidrodinamik modeli kapsamında, yatağın hız aralıkları, boşluk oranı ve kabarcıklı çap değişimi ve basınç kaybı modellenmiştir. Bunun için önce kartı tane çap dağılımı ve eşdeğer çap hesaplanmıştır. Katı tane eşdeğer çap ve şekil faktörünün hesaplanmasında üründeki büzülmeden kaynaklı hacim değişimi buharlaşan suyun hacmine eşit alınmıştır.

Kurutma işlemi esnasında tanenin içerisinde bulunan su ile katının kütle ve hacmi ayrı hesap edilmiştir.

Su ve katı bolümden oluşan ürünün toplam kütlesi ve hacmi;

$$m = m_l + m_t \tag{3.1}$$

$$V = V_l + V_t \tag{3.2}$$

Ürünün yoğunluğu, tanenin toplam kütlesinin toplam hacmine oranı ile elde edilmiştir.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{3.3}$$

Nem oranı ise tanenin içerisindeki suyun kütlesinin kuru katı kütlesine oranı ile elde edilmiştir.

$$Y_s = \frac{m_l}{m_t} \quad \left(\frac{kg\ su}{kg\ katı}\right) \tag{3.4}$$

Kurutma işleminde temel değişken olan nem oranına bağlı olarak ürünün yoğunluk değişiminin hesabı yapılırken katı kısmının yoğunluğu ile sıvı kısmının yoğunluğu ayrı olarak ele almıştır.

$$\rho = \rho_t \frac{\rho_l(1+Y_s)}{\rho_l+\rho_t Y_s} \tag{3.5}$$

3.1.1 Çap dağılımı ve ortalama tane çapı

Ürünlerin hepsinin aynı şekil ve aynı hacimde olmaları beklenemez. Ayrı hacimlerde ve benzer şekillere sahiptirler. Bu nedenle ürün yığının içinde sahip oldukları kütle kadar temsil edilirler. Eşdeğer çap hesabından elde edilen çaplar ile aşağıdaki formül yardımıyla ortalama tane (ürün) çapı hesap edilmiştir.

$$\overline{d_t} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_i}{d_t}\right)} \tag{3.6}$$

Bu denklemde $X_i = d_{t,i}$ çapındaki tanelerin sistem içindeki kütlesel oranıdır.

Bir tane için eşdeğer çap, tane ile aynı hacme sahip kürenin çapına eşittir. Şekil faktörü (küresellik katsayısı) ise o ürünün yüzeyi ile aynı hacme sahip bir kürenin yüzeyi oranından bulunur. Şekil faktörü 0 ile 1 arasında bir değer alabilir. Bu değer küreler için 1'dir.

$$\emptyset = \left(\frac{Küre\ Yüzeyi}{Katı\ tane\ yüzeyi}\right)_{aynı\ hacme\ sahip} \tag{3.7}$$

3.1.2 Kurutmadan kaynaklı çap değişimi

Ürünlerin kurumadan kaynaklı nem kaybına uğraması ürünün kütlesinde değişime neden olduğu gibi hacminde de bir değişime neden olur. Dolayısıyla ürünün çapı da değişir. Çaptaki değişim hesabında, değişimin temel kaynağı nem oranı olarak alınmıştır ve böylelikle çaptaki değişim ürün hacmi değiştikçe nem oranına bağlı olarak hesap edilebilir hale gelmiştir.

$$m = m_i + m_t \; ; \quad m = m_t(1 + Y_s) \tag{3.8}$$

$$V = V_i + V_t \tag{3.9}$$

$$\rho = \rho_t \frac{\rho_l(1+Y_s)}{\rho_l+\rho_t Y_s} \tag{3.10}$$

$$d_t = \left(\frac{3m}{\pi} \left(\frac{\rho_l+\rho_t Y_s}{\rho_t * \rho_l (1+Y_s)} \right) \right)^{1/3} \tag{3.11}$$

3.1.3 Boşluk oranı hesabı

Tanelerin sahip olduğu aşırı nem, akışkanlaştırarak kurutma sürecinde tanenin hareketine etki eder. Tanenin sahip olduğu nem içeriği ve akışkanlaştıran gazın bağıl neminin akışkanlaştırma üzerindeki etkisi hakkında çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Yatakta akışkanlaşmanın gerçekleşip gerçekleşmediği ε boşluk oranı değeriyle ifade edilebilir. Akışkanlaşmanın görülmesi için boşluk oranının sınır değeri 0,4'tür. Bu değerin altında akışkanlaşma genellikle görülmez.

$$J_{gt} = (1 - \varepsilon) * J_g - \varepsilon * J_t \tag{3.12}$$

$$J_{gt} = U_\infty \varepsilon^n (1 - \varepsilon) \tag{3.13}$$

J_g akışkanın hacimsel akısı

$$J_a = \frac{V_a}{A} = \frac{U_a A_o}{A} \; ; \quad \frac{A_o}{A} : Boşluk\ oranı \tag{3.14}$$

$$(U_g)_{maks} = U_{ma} \tag{3.15}$$

$$Re_{\infty} = \frac{U_{\infty} d_t \rho_g}{\mu_g} \tag{3.16}$$

- $Re_{\infty} < 1000$ ise;

$$C_{D\infty} = \frac{24}{Re_{\infty}} (1 + 0.15 * Re_{\infty}^{0.687}) \tag{3.17}$$

- $Re_{\infty} > 1000$ ise;

$$C_{D\infty} \cong 0.44 \tag{3.18}$$

$$\varepsilon^{4.7} = \frac{3}{4} * \frac{C_{Dt} {Re_t}^2}{Na} \tag{3.19}$$

"Na" Arşimet sayısıdır ve bazı kaynaklarda "Ar" olarak gösterilir. "Na" sayısının tanımı şöyledir:

$$Na = Ar = \frac{d_t^3 * (\rho_s - \rho_g) * g}{\mu_g^2} \tag{3.20}$$

3.2 Akışkan Yatak Basınç Kaybı

Akışkan yataklı kurutucularda basınc kaybı hesabında belirleyici unsur akışkanlaşmanın gerçekleşip gerçekleşmediğidir.

Eğer $\varepsilon > 0.4$ ise akışkanlaşma gerçekleşir ve buna bağlı olarak basınç kaybı hesabı aşağıda belirtildiği şekilde yapılır.

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{sür} = g\left[\varepsilon * \rho_g + (1 - \varepsilon)\rho_s\right] \tag{3.21a}$$

Eğer $\varepsilon < 0.4$ ise akışkanlaşma yoktur. Basınç kaybı hesabında sabit yatak hesabı esas alınır.

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{sür} = 2 * C_s \frac{\rho_s * J_{g0}{}^2}{d} * \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \quad \textbf{(3.21b)}$$

$$C_s = {}^{90}/_{Re_g} \quad \textbf{(3.22)}$$

$$Re_g = \frac{\rho_g * J_{a0} * d}{(1-\varepsilon)\mu_g} \quad \textbf{(3.23)}$$

$$U_g = \frac{J_{g0}}{\varepsilon} \quad \textbf{(3.24)}$$

3.3 Minimum Akışkanlaşma Hızı

Ürünün içerdiği fazla nem oranı akışkanlaşmış kuruma işlemi esnasında tanenin hareketini etkiler [4]

Minimum akışkanlaşma hızı yataktaki tanelerin akışkanlaşmaya başladığı andaki gaz hızıdır. Akışkanlaşmanın başladığı bu duruma *minimum akışkanlaşma* denir.

Tanelerin sahip olduğu aşırı nem, akışkanlaştırarak kurutma sürecinde tanenin hareketine etki eder. Tanenin sahip olduğu nem içeriği ve akışkanlaştıran gazın bağıl neminin akışkanlaştırma üzerindeki etkisi üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar doğrultusunda minimum akışkanlaşma hızı ile ilgili genel bir korelasyon verilir.

Minimum akışkanlaşmanın hesap ve kontrolünde aşağıda tanımlanan geliştirilmiş Ergun Korelasyonu kullanılmıştır. "Re" Reynolds sayısını simgeler.

Eğer 20<Re<1000 ise;

$$\frac{175\bar{d}_t * \rho_g}{\mu_g * \emptyset * \varepsilon_{ma}} U_{ma}{}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{ma})}{\emptyset * \varepsilon_{ma}{}^3} U_{ma} = \frac{\bar{d}_t{}^2(\rho_s - \rho_g)g}{\mu_g} \quad \textbf{(3.25a)}$$

Eğer Re>20 ise;

$$U_{ma} = \frac{(\emptyset \bar{d}_t{}^2(\rho_s - \rho_g)g}{150 * \mu_g}\left(\frac{\varepsilon_{ma}{}^3}{1-\varepsilon_{ma}}\right) \quad \textbf{(3.25b)}$$

Eğer Re >1000 ise,

$$U_{ma} = \frac{\emptyset\, \bar{d}_t}{175} * \frac{(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g} * \varepsilon_{ma}{}^3 \qquad \textbf{(3.25c)}$$

3.4 Terminal Hız

Terminal hız (U_∞) tanenin yataktan dışarı çıkmasına neden olacak maksimum hızdır. Tanelerin yataktan çıkmaması için akış hızının terminal hızdan küçük olması gerekir.

