

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKAN YATAKTA
KURUTMA PROSESİNİN İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Orkan KURTULUŞ

**FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN (YTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Akışkan Yatak Sistemleri	2
1.2 Akışkan Yatak Sistemleri ve Uygulamaları	3
1.3 Isı Pompası Sistemleri	5
1.4 Akışkan Yatak Sistemi ile Isı Pompasının Birlikte Kullanılması	6
2. AKIŞKAN YATAK VE KURUTMA	7
2.1 Akışkan Yatak Sistemleri	7
2.2 Gıda Kurutma	16
2.3 Akışkan Yatakta Gıda Kurutma Sistemleri	19
2.4 Araştırma Sonuçları	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
3.1 Deneysel Çalışmada İncelenecek Ürünler	28
3.2 Hesap Yöntemi	28
3.3 Basınç Düşümü Hesapları	29
3.3.1 Akışkan Yatak İçerisindeki Basınç Düşümü Hesapları	29
3.3.1.1 Minimum Akışkanlaştırma Hızı	29
3.3.1.2 Ergun Denklemi;	32
3.4 Deneysel Ölçümler	33
4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMİNİN TEORİK HESAPLARI	40
4.1 Kurulacak Olan Sistemin Elemanları	42
4.1.1 Veri Toplama Sistemi	42
4.1.2 Debimetre	42
4.1.3 Duyar Elemanlar	43
4.1.4 Dijital Hassas Terazi	43
4.1.5 Frekans Konvertörü	43
4.1.6 Vakum Pompalı Şarj İstasyonu	43
4.1.7 Gaz Toplama Ünitesi	44

4.1.8	Pleksiglas Boru.....	44
4.1.9	Soğutucu Gaz.....	44
4.2	Akışkan Yataktaki Eleğin Basınç Düşümü	44
4.3	Toplam basınç kaybı.....	45
5.	SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR.....		47
EKLER		50
Ek 1 Hesabı Yapılan Hava Kanalları için Kullanılan Tablolar ve Grafikler.....		51
ÖZGEÇMİŞ.....		54

SİMGE LİSTESİ

ΔP	Basınç düşümü, [Pa]
Ar	Arşimed sayısı [Boyutsuz]
B	Minimum akışkanlaştırma formülünde çarpan
d_k	Kanal eşdeğer çapı [m]
Dp	Partikül efektif çapı [m]
F_i	Hava kanalının kesit alanı [m ²]
L	Akışkan yatak uzunluğu, [m]
l	Hava kanalı uzunluğu [m]
P_{dyn}	Hava kanalı içerisinde oluşan dinamik basınç düşümü [Pa]
Q_h	Hava kanalı içerisindeki debi [m ³ /h]
Q_s	Hava kanalı içerisindeki debi [m ³ /s]
R	Hava kanalı boru sürtünme direnci [mmSS/m]
u_m	Minimum akışkanlaştırma hızı [m/s]
w	Hava kanalı içerisindeki hava hızı [m/s]
Z	Özel direnç kaybı [mmSS]
ε	Akışkan yatak boşluk oranı [Boyutsuz]
ε_k	Kanal pürüzlülük katsayısı [Boyutsuz]
λ_k	Hava kanalı özel direnci
μ_f	Havanın viskozitesi [Ns/m ²]
ζ	Hava kanalı üzerindeki elemanların özel direnci [Boyutsuz]
ρ_f	Havanın özgül ağırlığı [kg/m ³]
ρ_p	Partikülün özgül ağırlığı [kg/m ³]
Φ	Silindirlilik oranı [Boyutsuz]

KISALTMA LİSTESİ

CFD Computational fluid dynamics

ISE Integral squared error

Malz. Malzeme

Max. Maksimum

Min. Minimum

PLC Programmable Logic Control

SLOGGER Serial logger

ASABE American Society of Agricultural and Biological Engineers

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Akışkanimsı davranışlar (Kunii, 1977)	3
Şekil 1.2 Isı pompası (www.wikipedia.org).....	5
Şekil 2.1 Debi metrenin şematik görünümü (Gerald, 1952)	7
Şekil 2.2 Malzemelere göre kalibrasyon eğrileri (Gerald, 1952)	8
Şekil 2.3 Akışkan yatak ve elek tasarımı (Heperkan, 1985)	10
Şekil 2.4 Boraks üretilen akışkan yatağın şematik gösterimi (Akçay, 1996).....	12
Şekil 2.5 Akışkan yatak ve filtrenin boyutları (Ross, 1999)	13
Şekil 2.6 Akışkan yatak deney şekli (Chopard, 2003)	14
Şekil 2.7 Akışkan yatak içinde oluşabilecek kabarcıklar (Kunii, 1977)	15
Şekil 2.8 Kabarcıkları incelemek için hazırlanmış deney düzenekleri (Johnsson, 2004)	15
Şekil 2.9 Ambar kurutması ve kabin kurutması (Dwayne, 2005)	18
Şekil 2.10 Çay kurutma sistemi (S.J. Temple, 2000)	20
Şekil 2.11 SLOGGER kontrol algoritması (S.J. Temple, 2000)	22
Şekil 2.12 Akışkan yatak (Istadi, 2002)	23
Şekil 2.13 Akışkan yatak sistemi (Burgscweiger, 2002),.....	24
Şekil 2.14 Akışkan yatak deney sistemi (Gül, 2003)	26
Şekil 3.1 Akışkan yatak deney düzeneği	33
Şekil 3.2 Bulgurun basınç düşümü eğrileri	35
Şekil 3.3 Kırmızı mercimeğin basınç düşümü eğrileri	35
Şekil 3.4 Çayın basınç düşümü eğrileri	36
Şekil 3.5 Malzemelerin yatak uzunluğuna bağlı akışkan yatak basınç düşümü grafiği	38
Şekil 3.6 Malzemelerin min. akışkanlaştırma hızı akışkan yatak basınç düşümü eğrileri	39
Şekil 4.1 Tasarlanan akışkan yatağın şematik gösterimi	40

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Kurutulmak İstenen Ürünlerin Fiziksel Özellikleri.....	28
Çizelge 3.2 Minimum akışkanlaştırma hızı korelasyonları (Köse, 1995).....	30
Çizelge 3.2 Minimum akışkanlaştırma hızı korelasyonları (devam).....	31
Çizelge 3.3 Bulgurun deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması.....	37
Çizelge 3.4 Kırmızı mercimeğin deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması	37
Çizelge 3.5 Çayın deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması	37
Çizelge 3.6 Malzemelere göre min akışkanlaştırma hızları ve basınç düşümleri	38
Çizelge 4.1 400x400 hava kanalında hesaplanan toplam basınç düşümleri.....	45

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan, değerli katkılarını benden esirgemeyen tez danışmanım Yıldız Teknik Üniversitesi. Makine Fakültesi öğretim üyesi Sn. Prof. Dr. Hasan A. Heperkan 'a , deneysel çalışmalarda gösterdiği yardımlar ve çalışmalarım süresince verdiği destekten dolayı Sn. Arş. Gör. Burak Olgun'a, tüm çalışmalarım süresince bana daima destek olan Aileme teşekkür ederim.

ÖZET

Tarih boyunca gıdaya olan ihtiyaç her zaman büyük önem taşımıştır. Bu ihtiyaçtan dolayı gıda maddelerini uzun süre saklayabilmek ve koruyabilmek için gıda kurutması işlemi önem kazanmıştır. İlk zamanlarda doğal kaynaklardan yararlanılarak yapılan gıda kurutması işlemi için teknolojinin gelişmesiyle birlikte çeşitli sistemler oluşturulmuştur. Kurutma işleminde kurutma sıcaklığı ve kurutma hızı malzemeye göre değişmektedir. Kurutma işlemi sırasında malzemenin özelliklerine göre belirli bir sıcaklıktan yukarıya çıkılamaz. Sıcaklığın belirlenen kritik değerden fazla olmaması istenir. Bu nedenle kurutma süresi sıcaklıktan daha çok, kurutma havasının hızına bağlı olarak değişir. Dolayısıyla kurutma süresinin yeterince kısabilmesi için kurutma havasının ürüne tam olarak nüfuz etmesi gerekir. Bununla birlikte kurutma işleminde sistemde havayı ısıtmak için verilen enerji en büyük sorunlardan biridir. Gıda kurutmasındaki enerji ekonomisi yüzünden son dönemlerde gıda kurutması işlemlerinde akışkan yatak kullanımı büyük önem kazanmıştır.

Akışkan yatak sistemleri yakıt yakma sistemlerinden nükleer araştırmalara, medikal sistemlerden gıda kurutma sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Son zamanlarda akışkan yataklı sistemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Genel olarak yapılan araştırmalarda akışkan yataklı kurutma sistemleri laboratuvar boyutlarında hazırlanıp extrapolyasyon yapılarak büyük sistemlere adapte edilmektedir.

Araştırmalarda yaşanan en büyük zorluk akışkan yatağın yaratacağı basınç düşümünü simüle edebilmektir. Akışkan yatak sistemlerinde en büyük basınç düşümü akışkan yatak içerisinde oluşmaktadır. Akışkan yatak içerisinde oluşacak bu basınç düşümü için akışkan yatak içerisinde minimum akışkanlaştırma hızının bulunması gerekmektedir. Literatürde minimum akışkanlaştırma hızı için bir çok korelasyon bulunmaktadır; bunlar yapılan deneyler sonucu elde edilmiş ampirik ifadelerdir. Minimum akışkanlaştırma hızına göre akışkan yatak içerisinde oluşabilecek basınç düşümü hesaplanabilir.

Bu tez çalışmasında literatürdeki minimum akışkanlaştırma hızını veren korelasyonlar için ayrı ayrı hesaplar yapıp daha sonra bir akışkan yatak üzerinde fiziksel özellikleri bilinen maddeler için akışkanlaştırma işlemi incelenmiştir. İncelenen maddelerin ölçüm sonucu bulunan minimum akışkanlaştırma hızları, matematiksel korelasyonlar ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılıp, gerçeğe en yakın değerler bulunmaya çalışılmıştır.

Kurulması planlanan akışkan yataklı kurutma sistem için gerekli ekipmanlar ve özellikleri ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: akışkan yatak, akışkan yatakta kurutma, ergun denklemi, minimum akışkanlaştırma hızı

ABSTRACT

Throughout history, there has always been a significant need for food. This need has played an important role in terms of the processes for preserving food for a long time and drying food is one of those processes. In the early days, mainly natural resources were utilized to dry food, however along with the advancements in technology; various systems have been developed to serve the same purpose. In the process of drying food, the temperature as well as the rate of drying may vary according to the type of material. During the process, depending on the type of material, temperatures exceeding a particular value can not be applied. The temperature is desired to remain under a certain critical value. For this reason, the duration of the drying process varies depending on the drying rate rather than the temperature itself. Therefore, to shorten the duration of the drying process significantly, drying air should completely penetrate into the material. However, the energy supplied to heat the air in the system during the drying process is one of the main problems. Due to energy saving policies, the utilization of fluidized beds gained a great importance in food drying processes recently.

Fluidized bed systems are used in a wide range of activities such as fuel burning systems, nuclear research, medical systems and food drying systems. Especially, use of fluidized beds has increased to a large extent recently. Fluidized bed drying systems from general research are adapted to large systems after extrapolation.

The main problem encountered during the research is the simulation of the pressure drop that emerges due to fluidization. In fluidized bed systems, the highest pressure drop takes place within the bed. To estimate this pressure drop in the fluidized bed, the minimum fluidization velocity should be calculated. There are various correlations for the minimum fluidization velocity in literature and these are empirical statements achieved through experiments. The pressure drop can be calculated after the minimum fluidization velocity is determined.

In this study, separate calculations with correlations in literature for the minimum fluidization velocity are carried out and subsequently the fluidization process is examined in a fluidized bed for materials with known physical properties. The minimum fluidization velocity values calculated for these materials are compared with the values calculated based on mathematical correlations, to predict real minimum fluidization values.

The necessary equipment and their characteristics for a fluidized bed drying system are explained in detail.

Keywords: Fluidized Bed Drying, Ergun Equation, Minimum Fluidization Velocity

1. GİRİŞ

Kurutma işlemi, kurutulacak ürün üzerinde bulunan su miktarının çeşitli yöntemlerle ürün ya da parçacık üzerinden uzaklaştırılmasıdır. Kurutma işlemi, birçok üründe çeşitli sistemler ile yapılabilmektedir. En basitinden saç kurutması, ya da şeker fabrikalarındaki şekerlerin işleminden sonra kurutulması, gıdaların kurutulması, %100 oranda alkol elde edilmesi ya da yaş ağacın işlem görmeden önce içindeki suyun dışarı alınması örnek olarak verilebilir. Görüldüğü üzere kurutma işleminin birçok uygulama alanı vardır. Kurulacak olan deney tesisatında gıda kurutması üzerinde durulmuştur.

Endüstriyel gıda kurutmasına bilimsel yaklaşım 18.yy da başlamıştır. Gıda kurutması işlemi ilk olarak sebze kurutması ile 18. yüzyılda gerçekleşmiştir. Uzun soluklu savaşların devam etmesiyle birlikte gıdaya olan ihtiyaç insanları gıda kurutması teknolojisine yönlendirmiştir. Örnek olarak Kırım'daki İngiliz askerleri (1854-1856) yanlarında ülkelerinden getirmiş oldukları sebzelerle idare etmişlerdir. Yine aynı şekilde, Kanada'dan kurutulmuş olan sebzeler Güney Afrika'daki Boer Savaşı'ndaki (1899-1902) askerleri beslemek amacıyla yollanmıştır. Bir başka örnekte ise 1. Dünya Savaşı'nda yaklaşık olarak 4500 tonluk kurutulmuş ürün Amerika'dan birliklere gönderilmiştir. (Gongora-Nieto, 2001)

Gıda kurutması biyokimyasal, kimyasal ve gıda endüstrileri gibi süreçlerde çok önemli bir işlemdir. Kurutmanın temel amacı malzemeden suyun uzaklaştırılmasıdır. Gıdalarda kurutma işlemi ile kurutulmak istenen ürünün içindeki su alınarak, mikro organizma bozulmalarını azaltmak ya da durdurmak hedeflenmektedir. Bir başka açıdan bakılacak olunursa, kurutulan malzeme içerisinde herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşmasını engellemek temel hedeftir.

Gıda kurutması işlemlerinde iki ifade vardır. Bunlardan biri dehidre edilmiş ürün diğeri ise kurutulmuş üründür. Kurutulmuş ürün ile dehidre edilmiş ürün farklı anlamlar içermektedir. Amerikan Tarım Departmanının açıklamasına göre içinde %2,5 dan fazla su bulunmayan ürünler dehidre edilmiş ürün, içerisinde %2,5 dan fazla su bulunan ürünler ise kurutulmuş ürün olarak ifade edilmektedir. (Gongora-Nieto, 2001)

Gıda kurutma sistemleri kullanım amaçlarına göre sıralanacak olunursa; güneşte kurutma, suni kurutma, kombine kurutma olarak sıralanabilir. Güneş enerjisi ile kurutma işlemi açık havada yapılmaktadır; hijyenik açıdan pek tavsiye edilmeyen bir sistemdir. Suni kurutma işlemi ile dışarıdan alınan havanın elektrikli bir ısıtıcı, ya da yakma sistemleri aracılığıyla kurutulduktan sonra gıda maddesiyle temas ettirilmesi işlemidir. Kombine kurutma sistemi ise güneş enerjisi ile birlikte suni kurutma sistemlerinin bütünleşik olarak kullanıldığı kurutma

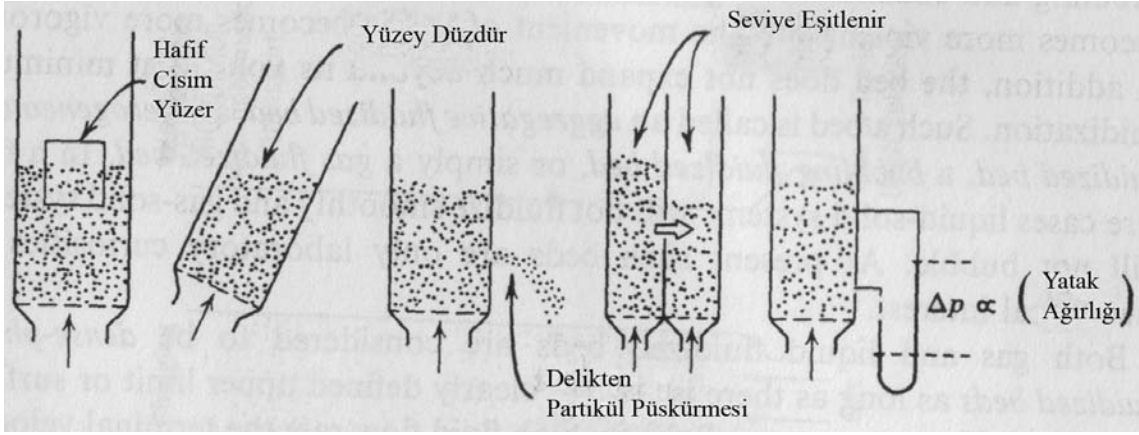
sistemleridir. Bu sistemlere tepsili ve kabin tipli kurutma sistemleri örnek olarak gösterilebilir. (<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>).

Kurutma süreçleri genel olarak doğrusal olmayan süreçler olarak bilinir. Tarımsal ürünler, gıda maddeleri, maya, enzim ve bakteri türü biyolojik ürünler, kurutma süreci boyunca sıcaklık, nem oranı gibi kurutma koşullarına karşı çok hassas davranış gösterirler. Bu yüzden kurutma süreçlerinin modellemeleri oldukça karmaşık ve zordur.

