


BUĞDAYIN PNÖMATİK NAKİL İLE TAŞINMASI

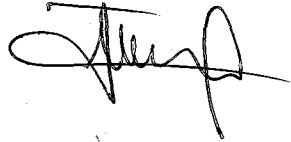
Mak.Müh. Atilla AKTAŞ

F.B.E. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Doç.Dr. Eyüp AKARYILDIZ

Prof. Dr. Doğan ÖZGÜR


Prof. Dr. Mesut BEGÜRLER


İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ	1
1.1 İletim Tekniğinin Görevleri	1
1.2 İletim Tekniğinin Uygulama Alanları	1
1.3 Pnömatik ve Mekanik Sürekli İletimin Karşılaştırılması	2
2 AKIM TIPLERİ	4
2.1 Yoğun ve Seyrek Fazlı Akımda Pnömatik Transfer	4
2.2 Seyrek Fazlı Akım	6
2.2.1 Düşey Boruda Seyrek Fazlı Akım İçin Tıkanma Hızı (U_{CH})	6
2.2.2 Yatay Boruda Seyrek Fazlı Akım İçin Sınır Hızı (U_{SALT})	8
2.2.3 Yatay Boruda Seyrek Fazlı Akımda Parçacıklara Etkiyen Kuvvetler	11
2.2.3.1 Sürüklenme Kuvveti	11
2.2.3.2 Çeperdeki Sürtünme Kuvveti	13
2.2.4 Dikey Boruda Seyrek Fazlı Akımda Parçacıklara Etkiyen Kuvvetler	15
2.3 Yoğun Fazlı Akım	16
2.3.1 Pnömatik Taşıma Sistemleri İçin Faz Diyagramları	17
2.3.2 Malzeme Demetinin Oluşumu ve Giderilmesi	19
2.3.3 Dökme Malzemelerin Davranışı	22
2.3.4 Yükleme Faktörünün Etkisi	23
2.4 Pnömatik Taşıma Sistemlerinin Performansı	24
2.4.1 Boru sisteminin çapı	24
2.4.2 Taşıma uzaklığı	25
2.4.3 Boru sisteminde basınç düşmesi	26
2.4.4 Tane Boyut Küçülmesinin Taşımaya Etkileri	26
2.5 Akış Şekilleri	28
2.6 Yatay Borularda Sürüklenme Hızı	31
2.7 Yoğun Fazlı Yatay Taşımada Basınç Düşmesi	33
3 TEMEL BAĞINTILAR	35
3.1 Gaz ve Partikül Hızları	35
3.2 Süreklilik	36
3.3 Basınç Kaybı	37

3.4	Seyrek Fazlı Akım İçin Sistem Dizayn Ölçütleri	42
3.4.1	Gaz Hızı	42
4	PNÖMATİK İLETİM TESİSLERİNİN HESABI	43
4.1	Havanın Sıkıştırılabilirlik Özelliğinin Pnömatik İletimdeki Etkisi	43
4.2	Basınç Kayıpları	43
4.3	Boru Çapı	46
4.4	Hava Debisi	46
4.5	İletim Borusundaki Olguya İlişkin Temel Denklemler	46
4.6	Havanın Sıkıştırılabilirlik İlkesine Göre Basınç Yöntemli Pnömatik İletim	48
4.6.1	Genel	48
4.6.2	Hava Hızı	48
4.6.3	Basınç Kaybı	49
4.7	Basınç Yöntemli Bir İletim Tesisatının Boru Çapı Kademelendirilmesine Gidilmeden Tasarımı	49
4.7.1	Çok Kademeli Boru Çapı Uygulamalı Basınç Yöntemli İletim Hattı	53
4.8	Havanın Sıkıştırılabilir Özelliği İlkesine Göre Emme Yöntemli Pnömatik İletim	57
4.8.1	Genel	57
4.8.2	Hava Hızı	57
4.8.3	Basınç Kaybı	58
4.8.4	Emme Yöntemli Pnömatik İletim Tesisatında Basınç Kaybının Sınırları	59
4.8.5	Havanın Sıkıştırılabilir Özelliği İlkesine Göre Emme Yöntemli Pnömatik İletim Tesisatının Tasarımı	59
4.9	Hesap Örneği	62
5	SONUÇ	66
KAYNAKLAR		67
EKLER		68
Ek 1	Pnömatik Yüzer Ortamlı İletimde Önemli Bazı Yığın Mallara İlişkin Veriler	68
Ek 2	Siklon Seçim Tablosu	69
ÖZGEÇMİŞ		70

SİMGE LİSTESİ

A	Boru kesit alanı
B	Dirsek için basınç kayıp katsayısı
C_{ds}	Sürüklenme katsayısı
D	Boru çapı
d_p	Partikül çapı
F_{ds}	Tek bir parçacığa etkiyen sürüklenme kuvveti
F_d	Toplam sürüklenme kuvveti
F_f	Sürtünme kuvveti
F_g	Gravitasyonel kuvvet
Fr	Gaz için Froude sayısı
Fr_s	Partikül için Froude sayısı
F_{SALT}	Çökme anındaki Froude sayısı
G_p	Katı partikül kütle akış oranı (birim alandan birim zamanda)
M_p	Katı partikül kütleli debisi
M_g	Taşıyıcı gaz kütleli debisi
V_g	Taşıyıcı gaz hacimsel debisi
R	Dirsek yarıçapı
Re	Reynolds sayısı
U_f	Taşıyıcı gaz hızı
U_p	Parçacık hızı
U_T	Tek bir parçacığın terminal hızı
U_{TT}	Kütle halinde akışta parçacıkların terminal hızı
U_{CH}	Dikey boruda tıkanma hızı
U_{SALT}	Yatay boruda çökme (sürüklenme) hızı
U_{SLIP}	Kayma hızı (partikül ve gaz arasındaki bağıl hız)
U_{oth}	Optimum taşıma hızı
ρ_p	Partikül yoğunluğu
ρ_b	Partiküllerin yığılma yoğunluğu
ρ_f	Taşıyıcı gaz yoğunluğu
L	Boru uzunluğu
L_A	Minimum hızlanma mesafesi
l	Malzeme demeti boyu
S	Eğri parçasının eğimi
ϵ	Boşluk oranı

ϵ_{CH}	Kritik boşluk oranı
λ	Sürtünme Katsayısı
$X_{p,g}$	Yükleme faktörü (oranı)
μ_f	Gazın mutlak vizkositesi
φ	Boru kesitimde biriken malzemenin kesit alanının toplam boru kesit alanına oranı
β	Mal hızının taşıyıcı gaz hızına oranı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Seyrek fazlı akımda taneciklerin durumu	4
Şekil 2.2	Yoğun fazlı akımda taneciklerin durumu	5
Şekil 2.3	Düşey borulardaki akım için faz diyagramı.....	6
Şekil 2.4	Yatay borularda gaz hızı ile basınç gradyanı ilişkisi.....	8
Şekil 2.5	Seyrek fazlı akımda buğday için basınç düşmesi.....	11
Şekil 2.6	Pnömatik taşıma sisteminde malzeme akış şekilleri	18
Şekil 2.7	Malzeme demetinde taneciklerin kama etkisi	19
Şekil 2.8	Tane dağılımının malzeme demetinde kamalama üzerine etkisi	20
Şekil 2.9	Malzeme demeti boyuna bağlı olarak demeti taşımak için gerekli olan basıncın değişimi	21
Şekil 2.10	Malzeme demetini hareket ettiren basınç	21
Şekil 2.11	Geldart diyagramı.....	22
Şekil 2.12	Boru çapının malzeme debisine etkisi bakımından A ve B malzemelerinin karşılaştırılması	25
Şekil 2.13	Boru çapı ile taşıma uzaklığının sadece hava akan boru sistemindeki basınç düşmesine etkisi	26
Şekil 2.14	Hava basıncının ve taşıma uzaklığının akışkan yüküne etkisi.....	27
Şekil 2.15	Akış tipleri için geçiş şekilleri ve gaz hızı ile basınç kaybı arasındaki ilişki	29
Şekil 2.16	By-pass hattı kullanılarak tıkanmanın önlenmesi	30
Şekil 2.17	Basınç kontrolü ile tıkanmanın önlenmesi	30
Şekil 2.18	Hava bıçağı kullanılarak tıkanmanın önlenmesi	31
Şekil 2.19	Yoğun fazlı akış için sürüklenme hız kolerasyonu	32
Şekil 3.1	Momentumun korunumu için boru kesiti	37
Şekil 4.1	Değişken kesitli boruda hava akımı	46
Şekil 4.2	Basınç yöntemli pnömatik iletim tesisi şeması	48
Şekil 4.3	Değişken kesitli boruda havanın özellikleri	54
Şekil 4.4	Emme yöntemli pnömatik iletim tesisi şeması	57
Şekil 4.5	Emme yöntemli pnömatik iletim tesisatında teleskopik boru.....	58
Şekil 4.6	Örnek problem için emme yöntemli pnömatik iletim tesisi şeması	62
Şekil 4.7	Değişken yükler için hava hızı ile basınç kaybı ilişkisi	65

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Pnömatik sürekli iletim ile mekanik sürekli iletimin karşılaştırılması.....	3
Çizelge 2.1 Reynolds sayısına bağlı sürüklenme katsayıları	12
Çizelge 2.2 Çeşitli malzemelerin sürtünme katsayıları.....	14
Çizelge 4.1 Boru çapı kademelendirilmesi olmadan basınç yöntemli bir iletim tesisatının tasarım gidiş diyagramı	49
Çizelge 4.2 Yüksek basınç yöntemli bir iletim tesisatının çok kademeli boru çapı uygulamasına göre tasarım gidiş diyagramı	54
Çizelge 4.3 Emme yöntemli bir pnömatik iletim tesisatının tasarım akış şeması	60



ÖNSÖZ

Buğdayın pnömatik sistemler ile taşınması hakkındaki bu çalışmayı yaparken her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan aileme, yardım ve desteklerinden dolayı Doç.Dr. Eyüp Akaryıldız'a, doküman sağlama konusundaki yardımlarından dolayı Mak.Yük.Müh. Haydar Boyalı'ya, destek ve fikirlerinden yararlandığım T.K.M. yetkililerine teşekkürü borç bilirim.