$U_{ma} < U < U_\infty$

$$U_\infty = \left(\left(\frac{(3.1 * g * (\rho_s - \rho_g) * d_t)}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \qquad 500 < Re_\infty < 200000 \qquad \textbf{(3.26a)}$$

$$U_\infty = \left(\left(\left(\frac{4}{225}\right) * \left(\frac{(\rho_s - \rho_g)^2 * g^2}{\rho_g} * \mu_g\right)\right)^{\frac{1}{3}}\right) * d_t \qquad 0.4 < Re_\infty < 500 \qquad \textbf{(3.26b)}$$

$$U_\infty = \frac{g * (\rho_s - \rho_g) * d_t^2}{18 * \mu_g} \qquad Re_\infty < 0.4 \qquad \textbf{(3.26c)}$$

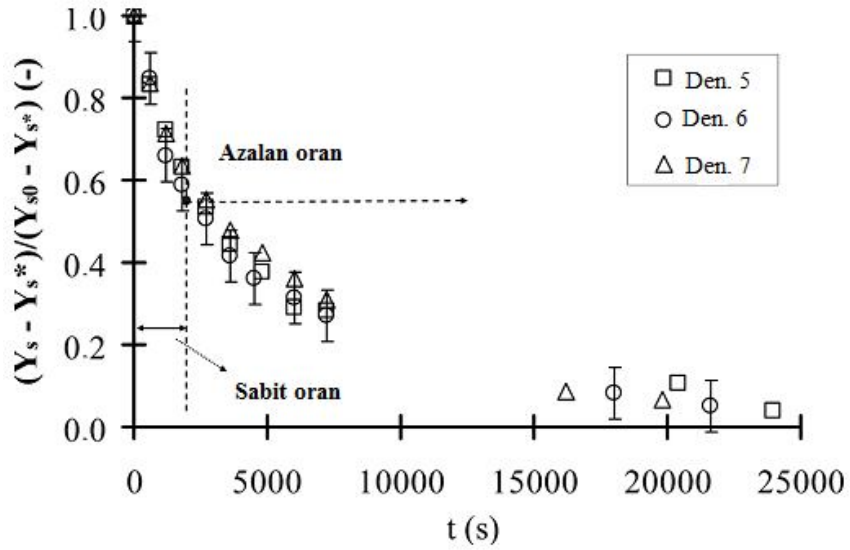
3.5 Akışkan Yataklarda Yatak Genişlemesi

Akışkan yataklarda yatağın genişlemesinin hesabında kullanılan çeşitli korelasyonlar mevcuttur. L yüksekliğindeki yatak için toplam hacim ifadesi yazılmak suretiyle yataktaki genişleme miktarının hesap edilmesi mümkündür. Bu çalışmada akışkan yatak hesabı için Leva ve Ark Korelasyonu seçilmiştir.

$$\frac{L_{ma}}{L} = 1 - \frac{0.0187(U - U_{ma})}{d_t{}^{0.5}} \qquad \textbf{(3.27)}$$

3.6 Kurutma

Kurutma işlemi iki kademede gerçekleşir. Birinci aşama sabit oranlı kurutma, ikinci aşama ise azalan oranda kurutma (difüzyon kontrollü kurutma) olarak adlandırılır. Birinci aşamada nem oranın zamanla değişimi doğrusalken, ikinci aşamada yavaş azalır. Birinci aşamada kurutulacak tanenin nem oranındaki azalma, tanenin yüzeyinde kurutma işlemi öncesinde yıkanmasıyla ya da herhangi bir başka nedenden dolayı oluşan nemin buharlaşması ile gerçekleşir. İkinci kademe de ise cismin içinde ihtiva ettiği nemin kaybı başlar ve nem kaybı hızı azalan bir ivmeyle devam eder.



Şekil 3.1: Akışkan yataklı kurutucuda gerçekleştirilmiş deneyler neticesinde elde edilmiş tohum kuruma eğrisi.

3.6.1 Sabit oranlı kurutma

Kurutma işleminin ilk basamağıdır. Bu aşamada nem kaybı tanenin dış yüzeyindeki nemin buharlaşmasından kaynaklanır ve nem kaybındaki değişim doğrusal ilerler.

$$Y_{s_0} > Y_s > Y_{scr}$$

$$\begin{pmatrix} Giren\ gaz\ tarafından \\ kütle\ kaybı \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Sıvının\ buharlaşması\ için \\ katıya\ geçen\ ısı\ miktarı \end{pmatrix}$$

3.6.2 Difüzyon kontrollü kurutma (azalan oranlı kurutma)

Kurutma işleminin ikinci basamağıdır. Nem oranı, kritik nem oranına eşitlendiğinde difüzyon kontrollü kurutma başlar. Bu aşamadaki nem kaybı tanenin içinde ihtiva ettiği nemin kaybına eşittir.

$Y_{scr} \geq Y_s \geq Y_s^*$

Difüzyon kontrollü kurutma denge nem oranına eşitlenene kadar devam eder.

3.7 Üç Fazlı Matematik Modelleme

3.7.1 Üç fazlı matematik modelleme için kabuller

- İki fazlı kurutma modelinde kabarcıklar akışkan yatak boyunca yukarı hareket ederken katı maddelerin minimum akışkanlaşma şartlarında mükemmel karıştığı kabul edilmiştir.
- Katı fazın nem miktarındaki değişim akışkan yatak yüksekliği boyunca aynı alınmıştır.
- Kabarcıklı faz ile tanecikli faz arasında kütle ve enerji geçişi vardır.
- Her iki bölgede de kurutucuda, kurutucu ile dış ortam arasında ısı geçişinin akışkan ile dış ortam arasında olduğu kabul edilmiştir. Tanelerin cidarda toplanması sonucu olan ısı geçişi ihmal edilmiştir.
- Kurutulacak malzemenin kurutma işlemi başlamadan önce yatağa yerleştirildiği ve ürünler istenen nem miktarına düşünceye kadar akışkan yataklı kurutucu da tutulduğu kabul edilmiştir. [1]
- Her kontrol hacmi yüksekliği ortalama kabarcık çapında alınmıştır.

3.7.2 Kütle ve ısı geçişi

Yüksek ısı iletimleri nedeniyle akışkan yataklar diğer kurutma tekniklerine göre daha çok tercih edilen metotlardan biridir.

$$\dot{Q}_{duvar} = K\, A_{yat}\left(T_g^M - T_a\right) \qquad \textbf{(3.28)}$$

Yatak duvarındaki enerji kaybı ($\dot{Q}_{duvar}$) denklem 3.28 ile hesap edilmiştir. K toplam ısı geçiş katsayısını ifade etmektedir. Akışkan yatak tasarımı sırasında, duvar malzeme seçimiyle hesaplanmaktadır.

Kurutma ortamı olarak havanın kullanımında, katı tane ve yoğun faz arasındaki ısı geçiş katsayısı, h, Reynolds katsayısının bir fonksiyonu olarak basitleştirilmiştir $\left(Re_t = G_{gi} * \frac{d_t}{\mu_g}\right)$.

$$h = \frac{k_{gi}}{d}\left(x_1 * Re_p^{x_2}\right) \quad \textbf{(3.29)}$$

Denklemdeki x_2 ve x_1 katı ve gaz arasındaki ısı geçiş mekanizması ile ilgili iki model parametresidir.

Victor et al. tarafından önerilen üç fazlı kurutma modeline göre kabarcıkların yukarı hareketi esnasında katı taneciklerin mükemmel karıştığı kabul edilir [6]. Yoğun faz homojen akış ya da homojen akış ve tıkaç akış arası seçilmiş bir rejimde hareket edebilir. Yoğun fazda ayrıca yatak cidarı ile ortam arasında ısı kaybı meydana gelmektedir. .

Bu çalışmada kurutulan tanelerin kütle ve enerji dengesi açısından ele alındığı *Katı Faz* , katı tanelerin minimum akışkanlaşma hızında tam olarak gazla karıştığı *Yoğun Faz* ve yatağa beslenen fazla havanın kabarcıklar halinde yukarı doğru hareket ettiği *Kabarcıklı Faz* olmak üzere akışkan yataklı kurutucu üç faz halinde modellenmiştir.

Bu üç faz arasındaki kütle ve enerji geçişini belirleyen denklemler aşağıda verilmektedir.