Gıda kurutmasında ihtiyaca göre ya da kurutulmak istenilen ürüne göre genel kurutma sistemleri ya da özel kurutma sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar genel başlıklar altında isimlendirilecek olursa; tepsili kurutma, kabinli kurutma, tünel kurutma, tamburlu kurutma gibi adlandırılan kurutma sistemleridir. Bunun yanında özel kurutma sistemleri de olduğu bilinmektedir. Bu sistemlerde, kurutma prosesi sırasında, kurutma havası ve kurutulacak ürünün tam olarak buluşması istenir. Özel kurutma sistemlerinin tercih edilmesinin bir başka nedeni ise bazı durumlarda çok ekonomik olmayan kurutma işleminin ekonomik hale getirilmeye çalışılmasıdır. Özel kurutma istemleri arasında en çok uygulamaya sahip olanlar sprey kurutma, vakum kurutma, dondurarak kurutma, akışkan yataklı kurutma sistemleridir. (University of Texas, 2005)

1.1 Akışkan Yatak Sistemleri

Akışkanlaştırma işlemi, fan aracılığıyla basınçlandırılan havanın veya pompa aracılığıyla basınçlandırılan akışkanın; akışkanlaştırılmak istenen katı parçacıkları arasından, ürüne etki eden yer çekimi kuvvetini yenecek kadar yüksek hızla geçirilerek, parçacıkların askıda tutulmasıdır. Akışkanlaştırılacak malzeme silindirik bir boru (yatak malzemesi) içerisine konulur. Sistemde akışkan yatağın silindirik seçilmesinin nedeni, yatak içerisinde sivri köşe olması durumunda hava veya akışkanın oluşan boşluktan kaçarak homojen bir dağılımı kötü yönde etkilemesidir. Malzeme ya da kurutulacak ürün havada askıda kalarak homojen bir yapı meydana gelir. Bu sayede sistemimizin içindeki ürün ya da malzeme bir akışkan gibi davranışta bulunur. Şekil 1.1’de basitçe akışkanlaştırılmış bir sistemin tepkileri şekillerle gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Akışkanimsı davranışlar (Kunii, 1977)

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi eğer basit fizik kurallarını akışkan yatak üzerinde uygulayacak olursak şu sonuçlar görülür. Birinci şekilde görüldüğü üzere akışkan yatak içerisindeki akışkanlaşmış ürünün üzerine hafif bir cisim koyarsak cisim genel tabiriyle akışkan üzerinde yüzermiş gibi en üstte yüzer şekilde durur. İkinci şekilde görüldüğü üzere sistemi açılı bir konuma getirirsek yine akışkan gibi davranıp yüzeyi düz olacak şekilde durur. Üçüncü şekilde ise sistem üzerinde delik açacak olursak yine akışkanimsı davranan parçacıklar bu açılan delikten dışarı doğru akarlar. Dördüncü şekilde ise iki farklı yükseklikteki sistemi ortalarından bir bölgeden birleştirecek olursak üst yüzeylerinin seviyeleri birleşene kadar aralarında parçacık transferi olacaktır. Beşinci resimde ise akışkanimsı davranan parçacıkların alt noktasından ve üst noktasından yapılan basınç ölçümünde sistemin statik basıncını ölçebilmekteyiz. Parçacıkları havada askıda tutmayı sağlayan hava hızları, üründen ürüne özellikle de parçacık büyüklüğüne ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir.

1.2 Akışkan Yatak Sistemleri ve Uygulamaları

Akışkan yatak kullanımı her sektörde geçerlidir. Geçmişten günümüze yapılan sistemler ile akışkan yatak kullanım yelpazesi genişlemiştir. Akışkan yatak ve akışkanlaştırma bilimi, katı cisimlerin akışkanlaştırılıp yakılmasından tanecikli ürünlerin kurutulmasına kadar çok geniş alanlarda incelemeler yapmıştır.

Kömür tozu gibi katı yakıtların akışkanlaştırılması sonucu yakılması “**sıcak akışkan yatak**” olarak belirtilmiştir. Sıcak akışkan yatak sistemi ile katı parçacık gazlaştırılarak daha yüksek verimli bir yakma işlemi sağlanmak istenilmektedir. Bu sayede yakılması istenilen parçacıklardan maksimum derecede yararlanılmış olunur.

Katı parçacıkların akışkanlaştırılıp içerisindeki suyun dışarı alınması işlemi ise literatürde “soğuk akışkan yatak” olarak geçmektedir. Araştırma yapılmış sistemler genelde laboratuvar koşullarından hazırlanmış deney sistemleridir ve elde edilen sonuçlara göre extrapolasyon yapılarak araştırma sonuçları büyük sistemlere adapte edilmektedir.

Akışkan yatakların kurutma ile ilgili avantaj ve dezavantajlarına bakalım (Kunii, 1977).

Akışkan yatak kullanımının faydaları;

- Akışkan yatak içerisinde oluşan homojen yapı sayesinde akışı sürekli kılmak ve akışı kontrol etmek kolaydır.
- Akışkan yatak içerisinde karışım izotermal şartlar yaratır, karışımı kontrol etmek kolaylaşır.
- İzotermal bir sistem olmasından ötürü homojen bir kurutma sağlanır.
- Isı ve kütle transferi verimleri diğer konvansiyonel kurutma sistemlerine göre daha yüksektir.
- Yüksek verimlerden ötürü kurutma süresi kısadır.

Akışkan yatak kullanımının zorlukları;

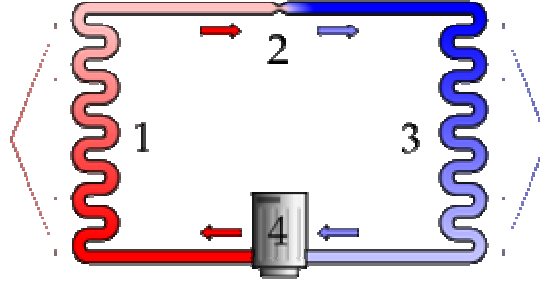
- Akışkanlaşmış olan parçacıkları akışkan yatak içerisinde tanımlamak zordur. Büyük miktardaki sapmalara yol açan durmalar havanın tanecikler ile karşı karşıya gelmesini engellemektedir.
- Hızlı karışımlarda katı parçacıkların homojen olmayan şekilleri yüzünden bazı akışkan yatak sistemlerinde akışkan yatak performansı düşmektedir.

Görüldüğü üzere akışkan yatak kullanımının faydaları zorluklarına göre daha fazladır.

1.3 Isı Pompası Sistemleri

Isı pompası düşük sıcaklıkta bir ortamdan yüksek sıcaklıkta bir ortama ısı enerjisi aktaran bir makinedir. Şekil 1.2’de ısı pompası çevrim şeması görülmektedir. Sistemin elemanları numaralarına göre açıklanırsa.

1. Yoğuşturucu (Kondenser)
2. Genişleme Valfi
3. Buharlaştırıcı (Evaporatör)
4. Kompresör



Şekil 1.2 Isı pompası (www.wikipedia.org)

Soğutma makineleri ve ısı pompaları aynı çevrimi gerçekleştirirler, fakat kullanım amaçları farklıdır. Bir soğutma makinesinin amacı düşük sıcaklıktaki ortamı, ortamdaki ısıyı çekerek çevre sıcaklığının altında tutmaktır. Daha sonra çevreye veya yüksek sıcaklıktaki bir ortama ısı geçişi, çevrimi tamamlamak ve yapılması zorunlu bir işlemdir fakat amaç değildir. Isı pompasının amacı ise bir ortamı sıcak tutmaktır. Bu işlemi yerine getirmek için düşük sıcaklıktaki bir ısı enerjisi deposundan alınan ısı, ısıtılmak istenen ortama verilir. Düşük sıcaklıktaki ısı enerjisi deposu genellikle soğuk çevre havası, kuyu suyu veya toprak, ısıtılmak istenen ortam ise bir evin içidir.

Isı pompasının ağırlıklı kullanım alanları, gıda soğutma veya dondurma işlemleri, hava şartlandırma sistemleri veya konfor sistemleri, akışkan soğutma sistemleri (Chiller), veya soğuk su hazırlama sistemleridir.

1.4 Akışkan Yatak Sistemi ile Isı Pompasının Birlikte Kullanılması

Kurulacak deney sisteminde kapalı sistem akışkan yatak ile tümleşik çalışan ısı pompası kullanılacaktır. Doğrudan ısı pompasının kullanılmasının nedenlerinden biri, elektrik tahrikli bir sisteme göre daha az enerji harcayarak kurutma işleminin gerçekleşmesidir. Kapalı bir sistem olması sonucu sisteme verdiğimiz enerjiyi dışarı atmayıp ısı pompası çevriminde tekrardan kullanarak enerjiden tasarruf etmek istenilmektedir. Sistemin kapalı bir sistem olmasından dolayı havanın nem tutma özelliğinden max. faydalanılmaktadır. Yine sistemin kapalı bir sistem olmasından dolayı hijyenik açıdan avantajlı olmaktadır.

Amaç, deney düzeneğinde akışkan yatak ile kurutma işlemi ile gıda ürünleri açısından homojen kurutmanın etkilerini belirlemek ve sabit kurutma için ısı iletim katsayılarını hesaplamaktır. Isı pompası sistemde ise ısı pompasına şarj edilen gaz miktarına göre soğutma performansının belirlenmesi planlanmaktadır. İlk olarak incelenecek olan soğutucu akışkan R134a'dır. İleriki safhalarda izobütan, CO₂, gibi günümüzde soğutma sistemlerinde kullanılması düşünülen ve incelemeleri hala sürmekte olan soğutucu akışkanlar incelenecektir.

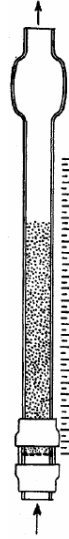
2. AKIŞKAN YATAK VE KURUTMA

2.1 Akışkan Yatak Sistemleri

1949’da hazırlanmış “Fluidization Nomenclature and Symbols” adlı makalede Walter J. Murphy akışkanlaştırma alanındaki hızlı gelişen bilimin anlamsal bazı problemler içerdiğini anlatmaktadır. Akışkanlaştırma bilimine bir standartlaştırma getirmek amacıyla çeşitli terim ve semboller kabul edilmek istenmiştir. Bu nedenden yola çıkılarak akışkanlaştırma üzerine çalışan bir grup insanın ortaklaşa çıkardığı sembol ve terim listesi oluşturulmuştur. Yazıda ayrıca ortaya çıkarılan sembol ve terimlerin statik olmadığı aynı zamanda çıkarılan listenin mükemmel olmadığı hala gelişmekte olduğu belirtilmiştir. Liste İngiliz sisteminde verilmiş, akışkan yatak bilimi ile alakalı olan terimler açıklanmıştır.

C.F. Gerald, 1952 yılında yazdığı “Fluid Bed Flowmeter” adlı makalesinde incelenen debimetrenin yazıldığı seneye kadar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığını belirtmiştir.

Debimetrenin bazı önemli özellikleri vardır. Bunlar; basit bir sistem olması, içerisinde devamlı akış sağlanıyor olması, korozif sistemlerde çalışma olanağı, küçük taşınabilir bir hacim olması ve basınç düşümünden etkilenmeyen yüksek hassasiyetli bir model olmasıdır. Şekil 2.1 ‘de debi metrenin şematik şekli görülmektedir.



Şekil 2.1 Debi metrenin şematik görünümü (Gerald, 1952)

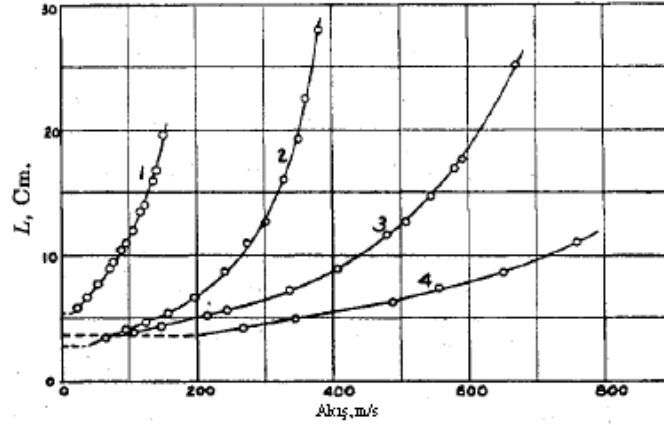
Kısaca sistemi açıklamak gerekirse sistemde 2 inç (50 mm) iç çapında yaklaşık 1mm kalınlığında cam tüp kullanılmıştır. Bir diğer açıklamaya göre debimetreyi şeffaf herhangi bir

malzeme ile imal etmek mümkündür. Ancak diğer şeffaf olmayan malzemeler bile kullanılabilir. Burada elde edilmek istenen bir şekilde akışkan yüksekliğini görebilmektir. Debimetrenin malzemesi konusunda, ultrasonik sistemlerle ya da diğer başka sistemlerle, akışın debimetre içinde takip edilebildiği sürece sorun kalmamaktadır.

Şekil 2.1'de üst kısımda görülen bombenin nedeni kaza ile oluşabilecek taşmaların engellenebilmesidir. Deney düzeneğinde geniş yüzeyli materyaller kullanılmaktan kaçınılmıştır. Kullanılan malzemeler, cam küreler, ottawa kumu ve kırılmış granittir.

Deney malzemelerinin çapları $\sqrt{2}:1$ arasındadır. Bu çaplarda akışı etkileyecek herhangi bir etki görülmemiştir. Parçacık çapına bağlı herhangi bir denge problemi ortaya çıkmamıştır. Yine aynı şekilde hysteresis etkisinin oluşmaması da bu yaklaşımı doğrulamaktadır.

Genel olarak bu çaplarda çalışılırsa çıkarılan kalibrasyon eğrileri daha düzgün olmaktadır. Şekil 2.2'de debimetrenin test edildiği malzemelerin kalibrasyon eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.2 Malzemelere göre kalibrasyon eğrileri (Gerald, 1952)

Test edilen malzemeler şunlardır:

1. 45-65 mm kırılmış granit
2. 28-35 mm cam küreleri
3. 14-20 mm cam küreleri
4. 1/16 inç cam toroids

Debimetrede bu inceleme ve diğ er kaynaklara göre tüp ç apına superficial lineer hız etki etmemektedir. Ç alışmada diğ er kaynaklarda incelenen debimetrelelere göre daha büyük ç aplı bir tüp kullanılmıştır.

1963 yılında Rose, A., Smith, H., tarafından hazırlanan “Fluidized Bed Dryers” adlı makalede akışkan yatak özellikleri anlatılmıştır. Makalede ayrıca akışkan yatağ a etki eden faktörlerden kısaca bahsedilmiştir. Oluşturulmuş olan deney tesisatı üzerindeki verilere göre ısı dengesi, kütle dengesi, gerekli hava, ç ıkan havanın bağ ıl nemi hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerden ayrı olarak akışkan yatak üzerinde bulunması gereken cihazlardan kısaca bahsetmişlerdir. Bunlar fan, ısıtıcı ünite, hava egzoz sistemi, kontrol sistemi gibi elemanlardır.

1967 “Heat Transfer in Fluidized Beds” adlı makalede Peter Harriott, L. A. Barnstone, akışkan yatakta ısı transferi denklemlerini ç ıkarmışlardır. J.J. Barker isimli yazarın makalesine atıfta bulunmuşlardır. Bazı şartlar için denklemler ç ıkarılmıştır. Bu denklemler ısı transferi denklemleri, gaz kabarcıkları arasındaki ısı transferi denklemleri, katalist egzotermik reaksiyon denklemleri, katalitik olmayan egzotermik reaksiyon denklemleridir. Ç ıkarılmış olan denklemler ayrı ayrı incelenip yorumlanmıştır.

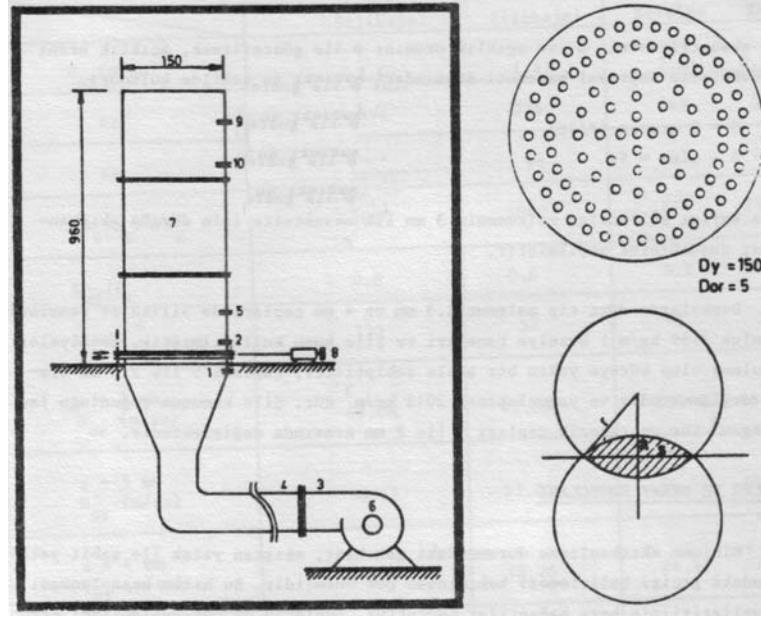
1981 yılında hazırlanıp American Chemical Society tarafından yayınlanmış olan “Jet Penetration in a Pressurized Fluidized Bed” adlı makalede jet tesiri verileriyle ilgili inceleme yapılmıştır. Laboratuarda atmosferik basınçta incelenmiş olan malzemelerin nümerik sabitlerinin farklı olduğu görölmüştür. Malzemeler:

1. Ottawa kumu
2. FMC kömürü
3. Siderit

Makalede kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri verilmiştir. Kullanılan akışkan yatak 30 cm yüksekliğ inde ve 2,5 cm ç apında olup, akışkan olarak azot ve dağ ıtıcı nozulu kullanılmıştır. Yapılan deneysel ç alışmalarda çeşitli basınçlarda deneysel ve teorik hızların karşılaştırılmaları yapılmıştır. Sonuç olarak bulunan ve yapılan korelasyon ile deneysel hesaplamalar birbirini çok yakın değerlerle tutmaktadır. Bu korelasyon ile akışkan yatak tasarımında kolaylık saç lamaktadır. İncelen makale 1981 yılına kadar akışkan yatak için yapılmış olan ilk korelasyonlardan biridir.

Hüseyin Vural ve Hasan Heperkan, 1985 yılında “Akışkan Yataklarda Ç ift Katlı Dağ ıtıcı Elek Kullanımı” adlı makalelerinde akışkan yatak tasarımında özellikle önem verilmesi gereken

konunun basınç düşümü olduğunu vurgulamışlardır. Hazırlanan makalede delik açıklıkları ayarlanabilen bir eleğin çeşitli malzemeler ile basınç düşümü hesapları yapıp tablo ve grafik şeklinde sonuçlar çıkarılmıştır. Elek değiştirilmeden farklı malzemelerin akışkanlaştırılması sağlanmıştır. Sistemin ve eleğin şekli Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3 Akışkan yatak ve elek tasarımı (Heperkan, 1985)

Şekil 2.3’de görülen akışkan yatak üzerinde 1, 2, 3, 4, 5 ve 9 noktalarından basınç ölçümü yapılmaktadır. 6 numarada kompresör gözükmektedir. 7 noktası serbest bölge olarak belirtilmiştir. 8 noktasında aynı anda sistem üzerindeki basınç düşümleri de incelenen çift katlı dağıtıcı elek bulunmaktadır. 10 noktasında ise hız ölçümü yapılmaktadır.

Sistemde şu malzemeler kullanılmıştır.

1. Silikajel
2. Bezelye
3. Kum

Deney sonuçlarına göre 5mm açıklıkta eleğin verdiği maksimum basınç 550 Pa elde edilmiştir. Elek açıklığı 3mm alındığında maksimum basınç kaybı 950 Pa kadar ulaşmıştır. Eğer elek açıklığı 2 mm olursa bu sefer elektteki basınç düşümü maksimum olarak 4000 Pa mertebelerine ulaşmıştır. Görüleceği üzere elek üzerindeki açıklık değıştikçe basınç düşümü de değışmektedir.