ÖZET

Pnömatik iletim tesisatı ilk kez 19. yüzyılın ikinci yarısında yapılmış ve pratik olarak gemi boşaltılmasında kullanılmıştır. Bu dönemde kurulan tesisler bilimsellikten bir hayli uzak kalıyordu. Bu gün için bir pnömatik tesisin gereken ölçülerini belli ilkelere dayanarak yeterli doğrulukta saptama olanağı vardır. Günümüzde endüstrinin birçok dallarında pnömatik iletim yaygın ölçüde uygulanmaktadır.

Pnömatik iletimin temelini akışkanlar bilimi, termodinamik, mekanik sistem ve iletim tekniği oluşturmaktadır. Bu bilim dallarının pnömatik iletim tekniğine uygulanmasında çözüm gerektiren bazı faktörler üzerindeki araştırmaların halen sürmekte olduğu bildirilmektedir. Son 25 yıldan beri yapılmakta olan araştırmaların yardımı ile yapımçı firmalar, endüstriden gelen istekleri gerçekleştirebilmektedir.

Bu çalışmada önce pnömatik iletimin temelleri ve akım tipleri hakkında bilgi verilmeye çalışıldı. Bundan sonra pnömatik iletim tesisinin tasarımı için gerekli olan basınç kaybı ifadeleri, yatay ve dikey borularda tıkanmadan kaçınmak için gerekli minimum hızın bulunması için çeşitli yöntemler ve kolerasyonlardan bahsedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Pnömatik iletim, gaz-katı faz akışı, optimum taşıma hızı

ABSTRACT

First pneumatic conveying system was established in early 1900s and used to unload vessels as practical. The systems were built in that time are faraway from being scientific.

In these days, there is possibility to determine necessary bounds of a pneumatic conveying system in adequate straightness on the basis of principles of transport technique. Nowadays, pneumatic conveying is employed in a lot of branches of industry.

Fundamentals of pneumatic conveying consist of fluid mechanics, thermodynamics, mechanic systems and transport technique. It is communicated that researchs about some factors that require solutions in application of these basis fields are still continued. Manufacturers can build pneumatic systems according to needs of industry on the basis of researches that is being made for last 25 years.

In this work, some explanations have been given about fundamentals of pneumatic conveying and flow types. After that pressure drop that is required construction of pneumatic conveying system and minimal gas velocity that is required to avoid chocking and saltation in vertical and horizontal pipes have been clarified.

Keywords: Pneumatic conveying, gas-particle phase flow, saltation velocity

1 GİRİŞ

1.1 İletim Tekniğinin Görevleri

İletim tekniğinin endüstrideki görevi, bir mal gerektiğinde iletim yerine ve buradan stok ambarına iletmesine yardımcı olmaktır. Tüm üretim kademelerinde iletim tekniğine rastlanmaktadır. Bir üretim kuruluşunun planlanmasında mal akış sorununun çözümü en önemli konudur.

İletim malının çeşitleri yeryüzünde katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç belirgin halde bulunmaktadır. Sıvı ve gaz halinde bulunan maddeler doğrudan pompa veya kompresör yardımı ile iletilir. Bu iki madde buradaki iletim tekniği konusunun dışındadır. İletim tekniği katı maddelerin iletimi konusunu içerir. Katı maddeleri iki bölümde ele almak mümkündür.

- Parça halinde olan mallar,
- Yığın halinde taneli ve tozsuz mallar

Bu mallar, üretim yolunun bir ucundan başlanarak öteki ucunda bulunan bir mekana iletilir. Bu iletimin gerçekleştirilebilmesi için bir araca ihtiyaç vardır. Bu araç mekanik, hidrolik ve pnömatik olmak üzere üç biçimde çalışabilir (Arun ve Akkoç, 1997).

1.2 İletim Tekniğinin Uygulama Alanları

1900 'lü yıllardan önce ilkel sistemlerle oluşturulan bazı ticari dizaynlarda yüksek hızlı hava akımından yararlanarak parçacıklı katıların pnömatik yolla taşınması gerçekleştirilmiştir. Bunu ilk defa 1866 yılında İngiliz mühendis Sturtavant başardı. İmal ettiği sistemde önce öğütülmüş tozların daha sonrada hafif maddelerin taşınması yapılmıştır. Bu tür sistemlerde taşınan malzemeler kağıt kırpıntıları, bıçkı tozu, pamuk yünü gibi aşındırıcı olmayan ve vantilatör pervaneleri arasından geçebilen türdendi. 1901 yılında Dodge kalın kalorifer peteği dilimlerini dökümhanenin bir ucundan diğerine ileterek pnömatik taşımanın eşsiz bir örneğini yapmıştır (Küçükberber, 1997).

Dünya savaşından sonra büyük yapı projelerinde ihtiyaç duyulan yüksek miktarda ki toz çimentonun, maden cevherlerinin, kömürün, plastik tanelerin, katalizörlerin, kilin, metal tozlarının, tahılların, alüminyumun ve birçok kimyasal katı malzemenin gemilerden demiryolu vagonlarına ve kamyonlara buradan da çeşitli silo ve kullanım mahallerine emniyetli ve temiz bir şekilde nakli için yaygın olarak pnömatik taşıma sistemleri kullanıldı.

Günümüzde de endüstrinin birçok dallarında pnömatik iletim geniş ölçekte uygulanmaktadır.

Örneğin;

Besin maddeleri endüstrisinde ;

- Gemi tahıl boşaltma tesisleri
- Değirmencilik
- Siloların doldurulması
- Yem tekniği

Kimya endüstrisi ve proses tekniğinde ;

- Plastik madde granüllerinin iletimi
- Deterjan bileşikleri ile yüklü sarmıçlı araçların boşaltılması

Taş ve toprak endüstrisinde ;

- Çimento
- Toz kömür, vb.

Ahşap endüstrisinde ;

- Yonga, kırpıntı, bıçkı tozu, vb.

1.3 Pnömatik ve Mekanik Sürekli İletimin Karşılaştırılması

İletim tekniği sürekli ve süreksiz olmak üzere ikiye ayrılabilir. Örneğin bir vincin ağır bir makine parçasını bir döküm atölyesinden alarak başka bir mahale taşıması süreksiz bir iletimdir. Buna karşın bantlı bir konveyör bir malın kesintisiz akışını sağlama durumundadır. Böylece pnömatik iletim, bantlı konveyörde veya spiral ileticide olduğu gibi sürekli iletici kategorisinde yerini alır.

Projeyi hazırlamakla görevli bir mühendis, iletim sorununu çözümlerken mevcut yığın malın iletimi için mekanik sistem ile pnömatik tesisat arasındaki seçimi iyi yapmalıdır. En iyi sisteme karar vermek oldukça güçtür. Çünkü her sistemin kendine özgü faydalı ve kusurlu yönleri vardır. Aşağıdaki Çizelge 1.1'de karar verme kriterlerinin bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Herhangi bir endüstri kolunda iletim yöntemini saptarken bu kriterlerin önemini göz ardı etmemek gerekir. Örneğin bir kum ocağında mekanik sürekli ileticiye (bantlı

konveyör) karar verildiği halde, plastik endüstrisinde pnömatik iletici tercih edilir. Tercih nedenleri Çizelge 1.1'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 1.1 Pnömatik sürekli iletim ile mekanik sürekli iletimin karşılaştırılması
(Arun ve Akkoç, 1997)

Kriterler	Pnömatik iletimde	Mekanik iletimde
Enerji tüketimi	Sürtünmeler nedeni ile çok	Az
İletim yolu	Her yönde esnek	Çoğu kez düz yol
Malın verilmesi	Emme sistemi sayesinde çok kolaylaşır	Çoğunlukla dozu önceden tespit edilerek
Malın sakatlanması	Yüzer ortamda çok	Az
Tesisatın Aşınması	Az	Sert taneli malda çok
Malın tane büyüklüğü	Sınırlı	Sınırsız
İri taneli mal	Enerji tüketimi artar	Önemsiz
Malın başka özellikleri	Tıkanma tehlikesi	Önemsiz
Tahrik gücü gereksinimi	Çok (körükle)	Az (tahrik motoru)
İletim yolu gereksinimi	Az (boru hattı)	Çok (iletim aracı)
Tozsuz iletim	Toz tutma filtresi	Havalandırma tesisatı
Toz patlaması tehlikesi	Koruyucu gaz altında iletim	Önlenmesi çok zor
Yüksek sıcaklık	Emme yöntemli tesisatta olumlu	Kepe zincirli ileticide olumlu
Gürültü yayılması	a) Körükle b) İletim borusunda	Lastik bantlarda az

2. AKIM TIPLERİ

2.1. Yoğun ve Seyrek Fazlı Akımda Pnömatik Transfer

Bu bölümde yoğun fazlı akım ile seyrek fazlı akımın birbirinden ayırt edilebilmesi için gereken özellikler ve her bir akım türü için yapılan sistem ve sistemlerde kullanılan bileşenler incelenmeye çalışılacaktır. Ayrıca her iki sistem için akım şartları tartışılacaktır.