Katı Faz Denklemleri;

Denklem (3.30), Denklem(3.31) ve Denklem(3.32) katı tanenin kütle ve enerji denklemlerini göstermektedir. Bu denklemlerde nemli tanenin entalpisi (H_{su}), kuru tanenin entalpisi (H_s) ile suyun entalpisinin (H_u) bir fonksiyonudur. f_{M1}, f_{E1} katı faz ile yoğun faz arasındaki ısı ve kütle geçişi oranıdır. "z" yönündeki değişim yok kabul edilmiştir. f_{M2} ve f_{E2} yoğun faz ile kabarcıklı gaz fazı arasındaki ısı ve kütle geçiş oranıdır.

$$(1-\varepsilon)\rho_s \frac{dY_s}{dt} = -f_{M1T} \quad \textbf{(3.30)}$$

$$(1-\varepsilon)\rho_S \frac{dHsu}{dt} = f_{E1T} - f_{M1T}(H_u + hsb) \quad \textbf{(3.31)}$$

$$H_{su} = H_s + H_u Y_s;\ H_s = C_s(T_R - T_R)\ ;\ \ H_u = C_l(T_s - T_R) \quad \textbf{(3.32)}$$

Yoğun Faz Denklemleri

$$(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g \frac{dY_{gi}}{dt} + G_{gi}\beta_M \frac{Y_{gi}-Y_{g0}}{L} = f_{M1} - f_{M2} \quad \textbf{(3.33)}$$

$$(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g \frac{dH_{gi}}{dt} + G_{gi}\beta_T \frac{H_i - H_0}{L} = f_{E1} - f_{E2} \quad \textbf{(3.34)}$$

$$H_i = H_{gi} + H_{vi}Y_{gi}\ ;\ H_{gi} = C_{pg}\left(T_{gi} - T_R\right)\ ; H_{vi} = hsb + C_{pv}\left(T_{gi} - T_R\right) \quad \textbf{(3.35)}$$

Denklem (3.33-3.35) yoğun fazdaki kütle ve enerji denklemlerini göstermektedir. Bu denklemlerde, yoğun fazdaki entalpi (H_i), kuru gaz entalpisi (H_{gi}) ile su buharı entalpisinin (H_{vi}) bir fonksiyonudur. f_{M1} ve f_{E1} katı faz ile yoğun faz arasındaki ısı ve kütle geçişi oranıdır. Benzer olarak f_{M2} ve f_{E2} yoğun faz ile kabarcıklı gaz fazı arasındaki ısı ve kütle geçişi oranıdır. dz birim hacimdeki yatak uzunluğunu gösterir.

Gaz Fazı Denklemleri

$$\delta\rho_g \frac{\partial Y_{gb}(z,t)}{\partial t} + G_{gb} \frac{\partial Y_{gb}(z,t)}{\partial z} = f_{M1} \quad \textbf{(3.36)}$$

$$\delta\rho_g \frac{\partial H_b(z,t)}{\partial t} + G_{gb} \frac{\partial H_b(z,t)}{\partial z} = f_{M2} H_{vi} - f_{E2} \quad \textbf{(3.37)}$$

$$H_b = H_{gb} + H_{vb} Y_{gb}; H_{gb} = C_{pg}(T_{gb} - T_R); H_{vb} = hsb + C_{pv}(T_{gb} - T_R) \quad \textbf{(3.38)}$$

Denklem (3.36-3.38) kabarcıklı fazdaki kütle ve enerji denklemlerini göstermektedir. Kabarcık fazınındaki entalpi (H_b), bu faz içindeki kuru gaz entalpisi (H_{gb}) ile su buharı entalpisinin (H_{vb}) fonksiyonudur. Kabarcıklı akışta kabarcıklar yukarı yönlü hareket halindedir. Bu nedenle modelde kütle ve enerji dengesi z yönünde ve zamana bağlı olarak değişmektedir.

Yukarda verilen tüm faz denklemlerinde kütle ve ısı geçişinde aşağıdaki katsayılar kullanılarak, f_{E1}, f_{E2}, f_{M1}, f_{M2}, f_{M1T}, f_{E1T} ifadelerinin hesaplanmasında kullanılarak denlemler yeniden düzenlenmiştir.

$$h_{bc}a_b = \delta * \left(4.5 * \frac{G_{ma}(i-1)*C_{pg}}{d_b}\right) + 5.85 * \left(\frac{(k_g * C_{pg} * \rho_g)^{0.5} * (g^{0.25})}{d_b^{1.25}}\right); \quad \textbf{(3.39)}$$

$$h_{cg}a_{gi} = \delta * \left(6.78 * \left((\rho_g * C_{pg} * k_g)^{0.5}\right) * \left(\frac{\varepsilon_{ma} * u_b}{d_b^3}\right)^{0.5}\right) \quad \textbf{(3.43)}$$

$$h_b a_1 = \left(\frac{h_{bc}a_b * h_{cg}a_{gi}}{h_{bc}a_b + h_{cg}a_{gi}}\right) \quad \textbf{(3.40)}$$

$$k_{bc}a_b = \delta * \rho_a * \left(4.5 * \left(\frac{G_{ma}}{\rho_g * d_b}\right) + 5.85 * \left(\frac{D_{vg}^{0.5} * g^{\frac{5}{4}}}{d_b^{1.25}}\right)\right) \quad \textbf{(3.41)}$$

$$k_{cg}a_{gi} = \delta * \rho_g * 6.78 * \left(\frac{\varepsilon_{ma} * D_{vg} * u_b}{d_b^3}\right)^{0.5} \quad \textbf{(3.42)}$$

$$k_{s1}a_1 = \frac{k_{bc}a_b * k_{cg}a_{gi}}{k_{bc}a_b + k_{cg}a_{gi}} \quad \textbf{(3.43)}$$

Katı Faz

$$\frac{dY_s}{dt} = \left(\frac{1}{N}\sum f_{m1}^{(k)}\right)\left(\frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)}\right) \quad \textbf{(3.44a)}$$

$$\frac{dY_s}{dt} = k_s a(Y_s - Y_s^*)\left(\frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)}\right) \quad \textbf{(3.44b)}$$

$$(1-\varepsilon)\rho_S \frac{dHsu}{dt} = f_{E1T} - f_{M1T}(H_u + hsb) \quad \textbf{(3.45a)}$$

$$\frac{dHsu}{dt} = \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)\rho_S}\right)\left(\left(\frac{1}{N}\sum f_{E1}^{(k)}\right) - \left(\frac{1}{N}\sum f_{M1}^{(k)}\right)(H_u + hsb)\right) \quad \textbf{(3.45b)}$$

$$\frac{dHsu}{dt} = \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)\rho_S}\right)\left(\left(\frac{1}{N}\sum ha(T_{gi} - T_s^*)\right) - \left(\frac{1}{N}\sum k_s a(Y_s - Y_s^*)\right)(H_u + hsb)\right) \quad \textbf{(3.45c)}$$

Yoğun Faz Denklemleri

$$\frac{dY_{gi}}{dt} = \frac{1}{(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g}\left[-G_{gi}\beta_M \frac{Y_{gi} - Y_{go}}{L} + k_s a(Y_s - Y_s^*) - k_{s1}a_1\left(Y_{gi} - Y_{gb}^*\right)\right]$$

$$\textbf{(3.46a)}$$

$$\beta_M = \beta_T = 1$$

$$(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g \frac{dY_{gi}}{dt} + G_{gi}\beta_M \frac{Y_{gi} - Y_{go}}{L} = k_s a(Y_s - Y_s^*) - k_{s1}a_1\left(Y_{gi} - Y_{gb}^*\right) \quad \textbf{(3.46b)}$$

$$(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g \frac{dH_{gi}}{dt} + G_{gi}\beta_T \frac{H_i - H_o}{L} = f_{E1} - f_{E2} \quad \textbf{(3.47a)}$$

$$\frac{dH_{gi}}{dt} = \frac{1}{(1-\delta)\varepsilon_{ma}\rho_g}\left[-G_{gi}\beta_T \frac{H_i - H_o}{L} + ha(T_{gi} - T_s^*) - h_b a_1\left(T_{gb} - T_{gi}^*\right)\right] \quad \textbf{(3.47b)}$$

Gaz Fazı Denklemleri

$$\delta\rho_g \frac{\partial Y_{gb}(z,t)}{\partial t} + G_{gb}\frac{\partial Y_{gb}(z,t)}{\partial z} = k_{s1}a_1\left(Y_{gi} - Y_{gb}^*\right) \quad \textbf{(3.48)}$$

$$\delta\rho_g \frac{\partial H_b(z,t)}{\partial t} + G_{gb}\frac{\partial H_b(z,t)}{\partial z} = \left(k_{s1}a_1\left(Y_{gi} - Y_{gb}^*\right)\right)H_{vi} - h_b a_1\left(T_{gb} - T_{gi}^*\right) \quad \textbf{(3.49)}$$

3.7.3 Sınır koşulları ve başlangıç değerleri

Akışkan yatak kurutucu modelinin sayısal çözümlemelerinde aşağıda verilen sınır koşulları ve başlangıç değerleri göz önüne alınmıştır.

t=0 iken $Y_s = Y_{s,0}$, $Y_g = Y_{g,0}$, $T_g = T_{g,0}$, $T_s = T_{s,0}$

z=0 iken $U_g = U_{g,giriş}$, $T_g = T_{g,giriş}$, $Y_g = Y_{g,giriş}$

Çizelge 3.1: Sayısal Çözümlemede kullanılan model parametreleri.