Mateer, David D., Novak, Lawrence T tarafından 1986 yılında hazırlanmış “Trickling Flow Pressure Drop in Packed Beds of Formed Catalysts” adlı makalede, 1,3mm ve 9,5 mm çapındaki partiküller için kabarcıklı akış basınç düşümü hesabı yapılmıştır. Ergun denkleminin modifiye edilmiş halinde boşluk oranı ile kabarcıklı akış arasında uygun bir ilişki bulunmuştur. Deney sistemindeki elemanlar, suyu akışkan yatak içine püskürtecek nozul, basınç tapası, su manometresi ve hava ve suyun debisini ölçebilmek için rotometre olarak belirtilmiştir. Deneysel çalışmada basınç etkilerinden ölçüm yapılmıştır. Deney düzeneğinde hem yüksek basınç hem de alçak basınç etkileri gözlemlenmiştir. Deney sonuçları daha sonra tablo olarak hazırlanan makale içerisinde gösterilmiştir.

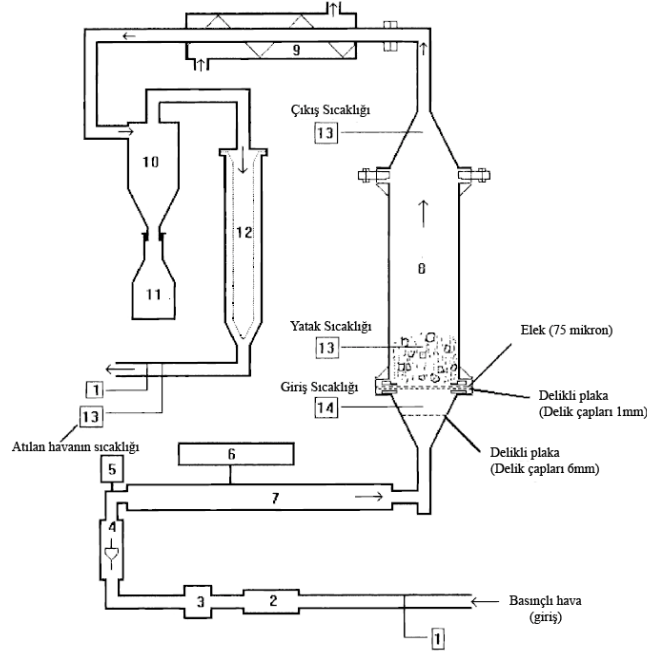
Ramazan Köse 1995 yılında hazırlanmış olduğu “Akışkanlaştırma Hızı ile Akışkan Yataklı Yakıcılar Arasındaki İlişkinin İncelenmesi” adlı makalesinde, minimum akışkanlaştırma hızlarını veren denklemleri teker teker tablo halinde vermiştir. Verilmiş olan denklemlerden başlıcaları, Wen & Yu, Davies & Richardson, Leva gibi araştırmacıların bulduğu denklemlerdir. Bütün denklemler gösterildikten sonra denklemler irdelenip çeşitli faktörlere bağlı değişimleri grafiksel olarak sunulmuştur. Örnek olarak tanecik çapı ile akışkanlaştırma hızı arasındaki ilişkiyi veya sabit tanecik çapında min. akışkanlaştırma hızının sıcaklıkla değişimini görebilmekteyiz

Deney sonuçları bize küçük taneciklerin akışkanlaştırma hızlarının basınçtan pek etkilenmediğini söylemektedir. Diğer taraftan büyük ve yoğunluğu yüksek taneciklerde ise basınç artışıyla taneciğin akışkanlaştırma hızlarının azaldığı görülmüştür.

1995 “Fluidized-Bed Bioreactors” adlı makalelerinde Francesc Godia, Carles Sola adlı yazarlar, akışkan yatak bioreaktörleri hakkında bilgiler vermişlerdir. Hazırlanan makalenin geri kalan kısmında akış şekilleri, değişik fazdaki parçacıkların naklinin mekanizması, bioreaktör içindeki çekirdek oluşumu hakkında bilgiler yer almaktadır. Ek olarak akışkan yataklı bioreaktörlerin geliştirilmesi ile ilgili bilgiler de verilmektedir. Bioreaktör içindeki reaksiyon ve difüzyonu incelenip denklemler sırasıyla verilmiştir. Makale içerisinde kütle dengesini hesaplayan denklemlere de değinilmiştir.

“Production of Anhydrous, Crystalline Borax in a Fluidized Bed”, S. Kocakuşak, K. Akçay, T. Ayok, H.J. Köroğlu, Ö.T. Savaşçı, R. Tolun, tarafından 1996 da yayınlanan makale, bileşiminde su bulunmayan boraks üretiminin ne kadar zor bir üretim olduğu ve üretim maliyetinin ne kadar çok olduğu üzerine bilgiler içermektedir. Yapılan çalışmada susuz boraksın üretim kalitesinin artırılması, üretim sırasında oluşan aşırı sıcaklıktan boraksın

erimemesi için daha düşük sıcaklıklarda çalışması ve üretim maliyetleriyle üretim zorluklarını basitleştirmek amaçlı incelemeler yapılmıştır. Yaklaşık olarak 800 °C ile 1000 °C arasında çalışan sistem akışkan yatak kullanımıyla 550 °C da çalıştırılmıştır. Deney sisteminin şematiği Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



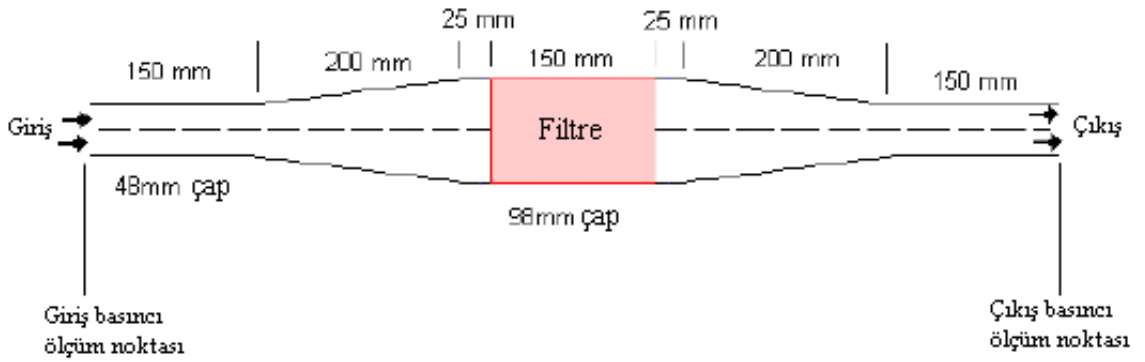
- | | |
|------------------------|---|
| 1. Nem ölçer | 8. Akışkan yatak (15cm çapında, 40cm uzunluğun) |
| 2. Regülatör | 9. Isı Değiştirici |
| 3. Vana | 10. Siklon |
| 4. Debimetre | 11. Toz tutucu |
| 5. Manometre | 12. Torba filtre |
| 6. Güç kontrol ünitesi | 13. Sıcaklık ölçüm sensörü |
| 7. Elektrikli Isıtıcı | 14. Sıcaklık kontrol birimi |

Şekil 2.4 Boraks üretilen akışkan yatağın şematik gösterimi (Akçay, 1996)

Deney sırasında Etibor-46 adlı madde kullanılmıştır. Bor üretimi sırasında 3 farklı deney yapılmıştır. Birincisinde sıcaklık değiştirilerek üretim sağlanmıştır. Bu deneylere göre hangi sıcaklıklarda ne kadar hızlı ve havanın içinde ne kadar nem bıraktığı incelenmiştir. Deney sonucunda 400 °C ile 550 °C arasında içinde su içermeyen boraks elde edilmiştir.

İkinci deneyde sıcaklık kontrolü ile birlikte nem kontrolü de yapılmaya başlanmıştır. Nem yaklaşık 25 °C %15 bağıl nemde tutulmuştur. Bu sayede sıcaklık 400 °C da sabitleştirilerek üretim gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında üretime etki eden faktörlerin sıcaklık, nem kontrolü, ısıtma süresi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca malzemenin içindeki nem miktarı üretilen boraksın parçacık büyüklüğünü de belirlemektedir.

1999 “Prediction of Pressure Drop and Flow Distribution in Packed Bed Filters” adlı makalede Kate Taylor, Anthony G. Smith, Stuart Ross, Martin Smith, CFD (Computational Fluid Dynamics) kullanarak akışkan yatak içindeki filtrede oluşan basınç düşümünün matematiksel modelinin deneysel değerlere uygunluğunu incelemiştir. Deneysel sonuçlara göre en uygun matematiksel model çıkarılmıştır. Deneysel sırasında öncelikle akışkan hızı ve basınç düşümü değerleri deneysel olarak bulunmuştur. Daha sonra bu bulunan değerlerle bir formülasyon oluşturulmuştur. Sistemin şematik diyagramı Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



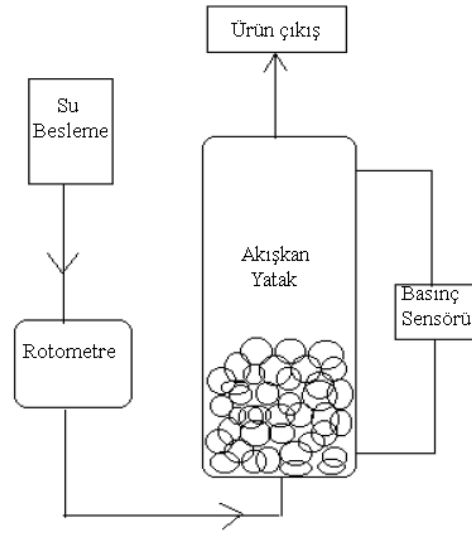
Şekil 2.5 Akışkan yatak ve filtrenin boyutları (Ross, 1999)

CFD ile geometri denklemleri, türbülans modeli ve sınır şartları, basınç düşüşü basınç kaybı ifadeleri, absorpsiyon modellemeleri yapılmıştır. Deneysel ve hesaplamalar sonucunda CFD modelleme ile basınç düşümü ve akışkanlaştırma hızını bulan doğru metod bulunmuştur. Bu metod ile geniş aralıktaki ters simetrik geometrideki akış özellikleri hesaplanabilmektedir. Yazının sonunda deneysel sonuçları ayrıca grafiksel ve görsel olarak gösterilmiştir.

R. Shankar Subramanian tarafından 2002 yılında yazılmış olan “Flow Through Packed Beds and Fluidized Beds” adlı makalede, akışkan yatak içerisindeki akış ile alakalı denklemler ve hesaplamalar vardır. Akışkan yataktaki basınç düşümü hesabını yapabilmek için Ergun denklemi kullanılmıştır. Ergun denklemi bazı hallerde göre modifiye edilip gösterilmiştir. Yazıda minimum akışkanlaştırma hızı, akışkan yatak içindeki malzemenin hacmi, net malzeme ağırlığı gibi değerlerde ayrıca bulunabilir.

2003 yılında “Packed Beds and the Ergun Equation: Relationship Between Fluid Flow and Pressure Drop” adlı makaleyi yazmış olan Mary Chopard, Aaron Welsh, Jonathan Ng, Martha Ottenberg, Rachel Holbrook makalelerinde modifiye edilmiş Ergun denklemine göre yapılan basınç düşümlerini doğru olarak hesaplanmasını incelemiştir. Amaç akışkan yatak içindeki hızları düzgün olarak rotometreden hesaplayabilmek, bir başka deyişle düzgün bir şekilde basınç düşümünü hesaplamak ve kalibre edilmiş rotometreler yardımıyla akışı kusursuz olarak okuyabilmektir. Rotometre kalibrasyonunun yanı sıra akışkanlaştırılmak istenen malzemeye göre akışkan yatak boşluk oranı (void fraction) da ölçülmüştür

Sistemin şekli Şekil 2.6’da görülmektedir.

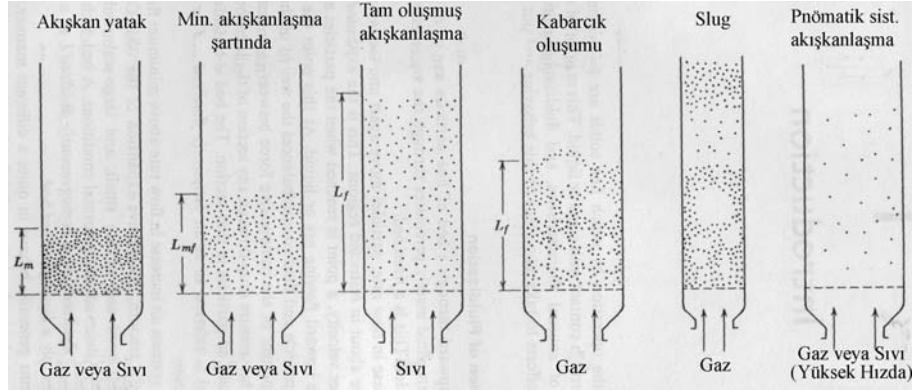


Şekil 2.6 Akışkan yatak deney şekli (Chopard, 2003)

Deney sisteminde iki çapta akışkan yatak kullanılmıştır. Bunlardan biri 3,25 inçlik akışkan yatak ve diğeri ise 5,25 inçlik akışkan yataktır. Kullanılan malzemeler ise iri taneli kum ve mermerdir.

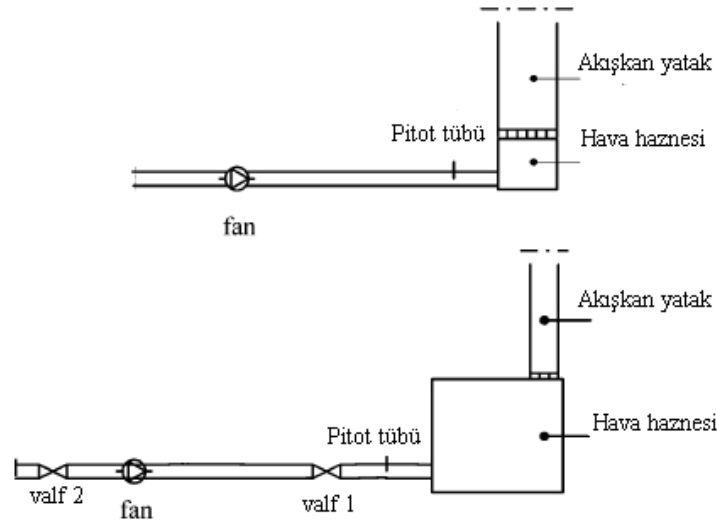
Srdjan Sasic, Filip Johnsson, Bo Leckner tarafından yazılan 2004 yılındaki “Interaction Between a Fluidized Bed and Its Air-Supply System: Some Observations” adlı makalede deney sistemi 12MWlık 1/9 ölçekli bir akışkan yatak modelidir. Akışkan yatak üzerindeki basınç dalgalanmalarının hava sağlayıcı sistemin ve uzun hava kanallarının akışkanlaştırmaya etkileri incelenmiştir. Bu küçültülmüş modelde 3 farklı kabarcıklı akış görülmüştür.

1. Tam teşekkül etmiş kabarcık rejimi bu rejimde tek bir kabarcık sistemin içinde oluştuğu açıklanmıştır.
2. Tam teşekkül etmiş kabarcık rejimi ağırlıklı bir rejimdir fakat içinde kabarcık patlaması görülmüştür.
3. Sadece kabarcık patlaması oluşumu. Bu kabarcıklar akışkan yatak içerisinde düzgün olmayan uzamalar yaparak şekillendikleri anlatılmıştır.



Şekil 2.7 Akışkan yatak içinde oluşabilecek kabarcıklar (Kunii, 1977)

Buradaki amaç hava üfleme sistemiyle akışkan yatak arasında bir optimizasyon yapıp fana verilen fazla enerjiyi azaltmaktır. Şekil 2.8’de deney düzeneklerinin şekillerini görülebilir.



Şekil 2.8 Kabarcıkları incelemek için hazırlanmış deney düzenekleri (Johnsson, 2004)

Şekildeki 2.8'deki iki farklı düzenek üzerinde yapılan incelemelerin sonuçları şöyle açıklanmıştır. Düşük gaz hızlarında düşük basınç düşümleri elde edildiği belirtilmiştir böyle durumlarda tam teşekkül etmiş kabarcık oluştuğu belirtilmiştir. Yüksek hızlara geçildiğinde kabarcıkların oluşmasına göre akışkan yataktaki basınç dalgalanmalarının değiştiği belirtilmiştir. Hangi durumda nasıl bir kabarcık oluşacağı hangi parametrelere bağlı olduğu belirlenememiştir. Aynı koşullarda yapılan deneyde tam teşekkül etmiş kabarcık ve kabarcık patlaması oluştuğu görülmüştür. Hangi koşullarda kabarcık patlaması oluşacağını tahmin etmenin mümkün olmadığı açıklanmıştır. Makalede akışkan yatakta ve hava toplama ünitelerine göre basınç düşümü ve fan hızı grafikleri verilmiştir. Yazarlar bu konu üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

2005 yılında “Fixed and Fluidized Beds” adlı makale University of Texas tarafından hazırlanmıştır. Yazıda akışkanlaştırmanın nasıl gerçekleştiği ve hesaplamalar hakkında bilgiler verilmektedir. Ayrıca hesaplama yöntemlerinin yanında hesaplama örnekleri de bulunmaktadır. Hesaplamalar içerisinde akışkan yatak basınç düşümü (Ergun Denklemi) minimum akışkanlaştırma hızı, laminar akış, türbülanslı akış, ürün sürtünme faktörü, akışkan yatak boşluk oranı, akışkan yatak yüksekliği hesaplarına değinilmiştir.

2005 yılında yayınlanmış olan “Taneli Ürünlerde Ürün Şev Karakteristiklerine Bağlı Depolama Yükleri” Turgut Öztürk, Hakan Kibar tarafından hazırlanmıştır. Makalede taneli ürünlerin fiziksel özellikleri (Nem içerikleri, Özgül hacimleri, Tane Çapları) ve saklama koşullarına göre fiziksel özellikleri verilmiştir. Makalede verilen değerler akışkan yatak tasarımında büyük önem taşımaktadır. Akışkan yatak tasarım edilirken bazı ön hesaplara ihtiyaç vardır bu ön hesaplar için gerekli olan ürün nem miktarı, ürün çapı, gibi özellikler çok büyük önem taşımaktadır.

2.2 Gıda Kurutma

1992 yılındaki “Drying and Storage of Grains and Oilseeds” adlı kitabı Donald B. Brooker, Fred W. Bakker-Arkema, Carl W. Hall, yazmışlardır. 1992 yılında hazırlanmış olan bu kitapta bazı taneli ürünlerden örnekler vererek ürünlerin özellikleri, nem miktarı, ürün kalitesi ve ürün kalitesi için gerekli standartlar, kurutma sistemleri tasarımı gibi birçok konu hakkında ve hesaplamalar ile ilgili bilgiler vardır.