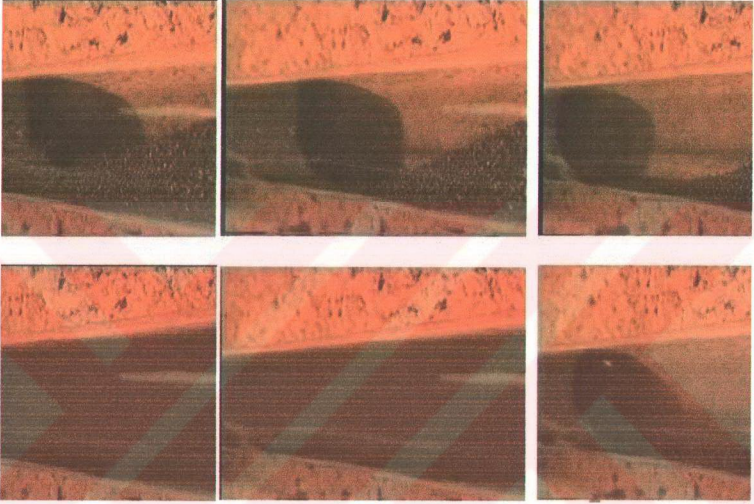
Bilindiği gibi katı parçacıkların bir taşıyıcı gaz ile taşınması işlemi kabaca yoğun ve seyrek olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Seyrek fazlı bir akımı karakterize eden en önemli özellikler yüksek taşıyıcı gaz hızı (20 m/s 'den daha fazla), düşük katı partikül konsantrasyonu (toplam hacmin %1 'inden daha az) ve transfer hattı boyunca borunun her birim uzunluğu için düşük basınç kaybı (tipik uygulamalarda 5 mbar/m 'den daha az.) Seyrek fazlı pnömatik transfer iletim yolunun uzunluğu ile sınırlıdır. 10 ton/saat 'in altındaki katı partikül transferinde bu sistemler yalnızca negatif basınç ile çalıştırılabilmektedir. Bu koşullar altında gerçekleştirilen seyrek fazlı pnömatik iletimde katı partiküller birbirinden bağımsız olarak hareket ederler. Bu durumda katı partiküllerin tamamı taşıyıcı gaz içinde asılı kalırlar ve akışkan-partikül kuvvetleri etkilidir (Arun ve Akkoç, 1997).



Şekil 2.1 Seyrek fazlı transferde partiküllerin durumu

Diğer yandan yoğun fazlı akımda gaz hızı seyrek faza göre daha yavaştır (1-5 m/s) fakat partikül konsantrasyonu hacmin %30 kadardır. Bu tip akımda basınç 20 mbar/m dolaylarındadır. Yoğun fazlı akımda partiküllerin tamamı taşıyıcı gaz içinde asılı kalmaz Şekil 2.2. 'de yatay bir boruda yoğun fazlı akım gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Yoğun fazlı akımda partiküller

Bütün bunlara rağmen yoğun fazlı akımla seyrek fazlı akım arasındaki sınır kesin olarak belirtilemez ve bu sınır için genel olarak kabul görmüş bir tanım yoktur.

Konrad (1986) akım tipleri arasındaki ayrımı yapabilmek için bazı ölçütler belirtmiştir.

Bunlar;

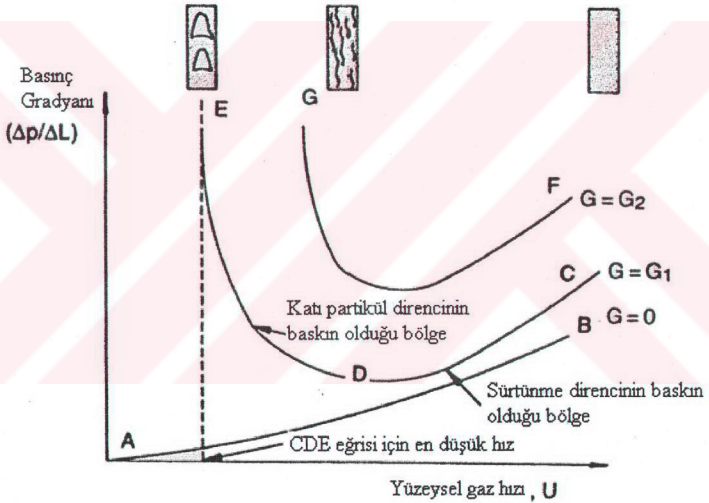
- Akımdaki partikül kütlesi ile taşıyıcı gaz kütlesi oranı
- Katı partikül konsantrasyonu
- Yoğun fazlı akımda bazı noktalarda boru kesitinin tıkanması
- Yoğun fazlı akımda hava hızının partiküllerin tamamını askıya alacak kadar yüksek olmaması (yatay borularda) veya boruda ters akımın başlaması (düşey borularda).

Bütün bu nedenlere bağlı olarak araştırmacılar bu iki tip akımı ayırt etmek için farklı ölçütlerden faydalanırlar. Burada bu iki fazı ayırt edebilmek için kullanılacak yaklaşım, yatay borular için çökme hızı ve düşey borular içinse ters akımın başladığı hız olacaktır. Bu hızların daha geniş tanımları Şekil 2.3 ile birlikte yapılacaktır.

2.2 Seyrek Fazlı Akım

2.2.1 Düşey Boruda Seyrek Fazlı Akım İçin Tıkanma Hızı (U_{CH})

Şekil 2.3 'de düşey eksen, borunun birim uzunluğu için basınç kaybını gösterirken yatay eksen taşıyıcı gaz hızını göstermektedir.



Şekil 2.3 Düşey borudaki akım için faz diyagramı

AB eğrisi yalnızca taşıyıcı gaz yüzünden oluşan basınç kaybını gösterir.

CDE eğrisi G_1 oranındaki besleme sonucu ortaya çıkan basınç kaybıdır.

FG eğrisi daha yüksek bir besleme oranı olan G_2 için basınç kaybını gösterir.

C noktasında gaz hızı yüksek, parçacık konsantrasyonu düşüktür dolayısıyla bu noktadaki basınç kaybı önemli ölçüde gaz ve boru cidarı arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Gaz hızı düşürülmeye başladığı anda bu basınç kaybı da azalmaya başlar. Fakat bu noktada

hız düşürüldüğü için parçacıkların gaz içinde asılı kalmasına yetecek olan gaz hızı sağlanamamaya başlar ve parçacıkların oluşturduğu statik basınç kaybı artar. Eğer gaz hızı D noktasının altına düşürülürse, parçacıkların oluşturduğu basınç kaybı artışı, gaz hızının azaltılmasından dolayı oluşan basınç kaybı azalışından daha fazla olacağı için basınç kaybı gradyanı tekrar artmaya başlar.

DE bölgesinde hızdaki azalma partikül konsantrasyonunda hızlı bir artışa neden olur ve bu olay boru kesitinin katı partiküller tarafından tamamen tıkanmasına kadar devam eder. Bu duruma tıkanma denir ve çok yüksek basınç dalgalanmalarının görüldüğü bir haldir. Bu etkinin görüldüğü hız olan U_{CH} hızı, G_1 katı partikül besleme oranı için inilebilecek en düşük hız seviyesidir. Şekil 2.3 'de de görüldüğü üzere daha yüksek bir besleme oranında (G_2) tıkanma hızı daha yüksektir. Bu hız, düşey borularda yoğun fazlı akım ile seyrek fazlı akım arasındaki sınırı ifade eder. Tıkanma etkisinin görüldüğü U_{CH} hızına sabit besleme oranında gaz hızının azaltılmasıyla ulaşılabildiği gibi, sabit gaz hızında besleme miktarının artırılmasıyla da gelinebilir.

Gerçekte tıkanma hızının teorik olarak belirlenmesi mümkün olmasa da literatürde bu hızın tahmin edilmesine yönelik bir çok kolerasyon mevcuttur. Knowlton (1986), Punwani (1976) gazın yoğunluğunu da hesaba katan (2.1.)'deki denklemini tavsiye etmektedir.

$$(U_{CH}/\epsilon_{CH}) - U_T = G/[\rho_p.(1-\epsilon_{CH})] \quad (\text{Knowlton, 1986}) \quad (2.1)$$

$$\rho_f^{0.77} = 2250.D.(\epsilon_{CH}^{-4.7}-1)/[(U_{CH}/\epsilon_{CH}) - U_T]^2 \quad (\text{Punwani, 1976}) \quad (2.2)$$

Buradaki kritik boşluk oranı ϵ_{CH} , katının özgül ağırlığından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kritik boşluk oranı aşağıdaki formül ile verilmiştir:

$$\epsilon_{CH} = 0,03 . \rho_p + 0,91 \quad (2.3)$$

Burada ρ_p (gr/cm^3), $d_p > 0,17$ ve $0,945 < \epsilon_{CH} < 0,987$ değerlerindedir.