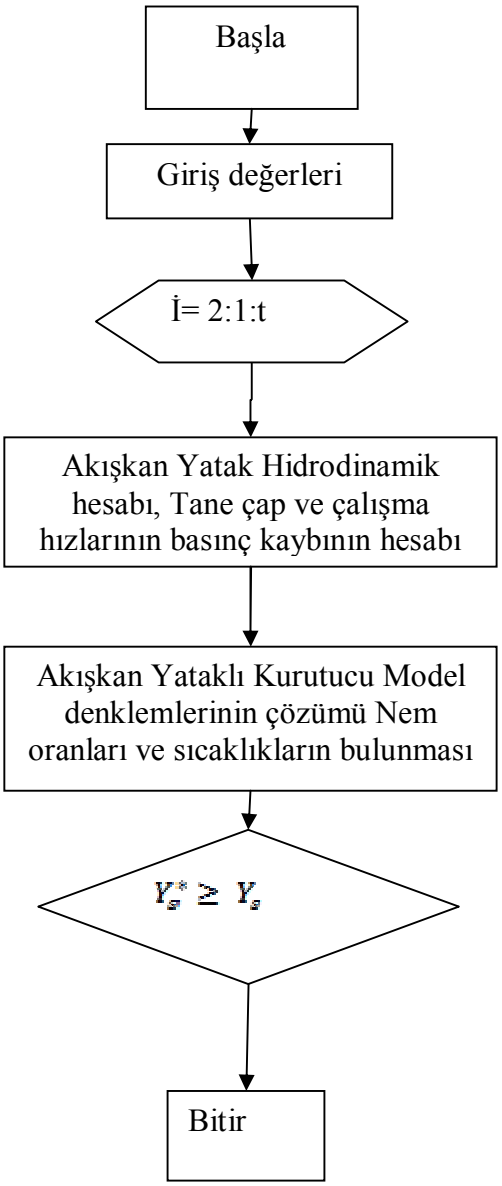
Model parametreleri	Değerler	Birimler
x_1	0.630	-
x_2	0.275	-
x_{1I}	$1.1 * 10^{-3}$	-
x_{1II}	$5.71 * 10^{-5}$	m^2/s
x_{2I}	0.644	-
x_{2II}	4596.63	K
K	3.52	kW/m^2K

Bu değerlerin yanı sıra yatak geometrisi (kesit alanı, yüksekliği), giren madde miktarı, maddenin cinsi ve giriş değerleri de kullanılarak sayısal çözümleme yapılmıştır.

4. SAYISAL ÇÖZÜMLEME VE-MODELİN GEÇERLİLİĞİNİN İRDELENMESİ

Bir önceki bölümde verilen akışkan yataklı kurutucu, hidrodinamik ve her faza ait kütle ve enerji denklemleri ayrıklaştırılarak MATLAB programı ile çözülmüştür

4.1 Program Algoritması



4.2 Modelin Geçerliliğinin İrdelenmesi

Modelin geçerliliği, literatürde yayınlanan akışkan yataklı kurutucu deney sonuçları kullanılarak irdelenmiştir. Yapılan modelin geçerliliğinin irdelenmesinde Çizelge 4.1'de gösterilen deney 1, 2 ve 3 no'lu tohum deneyleri ile 4 numaralı havuç deneylerinin giriş parametrelerinden ve sonuçlarından faydalanılmıştır [1,2]. Çizelge 5.1'de çim tohumu ve havuç deneyi giriş değerleri gösterilmektedir. Simülasyonda deney 1, 2 ve 3'ün karşılaştırılmasında kullanılan değerler için [1], deney 4 için gerekli değerler için [2]'dan faydalanılmıştır.

Çizelge 4.1: Simülasyonda kullanılan deney giriş verileri.

Deney No	Ürün Cinsi	G_g $\left(\frac{kg}{m^2 s}\right)$	$T_{g0}(^{\circ}C)$ Gaz	$T_{s0}(^{\circ}C)$ Katı	$T_a(^{\circ}C)$ Ortam	$T_s^M(^{\circ}C)$ Orta.	$H(m)$ Yük.	Y_{s0} Katının Nemi	Y_{g0} Gazın nemi
1	Tohum	0.925	51.5	31.5	26.6	33.5	0.175	0.222	0.012
2	Tohum	1.227	31.5	13.9	22.6	19.8	0.243	0.206	0.008
3	Tohum	1.092	40,9	30.2	25.0	29.3	0.192	0.191	0.009
4	Havuç		56	10	22.6	-		0.8	0.012
5	Tohum	1.081	40.9	28.2	25.0	29.3	0.192	0.191	0.009
6	Tohum	1.092	40.8	30.2	22.3	28.8	0.206	0.195	0.010
7	Tohum	1.100	41.5	16.9	20.7	26.5	0.210	0.173	0.012

Çizelge 4.2: Simülasyonda kullanılan ürün giriş değerleri.

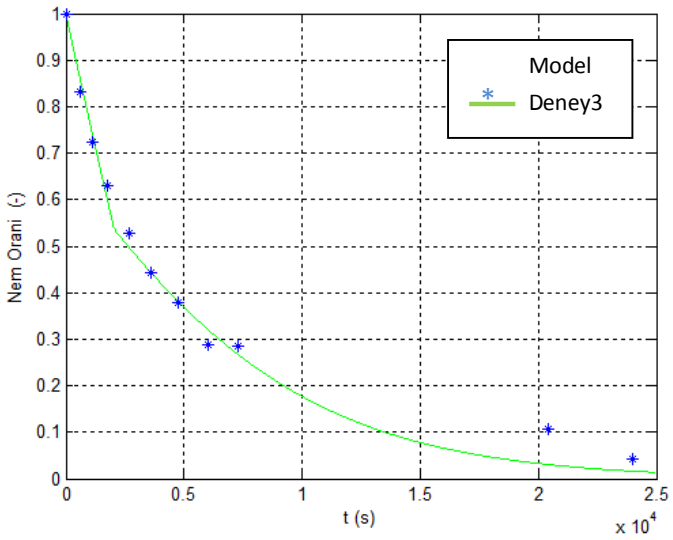
Özellikler	A. C. Rizzi Jr (2007)	F.M.Berruti (2008)
Toplam Ürün (tohum) ağırlığı (kg)	0.400	
Madde cinsi	Tohum	Havuç
Tohum özgül ısısı C_{pt} $(J/kg$ K)	428	3.98 [11]
Tohumun eşdeğer çapı (m)	0.0024	0.021
Tohum yoğunluğu (Y_s=0.063) (kg/m^3)	1018±20	-
ε_{mia}(Min. Akışkanlaşma Boşluk Oranı)	0.392	-
Y_{scr} (Kritik nem oranı)	0.140±0.001	0.8
G_{mf} $(kg/m^2$ s)	0.682	-
Y_s^* (Dengedeki nem miktarı)	$(0.668 - 0.0019T)(-\ln RH)^{-0.14}$	0.08

Sonuçların Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması;

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kuruma eğrisi iki farklı değişim göstermektedir. İlk aşamada yani sabit oranlı kuruma bölümünde nem oranındaki azalma doğrusal şekilde ilerlerken, ikinci aşamada kuruma hızı zamanla azalan bir değişim göstermektedir.

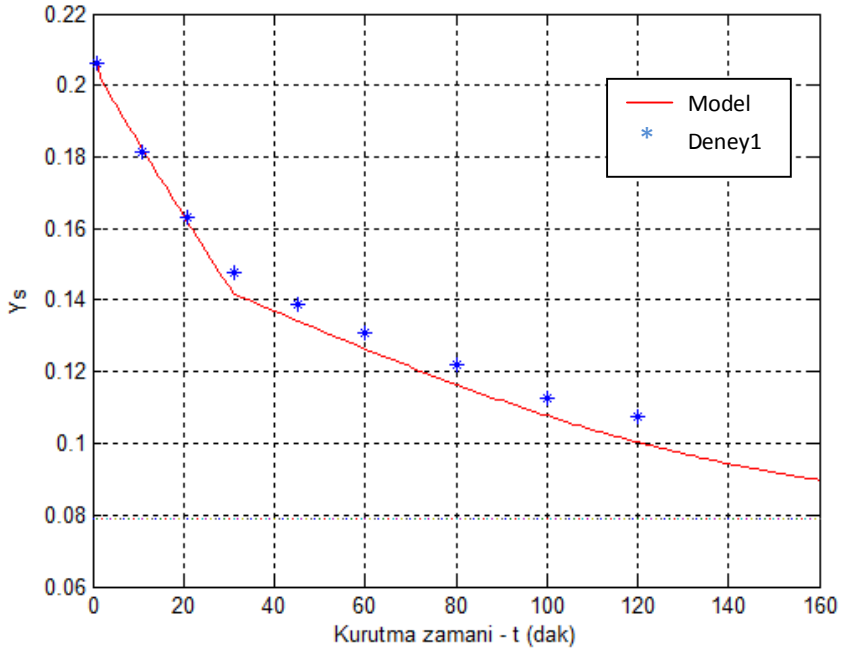
Birinci aşamada tohum tarafından nem kaybındaki azalma tohumun dış yüzeyinde bulunan suyun buharlaşarak havaya iletimiyle gerçekleşir. Bu bölümde kütle geçişinde belirleyici unsur Re sayısı ile belirlenen gaz akış karakteristiğidir. Birinci aşamada tohumun nem miktarı kritik nem miktarına eşit olana kadar kurutma işlemi devam etmektedir.