1999'da Murat Özdemir, ve Y. Onur Devres, tarafından hazırlanan "The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting" makalede ince tabaka fındık kavurma işlemi sırasında 100-160 °C sıcaklıklara çıkıldığı belirtilmiştir. Bu sistemi incelemek için 5 adet yarı-teorik ve 2 adet ampirik model oluşturulmuştur. Yazıda bu modeller ayrı ayrı incelenerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Oluşturulan her modelin denklemleri tablo halinde verilmiştir. Deney sistemleri şöyledir. Isıtıcının altında fan vardır. Fanın üflediği hava ısınarak odacık içinde ince tabakalar halinde tepside bulunan fındıkların üzerinden geçerek dışarı atılmaktadır. Deney sonuçlarına göre hazırlanan sistemde çıkarılan modellerden biri olan Thomson modeli fındık kavurma işlemi için en uygun modeldir.

2001'de yayınlanmış "Advances in Dehydration of Foods" adlı makaleyi Humberto Vega-Mercado, M. Marcela Gongora-Nieto, Gustavo V. Barbarosa Canovas adlı yazarlar yazmışlardır. Yazarlar makalede gıda kurutma işleminin özelliklerini ve bizim için önemini anlatmıştır. Makalede gıda kurutmanın ve aynı zamanda psikometrinin temellerinden, gıda kurutma sistemlerinin uygulanabilirliği ve uygulama alanlarından, genel kurutma sistemlerinden, genel olarak kurutma işlemlerinin faydalarından ve zorluklarından bahsedilmektedir. Çeşitli kurutma sistemlerinin şematikleri verilmiştir ayrıca bu sistemler kısaca anlatılmıştır.

S.J. Temple, C.M. Temple, A.J.B von Boxtel, M.N. Clifford adlı yazarlar 2001 yılında hazırladıkları "The Effect of Drying on Black Tea Quality" adlı makalelerinde, siyah çayın kalitesini belirlemek için son bir işlemde geçirmek gerektiğini belirtmişlerdir. Kaliteyi belirleyen son işlem için kurutulmuş hazır olan çayı tekrardan kurutma işleminden geçirmek gerektiğini belirtmişlerdir. Bu son işlemde siyah çay yaklaşık olarak 60 ila 140 °C arasında bir sıcaklığa maruz bırakılmak zorundadır. Yapılan son işlem yaklaşık 1 dakikanın altında 120 °C sıcaklığa maruz bırakılırsa çayın kalitesine etki etmiş olabileceğini örneklemiştir. Gerçekte 110 °C sıcaklıkta çayın yandığı söylenmiştir. Kalite belirleme işlemleri için başka metotlara da değinilmiştir. Bu metotlar; kuru olan çayın üzerine sıcaklık uygulamak, tepsi üzerinde kurutma, akışkan yataklı kurutmadır. Bu kurutma işlemleriyle çaya tat vermenin ve çayın kalitesini değiştirmenin mümkün olduğu anlatılmıştır. Araştırmada incelenmek istenen yüksek sıcaklıkta ve kısa zamanda bu işlem gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmadan çıkan sonuçlara göre 15 dakika gibi bir sürede kaliteli bir çay üretmek mümkün olabilmektedir. Bu süre zarfında yapılan kurutma işlemi ya da kalite artırma işlemi kalitenin kaybı ya da problem yaratacak bir durum ortaya çıkmamaktadır. Çalışmada 90 °C da yapılan kurutma ve tat verme işlemleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Deneyler sırasında yapılan incelemelerde 110

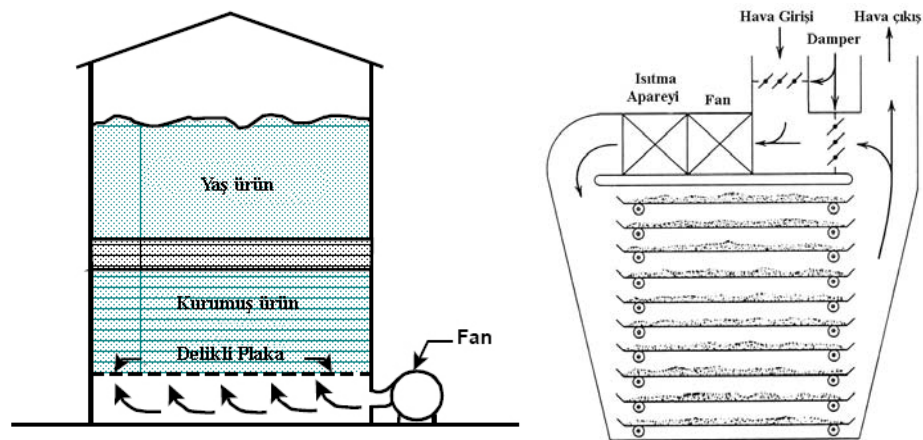
°C' lik kurutma ve tat verme işlemleri de yapılmıştır. 110 °C de yapılan kurutma işlemleri kaliteyi düşürmüş ve bazı istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmasına neden olmuştur.

2002 yılında “Hot-air Drying Characteristics of Red Pepper” adlı makaleyi İbrahim Doymaz ve Mehmet Pala hazırlamışlardır. Makalede teorik ve deneysel olarak kırmızı biber kurutma kinetiği incelenmiştir. Deney sisteminde kırmızı biberi kurutmadan önce bir solüsyona batırıp kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Solüsyonlara göre kurutma hızları çıkarılıp karşılaştırılmıştır. Solüsyonlar kısaca şunlardır.

AEE04, AEE05, AEE06, NAT, PAR.NAT, PAR.AEE0. Bu solüsyonlar arasında en iyi performansı veren PAT.NAT, PAR.AEE0 ve NAT' dır. Solüsyonlar arasında yakın bir kurutma süreci vardır. Kırmızı biber kurutmasında solüsyonların biber rengine, kurutma sıcaklığına etkileri olduğu görülmüştür. Solüsyonların kaliteye etkileri de belirlenmiştir. Bu etkiler deneysel çalışmalardan yola çıkarak kurutma işlemiyle ilgili bazı sabitlerin çıkarılmasında yararlı olmuşlardır.

2005 yılında yayınlanmış olan “Drying and Dehydration; Wilhelm, Luther R. Dwayne A. Suter, Gerald H. Brusewitz” eserde genel olarak kurutma ve kurutma işlemleri birer paragraf şeklinde anlatılmıştır. Kurutmada nemin öneminden bahsedilmiştir. Aynı şekilde kurutmada suyun etkisi, kurutma faktörlerinin kontrolünden bahsedilmiştir.

Makalede ayrıca kurutma modellerine değinilmiştir. Genel olarak kullanılan kurutma sistemlerini şekillerle gösterip açıklanmıştır bu kurutma sistemlerinden bazıları Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9 Ambar kurutması ve kabin kurutması (Dwayne, 2005)

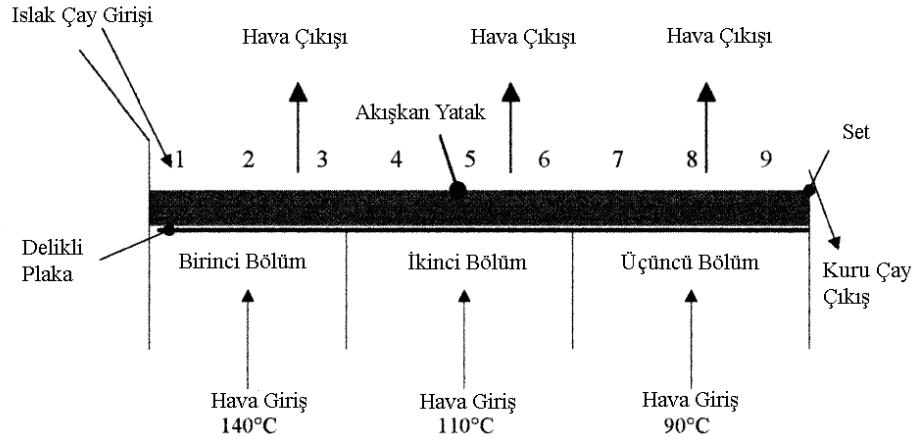
2.3 Akışkan Yatakta Gıda Kurutma Sistemleri

S.J. Temple, A.J.B. van Boxtel, 2000 yılında “Control of Fluid Bed Tea Dryers: Control in the Context of Design and Operation Conditions” adlı makalede çay kurutma sistemlerinde nelere dikkat edilmelidir, kontrol sistemleri nelerdir, nasıl kontrol edilmelidir, gibi sorulara cevap verilmektedir. Çay kurutma işleminde karşılaşılan kontrol sorunları ve kısıtlamalar anlatılmıştır.

Kontrol sisteminde kontrol edilen büyüklükler; besleme hızı, beslenen çayın içerisindeki nem miktarı, akışkan yatak üzerindeki sıcaklık ve dışarı atılan nem miktarıdır. Kurutucu konfigürasyonu pratikte elde edilen değerlere göre yapıp tablo halinde makalede sunulmuştur. Kurutulacak çayın besleme hızı 3,42 kg/dak., malzemenin içerdiği nem miktarı %71, akışkan yatak sıcaklığı 130 °C ve kuru hava çıkış sıcaklığı ise 90 °C olarak verilebilir.

Çay kurutma sistemini kontrol etmek; nem miktarını dışarı alarak ve besleme hızını kontrol ederek mümkün olmaktadır. Çay kurutmasında önemli olan konu nem miktarıdır nem miktarına göre besleme hızı değişmektedir. Isıtmada boyler kullanılması durumunda ise kurutma sisteminde termostatik kontrol gerekmemektedir.

2000 yılındaki S.J. Temple & A.J.B. van Boxtel’in yazdığı “Control of Fluid Bed Tea Dryers: Controller Design and Tuning” adlı makalede, çay kurutmasındaki nem kontrolünün üzerinde durulmuştur. Var olan nem kontrol sistemlerini iyileştirme amaçlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmaya başlarken önce çeşitli fabrikalardan çay kurutma prosesi sırasında dışarıya ne kadar nem atıldığı incelenmiştir. İnceleme sonuçları ise hazırlanan çalışmada grafik olarak verilmiştir. Grafikte dışarı atılması gereken max ve min nem miktarları gösterilmiştir. Dışarı atılan nem dışarı atılan enerji ve maliyet anlamına gelmektedir. Araştırma yapılan kurutucunun şekli Şekil 2.10’da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.10 Çay kurutma sistemi (S.J. Temple, 2000)

Kontrol sisteminin genel kontrol birimi olarak PID kontrol kullanılmıştır. Dışarıya alınan nemin kontrolü ile kontrol sisteminin istenildiği şekilde çalıştığı görülmüştür. Nem kontrolü ve egzoz sıcaklığının kontrolünün hem kurutma işlemini hem de kontrolünü kolaylaştırdığı belirtilmiştir. Makalede verilen bilgilere göre bu sistemin tek kötü tarafı sisteminin tepkisi geciktiği takdirde sistemdeki diğer cihazlarda gecikme oluşması ve sistemin hata vermesine neden olabilmesidir.

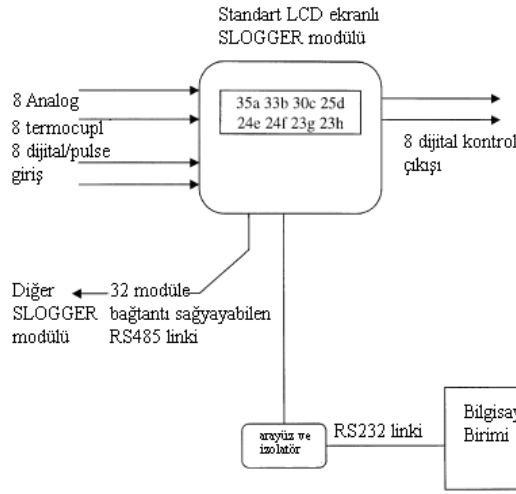
2000 yılındaki “Control of Fluid Bed Tea Dryers: Controller Performance under Varying Operating Conditions” adlı makalede S.J. Temple, A.J.B. von Boxtel, G. Van Straten, değişken operasyon koşullarında yeni bir kontrol tekniği geliştirildiğini belirtmişlerdir. Kontrol sistemi yine aynı yazarlar tarafından hazırlanan “Control of Fluid Bed Tea Dryers: Controller Design and Tuning” adlı makalede kurulmuş olan kurutma sistemi için kurulmuştur. Bu kontrol sisteminde yapılması istenen hatayı en aza indirgeyen entegral hata fonksiyonları oluşturulup çözüm yöntemi ve buna bağlı çözüm sistemi oluşturulmuştur. Sistemde ısıtıcının kontrole karşı verdiği gecikme, oluşturulan kontrol sisteminin performansını düşürmektedir. Bu gecikmenin önüne geçmek için Smith Predictor kullanılmıştır. Araştırmada önce sistemin transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. Transfer fonksiyonu oluşturulan sistemin integral squared error (ISE) denilen hata fonksiyonu ile oluşturulmuş olan kontrol mekanizmasıyla tüm sistemi kontrol etmek mümkün olabilmektedir. Geniş aralıkta ve çeşitli kontrol birimleri ile sistemi çıkarılan transfer fonksiyonuyla kurutma işlemini ayar etmek kolaylaştığı belirtilmiştir.

Deney sonuçlarında normalde sisteminde verilen karşılık ile Smith Predictor ile birlikteken verdiği karşılık grafiksel olarak verilmiştir. Bu karşılıklar sıcaklığa göre, nem miktarına göre, ve inferential kontrol sistemine göredir.

2000 yılında hazırlanmış olan “Drying of Particles in Batch Fluidized Beds” adlı makaleyi D. Mowla, H. Montazeri, adlı yazarlar hazırlamışlardır. Makalede akışkan yatak içindeki kurutulmak istenen katı parçacıklarının nem miktarı ve sıcaklığını veren denklemler çözülmüştür. Çözüm değerleriyle deneysel değerler karşılaştırılıp çıkarılan matematiksel modelin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

“Monitoring and Control of Fluid-Bed Drying of Tea” adlı S.J. Temple, S.T. Tambala, A.J.B. von Boxtel adlı yazarlar tarafından 2000 yılında yazılmış olan makalede; çay prosesinin el ile kontrol etmenin zor bir işlem olduğu belirtilmiştir. Çay prosesinde belirtilen zorluğu aşmak için işlem adımlarını kontrol etmek amacıyla veri toplama sistemi oluşturulmuştur. Normalde el ile sistemi kontrol etmek zor olacağı belirtildiğinden sistem üzerindeki birimlerin sabit hale gelmesi zaman alacaktır. Bu makalede çay kurutma sistemi oluşturulup bir model hazırlanmıştır ve bu model Matlab programı ile değişik durumlara maruz bırakılarak pratiğe geçilmeden sistemin yaratılan sanal durumlara verdiği cevaplar incelenmiştir.

Kullanılan veri toplama sisteminden bahsedilmiştir, veri toplama sisteminin adı SLOGGER Serial Logger’ın kısaltması şeklindedir. İçinde bir mikro prosesör vardır. Ayrıca Networks üzerinden bütün sisteme RS485 ile bağlıdır. Bu standart SLOGGER sistemi sekiz analog giriş ile birlikte voltaj ve ısı çift sinyalleri de almaktadır. Alınan bu sekiz sinyal cihaz üzerinde bulunan sıvı kristal ekrandan okunabilmektedir. SLOGGER sistemi ayrı ayrı çalışabilmektedir. Bu cihazların hepsi birleştirilerek tam anlamıyla bir kontrol sistemi oluşturulabilmektedir. Sistemi kontrol edecek olan program MS-DOS altında çalışabilen bir programdır. Şekil 2.11’de modülün şematiği görülmektedir.

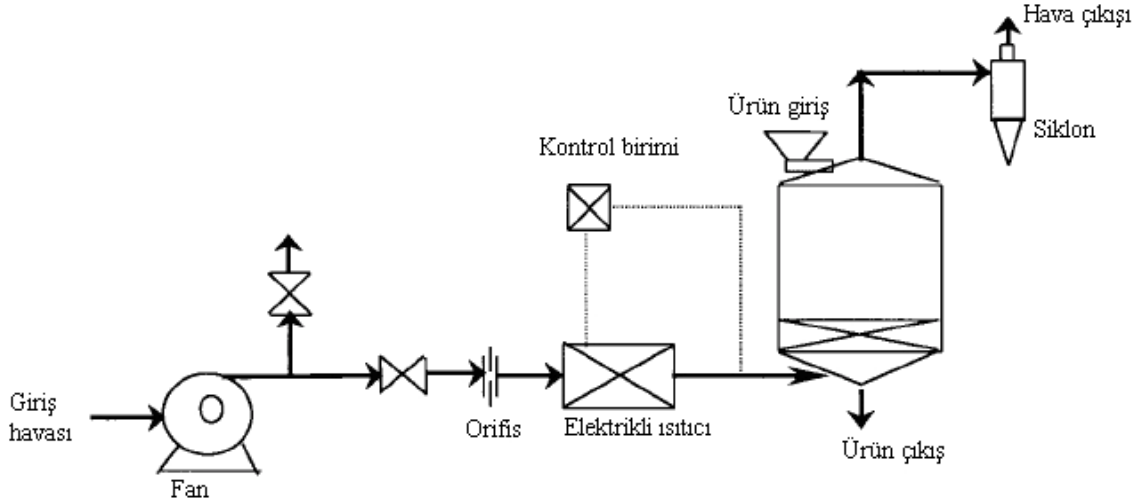


Şekil 2.11 SLOGGER kontrol algoritması (S.J. Temple, 2000)

Veri toplama sistemi hazırlandıktan sonra Matlab programında sistemin simülasyonu hazırlanmıştır. Bu simülasyonla birlikte kullanılan havanın sıcaklık simülasyonu çıkarılmıştır.

Otomatik kontrol sistemleri oluşturarak üretimde artış sağlamak daha kolaylaşacağı belirtilmiştir. Yazarların düşüncesine göre kontrol sisteminin üretim hattında olmasının avantajı uzun bir üretim hattındaki bazı gecikme faktörlerini azaltmak ve üretimi arttırmaktır.

2002 A Comprehensive Mathematical and Numerical Modeling of Deep-Bed Grain Drying; I. Istadi, J.P. Sitompul, yapılan çalışmada tane kurutmalı akışkan yatak için çok yönlü nümerik ve matematiksel model çıkarılmıştır. Bu modeli çıkarabilmek için akışkan yatak üzerinde çalışmalar yapılmış, bu çalışmalar sonucu matematiksel model çıkarılmadan önce gaz fazı ile tane arasındaki gerçekleşen fiziksel değişimler incelenmiştir. Çıkarılan matematiksel modelde hava fazı ile tane arasındaki momentum, enerji, kütle bağıntıları incelenmiştir. Çıkarılan model sonlu elemanlar yöntemiyle çözülüp sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Çıkarılan model ve yapılan simülasyonla bir akışkan yatak tasarımı yapılırken gerekli olan değerler bulunabilir ve aynı zamanda kurutma karakteristiği çıkarılabilir. Modeli çıkarılan akışkan yatağın şematik şekli şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12 Akışkan yatak (Istadi, 2002)

Matematiksel modelde çıkarılan sonuçlar daha sonra tablo ve grafiklerle makalenin sonunda gösterilmiştir.