Aynı boyutlu tanecikler için Zenz ve Othmer yatay taşımada sürüklenme hızının, düşey taşımadaki tıkanma hızına yaklaşık olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak karışık boyutlu tanecikler için tıkanma hızı 3 ila 6 kat daha küçüktür.

Sandy, Daubert ve Jones isimli araştırmacılar katı-gaz sistemleri ile ilgili pek çok çalışma yapmışlardır. Bu bilim adamları yoğun fazlı sistemlerde toplam basınç düşmesinin çok dikkatli bir şekilde hesaplanması gerektiğini vurgulamaktadırlar. Özellikle taneciklere ilk hareketi vermek yani bunları kaldırmak için gerekli olan basınç düşmesi yaklaşık olarak borudaki basınç düşmesinin dört katıdır. Parçacıkların bu ilk hareketi esnasında basınç düşmesi yaklaşık olarak (2.4) formülü ile bulunabilir.

$$\Delta P/L = 4 \cdot \rho_b$$

(Marchello, 1976)

(2.4)

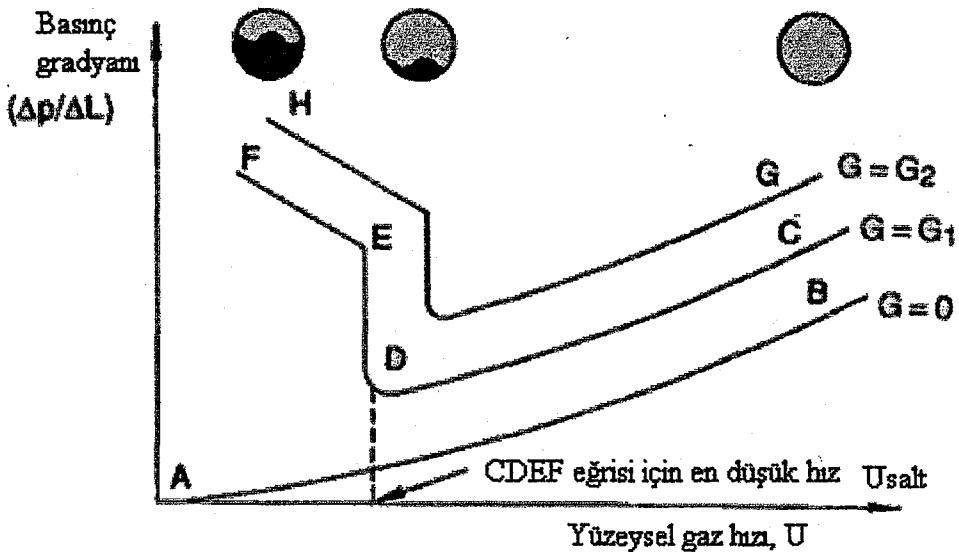
(2.4)'de ρ_b , katı parçacıkların yığınsal özgül kütlesi ve L , borunun uzunluğudur. Bu yaklaşık denklem deneysel olarak tespit edilmiş aşağıdaki aralıkları kapsar.

- Parçacık özgül kütlesi : 2500-4000 kg/m³
- Parçacık çapı : 25-30 mesh
- Katı-gaz yükleme oranı : 5000 ' e kadar

Anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi yoğun fazlı sistem dizaynlarında düşey taşımada yüksek bir emniyet faktörü gözetilmelidir.

2.2.2 Yatay Boruda Seyrek Fazlı Akım İçin Sınır Hızı (U_{SALT})

Yatay borularda taşıyıcı gaz hızı ile basınç kaybı arasındaki ilişki dikey borulardakine benzer olarak Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4 Yatay borularda gaz hızı ile basınç gradyanı ilişkisi

AB eğrisi, boruda yalnızca gaz olduğu durumdaki basınç kaybını göstermektedir, G_1 besleme oranında CDEF ve G_2 besleme oranında GH eğrileri taşıyıcı gaz hızı ile basınç kaybı arasında ki ilişkiyi göstermektedir. C noktasında, gaz hızı parçacıkların tamamının gaz içinde asılı kalmasına yetecek kadar yüksektir. Bu hızda katı partiküllerin boru cidarlarında birikmesi, taşıyıcı gazın oluşturduğu türbülans ile önlenir. Eğer besleme oranı sabit tutularak gaz hızı düşürülecek olursa basınç gradyanı da azalmaya başlayacaktır. Bu durumda katı partiküller daha yavaş hareket edeceği için borudaki parçacık konsantrasyonu artacaktır.

D noktasına gelindiğinde gaz hızı parçacıkların tamamını taşıyabilecek kadar yüksek olmadığı için katı partiküller boru tabanında birikmeye başlar. Bu olayın başladığı andaki gaz hızına çökme hızı denir ve bu noktadan sonra hız daha da düşürülürse, gazın geçebileceği boru kesiti azalacağından, basınç gradyanında ani bir sıçrama görülecektir.

E ve F noktalarında bazı parçacıklar yoğun fazlı akımda ki gibi boru tabanı boyunca hareket ederken diğerleri seyrek fazlı akımdaki gibi hareket etmeyi sürdürecektir. Çökme hızı, yatay borularda, seyrek fazlı akım ile yoğun fazlı akım arasında ki sınırı ifade eder.

Düşey borularda olduğu gibi yatay borularda da bu hızın teorik olarak tam hesaplanması olanağı yoktur. Fakat bu hız için de literatürde bir çok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlarda biri $\% \pm 54$ hata oranı olan Rizk(1973) kolerasyonudur. Bu kolerasyon denklem (2.5) ve (2.6) 'ün beraber çözülmesinden ibarettir.

$$X_{p,g} = M_p / (\rho_f U_{SALT} A) = (1/10^\alpha) F_{SALT}^\beta \quad (\text{Rizk, 1973}) \quad (2.5)$$

$$U_{SALT} = \{ [4.M_p.10^\alpha . g^{\beta/2} . D^{(\beta/2-2)}] / (\pi . \rho_f) \}^{1/(\beta+1)} \quad (\text{Rizk, 1973}) \quad (2.6)$$

$$F_{SALT} = U_{SALT} / (g.D)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$\alpha = 1440.d_p + 1,96 \quad \text{ve} \quad \beta = 1100.d_p + 2,5$$

Homojen akış radyal ve aksenal doğrultulardaki yoğunluk farkları küçük olan ve borunun dibinde yığılmaların, kümelerin görülmediği bir akış olarak tanımlanmıştır. Bu akış sisteminde akışkana asılı parçacıkların türbülans hareketleri ağırlık etkisini dengeler. Homojen akışın yüksek Reynolds sayılarında ortaya çıktığı söylenebilir. Bu incelemelere özet olarak aşağıdaki bilgiler ortaya çıkmıştır. Eğer Reynolds sayısı 10^5 'den büyükse katı-gaz oranı 2'den azdır.

Sürtünme enerjisinin dağılması gaz-katı akışında mühendislik dizaynı ve pnömatik sistemlerin analizi için çok önemlidir. Bu problem pek çok araştırmacı tarafından ele alınmıştır.

Literatürde, yatay borularda iki fazlı akış karakteristikleri ve akış modelinin anlaşılabilmesi için değişik parametreleri göz önüne alan deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur. Rizk büyük çapa sahip parçacıkların (0,7 mm'den 6 mm'ye kadar) optimum taşıma hızları için (U_{oth}) aşağıdaki eşitliği geliştirmiştir.

$$U_{oth} = 10^{\alpha\beta} \cdot X_{p,g} \cdot (g \cdot D)^{0,5} \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (2.8)$$

(2.8)'de $\alpha = 1,44 \cdot d_p + 1,96$ ve $\beta = 1,1 \cdot d_p + 2,5$ değerlerindedir.