Tohumun nem oranı (Y_s), kritik nem oranına (Y_{scr}) eşitlendiğinde difüzyon kontrollü kuruma başlar. Tarımsal ürünlerde, difüzyon kontrollü kurutma esnasında kurutmanın ürünün içindeki nem kaybı ile gerçekleşmesi üründe hacim değişikliği neden olur [1].



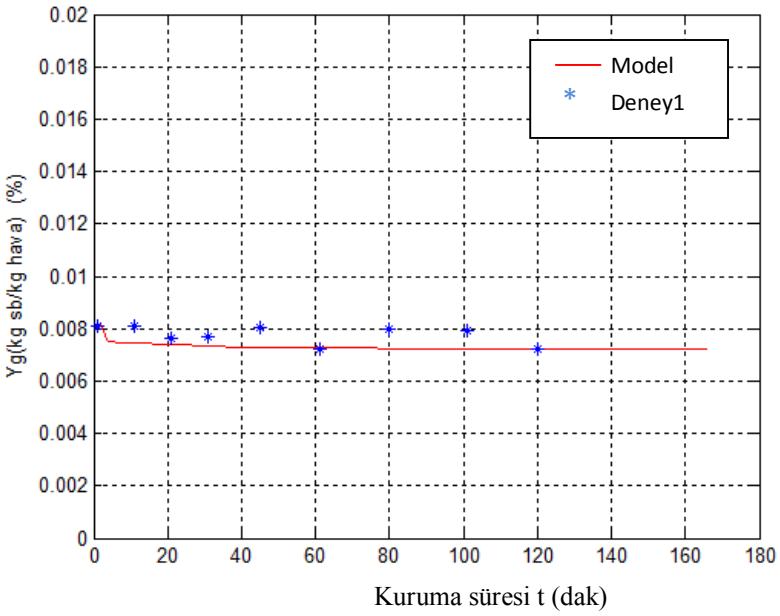
Şekil 4.1: Simülasyonla hesaplanan çim tohumunun nem oranının zamanla değişiminin deneysel verilerle karşılaştırılması; $(Y_s - Y_s^*)/(Y_{s0} - Y_s^*)$.

Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4, Çizelge 4.1'deki deney 1'in başlangıç koşulları kullanılarak yapılan modellemeden elde edilen simülasyon ile deney 1'de elde edilen sonuçları içermektedir. Bu karşılaştırmada tohumun nem miktarındaki değişim, deney sonuçlarına %1'lik bir hata oranın altında yakalamıştır. Her iki şekilden de gözleneceği üzere, model gerek tane nem miktarını, gerekse kurutucu içindeki havanın nem miktarını oldukça iyi hesaplayabilmektedir.

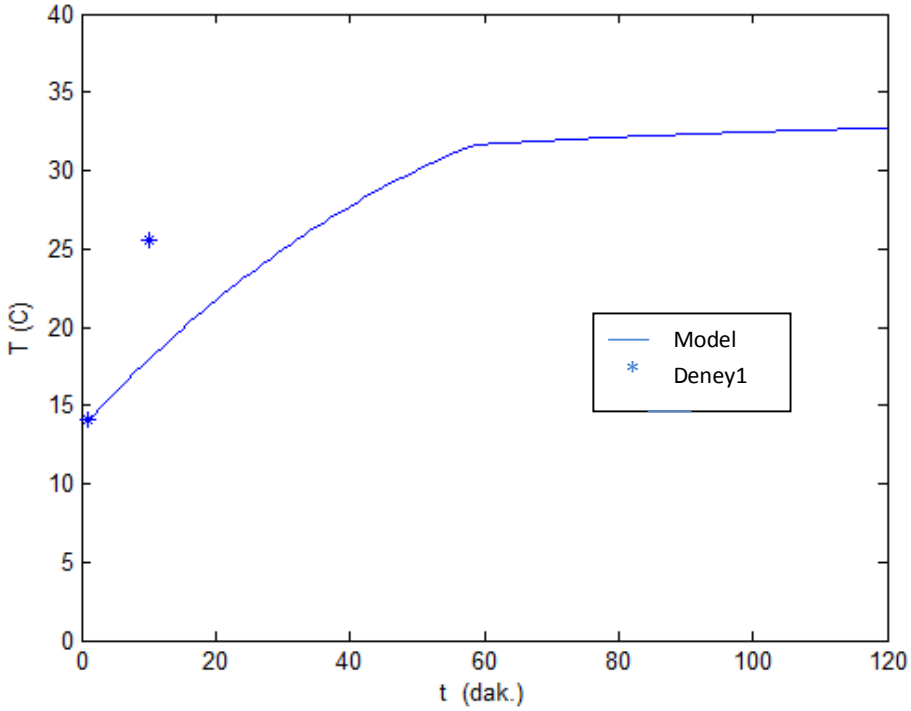


Şekil 4.2: Deneysel ve simülasyonla hesaplanan tane nem miktarının zamanla değişimi.

Havanın nem miktarının hesabında en fazla % 1oranında sapma olmaktadır. Bunun nedeni, deneysel verilerin ölçümünde yapılan hatalar olabileceği gibi, bazı model parametrelerinin ampirik ifadeler olmasından da kaynaklanıyor olabilir.

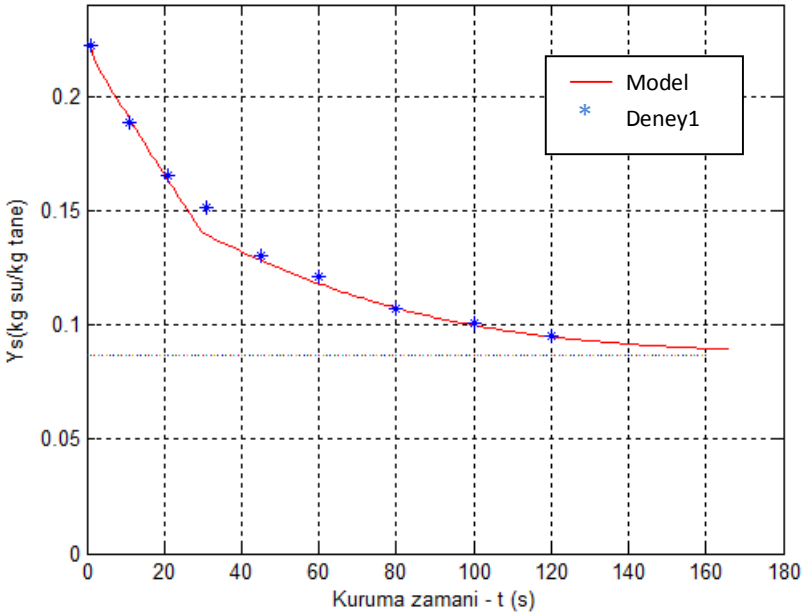


Şekil 4.3: Zamana bağlı hava nem miktarı değişiminin deneysel verilerle karşılaştırılması.

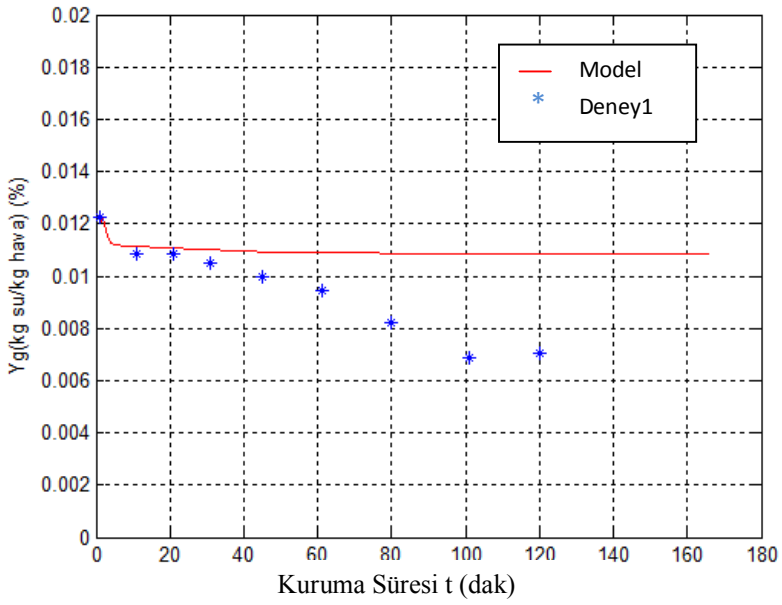


Şekil 4.4 : Hava sıcaklığının zamanla değişimi: Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.

Çizelge 4.1'deki deney 1'in giriş şartları kullanılarak teorik sonuçlar elde edildiğinde tohum nem miktarındaki değişim Şekil 4.5'te deney sonuçlarıyla yakın sonuçlar verirken şekil 4.6'daki havanın nem oranındaki değişim deney verilerine kıyasla sapma oluştuğu gözlemlenmiştir.