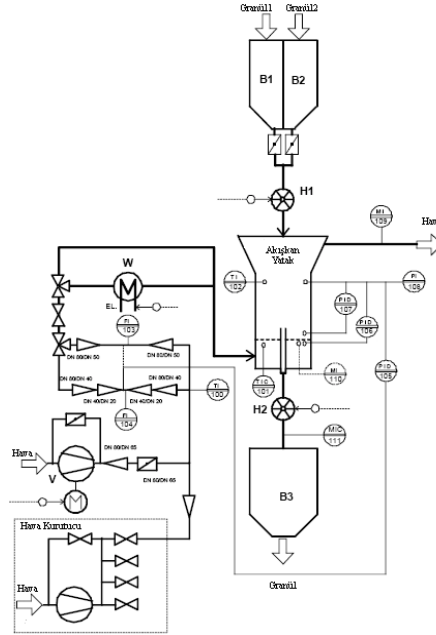
2002 yılında yayınlanmış “Experimental Investigation and Modelling of Continuous Fluidized Bed Drying under Steady-State and Dynamic Conditions” adlı makale J. Burgsweiger, E. Tsotsas tarafından hazırlanmıştır. Bu çalışmada laboratuvar boyutlarındaki akışkan yatak üzerinde çalışılmıştır. Bu deney setinden yola çıkılarak, gaz fazı için denge denklemleri, ısı dengesi denklemleri, parçacık kütle denklemleri, parçacık kinetik denklemleri oluşturulmuştur.

Deney sırasında 53 adet kurutma işlemi sürekli rejim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Buna göre bazı deney parametreleri şunlardır:

- Partikül kütle debisi 0,48g/s ile 1,69 g/s arasındadır.
- Partikül nem miktarı % 43,6 ve 0,690 kg H₂O/kg kuru katı arasındadır.
- Gaz kütle debisi 19 g/s ile 58 g/s arasındadır.
- Hava ısıtıcısının kapasitesi 800 W ile 4356 W
- Gaz giriş sıcaklığı 58 °C ile 150 °C arasındadır.

Bu değerlere göre çıkarılan matematiksel model simülasyonu ile gerçek deneysel sonuçları; hava debisi ile hava ısıtıcısı kapasitesi arasındaki değişimin grafiği, parçacık nem miktarı ile hava ısıtıcısı arasındaki değişiminin grafiği makalede gösterilmiştir.

Çıkarılan model ile sürekli rejimde akışkan yatak için yapılan hesaplamalar memnun edici sonuçlar vermiştir. Akışkan yatağın şematığı Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13 Akışkan yatak sistemi (Burgscweiger, 2002),

2002 yılında yazılmış olan “Thermal Analysis in Fluidized Bed Drying of Moist Particles” adlı makaleyi S. Syahrul, F. Hamdullahpur ve I. Dincer yazmışlardır. Yazılan makalede literatürde daha önceden incelemesi yapılan mısır tanesi verilerine göre termal modelleme yapılmıştır. Modelde incelenmek istenen parametrelerin giriş havası, hava hızı ve mısırın ihtiva ettiği nem miktarı olduğu belirtilmiştir. Modele göre termal verimliliğin mısır içerisindeki nem miktarının azalması durumunda ve kurutma zamanının azaldığı durumlarda azaldığı görülmüştür. Yazarlara göre malzemenin nem transferi, hava hızına, hava sıcaklığına ve kurutulacak malzemenin içerdiği nem miktarına bağlı çıkmaktadır. Yapılan modelleme için bütün hesaplamalar ortaya koyulmuş olup yapılan hesaplamalara göre literatürdeki deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu yapılan matematiksel modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Hesaplamalar termal verimliliğe bağlı olarak nem miktarı, nem miktarına göre kurutma zamanları grafiksel olarak verilmiştir.

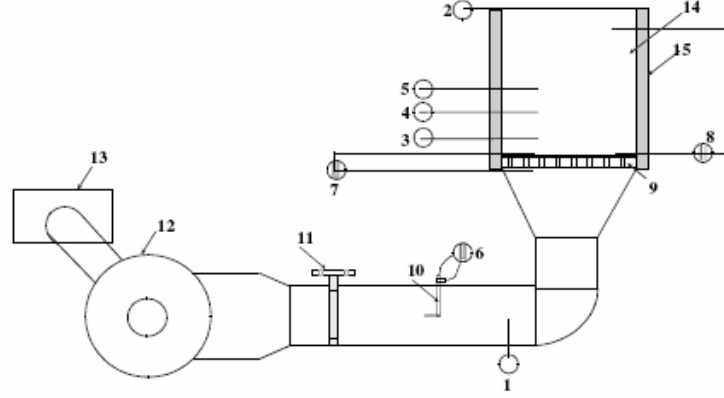
Deney sonuçları irdelendiğinde, termal etkinliğin %55 ile %85 oranında nem miktarının değişimine bağlı olarak %4 ile %17 arasında değiştiği görülmektedir. Fakat termal etkinlik 50 °C ile 63 °C arasındaki sıcaklık değişiminde hiçbir değişiklik göstermemektedir. %15lik bir hava hızında azalma kurutma süresini arttırmaktadır öte yandan hızın azalması nem miktarının azalmasına da etki eder. Fakat genel verimde herhangi bir değişiklik gerçekleşmediği belirtilmiştir.

S. Syahrul, I. Dincer ve F. Hamdullahpur'un 2002 yılında "Thermodynamic Modeling of Fluidized Bed Drying of Moist Particles" adlı makalesinde mısır kurutmasının yanı sıra buğday kurutması da incelenmiştir. Yapılan akışkan yatak modelinde incelenen termodinamiksel modelde, kütle dengesi, enerji dengesi, entropi dengesi, ekserji dengesi ve termodinamik verim hesaplamaları gösterilmiş ve formülasyonlar ile belirtilmiştir. Yapılan deney sonuçlarında kurutma süresi-nem miktarı, termodinamik verim-nem miktarı, kurutma süresi-termodinamik verim grafikleriyle verilmiştir.

Yapılan incelemelerde Ergun denkleminde basınç düşümünün artan grafik olarak devam ettiği görülmüştür. Diğer yandan yapılan deney sonucunda görülmüştür ki akışkanlaştırma noktası geçildikten sonra sistem farklı davranmaktadır. Basınç düşümü hız arttıkça değişmediği belirtilmiştir. Bu incelemeler sonucunda görülmüştür ki iri taneli kumun deney sonuçları Ergun denkleminin hesap sonuçlarına uymaktadır. Bir başka mermer kurutmasında 5,25 inçlik akışkan yataktan alınan cevabın benzerini 3,25lik akışkan yatak için alınamamıştır. Deney sonuçlarından görüldüğü üzere akışkanlaştırma ve basınç düşümü; boşluk oranı, akışkan yatak çapı, akışkan yatak yüksekliğine bağlıdır.

2003 yılında yazılmış "An Experimental and Numerical Study of Fluidized Bed Drying of Hazelnuts" adlı makaleyi yazmış olan Adnan Kopuz, Mesut Gür, M. Zafer Gül makalelerinde laboratuvar koşullarına göre tasarım edilmiş boyutta olan akışkan yatak üzerinde fındık kurutmasını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Nümerik olarak Crank-Nicholson metodu kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi çözümü yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre deneysel çalışma ile nümerik çalışma arasında birbirini tutan değerler bulunmuştur.

Deney sisteminin şekli Şekli 2.14'de görülmektedir.



Şekil 2.14 Akışkan yatak deney sistemi (Gül, 2003)

Şekil 2.14 'de görülen sistemde 1,2,3,4,5 numaralı yerlerde sıcaklık ölçümü yapılmaktadır.6,7,8 numaralı yerlerde basınç ve nem ölçümü yapılmaktadır. 9 numarada gözüken akışkan yatağın eleğidir. 10 numarada pitot tüpü ile ölçüm yapılmaktadır. 11 numaralı yerde ayarlı bir vana bulunmaktadır bu sayede sistem içindeki debi ayarlanabilmektedir. 12 numaralı eleman fan 13 numaralı eleman ise hava şartlandırıcı ünedir. 14 numaralı eleman akışkan yatağı göstermektedir. Akışkan yatak kısmı 196 mm iç çaplı 1 m yüksekliğinde 2 mm kalınlığında pleksiglas kullanılmıştır. 15 numaralı eleman ise akışkan yatağın etrafına sarılmış olan yalıtımı göstermektedir.

Matematiksel modelde kabarcıklı faz, gaz fazı ve katı fazı incelenmiştir. Bütün fazlar için matematiksel formülasyonlar makalenin içinde verilmiştir. Bu araştırmada fındığın içerdiği nem miktarının karakteristiği çıkarılmaya çalışılmıştır. Çıkarılan modele göre akışkan yatak hidrodinamik özellikleri ufak farklılıklarla birlikte hesaplanabilir. Deneylerden çıkarılan bir başka sonuç ise başlarda hızlı olan kurutma işlemi daha sonra nem miktarının azalmasıyla düşmektedir.

2005 yılında Jorge Martinez Garreiro, Sandra Kahan, Berta Zecchi, Patricia gerla, Leonardo Clavijo, Arturo Rodriguez, tarafından yazılan "A Simple Model for Rice Grains in a Deep-Bed Dryer" adlı makalede, akışkan yataklı kurutmada pirinç için basit bir ısı ve kütle transferi modeli çıkarılmıştır. Bu modelde 2 adet kontrol hacminin bulunduğu belirtilmiştir. Kontrol hacimlerinden biri tane üzerindeki nemi sıvı olarak bulunduğu bölge, diğeri ise nemli havanın çekirdek etrafında olduğu bölge olarak ifade edilmiştir.

Kurutma işlemi için matematiksel model çıkarılmıştır bu matematiksel model ise FORTRAN bilgisayar dilinde çözülmüştür. Akışkan yatak üzerine yapılan deneylerde 38,3 °C, 57,8 °C,

86,3 °C sıcaklıkları üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak matematiksel modelin FORTRAN programlama dili ile çözümünden bulunan değerler %1.01 ila %3.76 gibi bir sapmayla birbirlerine yakın çıkarılmıştır.

2.4 Araştırma Sonuçları

Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilmiş bilgilere göre, akışkan yatak ile kurutma sistemlerinin faydaları zorluklarından daha fazladır. Bilim dünyasında akışkan yatağın kullanılma yelpazesi çok geniştir. Bunlara genel olarak bakacak olursak, tıp biliminde, gıda kurutma sektöründe, küçük taneli ürünlerin kurutmasında, nükleer araştırmalarda çok fazla kullanılmaya başlanmıştır. Akışkan yatak kullanımıyla birlikte harcanan az miktardaki enerji ve üründe ortaya çıkan üretim artışları çok fazla göze batmaktadır. Akışkan yatak içerisinde kurutma işlemi sırasında hem ısı transferi hem de kütle transferleri yüksek verimde gerçekleşmektedir. Bunun nedeni ise daha öncede belirtildiği gibi akışkanlaştırılmış tanelerin üzerinde sıcak havanın yüksek oranda temas etmesidir.

Sistemde ısı pompasının eklenmesi ile birlikte; kullanılan enerjiyi en aza indirgeyerek kendi içerisinde yüksek verimli bir kurutma prosesi oluşturmak istenmiştir. Kapalı bir sistem içerisinde kurutma prosesinin gerçekleşmesi ve akışkan yatak kullanımı ile enerjiden kazanım planlanmaktadır. Kapalı bir sistem olması da dışarıdan alınan havayı alıp yeniden şartlandırarak ekstra enerji harcamamızı engellemektedir. Ayrıca kapalı bir sistemin bir diğer önemli nedeni ise, kurutulacak olan malzemelerin gıda ürünü olması ve farmakolojik bazı semptomların oluşmamasının sağlanmasıdır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneysel Çalışmada İncelenecek Ürünler

Tasarlanmak istenen akışkan yatak ile aşağıdaki ürünlerin kurutulması istenmektedir.

- Bulgur
- Kırmızı mercimek
- Çay

Çizelge 3.1' kurutulmak istenen ürünlerin fiziksel özellikleri tablo halinde gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Kurutulmak İstene Ürünlerin Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellik Ürün	ε -	d_p (m)	ρ_p (kg/m ³)
Bulgur	0,47	0,0023	800
Kırmızı Mercimek	0,48	0,0035	750
Çay	0,38	0,001	350

Bu değerler sonucunda akışkan yatak tasarımı ile alakalı bazı hesaplamalar yapılmıştır.

3.2 Hesap Yöntemi

Kurutulacak olan malzemenin fiziksel ve termodinamik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir.

Bu özellikler elde edildikten sonra tasarım için gerekli olan hesaplamalara geçilebilir.

Akışkan yatak tasarımı için yapılması gereken ilk hesap, akışkan yatak içindeki kurutulacak malzemeye göre minimum akışkanlaştırma hızı ve buna bağlı olarak akışkan yatak basınç düşümünün bulunmasıdır. Bir sonraki adımda, hava kanalı üzerindeki elemanlara göre basınç kayıpları hesaplanarak fanın yenmesi gereken toplam basınç kaybının bulunması gerekmektedir. Basınç kayıpları bulunduktan sonra fan seçimi yapılabilir.

Kanal büyüklüklerinin tayini için kanal içi akışlarda Re sayısının hesaplanması gerekmektedir. Kanal içi Re sayısının türbülanslı bölgede ya da laminar bölgede olması

tasarımı etkilemektedir. Hesaplarda çıkan minimum akışkanlaştırma hızlarına göre Re değerleri türbülanslı bölgede çıkmaktadır. İleride anlatılacak olan Ergun denklemi ve min. akışkanlaştırma hızının türbülanslı akışta doğru sonuçlara yakınsadığı literatürde belirtilmiştir. (Köse ,1995)

Deney sistemi, laboratuvar koşullarında hazırlandığından boyutlandırmada bazı kısıtlamalar karşımıza çıkmaktadır. Bu kısıtlamalar yanında kanal uzunlukları hesaplanırken ölçüm cihazlarının birbirinden etkilenmeden ölçüm yapılabilecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle tasarımda elde edilen kanal çapının yaklaşık 7 katı uzunluk akışın tam teşekkül etmesi için yeterli olduğu varsayılmıştır.

3.3 Basınç Düşümü Hesapları

3.3.1 Akışkan Yatak İçerisindeki Basınç Düşümü Hesapları

Aşağıda Ergun denklemi ve minimum akışkanlaştırma hızı belirtilmiştir. Bu denklemler gerçekte oluşabilecek basınç düşümünü temsil edebilmektedir.

3.3.1.1 Minimum Akışkanlaştırma Hızı

Yüksek basınçlı bir fan ya da kompresör yardımıyla yukarıya doğru beslenen akış hızı arttırıldıkça, beslenen hava parçacıklara daha fazla kuvvet uygulayarak parçacıkların arasındaki yerçekiminden kaynaklanan sürtünme kuvvetlerini azaltır. Hız daha da arttırıldığında parçacıkların üzerindeki kaldırma kuvveti yerçekimini dengeleyerek yukarı doğru akan hava içinde parçacıkların asılı kalmasını sağlar. Bu durumda yatağı oluşturan parçacıklar akışkan özellikleri sergilemeye başlamıştır ve bu durum “**minimum akışkanlaştırma hızı koşulu**”, bu koşulu sağlayan gaz hızı da “**minimum akışkanlaştırma hızı**” olarak tanımlanır.

Literatürde araştırmacıların min. akışkanlaştırma hızı için çeşitli korelasyonları mevcuttur. Bunlardan bazılarını inceleyecek olursak literatürde en çok kullanılanların Wen & Yu (Köse, 1995), Horio & Wen (Köse, 1995), Bourgeois & Grenier (Köse, 1995), Leva (Köse, 1995) tarafından verilen ifadeler olduğu görülür. Bu denklemler Çizelge 3.2 de denklem 3.1’den denklem 3.27’ye kadar gösterilmektedir.

Çizelge 3.2 Minimum akışkanlaştırma hızı korelasyonları (Köse, 1995)

Araştırmacılar	Korelasyonlar	Denklem
Wen & Yu	$u_m = B[1135,7 + 0,0408Ar - 33,7]^{1/2}$	(3.1)
Davies & Richardson	$u_m = B_1(7,8 \times 10^{-4})$	(3.2)
Leva	$u_m = \frac{7,39D_p^{1,82}(\rho_p - \rho_f)^{0,94}}{\rho_f^{0,06}}$	(3.3)
Goroshko	$u_m = B \left[\frac{Ar}{1400 + 5,2\sqrt{Ar}} \right]$	(3.4)
Bena	$u_m = B \left[\frac{1,38 \times 10^{-3} Ar}{(Ar + 19)^{0,11}} \right]$	(3.5)
Miller & Logwinuk	$u_m = \frac{0,00125d_p^2(\rho_p - \rho_f)^{0,9} \rho_f^{0,1} g}{\mu_f}$	(3.6)
Baeyens	$u_m = \frac{d_p^{1,8}(\rho_p - \rho_f)^{0,934} g^{0,934}}{1111\rho_g^{0,06} \mu_f^{0,87}}$	(3.7)
Chyang & Huang	$u_m = B[(33,3^2 + 0,033Ar)^{1/2} - 33,3]$	(3.8)
Broadhurst & Becker	$u_m = B[(25,28^2 + 0,0571Ar)^{1/2} - 25,28]$	(3.9)
Saxena & Vogel	$u_m = B \left[\frac{Ar}{2,42 \times 10^5 Ar^{0,85} (\rho_p - \rho_f)^{0,13} + 37,7} \right]^{0,5}$	(3.10)
Babu	$u_m = B[(25,25^2 + 0,0651Ar)^{1/2} - 25,25]$	(3.11)
Richardson & Da St. Jeromino	$u_m = B[(25,7^2 + 0,0365Ar)^{1/2} - 25,7]$	(3.12)
Doichev & Akhmanov	$u_m = B(1,08 \times 10^{-3} Ar^{0,947})$	(3.13)
Thonglomp	$u_m = B[(31,6^2 + 0,0425Ar)^{1/2} - 31,6]$	(3.14)

Çizelge 3.2 Minimum akışkanlaştırma hızı korelasyonları (devam)

Araştırmacılar	Korelasyonlar	Denklem
Bourgeois & Grenier	$u_m = B \left[(25,46^2 + 0,03824 Ar)^{1/2} - 25,46 \right]$	(3.15)
Grace	$u_m = B \left[(27,2^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 27,2 \right]$	(3.16)
Kunii & Levenspiel	$u_m = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{1650 \mu_f}$	(3.17)
Chister	$u_m = B \left[(28,7^2 + 0,0494 Ar)^{1/2} - 28,7 \right]$	(3.18)
Zheng	$u_m = B \left[(18,75^2 + 0,0313 Ar)^{1/2} - 18,75 \right]$	(3.19)
Nakamura	$u_m = B \left[(29,5^2 + 0,0357 Ar)^{1/2} - 29,5 \right]$	(3.20)
Lucas	$u_m = B \left[(32,1^2 + 0,0571 Ar)^{1/2} - 32,1 \right]$ $u_m = B \left[(25,2^2 + 0,0672 Ar)^{1/2} - 25,2 \right]$	(3.21)
Tanous	$u_m = B \left[(25,83^2 + 0,0430 Ar)^{1/2} - 25,83 \right]$	(3.22)
Agarwal & El-Mitchell	$u_m = B \left[(42,81^2 + 0,0610 Ar)^{1/2} - 42,81 \right]$	(3.23)
Adanez	$u_m = B \left[(25,18^2 + 0,0373 Ar)^{1/2} - 25,18 \right]$	(3.24)
Boyutsuz Sayılar		
$Ar = \frac{\rho_f D_p^3 (\rho_p - \rho_f) g}{(\mu_f)^2}$		(3.25)
$B = \frac{\mu_f}{\rho_g d_p}$		(3.26)
$Re = \frac{D_p u_m \rho_f}{\mu_f}$		(3.27)

Denklemlerde kullanılan simgeler ve birimleri aşağıda açıklanmıştır.

u_m → Minimum Akışkanlaştırma Hızı [m/s]

D_p → Parçacık Efektif Çapı [m]

ρ_p → Parçacığın Özgül Ağırlığı [kg/m^3]

ρ_f → Havanın Özgül Ağırlığı [kg/m^3]

μ_f → Havanın Viskozitesi [N.s/m^2]

Minimum akışkanlaştırma hızından yola çıkılarak akışkan yatak içerisinde oluşacak basınç düşümü hesaplanılabilir.