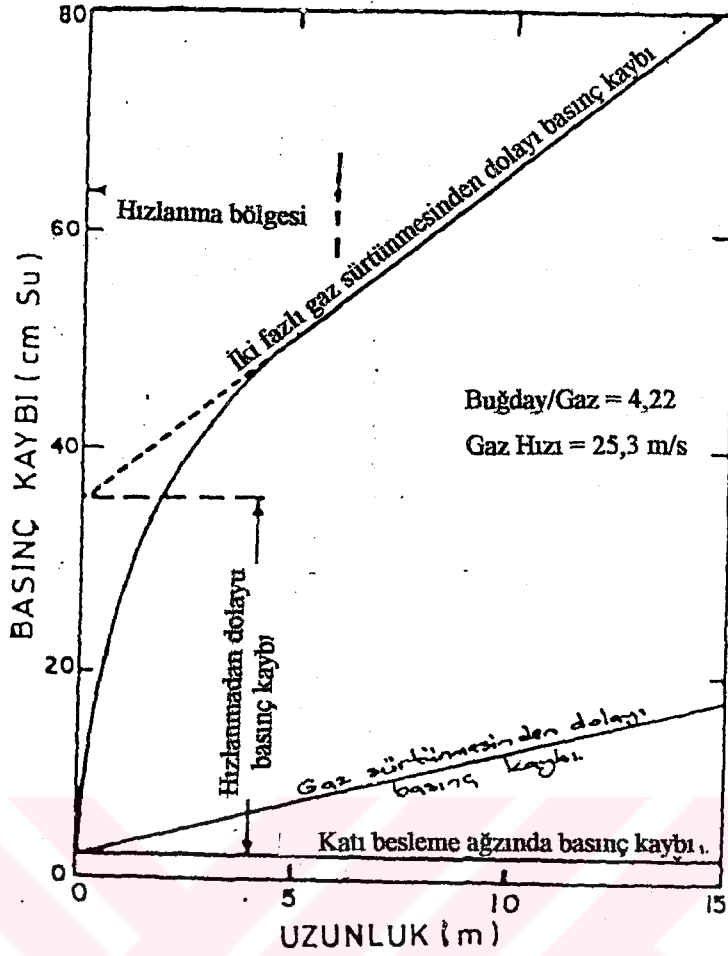
Matsimoto vd., optimum taşıma hızının belirlenmesi ile ilgili olarak detaylı çalışmalar yapmıştır. Deneyler esnasında farklı yoğunlukta ($1000-8700 \text{ kg/m}^3$) ve çapta (300-2 mm) parçacıklar kullanılarak (2.9) eşitliği elde edilmiştir.

$$U_{oth} = 13,096 \cdot X_{p,g} \cdot (U_T/10)^{1,75/3} \cdot (\rho_f/\rho_p)^{1/6} \cdot (g \cdot D)^{1,25/6} \quad (\text{Matsumoto vd., 1974}) \quad (2.9)$$

Matsumoto vd., ayrıca 120 mm ile 2,1 mm arasında değişen çaplardaki parçacıklar ile deneysel çalışmalar gerçekleştirmişler ve optimum taşıma hızının hesaplanması için (2.10) ifadesini geliştirmişlerdir.

$$U_{oth} = 9,6581 \cdot X_{p,g}^{1/3} \cdot (U_T)^{2,3/3} \cdot (\rho_f/\rho_p)^{0,55/3} \cdot (g \cdot D)^{0,75/6} \quad (\text{Matsumoto vd., 1976}) \quad (2.10)$$

Seyrek fazlı pnömatik taşıma sisteminde basınç düşmesinin tipik bir örneği buğday taşınması için Şekil 2.5.'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Seyrek fazlı akımda buğday için basınç düşmesi (Marchello, 1976)

Gaz ve katı taneciklerin giriş hızından çalışma hızına kadar olan ivmelenme süresi geçici rejim teşkil eder. Hızlanma mesafesi parçacık boyutlarının büyüklüğüne (küçük parçacıklar kısa bir hızlanma mesafesine ihtiyaç duyarlar) ve katı malzeme debisine bağlıdır. Gaz hızına veya gaz -katı oranına bağlı değildir. Rose ve Duckworth adlı araştırmacılar çeşitli malzemelerin borularda nakli için hızlanma mesafelerini deneysel olarak incelemişler ve yatay pozisyondan başlayarak çeşitli eğim açılarıyla düşey pozisyona kadar geçerli olan aşağıdaki formülü vermişlerdir.

$$(L_A/D) = 6. [(G_p/(\rho_f \cdot g^{1/2} \cdot D^{5/2})) \cdot (D/d_p)^{1/2} \cdot (\rho_p/\rho_f)^{1/2}]^{1/3} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.11)$$

2.2.3 Yatay Boruda Seyrek Fazlı Akımda Parçacıklara Etkiyen Kuvvetler

2.2.3.1 Sürüklenme Kuvveti

Gaz-katı süspansiyonlarının akışı olayının incelenmesi çalışmasında tek bir parçacığa etkiyen kuvvetlerin incelenmesiyle başlanıp daha sonra parçacıkların toplu akışı ele alınır. Tek bir parçacığa etkiyen sürüklenme kuvveti deneysel olarak tespit edilen C_{ds} sürüklenme katsayısı ile belirlenir. F_{ds} tek bir parçacığa etki eden sürüklenme kuvveti olmak üzere

$$F_{ds} = C_{ds} \cdot (\pi \cdot d_p^2 / 4) \cdot \rho_f \cdot (U_f - U_p)^2 / (2 \cdot g_c) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.12)$$

Burada:

$$C_{ds} = 24 \cdot \text{Re}^{-1} + 3,6 \cdot \text{Re}^{-0,313} \quad 2,0 < \text{Re} < 2000 \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.13)$$

$$\text{Re} = d_p \cdot (U_f - U_p) \cdot \rho_f / \mu_f \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.14)$$

C_{ds} ve Re sayıları Aşağıda Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Reynolds sayısına bağlı sürüklenme katsayıları(Marchello, 1976)

Re	C_{ds}
0,05	480
0,1	240
0,2	120
0,5	49,5
1,0	26,5
2,0	14,4
5,0	6,9
10	4,1
20	2,55
50	1,50
100	1,07
200	0,77
500	0,55

Toplu halde hareket eden parçalardan birine etki eden sürüklenme kuvveti tek bir parçacığa etki eden sürüklenme kuvvetinden büyüktür. Sürüklenme kuvveti katı-gaz karışımındaki boşluk oranına bağlı olarak değişir.

Burada

$$C_{ds} = f(\epsilon) \text{ ve } f(\epsilon) = \epsilon^{-4,7}$$

Seyrek fazlı pnömatik taşımada $\epsilon = 0,8-1,0$ arasında değerlere sahiptir. Parçacık konsantrasyonuna bağlı olarak C_{ds} artar (Marchello, 1976).

dL uzunluğundaki bir yatay boruda katı parçacıkların ağırlığı dW_s olsun. Yine bu uzunluğa isabet eden parçacık sayısı dn , aşağıdaki formül ile verilmiştir.

$$dn = 6. dW_p / (\rho_s \cdot \pi \cdot d_p^3) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.15)$$

Eğer M_p kütleli akış debisi (kg/s) ise aşağıdaki formül verilebilir.

$$dW_p = M_p \cdot dL / U_p \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.16)$$

Bu durumda dn şu şekilde bulunur:

$$dn = 6. M_p \cdot dL / (\rho_s \cdot \pi \cdot d_p^3 \cdot U_p) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.17)$$

dL kesitinde ki boşluk oranı ε aşağıdaki formülden bulunur:

$$\varepsilon = 1 - 4 \cdot M_p / (\rho_p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot U_p) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.18)$$

dL kesitindeki parçacıklara etki eden toplam sürüklenme kuvveti tek bir parçacığa etki eden sürüklenme kuvvetinden faydalanılarak:

$$dF_d = \left\{ \left[\left(\frac{3}{4} \right) \cdot C_{ds} \cdot M_p \cdot \rho_f \cdot (U_f - U_p)^2 \cdot dL \right] / \left[\left(\rho_p \cdot g_c \cdot d_p \cdot U_p \right) \right] \right\} \cdot \varepsilon^{-4.7} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.19)$$

şeklinde bulunur.

2.3.3.2 Çeperdeki Sürtünme Kuvveti

λ , parçacıkların boru duvarları arasında ve birbirleri arasında yaptığı hareketlere karşılık gelen sürtünme katsayısı olsun. Bu halde parçacıklara etki eden sürtünme kuvveti aşağıdaki formülle verilebilir.

$$dF_f = \pi \cdot D \cdot dL \cdot \tau_s = [\lambda \cdot U_p^2 / (2 \cdot D \cdot g_c)] \cdot DW_p = [\lambda \cdot U_p \cdot G_p / (2 \cdot D \cdot g_c)] \cdot dL \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.20)$$

Sürtünme katsayısı değerleri aşağıdaki Çizelge 2.2'den okunabilir.

Çizelge 2.2 Çeşitli malzemelerin sürtünme katsayıları(Marchello, 1976)

Malzeme	λ
Tenite	0,004-0,008
Polistiren	0,008-0,019
Katalin	0,003-0,008
Saf alüminyum oksit	0,009-0,018
Maden kömürü	0,005
Kok kömürü	0,005
Buğday	0,003-0,013
Ottawa kumu	0,010-0,021
Deniz kumu	0,008-0,019
Kraking katalitörü	0,008-0,023
Toprak kraking katalitörü	0,008-0,018
Pirinç	0,0058
Soya fasulyesi	0,0081

$$\lambda = [(2.g.D)/U_T^2] \cdot [(U_f - U_p)/U_p] \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.21)$$

Burada U_T tek bir parçacık için serbest düşme hızıdır. U_{TT} ise yatay boruda parçacıkların toplu halde akışı için serbest düşme sınır hızıdır.