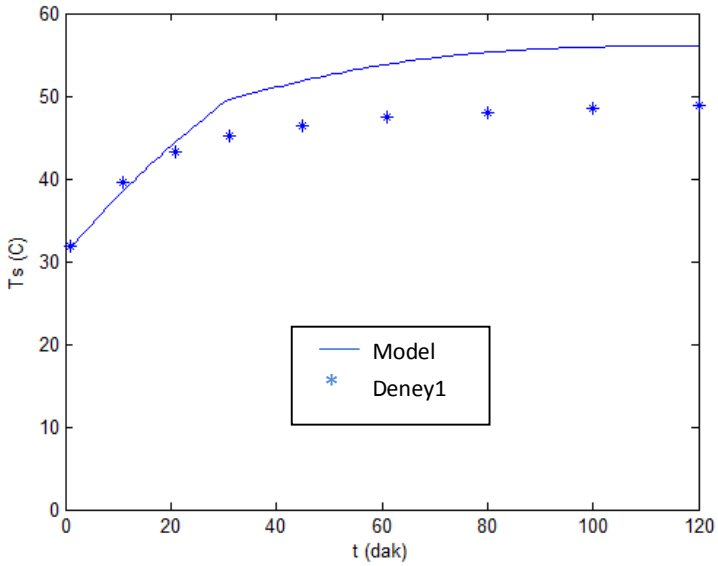


Şekil 4.5: Akışkan yataklı kurutucuda tohumun nem oranının zamanla değişimi: Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.



Şekil 4.6: Havanın nem miktarının zamanla değişiminin deneysel verilerle karşılaştırılması.

Çizelge 4.1'deki deney1'in verileriyle modelleme yapıldığında elde edilen simülasyon sonuçları deney sonuçlarıyla mukayese edildiğinde Şekil 4.7'de görüldüğü üzere deneyden elde edilen tane sıcaklığı daha düşük değerde dengeye gelirken simülasyon sonuçları da benzer bir eğri çizmesine rağmen model daha yüksek katı sıcaklık değerleri bulmaktadır.



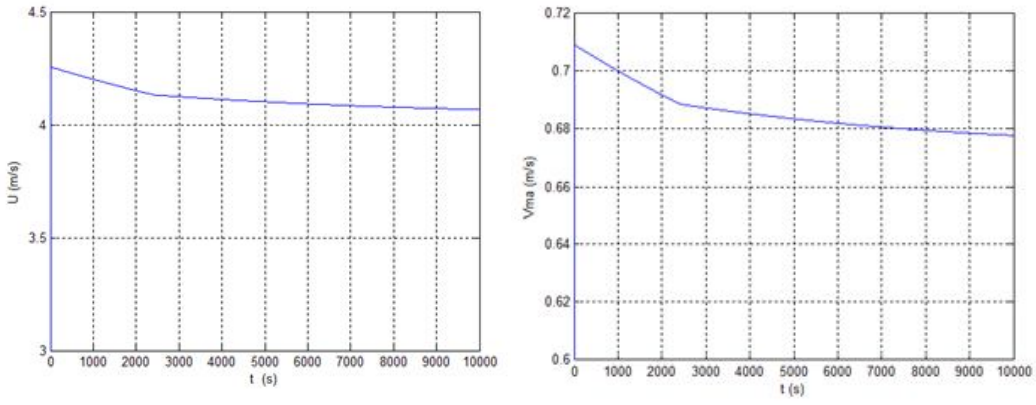
Şekil 4.7: Sıcaklık değişiminin deney 1 ile karşılaştırılması.

5. AKIŞKAN YATAKLI KURUTUCU PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Akışkan yataklı kurutucuların performansına ürün cinsi, ürünün başlangıçtaki nem oranı, kurutucu gaz giriş sıcaklığı ve hızı etki etmektedir., Bir akışkan yataklı kurutucu sabit bir gaz giriş sıcaklık ve debisinde en kısa sürede bir ürünü istenilen nem seviyesine kadar kurutabilirse bu durumda yüksek performans ile çalışıyor kabul edilebilir. Çalışmanın bu bölümünde farklı akışkan yataklı kurutucu işletme parametrelerinin kurutma süreleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

5.1 Modelin Geçerliliğinin İrdelenmesi

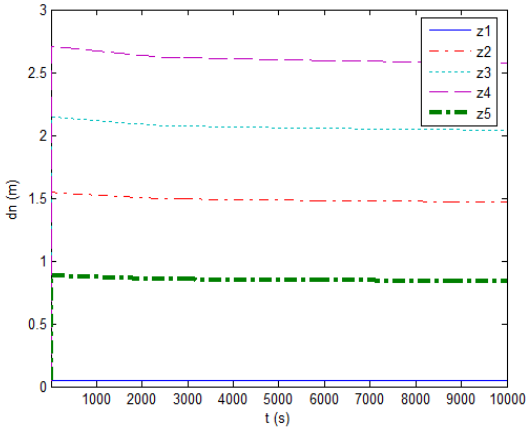
Çalışmada geliştirilen akışkan yataklı kurutucu modeli kullanılarak işletme parametrelerinin kurutma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Akışkan yataklı kurutucuda hesaplanan minimum akışkanlaşma hızının ve yatak hızının zamanla değişimi şekil 5.1'de görülmektedir. Minimum akışkanlaşma hızı zamanla çok küçük bir oranda azalma gösterirken ve yatak hızı da bu azalmaya benzer bir değişim göstermiştir.



(a) **(b)**

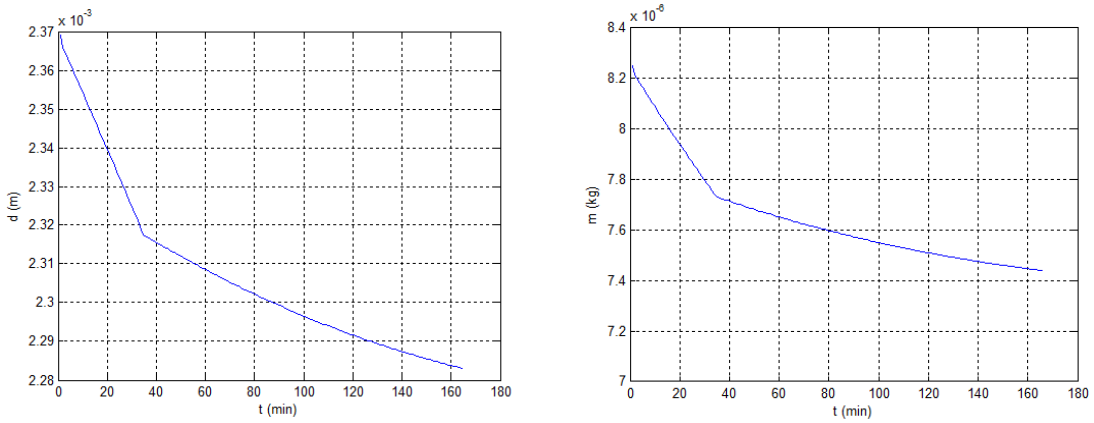
Şekil 5.1: Zamana bağlı (a) minimum akışkanlaşma hızı ve (b) yatak hızı değişimi

Şekil 5.2'de de görüldüğü gibi her zaman adımında yatak yüksekliği ile kabarcık çapı artarken aynı kontrol hacminde (sabit yatak yüksekliğinde) zamanla kabarcık çapında küçük bir oranda azalma gözlemlenmektedir. Kabarcık çapının büyümesi, yatakta sikülasyonun iyileşmesine ve dolayısıyla katı ve gaz temasının daha iyi olmasına yol açtığından kurutma performansını da iyileştirmektedir.



Şekil 5.2: Kabarcık çapının z boyunca değişimi – dz=H/5

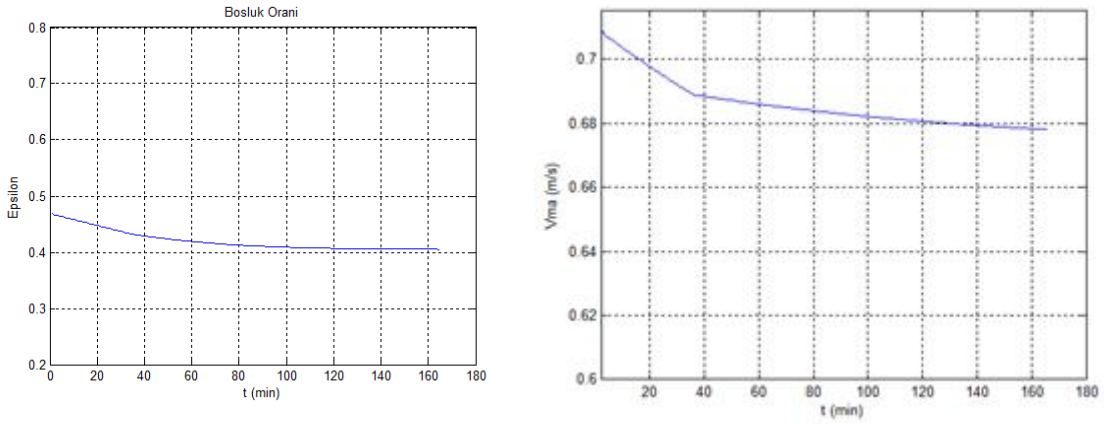
Tohum kurutma işlemi süresinde, tane istenen nem oranına ulaşana kadar su kaybeder ve bu da hem kütlesinde hem de şeklinde değişiklikler görülmesine neden olur. Modelin her aşamasında zamanla görülen çap değişikliği hesaba katılmıştır ve bu değişiklik katının nem miktarındaki (Y_s) değişimden faydalanılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle çap ve kütledeki değişim Şekil 5.3'de görüldüğü gibi tane nem miktarındaki değişime benzer olarak sabit oranlı ve azalan oranlı kuruma olarak iki aşamada gözlenmektedir. Nem kaybından kaynaklanan şekil ve kütle değişimi, nem oranına benzer değişim göstermektedir.