3.3.1.2 Ergun Denklemi;

$$\frac{\Delta p}{L} = 150x \left[\frac{\mu_f u_m}{D_p^2 \phi^2} \right] \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1.75 \left[\frac{\rho_f u_m^2}{D_p \phi} \right] \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (3.28)$$

ΔP → Basınç Düşümü, [Pa]

L → Akışkan Yatak Uzunluğu, [m]

u_m → Min. Akışkanlaştırma Hızı [m/s]

ρ_f → Havanın Özgül Ağırlığı [kg/m^3]

μ_f → Havanın Viskozitesi [N.s/m^2]

D_p → Parçacık Efektif Çapı [m]

ε → Akışkan Yatak Boşluk Oranı [Boyutsuz]

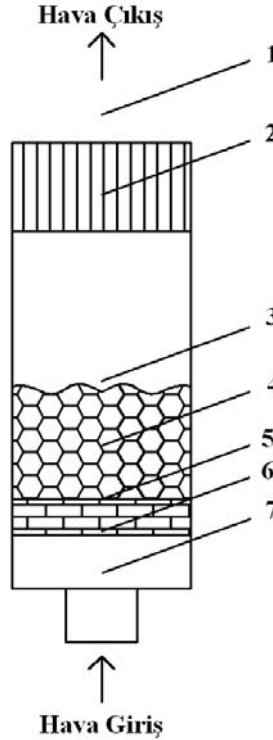
Φ → Silindiriklik Oranı [Boyutsuz]

Bu iki denklemden yola çıkarak akışkan yatak üzerinde kullanılması gerekli olan fan bulunmak istenilmektedir. Görüleceği üzere matematiksel korelasyonlar çok fazladır. Her bir korelasyon farklı bir durum için oluşturulmuştur. Hangi korelasyonun gıda ürünlerinin akışkanlaştırılması işleminde kullanılacağına deneysel verilerle karşılaştırarak karar verilebilir.

3.4 Deneysel Ölçümler

P.A. Hilton Ltd. Şirketinin deneysel araştırmalar için geliştirdiği “Akışkan yatak ve akışkan yatak ısı transferi” deney dzeneninde bazı ölçümler yapılmıştır.

Deney dzeneninde akışkan yatak olarak iç çapı 10 cm olan bir cam boru kullanılmıştır. Genel hatlarıyla deney sistemine bir kompresör yardımıyla hava verilerek akışkanlaştırma işlemi gerçekteştirilmektedir. Deney dzenenide üzerinde kompresörden gelebilecek fazla basınç sonucu deney dzenenine zarar vermemesi için hava giriş kısmına basınç düşürücü konulmuştur. Sistemden geçen hava rotometre yardımıyla ölçülmektedir. Gerçek değerlere ulaşabilmek amacıyla sisteme bağlı bulunan basınç düşürücü iptal edilmiştir. Deney dzenenide içerisinde bulgur, çay ve kırmızı mercimeğin akışkanlaştırılması gözlemlenmiştir. Her bir malzemenin akışkan yatak yüksekliği 6 cm kadardır. Sistem deneysel boyutlarda ve bulgur, çay ve kırmızı mercimeğin akışkanlaşması için gereken basınç ve debi daha büyük olduğundan ötürü hız ölçümü için rotometrenin çalışma aralığı yetmediğinden rotometre yerine anemometre kullanılmıştır. Basınç ölçümleri ise deney sistemi üzerindeki manometre yardımıyla yapılmıştır. şekil 3.1 de akışkan yatak şematik olarak gösterilmiştir.



şekil 3.1 Akışkan yatak deney dzenenide

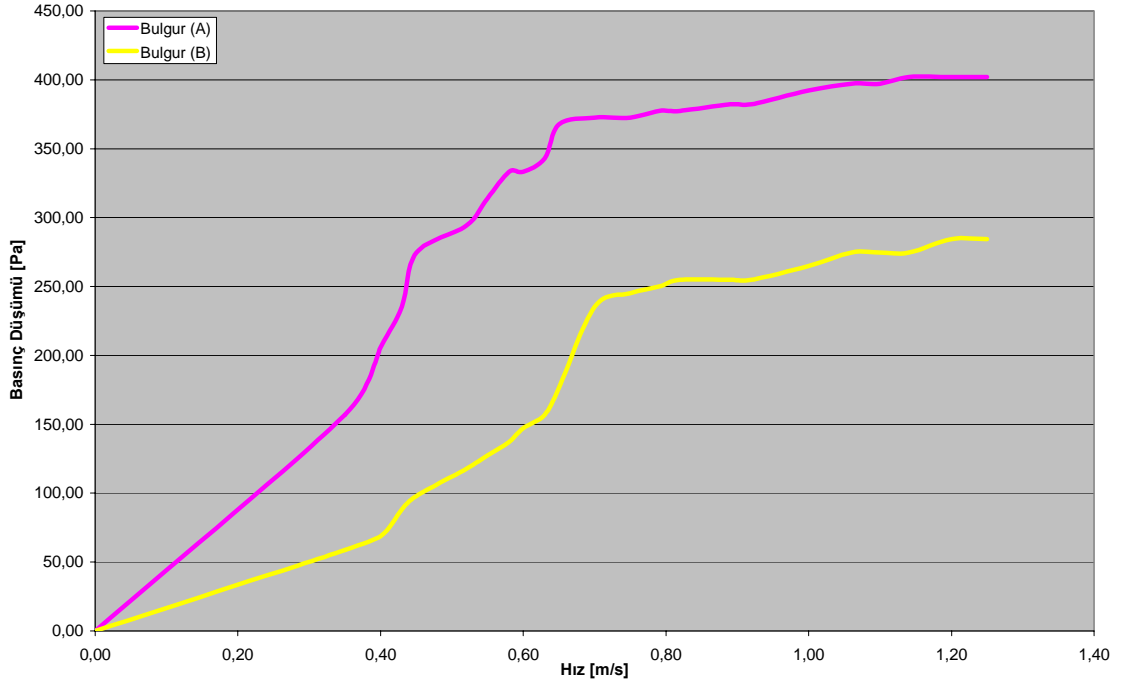
Şekil 3.1’de 1 numarada anemometre ile filtrenin hemen üst noktasında hava hızı ölçümü yapılmıştır. 2 numara filtredir. 3,4,5, noktaları basınç düşümlerini ölçmek için sistemin içerisine düz borular daldırılmıştır. 3 ile 5’den ölçülen basınçların farkından akışkan yatak boyunca (6 cm) basınç kaybı ölçülmektedir. 4 ile 5’den ölçülen basınçların farkından ise akışkan yatağın elekten 3 cm yukarısındaki basınç düşümü ölçülmektedir. 6 numaralı eleman ince delikli elektir. 7 numara ise hava ön odasıdır. Hava buradan akışkan yatak içerisine gitmektedir.

Yapılan deneylerin sonuçları, Şekil 3.2’de bulgur, Şekil 3.3’de kırmızı mercimek ve Şekil 3.4’de çayın akışkanlaşma eğrileri olarak grafikler şeklinde gösterilmiştir. Her malzeme için akışkanlaşmanın olduğu bölge ve üstüne kadar kademeli olarak hava hızı arttırılarak ölçüm yapılmıştır. Yine aynı şekilde sistemde maksimum hızdan geriye doğru gidilerek yine basınç düşümleri incelenmiştir. Şekil 3.2 Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görülen basınç dalgalanmaları deneysel sistemin büyük basınçlarda ve hızlarda tasarım edilmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bütün malzemeler için akışkan yatak yüksekliği 6 cm dir. Deney sırasında akışkan yatak üzerinde iki konumdan ölçüm alınmıştır.

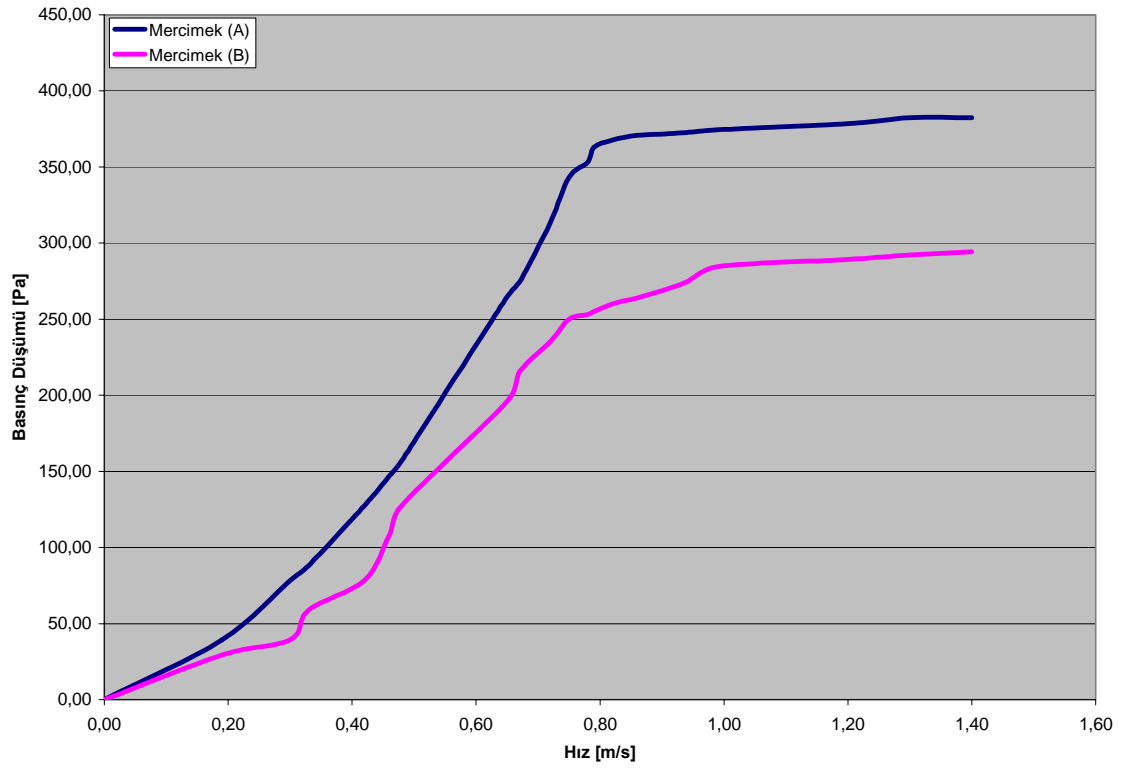
Bunlar;

- A konumu: akışkan yatak içerisindeki akışkan yatağın tepe noktasında basınç düşümü ölçümleri (6 cm)
- B konumu: aynı akışkan yatak içerisinde basınç değişimini görebilmek amacıyla akışkan yatağın en alt noktasından 3 cm yukarısından ölçümler yapılmıştır.

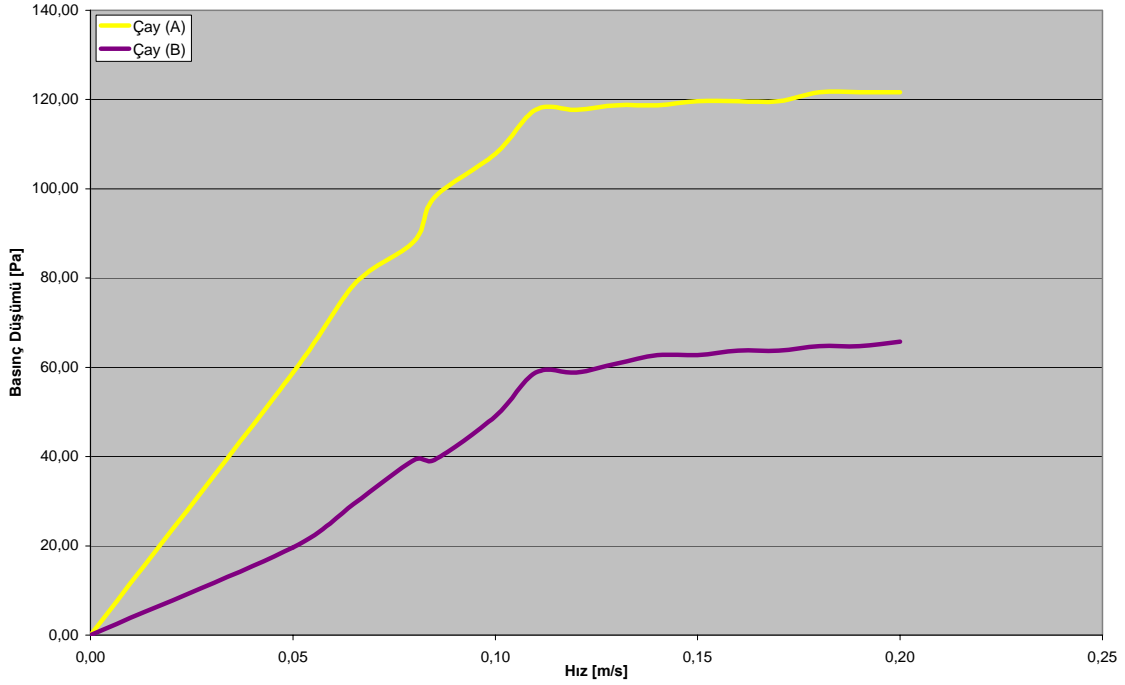
Şekiller incelendiğinde, sistem bir noktaya kadar hızlı bir şekilde basınç düşümü artan grafik olarak görülmektedir. Bir noktadan sonra ise grafik azalarak artmaktadır ve bir süre sonra basınç düşümü değeri sabitlenmektedir. Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 üzerinde gözükten boyun noktasında sistemin min. akışkanlaşma noktasına ulaştığı literatürde belirtilmiştir. (Subramanian, 2002)



Şekil 3.2 Bulgurun basınç düşümü eğrileri



Şekil 3.3 Kırmızı mercimeğin basınç düşümü eğrileri



Şekil 3.4 Çayın basınç düşümü eğrileri

Şekillerden görüleceği üzere bulgurun min. akışkanlaştırma hızı 0,6 m/s; kırmızı mercimeğin min. akışkanlaştırma hızı 0,81 m/s; çayın min. akışkanlaştırma hızı 0,11 m/s olarak kabul edilebilir. Bu sonuçları göre matematiksel korelasyonlarla karşılaştırsak en yakın değeri Bourgeois & Grenier korelasyonu vermektedir. Değerler minimum akışkanlaştırma hızı ve akışkan yatak basınç düşümüne göre karşılaştırılırsa Bulgur için Çizelge 3.3, Kırmızı mercimek için Çizelge 3.4 ve Çay için Çizelge 3.5’de görüldüğü üzere matematiksel hesap ile deneysel veriler birbirine yakındır.

Çizelge 3.3 Bulgurun deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması

	Matematiksel Hesap	Deneysel Ölçüm	Sapma
Min. akışkanlaştırma hızı (m/s)	0,62	0,63	0,01
Akışkan yatak basınç düşümü (Pa)	412,58	367,75	44,83

Çizelge 3.4 Kırmızı mercimeğin deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması

	Matematiksel Hesap	Deneysel Ölçüm	Sapma
Min. akışkanlaştırma hızı (m/s)	0,81	0,81	0
Akışkan yatak basınç düşümü (Pa)	381,37	367,75	13,62

Çizelge 3.5 Çayın deneysel ve matematiksel hesaplarının karşılaştırılması

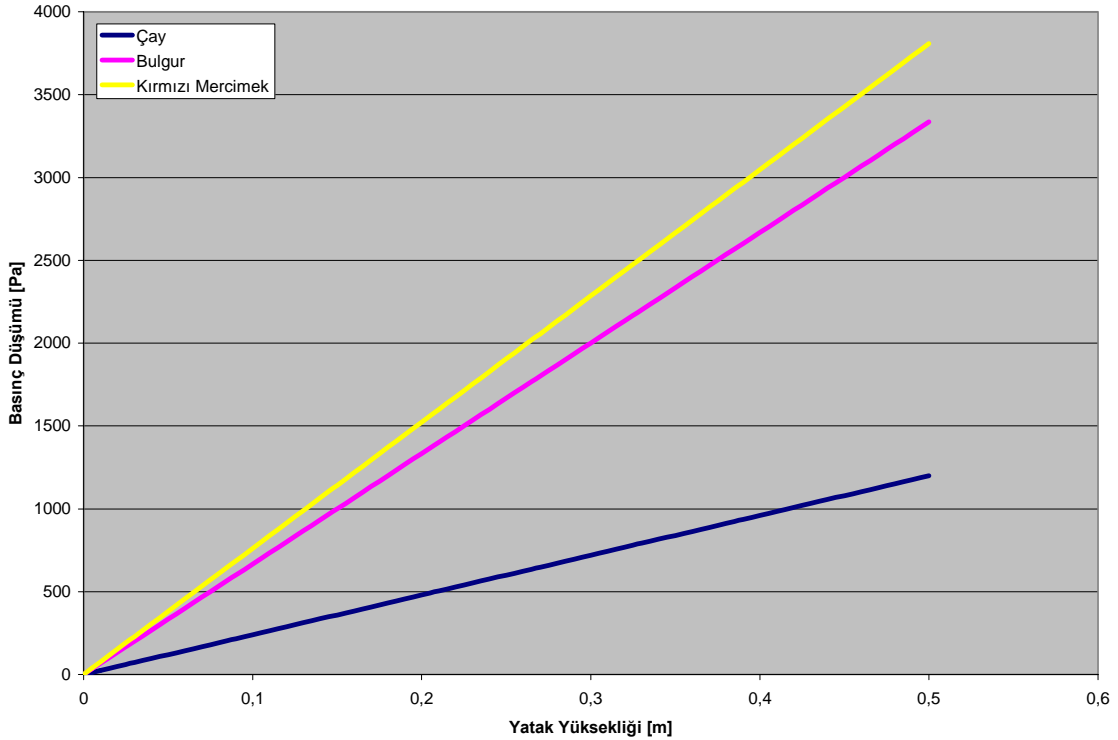
	Matematiksel Hesap	Deneysel Ölçüm	Sapma
Min. akışkanlaştırma hızı (m/s)	0,11	0,11	0
Akışkan yatak basınç düşümü (Pa)	142,48	117,68	24,8

Min. Akışkanlaştırma hızı ve Ergun denkleminde göre yapılan hesaplarda incelenen malzemelere göre şu sonuçlar çıkarılmıştır. Çizelge 3.6'da min. akışkanlaştırma hızına bağlı 30 cm'lik akışkan yatak yüksekliğine göre basınç düşümü ve Re sayısı görülmektedir.