Parçacıklar yatay boru içerisinde dL mesafesinde hareket ederken serbest düşme neticesi düşey doğrultuda U_t (dL/U_p) kadar bir hareket olur. Sonuç olarak gaz kütleli dF_g 'nin etkisi altında yeniden kaldırabilmelidir.

$$dF_g = U_{TT} \cdot dW_p \cdot g / (U_p \cdot g_0) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.22)$$

Serbest düşme sınır hızı toplu akış halinde aşağıdaki denklemle bulunabilir.

$$U_{TT} = \{[(4/3) \cdot g \cdot d_p] \cdot [(\rho_p - \rho_f) / \rho_f] \cdot [\epsilon^{4,7} / C_{dst}]\}^{1/2} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.23)$$

$$C_{dst} = 24.Re^{-1} + 3,6.Re^{-0,313} \quad \text{ve} \quad Re = d_p \cdot U_T \cdot \rho_f / \mu_f \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.24)$$

U_T terimi akışın belli bir anı için aşağıdaki formülden elde edilir.

$$U_T = \{[(4/3) \cdot g \cdot d_p] \cdot [(\rho_p - \rho_f) / \rho_f] / C_{dst}\}^{1/2} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.25)$$

dL uzunluğundaki borudaki parçalar için hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$dF_d - dF_g - dF_f = (dW_p / g_c) \cdot (dU_p / dt) \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.26)$$

Sürekli çalışma şartlarında Yukarıdaki denklem aşağıdaki şekle gelir.

Eşitliğin ikinci tarafındaki atalet kuvvetinin ifadesinde ivme sıfır olacağı için $(dU_p / dt) = 0$

$$dF_d = dF_g + dF_f \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.27)$$

yukarıdaki denklemlerin kombinasyonuyla;

$$(3/4) \cdot (C_{ds} / \varepsilon^{4,7}) \cdot (\rho_f / \rho_p) \cdot [(U_f - U_p)^2 / (d_p \cdot g)] - (\lambda/2) \cdot [(U_p^2 / (D \cdot g))] = \{[(4/3) \cdot (g \cdot d_p / U_p^2)] \cdot [(\rho_p - \rho_f) / \rho_f] \cdot [\varepsilon^{4,7} / C_{dst}]\}^{1/2} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.28)$$

En son bulunan denklem parçacık hızıyla gaz hızı arasındaki bir bağıntıdır. Partikül hızı bu denklem yardımı ile bulunabilir.

2.2.4. Dikey Boruda Seyrek Fazlı Akımda Parçacıklara Etkiyen Kuvvetler

Daha önce yatay borular için verilen hesap şekli düşey borularda da uygulanabilir. Dikkat edilecek nokta düşey borularda gravitasyonel kuvvetlerin farklı etkisidir. Bu durumda gravitasyonel kuvvetler aşağıdaki gibi verilebilir.

$$dF_g = (g/g_c) \cdot dW_p \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.29)$$

Sürüklenme kuvveti dF_d ve katı katı parçacıklara etkiyen sürtünme kuvveti dF_f 'nin değerleri yatay borular için verilen (2.9) ve (2.17)' nin aynısıdır. Pek tabii bu durumda hız bileşenleri

düsey doğrultudadır. Eğer düsey doğrultudaki parçacık hızı U_p biliniyorsa basınç düşmesi hesabı yapmak mümkündür.

$$U_p = U_f - \left\{ \left[(1 + \lambda \cdot U_p^2 / (2 \cdot D \cdot g)) \cdot (4/3) \cdot \left((\rho_p - \rho_f) \cdot d_p \cdot g \cdot \varepsilon^{4.7} / (\rho_f \cdot C_{ds}) \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{Marchello, 1976})(2.30)$$

Yukarıdaki formül Yang tarafından tecrübelerle dayanan araştırmalar sonucu verilmiştir. Bu denklemin verdiği sonuçlar tecrübelerle sabit olduğu üzere ± 20 doğrulukla gerçeğe uygundur.

2.3 Yoğun Fazlı Akım

Pnömatik taşıma tekniği, toz ve taneli malzemelerin boru sistemlerinde pozitif veya negatif basınç etkisiyle taşınmasında yaygın olarak kullanılır. Pozitif basınçlı pnömatik taşıma sistemlerinde malzeme taşıma maliyetleri önemli ölçüde taşıma hızlarına bağlıdır. Yüksek hızlar taşıma maliyetini artırdığı gibi taşınan malzeme taneciklerinin kırılarak boyutlarının değişmesine ve en önemlisi taşıma borularının aşınmasına ve kısa sürede işe yaramaz hale gelmesine yol açar. Bu nedenle pnömatik taşıma sistemlerinde taşıma hızlarının düşük olması istenir.

Pek çok avantajlarından dolayı malzeme yoğun fazlı pnömatik taşıma konusunda önemli çalışmalar yapılmış olup, endüstriyel uygulamalar bakımından, son 35-40 yılda dikkate değer gelişmeler sağlanmıştır. Hilbert, pnömatik taşıma sistemlerinin, dökme malzemelerin kullanıldığı endüstrilerdeki rolünü araştırarak taşıma maliyetleri açısından malzeme yoğun fazlı taşımının önemini belirtmiştir. Pnömatik sistemlerde taşınan dökme malzemelerin geçirgenlik ve hava tutuculuk özellikleri Mainwaring ve ortağı tarafından ölçülerek hangi malzemelerin malzeme yoğun fazla taşınabileceği, pnömatik taşıma deney düzeneğinde gözlenerek, tespit edilmiştir. Taylor ise malzeme yoğun fazlı taşımada özgül enerji tüketimi ve aşınma nedeniyle malzeme taneciklerinde meydana gelen boyut değişimlerini ölçerek literatürde verilen değerlerle karşılaştırmıştır. Laouar ve ortağı çok düşük hava hızlarında, taşıma sisteminin yatay borularında meydana gelen basınç düşmesini deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde dökme malzeme olarak ortalama çapı 0.2 mm olan kum kullanılmış olup basınç düşmesi 7m boyunda ve değişik çaplardaki borular için ölçülmüştür. Dökme malzemelerin özelliklerinin taşıma şekline etkileri Pan tarafından araştırılarak, dökme malzemelerin geçirgenlik ve hava tutuculuğu özelliklerinin taşımadaki etkileri belirtmiştir. Guiney ve ortakları malzeme yoğun fazlı taşımının alt ve üst sınırlarını belirlemek için bir metot geliştirerek değişik dökme malzemeler için boru hattındaki toplam basınç düşmesini ölçmüşler ve malzeme yoğun taşıma için alt ve üst sınırlarını belirlemiştirler. Wypych ve

ortağı dökme malzemelerin, yatay borularda malzeme yoğun fazlı akışı için minimum taşıma sınırlarını araştırarak paslanmaz çelik borularda taşınan plastik dökme malzeme ile ilgili faz diyagramını elde etmişlerdir (Tuç ve Gemalmayan, 2003).

Düşük hava hızları ve buna karşılık gelen düşük malzeme hızları ile taşıma sistemlerine ait borularda aşınmayı ve malzeme taneciklerinin parçalanmasını azaltmak mümkündür. Malzeme yoğun fazlı pnömatik taşımada, belirli miktardaki dökme malzeme, seyrek fazlı pnömatik taşımada kullanılan hava miktarından daha düşük bir miktarla taşınabilir. Böylece taşıma için ihtiyaç duyulan enerjide önemli derecede düşüş sağlanır. Ayrıca, daha küçük olan hava debileri sayesinde kompresör ve hava filtresi gibi taşıma sistemine ait elemanların boyutlarını da küçültmek mümkün olur.

Malzeme yoğun fazlı taşıma şartları; seyrek fazlı taşımaya göre, taşınacak malzemeye daha fazla bağımlıdır ve sınırlı sayıda malzemeye uygulanabilir. Bu nedenle, malzeme yoğun fazlı taşıma sistemlerini üreten firmaların taşınmak istenen her bir malzeme için çok dikkatli bir tasarım yapmaları gerekir. Bunun için de ilgili malzemenin fiziksel özellik ve akış karakteristikleri konusunda yeterli bilgiye sahip olmak gerekir. Taşınacak malzemelerin özellikleri bilindiği takdirde, ne tür yardımcı sistemlerin kullanılarak taşıma borularının tıkanmasının önlenilebileceği belirlenebilir veya en azından borularda meydana gelen tıkanmalar yok edilebilir.

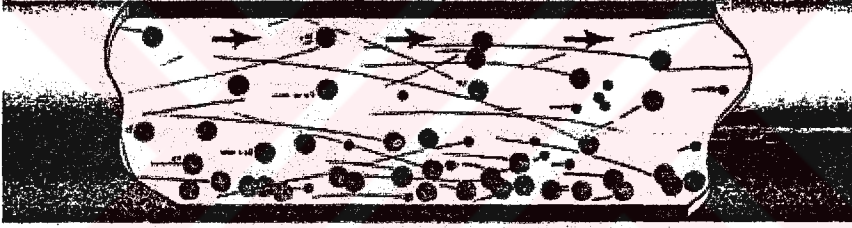
2.3.1 Pnömatik Taşıma Sistemleri İçin Faz Diyagramları

Pnömatik taşıma sistemlerinin ve özellikle de malzeme yoğun fazlı taşıma sistemlerinin tasarımında güvenilir bir sistem elde edebilmek için taşıma sınırları hakkında yeterli derecede bilgi sahibi olmak gerekir. Taşıma sınırları ile ilgili bilgiler, malzeme kütleli debisi bir parametre olmak üzere, taşıyıcı boru sistemlerindeki basınç düşmelerinin hava hızına bağlı olarak değişimini gösteren ve Geldart, Heep ve ortakları tarafından verilen faz diyagramlarından bulunabilir (Tuç ve Gemalmayan, 2003). Herhangi bir dökme malzeme taşınırken sistemde meydana gelen basınç düşmesi, taşıyıcı boru sisteminin boyundan ve çapından fazlaca etkilenir. Bunun anlamı, bir faz diyagramı sadece temsil ettiği malzeme ve belirli bir taşıma hattı için geçerlidir.