(a) (b)

Şekil 5.3: Çim tohumunun simülasyondan (a) Çap değişimi ve (b) kütle değişimi

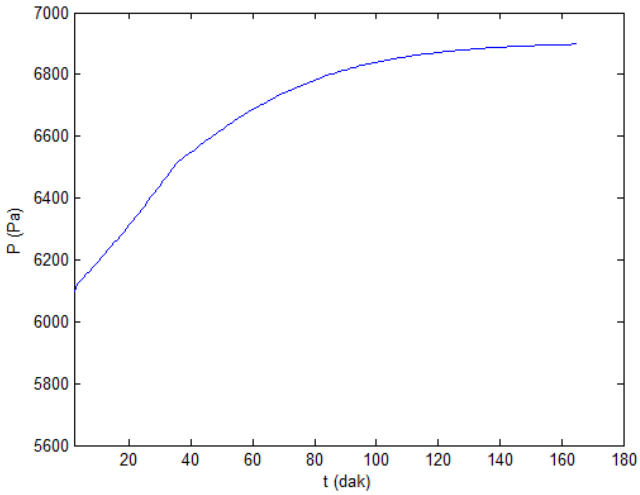
Şekil 5.4'de yatak boşluk oranının ve minimum akışkanlaşma hızının zamanla değişimi gösterilmiştir. Kuruyan tanenin çapı değiştikçe minimum akışkanlaşma hızı da azalırken bu değişim de ε boşluk oranına tesir etmiştir.



(a) (b)

Şekil 5.4: (a) Boşluk oranı değişimi ve (b) Minimum akışkanlaşma hızı değişimi

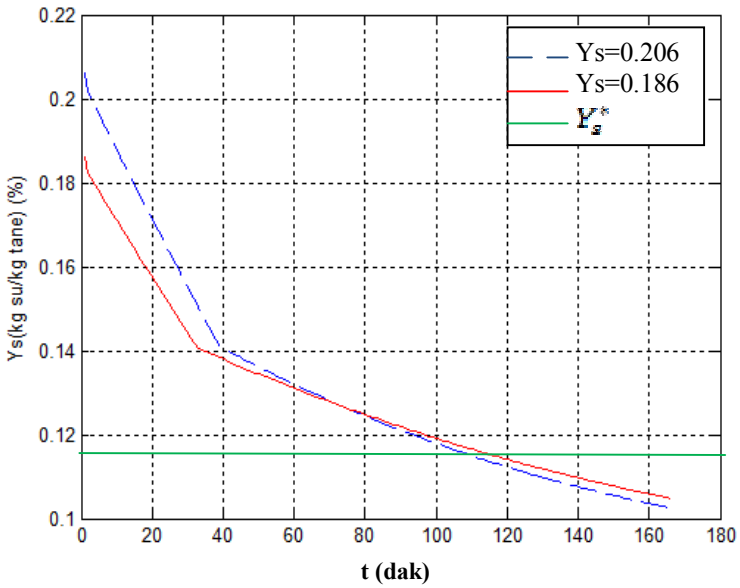
Şekil 5.5'de basınç kaybındaki artış zamanla azalarak sabit bir değere yaklaşmaktadır.



Şekil 5.5: Basınç kaybının zamanla değişimi

5.2 Giriş Nem Miktarının Etkisi

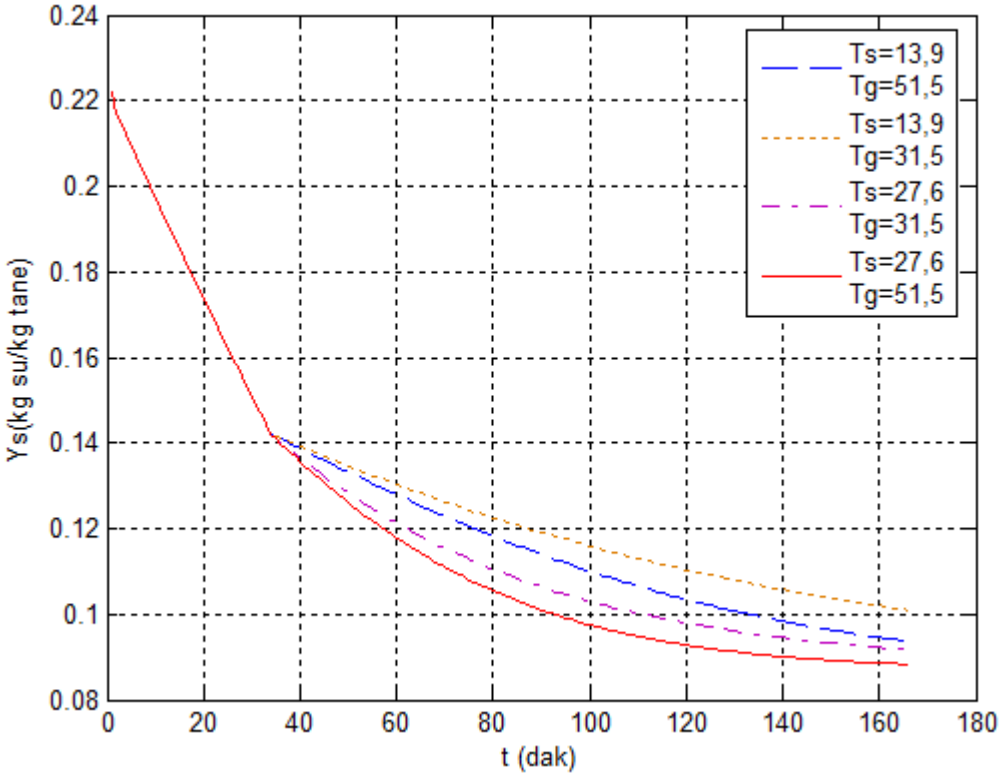
İki ayrı nem oranında akışkan yataklı kurutucuya giren tanenlerin nem oranlarının değişimi ilk periyotta harcanan süreyle doğru orantılıdır. İkinci periyotta ise giriş nem oranı daha yüksek olmasına rağmen dengeye ulaşma süresi 0.206 nem oranıyla giren ürün grubunun, 0.186 nem oranı grubuna göre daha kısadır.



Şekil 5.6: Çizelge 4.1'deki deney 2'nin giriş değerleriyle tohum nem miktarının değişimi

5.3 Gaz Giriş Sıcaklığı

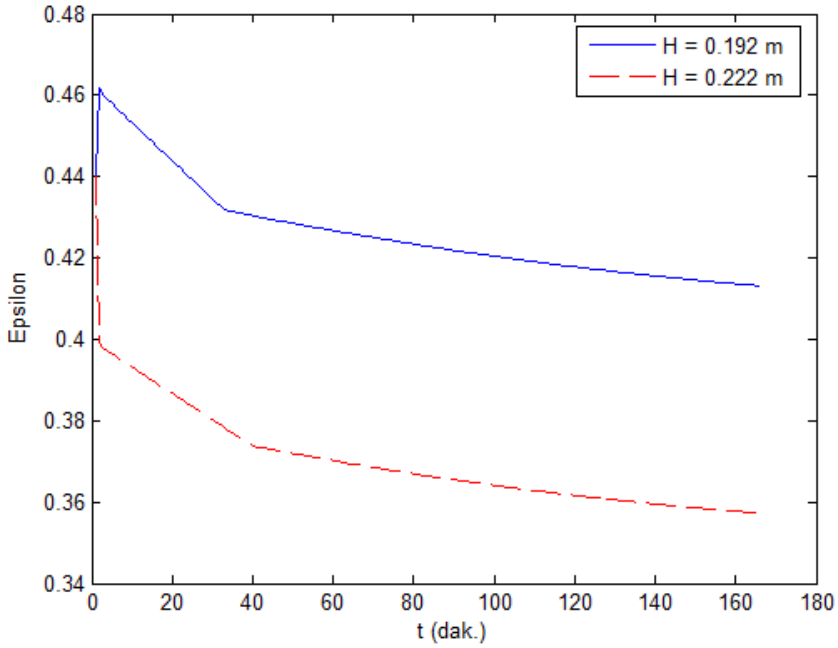
Tane sıcaklığı ve gaz giriş sıcaklığı değiştirilip diğer özelliklerin aynı bırakıldığı koşullarda, sabit oranlı kuruma esnasında tene ve gaz giriş sıcaklıklarındaki değişimlerin kurutma hızına etki etmediği gözlenmiştir. Ancak azalan oranda kuruma evresinde ise kuruma eğrilerinin farklı olduğu Şekil 5.7'te görülmektedir. Gaz ve tane sıcaklığındaki azalma kuruma sürelerinde artışa neden olmaktadır. Kuruma sürelerindeki artışa en büyük etkiyi katı tane sıcaklığındaki azalma göstermektedir.