Çizelge 3.6 Malzemelere göre min akışkanlaştırma hızları ve basınç düşümleri

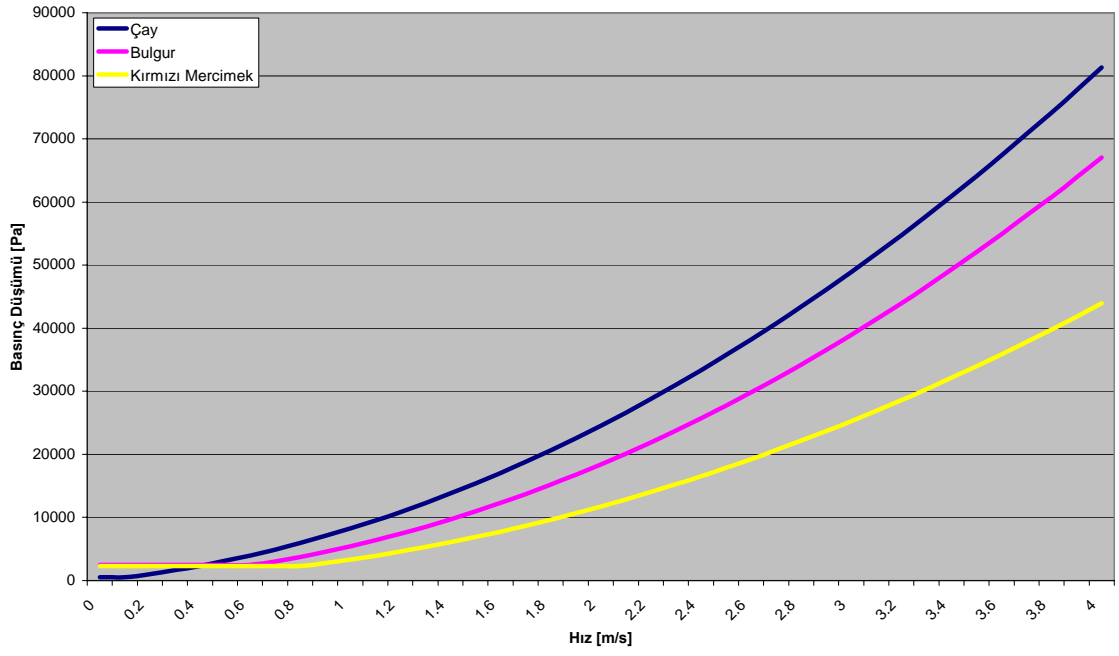
Kurutulan Malzeme	Min. Akışkanlaştırma Hızı [m/s]	Ak. Yatak Basınç Düşümü [Pa]	Re [Boyutsuz]
Bulgur	0,81	2001,01	6,52
Kırmızı mercimek	0,62	2285,15	79,99
Çay	0,11	719,92	154,39

Kurutulmak istenilen bu malzemeler hesapta çıkan min. akışkanlaştırma hızına ulaşmadığı sürece yataktaki basınç kayıplarını yenemez ve akışkanlaşamaz. Şekil 3.5'den Şekil 3.8'e kadar bütün ürünlerin bir arada ve ayrı ayrı akışkan yatak uzunluğu ve akışkan yatak basınç düşümüne bağlı olarak grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Malzemelerin yatak uzunluğuna bağlı akışkan yatak basınç düşümü grafiği

Şekil 3.6’da kurutulması planlanan ürünlerin akışkan yatak içerisindeki hızlarına bağlı olarak yatak içerisindeki basınç kaybı eğrileri görülebilmektedir.

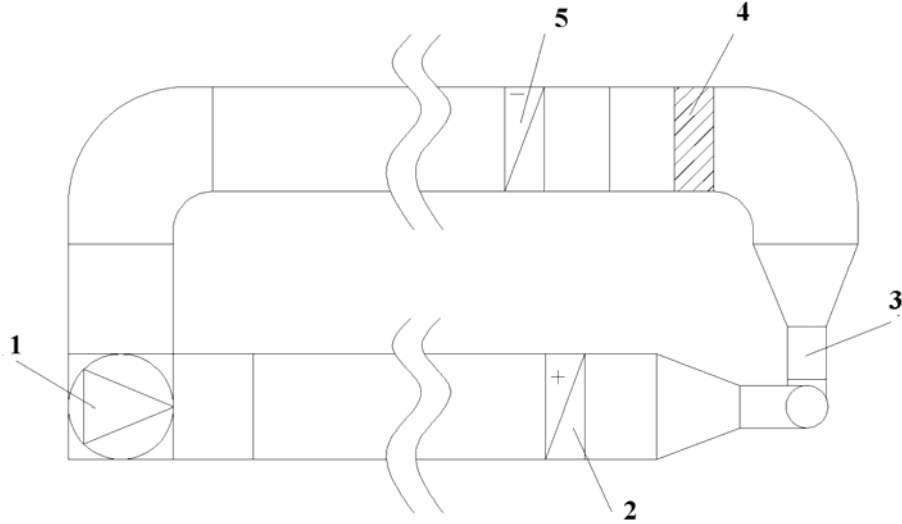


Şekil 3.6 Malzemelerin min. akışkanlaştırma hızı akışkan yatak basınç düşümü eğrileri

4. AKIŞKAN YATAKLI KURUTMA SİSTEMİNİN TEORİK HESAPLARI

Bu çalışmada, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinatörlüğü biriminin desteklediği akışkan yatak ile bütünleşik bir ısı pompası düzeneğinde gıda kurutma proseslerinin incelenmesi konulu bir projenin ön hesapları yapılarak tasarım parametreleri tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmaların amacı kurulmak istenilen daha büyük bir akışkan yatak sistemi için fanın yenmesi gereken basınç kaybını hesaplamak ve bu değerler karşısında gerekli olan fanı seçebilmektir.

Tasarımı planlanan deney sisteminin üzerinde bir havadan havaya ısı pompası, basınç düşümelerini sağlayacak bir fan ve akışkan yatak bulunmaktadır. Tasarlanan akışkan yataklı sistemin şematik şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1 Tasarlanan akışkan yatağın şematik gösterimi

Görüldüğü üzere deney sistemi üzerinde numaralandırılmış elemanlar bulunmaktadır; bunlar sırasıyla;

1. Fan
2. Isıtıcı batarya
3. Akışkan yatak
4. Filtre
5. Soğutucu batarya

Yapılan araştırma sonucu, literatürde incelenen kurutma sistemlerinde kurutma için harcanan enerjinin verimli kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle akışkan yatak (3) kullanımı ile akışkan yatak içerisindeki ısı ve kütle transferinin iyileştirilmesi istenmektedir. Böylelikle kurutmada tüketilen enerjiden maksimum ölçüde yararlanılacağı düşünülmektedir. Kurulacak deney düzeneğinin hava kanalı içerisinde bütünlük olarak eklenmesi planlanan havadan havaya ısı pompasının sıcak tarafında (2) ürünün üzerinden geçecek olan hava ısıtılır. Diğer taraftan kurutulacak malzeme üzerinden sıcak havanın etkisiyle alınmış olan nem soğutucu batarya (5) üzerinden geçirilip üzerindeki nem yoğunlaştırılarak dışarı alınır. Kurulacak sistem içerisinde herhangi bir parçacık taşınması yapılmayacaktır. Malzemeler sadece akışkan yatak üzerinden besleme yapıp alınacaktır. Filtre yardım ile (4) akışkanlaştırma işlemi sırasında oluşan küçük parçacıklar ya da ürün içerisindeki istenmeyen parçacıkların hava kanalları içerisine gitmesi engellenecektir. Böylelikle hava sistem içerisinde hareket ederek çevrimi tamamlamış olur. Sistem kapalı bir çevrim olduğundan sistemde enerji verimliliği sağlanacağı düşünülmektedir. Sistemin bir başka önemli avantajı ise kapalı bir sistem olduğundan, sistem içerisinde bakteri üremesi oluşması riskinin azalmasıdır. Bu bakımdan kurulacak olan sistem hijyenik bir sistem olarak kabul edilebilir.

Kurulacak olan sistemde, ürün tarafında malzemelerin akışkanlaştırılarak üzerinden ne kadar sürede ne kadar nem alınabildiğinin belirlenmesi ve her malzemenin kurutma eğrilerinin çıkarılması planlanmaktadır. Ayrıca kurutulacak ürünlere göre ısı ve kütle transferlerinin modellenerek incelenmesi düşünülmektedir.

Kurulacak olan sistemle birlikte ısı pompası üzerinde de araştırmalar yapılacaktır. Sistem üzerinde yapılan gaz şarjı miktarına göre ısı pompasının soğutma performansı ve verimi incelenecektir.

Sistem kapalı bir sistem olduğundan dışarı atılan enerji olmamaktadır bu sayede enerjinin kullanılabilirliği max. düzeyde olacaktır. Akışkan yatak sisteminin kurulmak istenmesinin nedenlerinden biride budur.

4.1 Kurulacak Olan Sistemin Elemanları

Deney sistemini oluşturmak için gerekli olan bileşenlerin ve donanımların kısa listesi ve açıklamaları aşağıda özetlenmiştir..

4.1.1 Veri Toplama Sistemi

Deney tesisatında kullanılacak olan veri toplama sistemi bir PLC dir (Programmable Logic Control). Veri toplama ünitesi olarak PLC seçilmesinin nedenlerinden biri, modüller halinde satıldığından istenilen konfigürasyona göre seçim yapılabilmesidir. Bir diğer önemli neden ise PLC ile sadece veri okuma değil aynı zamanda kontrol ekipmanlarına kumanda edebilme özelliğidir.

Kısaca bu modüllerden bahsedecek olursak, sistem 13 parçadan oluşmaktadır. Bunlar, anakart üzerine yerleştirilerek birbirleriyle ve işlemci ünitesiyle birlikte çalışmasını sağlayan bir kartın üzerindedir. Bu anakartın üzerinde modüllere gerekli enerjiyi sağlayacak güç kaynağı, PLC sisteminin beyni olan işlemci modülü vardır. Bu iki modülün yanında ek modüllerle istenilen özelliklerde bir veri okuma ve işleme sistemi oluşturulabilir. Bütün işlemler bu modül üzerine yüklenen program sayesinde yapılabilir. Sistemde 8 adet 8 dijital girişi olan modül vardır. Bu modüller ile -10/+10 V, -20/+20 mA, çıkış değerleri okunabilir. Ayrıca ısılıçift, PT100, PT1000 gibi duyar elemanların algıladığı sıcaklıklar okunabilir. Veri toplama sistemindeki bir başka modül ise pozisyon kontrol modülüdür. Bu modül ile servo motor üzerinde 4 konumdan kontrol yapılabilir. Bir başka modül ise 62 kanal dijital çıkış veren modülüdür. PLC sisteminin bir diğer önemli özelliği programının içinde PID kontrolüne de olanak sağlamasıdır.

Veri toplama ünitesiyle kısaca, 64 noktadan sıcaklık okunabilir, 62 adet rölenin aç/kapa kontrolü yapılabilir, bir servo motor istenilen herhangi bir noktaya getirilebilir, yine aynı şekilde pozisyon kontrol modülü ile frekans kontrol cihazı kontrol edilebilir.

4.1.2 Debimetre

Isı pompası içerisindeki soğutkanın debisini ölçmek için kullanılacaktır. Çeşitli soğutkanlarla çalışabilme özelliği vardır. Debimetrenin izobütan ile çalışma olanağı vardır. İleriki araştırmalarda soğutucu akışkan olarak izobütanın kullanılması amaçlanmaktadır. Debimetre paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Üzerinde sinyalçevirici bulunmaktadır. Bu sayede veri toplama sistemiyle bağlantı kurularak veri transferi sağlanabilmektedir. Çıkış sinyali 0-20 mA veya 4-20 mV olarak PLC sistemine bağlanabilir.

4.1.3 Duyar Elemanlar

Deney sistemini kumanda edebilmek için ölçülmesi gereken belli başlı büyüklükler vardır. Bunlar havanın nemi (%), sistem içerisindeki basınçlar (Pa), sistem içerisinde hareket eden havanın hızı (m/s) ve hava sıcaklığıdır ($^{\circ}\text{C}$).

Bahsedilen büyüklükleri ölçebilmek için bazı donanımlar temin edilmiştir. Temin edilen duyar elemanlar içerisinde üç çeşit problu duyar eleman vardır. Bunlardan birincisi problu nem ölçerdir. Bu duyar eleman aynı zamanda sıcaklığı da ölçebilmektedir. Bu duyar elemanın sıcaklık ölçme aralığı $-20\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ dir. İkinci tip problu duyar eleman ile hava hızı ölçülebilir. Bu duyar eleman ise $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkları arasındaki havanın hızını $0 - 2\text{ m/s}$ aralığında ölçülebilir. Üçüncü problu duyar eleman ise PT100'dür. PT100 ile çok hassas sıcaklık ölçümleri yapılabilir. Bu duyar elemanlardan gelen sinyaller sayesinde bilgisayar ya da operatör panel kullanmadan gösterge duyar eleman göstergeleri üzerinden de okuma yapılabilir.

Belli yerlerde sıcaklık ölçmek için T Tipi (Bakır-Bakır Konstantan) ısı çifti seçilmiştir. Bu ısı çifti çalışılacak olan sıcaklık aralığında $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hassasiyette ölçüm yapabilmektedir.

4.1.4 Dijital Hassas Terazi

Soğutma sistemine şarj edilecek gaz miktarını ve kurutması yapılacak olan malzemelerin ağırlığını ölçmek için kullanılacaktır. Deney setiyle birlikte kullanılacak olan bu cihaz $3,2\text{ kg}$ ağırlığında ve $0,01\text{ g}$ hassasiyetinde bir dijital tartıdır. Bir diğer özelliği ise RS232 standart çıkış vererek bilgisayara bağlanabilmesidir. Deney sırasında ısı pompası sistemine ne kadar soğutucu akışkan verildiği ölçüm ve performans açısından büyük önem taşımaktadır.

4.1.5 Frekans Konvertörü

Deney sisteminde, frekans konvertörü kullanılan fan sayesinde havanın istenilen debide üflenmesine olanak sağlanmaktadır. Kurutulacak malzeme değiştirildiği zaman gerekli basınç ve hava debisi değişeceğinden değişik debilerde havaya ihtiyaç olacaktır. Bu ihtiyaç ise frekans konvertörü ile giderilmektedir.

4.1.6 Vakum Pompalı Şarj İstasyonu

Isı pompası basınç altında çalışan bir sistem olduğundan basınç testleri ve aynı zamanda vakum testleri yapılması gerekmektedir. Bu şarj istasyonu ile sistemin içerisinde soğutucu akışkan şarjı gerçekleştirilebilir. Deney sırasında soğutucu akışkanın cinsine göre şarj edilen

soğutucu akışkan miktarına bağlı soğutma performansı ve soğutucu akışkanın performansa doğrudan etkileri incelenmek istenmektedir.

4.1.7 Gaz Toplama Ünitesi

Deney sisteminde, kurutma prosesi ile birlikte ısı pompasının performansı da incelenecektir. Çeşitli soğutucu akışkanlarla soğutma performansı belirlenecektir. Her yeni soğutucu akışkan için tekrardan gaz şarjı gerektiğinden bir önceki soğutucu akışkanın bir şekilde sistemden alınması gerekir. Yine deney sırasında ihtiyaç dahilinde kondenser veya evaporatörlerin değiştirilmesi gerekebilir. Böyle bir durumda yine şarj edilmiş olan gazın dışarı alınması gerekecektir. Gazın doğrudan dışarı atılması maliyetli ve külfetli bir işlemdir, aynı zamanda gazın dışarıya alınmasında çevreye verilebilecek zararlar da söz konusudur. Bu işlem için gaz şarj istasyonuna gerek duyulmuştur.

4.1.8 Pleksiglas Boru

Akışkan yatak içerisindeki hareketi ve akışkanlaşmayı görebilmek amacıyla şeffaf malzeme kullanmak gerekmektedir. Şeffaf malzeme sayesinde akışkanlaşmanın oluşup oluşmadığı veya parçacık hareketleri görülebilir. Cam gibi kırılabilir ve üzerinde çalışılması zor bir malzeme yerine pleksiglas borular kullanılacaktır. Deney tesisatında kullanılacak olan pleksiglas boruların çapları 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 400 mm dir.

4.1.9 Soğutucu Gaz

Isı pompası içerisinde sistemde kullanmak amacıyla ilk aşamada R134a soğutucu akışkan kullanılacaktır. Şarj edilen soğutucu akışkan miktarına göre soğutucu akışkanın COP'si, soğutucu akışkanın performans testi, soğutucu akışkanın miktarına göre ne kadar soğutma gerçekleştirdiği deneyler sırasında ölçülecektir. R134a ile ölçümler yapıldıktan sonra değişik soğutkanlar ile COP ölçümü yapılması planlanmaktadır.

4.2 Akışkan Yataktaki Eleğin Basınç Düşümü

Herhangi bir hesap algoritması yapılamamıştır. Literatürdeki hesaplanan değerlere göre bir kabul yapılmıştır. Literatür araştırmasında yer alan Heperkan ve Vural'ın "Akışkan Yataklarda Çift Katlı Dağıtıcı Elek Kullanımı" adlı makalesinden yararlanılmıştır. Makaleye göre elek basınç düşümü yaklaşık olarak 600 Pa kadardır. Kurulacak deney düzeneğinde delikleri ayarlanabilir elek yerine ince aralıklı tel elek kullanılması düşünülmektedir.