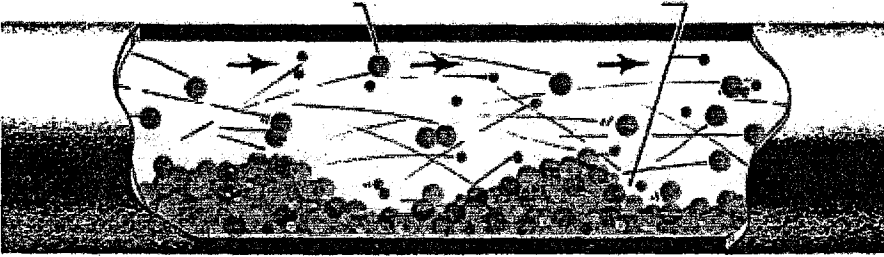
Çok yüksek hava hızlarında malzeme taneciklerinin tamamı Şekil 2.6.a'dan görüldüğü gibi havada asılıdır ve taşıyıcı boru kesitinde yaklaşık düzgün dağıldıkları kabul edilir. Bu tip akışlar, seyrek fazlı sistemlerde ortaya çıkar. Büyük boyutlu tanecikler boru cidarlarına çarparak saparken küçük tanecikler hava türbülansı içinde asılı kalırlar ve boru içerisinde

enine hareketler meydana getirirler. Sistemdeki taşıma havasının hızına ve boru çapına bağlı olarak sadece belirli sayıda tanecik taşıyıcı havada asılı kalabilir. Sistemde, malzeme taşıyan havanın hızı azaltıldığı takdirde havada asılı olan taneciklerin bazıları boru tabanına düşer, Şekil 2.6.b. Bu halde malzemenin bir kısmı havada asılı olarak akarken boru tabanına düşerek bir tabaka meydana getiren tanecikler de kayarak ve yuvarlanarak akmaya devam eder. Bu akış halinde borunun üst bölgelerinde seyrek, alt bölgelerinde ise malzeme yoğun fazlı akış vardır.

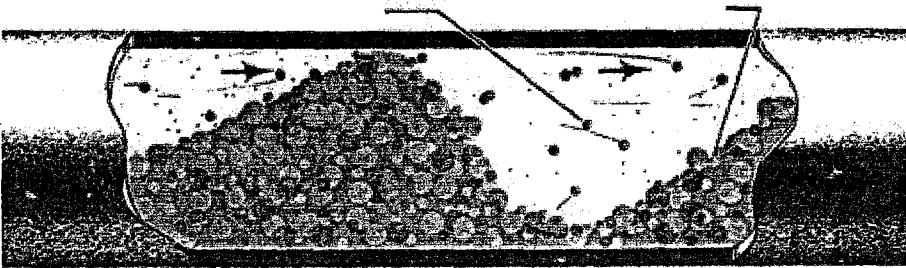
Levy ve ortaklarının yaptığı çalışmaya göre, hava hızı daha da azaltılacak olursa boru tabanında sürüklenerek akan malzeme miktarında artış olur, Şekil 2.6.c. Bu durumda boru tabanında akan malzemenin yanı sıra boru üst bölgesinde asılı olarak ilerleyen malzeme tanecikleri de bulunur. Hava hızı düşürülmeye devam edilirse malzeme, duran ve tekrar hareket eden yığınlar halinde ilerler. Boru sistemi içindeki malzeme kısa sürelerle boru kesitini tam olarak doldurur. Hava hızındaki herhangi bir azalma boruda tıkanma meydana gelmesine yol açar (Tuç ve Gemalmayan, 2003).



a) Bütün parçalar asılı olarak akarlar



b) Boru tabanındaki parçalar sürüklenerek akarlar



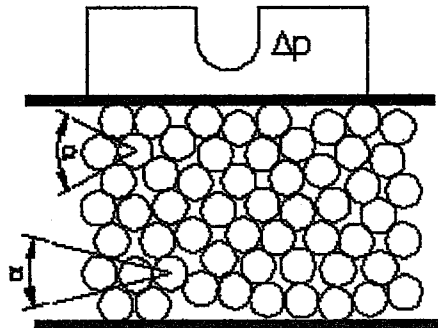
c) Sürüklenerek akan malzeme daha fazla

Şekil 2.6 Pnömatik taşıma sisteminde malzeme akış şekilleri

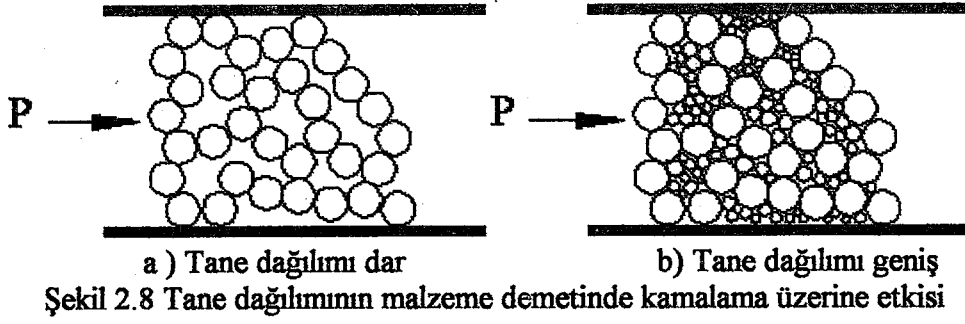
Woodcock, Doig ve Mills çimento, kömür tozu ve ince toz halindeki kül v.s. de olduğu gibi iyi hava tutma özellikleri gösteren ince taneli ürünler için malzeme yoğun fazlı taşımının uygun olduğunu belirtmişlerdir (Tuç ve Gemalmayan, 2003). Zayıf hava tutma karakteristikleri gösteren ürünlerin malzeme yoğun fazlı taşınması çok zor olup, standart taşıma sistemlerinde sadece düşük malzeme miktarları oldukça yüksek hava hızlarında taşınabilir.

2.3.2 Malzeme Demetinin Oluşumu ve Giderilmesi

Şekil 2.7.'de pnömatik taşıma sistemine ait boru içerisinde meydana gelen bir malzeme demeti gösterilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi (Δp) basınç farkından dolayı taneciklerin her biri yanlarındaki tanecikler arasındaki boşluklara preslenir. Bunun bir sonucu olarak kama açısına, (α) dolayısıyla tane şekline, taneler arasındaki ve tanelerle boru arasındaki sürtünmeye bağlı olarak kama kuvvetleri meydana gelir. Buna ilaveten, taşınmak istenen malzemenin elastikliği ve tane boyutunun boru çapına oranı kama etkisine ve dolayısıyla malzeme demetini boru boyunca hareket ettirmek için gerekli basınç üzerine önemli etkileri olur. Aynı dökme malzemedan meydana gelen ve ortalama tane büyüklüğü aynı olan malzeme demetlerinden tane boyut dağılımı dar olan, geniş olana göre daha kolay hareket ettirilir. Tane dağılımının boru içerisindeki etkisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Boru içerisinde meydana gelen malzeme demetinin yığın yoğunluğu genellikle her noktada aynı olmaz; yani tanecikler arasında, küçük ve büyük boşluklar bulunur. Malzeme demetine P kuvveti uygulandığında taneciklerin çoğu, yanlarındaki tanecikler arasındaki boşluklara preslenir. Aralarında kama etkisi olan büyük taneler arasındaki boşluklar küçük taneler tarafından doldurulduğunda büyük taneler esnekliklerini kaybeder. Bunun sonucu maksimum kama etkisi meydana gelir ve hareket ettirilemeyen bir malzeme demeti oluşur.



Şekil 2.7. Malzeme demetinde taneciklerin kama etkisi



Özellikle malzeme yoğun fazlı taşıma durumlarında daima herhangi bir şekilde kısa boylu malzeme demetleri oluşur. Bu nedenlerden pnömatrik taşıma sistemlerinin hesabı ve tasarımı için sadece ortalama tane boyutunu dikkate almak uygun değildir. Tane boyut dağılımı geniş olan malzemeler için basınç düşmesi ve sürtünme faktörü gibi verilerin laboratuvarlarda ölçülmeleri gerekir.

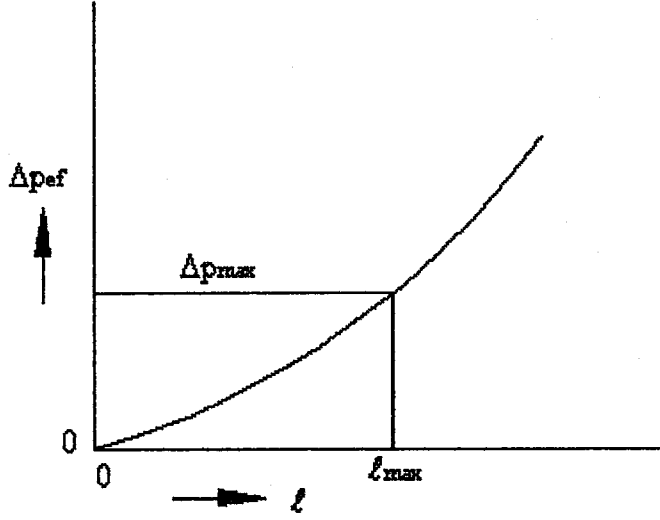
Eğer taşıma borusu içinde rijit bir malzeme demeti meydana geliyorsa, bu demetin hareket ettirilmesi için gerekli olan basınç ΔP_{ef} demetin boyuna bağılı olarak Şekil 2.9.'daki gibi artar. Örneğin, eğer bir pnömatrik taşıma sisteminde mevcut olan maksimum basınç ΔP_{max} ise bu sistemde sadece boyu l_{max} değerinden kısa olan malzeme demetleri hareket ettirilebilir. Daha uzun boylu malzeme demetleri meydana gelecek olursa boru sistemi tamamen tıkanır.