Şekil 5.7: Değişik sıcaklıklarda deney 2 koşullarında nem miktarının zamanla değişimi

5.4 Yatak Boyutları

Yatak boyutlarındaki değişimin tane nem oranındaki değişime etkisi ihmal edilebilir olmasına karşın, Şekil 5.8'deki gibi boşluk oranında %12'lik azalmaya neden olmaktadır. Sadece yatak yüksekliğinde değişiklik yaparak, yükseklikleri 0.192metre ve 0.222 metre alınan iki ayrı modelin çözümünde yatak yüksekliğinin tasarımda boşluk oranına önemli ölçüde etki ettiği gözlemlenmektedir. Tohumun ε_{min} = 0.392 [1] olması nedeniyle yüksekliğin 0.222m olarak alındığı halde boşluk oranı akışkanlaşma için gerekli şartın altına inmiştir.

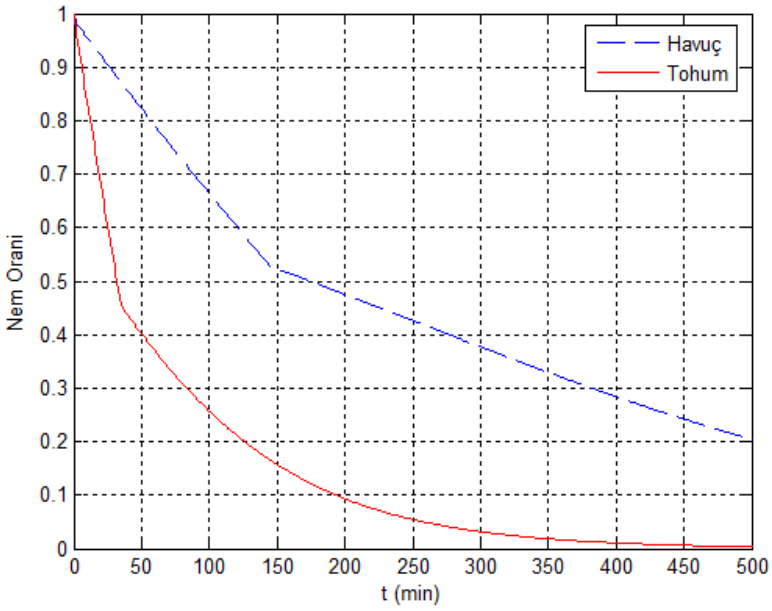


Şekil 5.8: Yatak yüksekliğinin boşluk oranındaki etkisi

5.5 Ürün Cinsi

Kurutma, iki ayrı ürün cinsi ele alınarak incelenmiştir. Her iki ürün cinsinin kurutulma işleminde $Y_{scr} < Y_s$ olduğunda nem oranı eğrisi doğrusal olarak ilerlerken $Y_{scr} > Y_s$ şartını sağladıktan sonra ise kuruma oranı zamanla azalan şekilde ilerlemektedir. Kurutma işleminin aldığı süre ürün cinsine göre değişmiştir.

İki ayrı ürün cinsi için yapılan incelemede içerdikleri nem oranlarını, özgül ısılarının fiziksel özelliklerinin ayrı olması farklı bir eğri çizmelerine neden olmaktadır. Başlangıç kosullarında havuç içerisinde 0.88 oranında su bulunurken tohumun içerisinde yaklaşık 0.2 oranında su bulunur. Havucun özgül ısısının da yüksek oluşuyla tohumun içersinde bulunan tüm nemin kaybediği sürede havucun nem oranı %20'dir.



Şekil 5.9 : Ürün cinsi değişerek kurutma modellerinin karşılaştırılması

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Akışkan yataklı kurutucunun zamana bağlı modellemesinin üç fazlı olarak incelendiği bu çalışmada kurutma sabit oranlı ve azalan oranlı kurutma olarak iki farklı periyotta incelenmiştir. Kuruma modelinin her aşamasında tanenin su kaybından kaynaklanan şekil değişikliği hesaba alınmıştır.

Katı tane ve yoğun faz arasındaki ısı ve kütle geçişi tanımlanırken beş adet parametre kullanılmıştır. Yapılan modelin geçerliliğinin incelenmesi amacıyla çim tohumunun [1] kurutma deney sonuçlarından faydalanılmıştır. Genel olarak büyük ölçüde simülasyondan elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır. Çim tohum ile yapılan deneylerden elde edilen deney sonuçlarının yanı sıra havuç [2] gibi farklı bir Geldart D grubu ürüne ait özellikler girilerek nem oranları değişimi karşılaştırılmıştır. Bu sonucun farklı bir ürün cinsi için geçerliliğinin kontrolünde, o ürüne ait deney sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi daha iyi sonuç verecektir.

Bu çalışmanın sonuçları akışkan yatak kurutucunun hidrodinamik hareketi üzerine bilgi vermiştir. Yapılan çalışmanın Geldart'ın B grubuna ait ürünle üzerinde de çalışılarak modelin daha geniş ürün grupları üzerindeki geçerliliği de irdelebilir.

KAYNAKLAR

[1] **A. C. Rizzi Jr., E. F. Costa Jr., J. T. Freire, M. L. Passos**, 2007: Modeling the Drying of Grass Seeds (Brachiaria brizantha) in Fluidized Bed*, Drying Technology,* **25**:123-137.

[2] **F. M. Berruti, M Klaas, C. Briens, F. Berruti**, 2009: Model for convective drying of carrots for pyrolysis, *Journal of Food Engineering* **92**:196–201

[3] **Ebrahim Hajidavaloo ve Feridun Hamdullahpur,** 2000: Thermal analysis of a fluidized bed drying process for crops. Part I: Mathematical modeling*, International Journal of Energy Research* **24** 791-807.

[4] **I. Dinçer , A. Z. Sahin.** 2004: Thermodynamic anaysis of a drying process, *International Journal of thermal Scieces* **47** 645-652.

[5] **S. Syahrul, I. Dinçer, F. Hamdullahpur** 2003: Thermodynamic modeling of fludized bed drying of moist particle, *International Journal of Thermal Scieces* **42** 691-701).

[6] **Mikami, T., H. Kamiya, and M. Horio,** 1998: Numerical simulation of cohesive powder behavior in a fluidized bed. *Chem. Eng. Sc*., **10** (53), pp. 1927-1940.

[7] **Wang, Z. H., ve G. Chen.** , 1999: Heat and mass transfer during low intensity convection drying. *Chem. Eng. Sc.* **54,** pp. 3899-3908.

[8] **Wang, Z.H. ve G. Chen.** 2000: Heat and mass transfer in batch fluidized-bed of porous particles. *Chem. Eng. Sc*., **55,** pp. 1857-1869.

[9] **Seibert K.D., ve M.A. Burns.** 1996: Simulation of fluidized beds and other fluid-particle systems using statistical mechanic. *AIChE Journal*, **3** (42), pp. 660-670.

[10] **Hjertager, B.H., V. Mathiesen, ve T. Solberg.** 1999: Computational analysis of some fluidized systems. *AIChE Symposium Series*, **321** (95), pp. 1-6.

[11] **Vojtec V., ve R. Drbohlav.** 1966: Fluidized Bed *Drying Chemical and Process EngineeringSeries,* pp 17-81.

[12]] **Robinson, J.W.**, 1992: Improve dryer control. *Chem.Eng. Prog.,* pp. 28-33.

[13] **Perry, R.H. ve C.H. Chilton.** 1973: Chemical Engineers Handbook. *McGrawHill Book Company, Newyork*.

[14] **Robinson, J.W.,** 1992 Improvement dryer control *Chem. Eng. Prog. Februarry*, pp. 28-33.

[15] **Allen, T.** 1974: Particle size measurement. *Chapman and Hall Ltd. London*

[16] **Wen C.Y. ve Y.H. Yu.** 1966: Mechanics of fluidization. *Chem. Eng. Prog. Symp*. **Ser**, pp. 100-111.

[17] **Becker, H** 1959: A study of diffusion in solids of arbitrary shape with application to the drying of wheat kernel. *Journal of Applied Polymer Science* , **1**, 212–226.

[18] **Ciesielczk, W.** 1996: Analogy of heat and mass transfer during constant rate period in fluidized bed dryer. *Drying Technology* **14** (2), 217–230.

[19] **Geldart D. ve R.R. Cranfiel,** 1972: The Gas fludization latge particles. *Chem Eng*. J **3** 211:231.

[20] **Liptak, B.** 1998: Optimizing drying performance through better control. *Chem. Eng. Prog.* **Februarry**, pp. 110-114.

[21] **Kuni, D ve O. Levenspiel.** 1969: Latereal dispersion of solid in fluidized bed. *J.Chem. eng. Japan*. **2** (1): 122-125.