Böylelikle çift katlı eleğin oluşturduğu basınç kaybından daha düşük bir basınç düşümü beklenilmektedir. Üzerinde akışkanlaştırma deneyi yapılan sistemde de aynı tarzda elek kullanılmıştır. Deney düzeneği boşken yapılan ölçümde elek basınç düşümü yaklaşık olarak 150 Pa çıkmıştır.

4.3 Toplam basınç kaybı

Elde edilen sonuçlara göre, kurutulacak ürün için toplam basınç kayıpları 400x400 hava kanalı için Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 400x400 hava kanalında hesaplanan toplam basınç düşümleri

Ürün	Bulgur	Kırmızı Mercimek	Çay
	Pa	Pa	Pa
Akışkan Yatak	2001,01	2285,15	719,92
Soğutucu Batarya	150	150	150
Isıtıcı Batarya	50	50	50
Elek	150	150	150
Hava Kanalında	1,99	2,55	1,96
Filtre	250	250	250
Toplam	2453	2737,7	1169,92

Çizelge 4.1’de görüleceği üzere 0,3mlik akışkan yatak içerisinde maksimum basınç düşümü kırmızı mercimekte olmaktadır.

5. SONUÇ

Isı pompalı akışkan yatak sistemi üzerinde basınç düşümlerine bakılmıştır. Basınç düşümleri incelendiğinde matematiksel modelde parabolik eğriler elde edilmektedir, fakat gerçekte akışkanlaşan parçacığa etkiyen hava hızı belli bir değere ulaştıktan sonra akışkan yatak içindeki basınç kaybı, hız arttıkça hızlı artış gösteren eğilim yavaşlamaktadır ve belli bir süre sonra basınç kaybı çok artmamaktadır. Bu eğrinin sırt yaptığı yerde ürünün akışkanlaşmaya başladığı nokta görülebilmektedir.

Şekil 3.2’de bulgurun min. akışkanlaşma hızı 0,81 m/s, Şekil 3.3’de kırmızı mercimeğin min. akışkanlaşma hızı 0,6 m/s, Şekil 3.4’de çayın min. akışkanlaşma hızı 0,11 m/s olarak görülmektedir.

Matematiksel olarak da Bourgeois & Grenier korelasyonu çay, ve kırmızı mercimek için uyum sağlamaktadır ancak bulgurda 0,01 m/s lik bir sapma ile uyum sağladığı görülmektedir. Matematiksel korelasyonların hesaplarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, tahıl ürünlerinin fiziksel özelliklerini düzgün belirlenmesidir.

Akışkan yatak içerisindeki basınç düşümü hesaplanırken Ergun denklemi kullanılmıştır. Bu denklem sayesinde akışkan yatak içerisindeki basınç kaybını ufak bir sapmayla hesaplamak mümkün olmaktadır. Basınç kaybını hesaplarken fiziksel özelliklerin yanı sıra denkleme etki eden malzemeye göre değişkenlik gösteren yatak boşluk oranı ve şekil faktörlerini belirlemek önemlidir. Bu değerleri literatürden bulmak mümkündür. Çay için bulunan boşluk oranı 0,39, kırmızı mercimek için 0,48, bulgur için 0,47 olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalardan çıkan sonuçlara göre, matematiksel hesaplamalar ile deneysel ölçümler karşılaştırıldığında çayda 24,8 Pa kadar bir fazladan fark çıkmaktadır. Kırmızı mercimekte 13,62 Pa kadar bir fazladan fark çıkmaktadır. Bulgurda ise 44,83 Pa kadar bir fazladan bir fark çıkmaktadır.

Şekil 4.1 de gösterilen deney sisteminin şematiğine göre kanal boyutlandırmaları daha önceden belirtilmişti. Hava kanalının basınç düşümü hesapları Ek1 de gösterilmektedir. Ek1 Çizelge.1 de ürünler için kanal içi basınç kayıpları hesaplanıp gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Akçay, K., Ayok, T., Kocakuşak, S., Köroğlu, H. J., Savaşçı, Ö. T., Tolun, R., (1996) "Production of Anhydrous, Crystalline Borax in a Fluidized Bed", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 35:1424-1428
- American Chemical Society, (1981), "Jet Penetration in a Pressurized Fluidized Bed", *Industrial and Engineering Chemistry*, 20:287-300
- Ash, William J., Wall, Clarence J. (1949), "Fluid-Solid Air Sizer and Dryer" *Industrial and Engineering Chemistry*, 41:1247-1249
- Bakker-Arkema, Fred W., Brooker, Donald B., Hall, Carl W., (1992), "Drying and Storage of Grains and Oilseeds", Chapman & Hall, ISBN 0442205155
- Barnstone, L. A., Harriott, Peter, (1967), "Heat Transfer In Fluidized Beds", *Industrial and Engineering Chemistry*, 59:55-58
- Bhandari, Bhash, Senadeera, Wijitha, Gordon, Young, Wijesinghe, Bandu, (2006), "Fluidization Characteristics of Moist Food Particles", *International Journal of Food Engineering*, 2: Article 7
- Boxtel, A.J.B von, Clifford, M. N., Temple, C. M., Temple, S. J., (2001), "The Effect of Drying on Black Tea Quality", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81:764-772
- Boxtel, A.J.B. van, Straten, G. Van, Temple, S. J., (2000), "Control of Fluid Bed Tea Dryers: Controller Performance Under Varying Operating Conditions", *Computers and Electronics in Agriculture*, 29:217-231
- Boxtel, A.J.B. van, Tambala, S. T., Temple, S. J., (2000), "Monitoring and Control of Fluid-Bed Drying of Tea", *Control Engineering Practice*, 8:165-173
- Boxtel, A.J.B. van, Temple, S. J., (2000) "Control of Fluid Bed Tea Dryers: Control in the Context of Design and operation Conditions", *Computers and Electronics in Agriculture*, 29:209-216
- Boxtel, A.J.B. van, Temple, S. J., (2000) "Control of Fluid Bed Tea Dryers: Controller Design and Tuning" *Computers and Electronics in Agriculture*, 26:159-170
- Burgschweiger, J., Tsotsas, E., (2002), "Experimental Investigation and Modelling of Continuous Fluidized Bed Drying Under Steady-State and Dynamic Conditions", *Chemical Engineering Science*, 57:5021-5038
- Canovas, Gustavo V. Barbarosa, Gongora-Nieto, M. Marcela, Vega-Mercado, Humberto, (2001), "Advances in Dehydration of Foods", *Journal of Food Engineering*, 49:271-289
- Chopard, Mary, Holbrook, Rachel, Ng, Jonathan, Ottenberg, Martha, Welsh, Aaron, (2003), "Packed Beds and the Ergun Equation: Relationship Between Fluid Flow and Pressure Drop", *Carnegie Mellon University*
- Clavijo, Leonardo, Garreiro, Jorge Martinez, Gerla, Patricia, Kahan, Sandra, Rodriguez, Arturo, Zecchi, Berta, (2005), "A Simple Model for Rice Grains in a Deep-Bed Dryer", 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering
- Devres, Y. Onur, Özdemir, Murat, (1999), "The Thin Layer Drying Characteristics of Hazelnuts During Roasting" *Journal of Food Engineering*, 42:225-233

- Dincer, I., Hamdullahpur, F., Syahrul, S., (2002), "Thermal Analysis in Fluidized Bed Drying of Moist Particles", *Applied Thermal Engineering*, 22:1763-1775
- Dincer, I., Hamdullahpur, F., Syahrul, S., (2002), "Thermodynamic Modeling of Fluidized Bed Drying of Moist Particles", *International Journal of Thermal Science*, 42:691-701
- Dore, Emmanuel, Legallais, Cecile, Paullier, Patrick, (2000), "Design of a Fluidized Bed Bioartificial Liver", *Artificial Organs*, 24:519-525
- Doymaz, İbrahim, Pala, Mehmet, (2002), "Hot-air Drying Characteristics of red Pepper", *Journal of Food Engineering*, 55:331-335
- Dwayne, A. Suter, Gerald, H. Bruswitz, Wilhelm, Luther R., (2005), "Drying and Dehydration", *Food Process Engineering Technology*, 10:259-284
- Gerald, C.F. (1952), "Fluid Bed Flowmeter", *Engineering and Process Development*, 233-235
- Godia, Francesc, Sola, Carles, (1995), "Fluidized-Bed Bioreactors", *Biotechnology Progress*, 11:479-497
- Gül, M. Zafer, Gür, Mesut, Kopuz, Adnan, (2003), "an Experimental and Numerical Study of Fluidized Bed Drying of Hazelnuts", *Applied Thermal Engineering*, 24:1535-1547
- Harzadin, G., Sinici, R., Soytaş, N., (1972), "Hava Kanalları Hesabı ve Konstrüksiyonu"
- Heperkan, Hasan, Vural, Hüseyin, (1985) "Akışkan Yataklarda Çift Katlı Dağıtıcı Elek Kullanımı", *Uluslararası Yanma Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 5:2:621-632
- Istadi, I., Sitompul, J. P., (2002) "A Comprehensive Mathematical and Numerical Modeling of Deep-Bed Grain Drying", *Marcel Dekker Inc.*, 20:1123-1142
- Johnsson, Filip, Leckner, Bo, Sasic, Srdjan, (2004), "Interaction Between a Fluidized Bed and Its Air-Supply System: Some Observations", *Industrial Engineering Chemistry*, 43:5730-5737
- Kibar, Hakan, Öztürk, Turgut, (2005), "Taneli Ürünlerde ürün Şev Karakteristiklerine Bağlı Depolama Yükleri", *J. of Fac. of Agric., OMU*, 21:132-139
- Köse, Ramazan, (1995), "Akışkanlaştırma Hızı ile Akışkan Yataklı Yakıcılar Arasındaki İlişkinin İncelenmesi", *Uluslararası Yanma Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 4:286-296
- Kunii, Daizo, Levenspiel, Octave, (1977), "Fluidization Engineering", *John Wiley & Sons Inc.*, ISBN 0-88275-542-0
- Mateer, David D., Novak, Lawrence T., (1986), "Trickling Flow Pressure Drop In Packed Beds of Formed Catalysts", *Industrial and Engineering Chemistry*, 25:1034-1036
- Mecham, W. J., Sandus, Oscar, Steunenber, R. K., Vogel, G. J., (1958) "Fluidized-bed Techniques in Producing uranium Hexafluoride from ore Concentrates", *Industrial and Engineering Chemistry*, 50:1744-1747
- Montazeri, H., Mowla, D., (2000), "Drying of Particles in Batch Fluidized Beds" *Journal of Aerosol Science*, 31:793-794
- Murphy, Walter J., (1949) "Fluidization Nomenclature and symbols" *Industrial and Engineering Chemistry*, 41:1249-1250
- Rose, A., Smith, H., (1963) "Fluidized Bed Dryers", *Industrial and Engineering Chemistry*, 50:20-26

Ross, Stuart, Smith, Anthony G., Smith, Martin, Taylor, Kate, (1999), "Prediction of Pressure Drop and Flow Distribution in Packed Bed Filters", International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 273-280

Subramanian, R. Shankar, (2002), "Flow Through Packed Beds and Fluidized Beds", University of California

University of Texas, (2005), "Fixed and Fluidized Beds", University of Texas

Zabrodsky, S. S., (1966), "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds", MIT Press, ISBN 0-262-24007-6

İNTERNET KAYNAKLARI

[<http://www.erzurum-tarim.gov.tr/teknik/gida/kurutma.htm>]

[tr.wikipedia.org]

[eng.wikipedia.org]

[www.asabe.org]

EKLER

Ek 1 Hesabı Yapılan Hava Kanalları için Yapılan Hesaplamalar ve Kullanılan Tablolar,
Grafikler

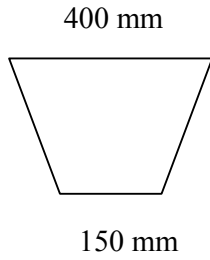
Ek 1 Hesabı Yapılan Hava Kanalları için Kullanılan Tablolar ve Grafikler

Öngörülen Isı pompalı, akışkan yataklı kurutma sisteminin kanal boyutlandırılması

Sistemin akışkan yatak haricindeki kanal içerisinde oluşacak olarak basınç kayıpları hesabı yapılmalıdır. Tasarım yapılırken 400x400 boyutlarındaki kare kanallara hesaplamaları yapılmıştır.

İncelenen sistem üzerinde iki adet dirsek, bir adet genişleme elemanı ve bir adet ise daralma elemanı mevcuttur. Bu elemanların özel dirençleri hesaplanabilir.

Genişleme elemanı:



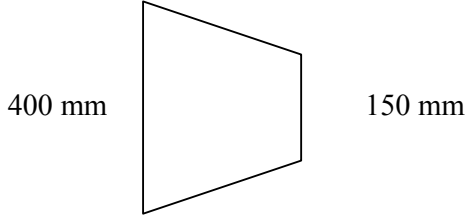
Genişleme elemanı akışkan yataktan çıktıktan sonra kanala bağlanırken kullanılan elemandır. Hesaplama yapılabilmesi için tablodan özel direnç katsayısı bulunmalıdır. Bu özel direnç katsayısını tablodan bulabilmek için, genişleme elemanının genişleme açısını ve genişleme yüzeylerinin alanlarının oranına ihtiyaç duyulur. Üst yüzeye F1 alanı alt yüzeye ise F2 alanı denilirse

$$\frac{F1}{F2} = 4 \quad (\text{Ek1.1})$$

$\alpha = 13,19^\circ$ olarak hesaplanır.

Bu değerlere göre tablolardan okunan özel direnç katsayısı

$$\zeta = 0,73$$

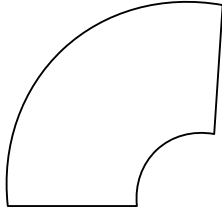
Daralma Elemanı:

400x400 genişleme elemanı için

$$\zeta = 0,73$$

Dirsek:

Dirsek hesabında, dirseğin dönme yarıçapı, alt kenarın uzunluğu ve dönme açısı bilinmelidir.



Buna göre 400x400 kanal için;

$$R=300 \text{ mm, } a=400 \text{ mm, } \alpha=90^\circ$$

$\zeta=0,5$ olarak bulunur.

Bu değerler her iki dirsek için geçerlidir.

400x400 kanal için özel dirençleri toplayacak olursak.

$$\Sigma\zeta=2,46 \text{ olarak bulunur.}$$

Tespit edilen hava hızına (w), kanal uzunluğu (l) ve kanal boyutlarına (400x400) göre 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 10 nolu sütunlar doldurulur. Bu değerler sonucunda “Hava Kanalları Hesabı ve Konstrüksiyonu” (Harzadin, 1977) kitabındaki şekil (17-1)’deki tabloya göre okunan eşdeğer çap sütun 7’ye yazılır. Eşdeğer çapa göre gerçek kanal kesiti sütun 8 e yazılır. Bu kanal kesitine düzeltme yapılarak kanal içerisindeki gerçek kanal hızı hesaplanır ve sütun 9 a yazılır. Eşdeğer çap ve debi değerlerine göre şekil (17-2)’den (Harzadin, 1977) R değeri okunup sütun 11’e yazılır. l çarpı R sütun 12 ye yazılır. Kanal içi hız ve kesite göre cetvel

(17-1)'den (Harzadin, 1977) dinamik basınç P_{dyn} bakılabilir ya da hesap yapılabilir. Bazı noktalarda basınç değeri grafiğin dışına çıkmıştır. Buna göre dinamik basınç hesap yöntemi ile bulunmuştur.

$$P_{dyn} = \rho x \frac{w^2}{2} x \frac{\lambda_k x l}{d_h} \quad (\text{Ek1.2})$$

$$\lambda = 0,118 x \frac{\epsilon_k^{0,25}}{d_h^{0,4}} \quad (\text{Ek1.3})$$

Buradaki pürüzlülük katsayısı (ϵ_k) tablolardan metal kanallar için 0,0015 olarak alınmıştır. Hesaplanan dinamik basınç sütun 13'e yazılır. Yukarıda daha önce yapılan özel direnç kayıpları hesabında elde edilen değerler sütun 14'e yazılır. Dinamik basınç ile özel kayıpları çarpıp sütun 15'e yazılır. Basınç düşümleri hesaplandıktan sonra toplamı yazmak gereklidir. Sütun 16'ya sütun 12 ile sütun 15'in toplamı yazılır. Sütun 18 de ise sadece kanallarda oluşan basınç kayıplarının Pa cinsinden sonuçları gösterilmiştir. Kanalların basınç kayıpları haricinde sistemdeki bazı elemanların basınç kayıpları da mevcuttur. Hesaplanan değerler sadece kanal içerisinde oluşan kanal boyunca ve özel birimlerin kayıpları hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda çıkan değerler çizelge olarak (Çizelge Ek1.1) aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge Ek.1.1 400x400 Kanal için basınç düşümü hesapları

Parça No	Hava Debisi	Hava Debisi	Geçici Hiz	Geçici Kesit	Kanal Ölçüleri	Eşdeğer Çap	Hakiki Kesit	Hakiki Hiz	Uzunluk	Basınç Düşüğü	Sürtünme Kaybı	Dinamik Basınç	Özel Direnç Katsayısı	Özel Direnç Kaybı	Toplam basınç Kaybıdana kadar	Emre amade basınç	Açıklama
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Qh	Qs	w	F	azb	D	F	w	l	R	IR	Pdyn	ζ	Z	IR+Z		Σ(IR+Z)		
	m ³ /h	m ³ /s	m/s	m ²	mmxmmm	mm	m ²	m/s	m	m	mmSS	mmSS	-----	mmSS	mmSS	-----	Pa	
400x400 kanal için hesap																		
Çay																		
	63.4	0.018	0.110	0.160	400x400	440	0.194	0.09	10.1	0.02	0.202	7E-04	2.46	0.002	0.204		1.99882	2 Dirsek, genişleme, daralma
Bulgur																		
	357	0.099	0.620	0.160	400x400	440	0.194	0.51	10.1	0.02	0.202	0.024	2.46	0.058	0.26		2.55305	2 Dirsek, genişleme, daralma
Kırmızı Mercimek																		
	467	0.130	0.810	0.160	400x400	440	0.194	0.67	10.1	0.01	0.101	0.04	2.46	0.1	0.201		1.96712	2 Dirsek, genişleme, daralma

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	30.01.1980	
Doğum yeri	Pforzheim/B. ALMANYA	
Lise	1994-1998	Kenan Evren Anadolu Lisesi
Lisans	1998-1999	Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
Lisans	1999-2003	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2003-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2006-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Fakültesi
Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı
Araştırma Görevlisi