Bu tür bir tıkanmanın üstesinden gelmenin tek yolu, malzeme demetini hareket ettirmek için gerekli olan basıncın (ΔP_{ef}), ΔP_{max} basıncından az olmasını sağlamaktır. Boru içerisinde meydana gelen bir malzeme demetini yok etmek yerine demetin oluşarak borularda tıkanmaya yol açmasını önlemek çok daha uygundur. Şekil 2.10 bir malzeme taşıma borusunun ΔL boyundaki bölgesini göstermektedir. Bu bölgede boru tabanına çöken malzemenin kesit alanı A_d dir. Malzemeyi hareket ettirebilmek için gerekli olan basıncın değeri (ΔP_{ef}) sürtünme kuvvetine bağılıdır. Sürtünme kuvveti;

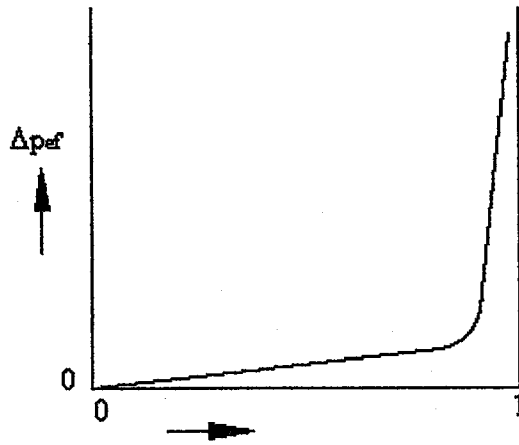
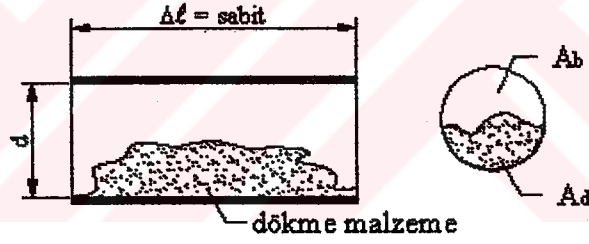
$$F_s = A_d \cdot \Delta L \cdot \rho_b \cdot \lambda \quad (\text{Tuç ve Gemalmayan, 2003}) \quad (2.31)$$

olup, burada; ρ_b dökme malzeme yığın yoğunluğu ve λ dökme malzeme ile boru cidarı arasındaki sürtünme katsayısıdır. Malzeme demetini hareket ettirmek için gerekli basıncın, biriken malzemenin kesit alanının (A_d) boru kesit alanına (A_b) oranına (ϕ) bağılı olarak değişimi grafik halinde çizilirse Şekil 2.10'deki durum elde edilir. Bu grafikten görüleceği gibi ΔP_{ef} basıncı $(1 - \phi)$ 'ye bağılı olarak önce lineer bir artış gösterir. Eğer $(1 - \phi)$ 'nin değeri 1'e

yaklaşırsa sıkıştırılmış bir malzeme demeti meydana gelir ve kama kuvvetleri nedeniyle Δp_{ef} basıncı kendiliğinden artar. Gerçek pnömatik taşıma sistemlerinde bu basınçta veya gerekli olan enerji miktarında çok önemli artışlar olur.



Şekil 2.9 Malzeme demeti boyuna bağlı olarak demeti taşımak için gerekli olan basıncın değişimi



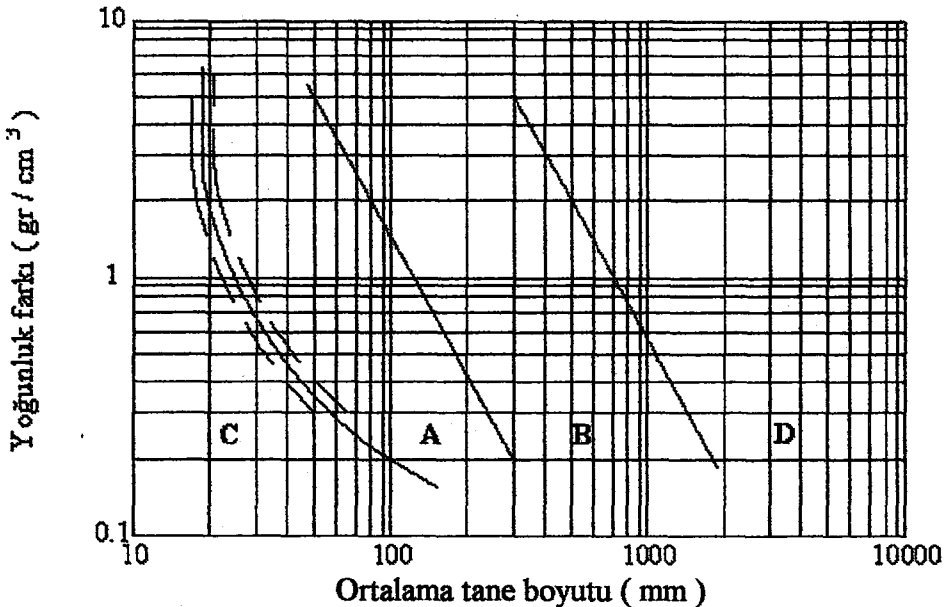
Şekil 2.10. Malzeme demetini hareket ettiren basınç

2.3.3 Dökme Malzemelerin Davranışı

Dökme malzemelerin taşıma borularındaki davranışı büyük ölçüde malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Seyrek fazlı taşıma; düşük yükleme, yüksek hava ve malzeme hızları ve taşıyıcı boru kesitinde taneciklerin dağılımının düzgün olması ile karakterize edilir. Bu sebepten, taşıma şartları esas olarak taneciklerin etrafındaki gaz akışını da etkileyen malzeme özelliklerine göre elde edilir. Taşıma şartları dökme malzemeye ait her bir tanecik değil de dökme malzemenin kendisine ait karakteristiklerinden etkilenir. Dökme malzemelerin malzeme yoğun fazlı taşıma için uygunluklarının belirlenmesinde, hava geçirgenlikleri ile tutuculukları önemli parametrelerdir.

Bir dökme malzemenin akışkanlaştırılma kalitesi veya akışkanlaşma safhasının sağlanması; tane boyutu, tane yoğunluğu ve malzemenin yapışkanlığından etkilenir. Bu konuda Geldart, yapmış olduğu çalışmalar sonucunda hava ile akışkanlaştırılan dökme malzemelerin davranışının genel olarak dört ayrı gruba ayrılabilceğini göstermiştir.

Bu gruplandırma, malzeme ile akışkanlaştırılan ortamın yoğunlukları arasındaki fark ve ortalama tanecik çapına bağlı olarak yapılmış olup, Geldart diyagramı Şekil 2.11.'da verilmiştir. Bu diyagramda her bir malzeme grubu teorik olarak hesaplanabilen eğrilerle ayrılmıştır. Geldart diyagramında B ve D grubundaki malzemelerin gaz geçirgenlikleri yüksektir ve gaz tutuculuk kapasiteleri düşüktür. A grubundaki malzemeler zıt özelliklere sahiptir. C grubundaki malzemeler zayıf akışkanlaştırılma özelliklerine sahiptir ve yapışkandır. Bu gruptaki malzemeler yoğun bir şekilde havalandırılırsa, A grubundaki malzemelere benzer davranış gösterirler.



Şekil 2.11 Geldart Diyagramı (Tuç ve Gemalmayan, 2003)

Şekil 2.11'den görüleceği gibi tozlar, yüksek hava tutuculuk özelliklerine sahiptir. Havalandırma altında az miktardaki gaz, malzemeyi akışkanlaştırmaya yetmektedir ve iç sürtünme açısını azaltmaktadır. Gaz akışı kesildiği zaman bu akışkanlaşma belirli bir zaman için kalır. Bu periyot sırasında genellikle iç sürtünme açısı cidar sürtünme açısının altındadır. Ayrılmanın fazla olduğu malzeme yoğun fazlı taşıma sistemlerinde malzeme yığılmaları ve demetleri dağılır. Malzeme yaklaşık olarak akışkanlaşmış bir formda boru tabanında taşınır. Gaz geçirgenliği düşük olan tozlar herhangi bir malzeme sütunu formunda kısa kritik bir boyda ortaya çıkar.

Diğer taraftan yüksek hava geçirgenliğine sahip kaba taneli malzemeler, boyları boru çapından önemli derecede büyük olan kritik malzeme sütunları meydana getirir. Malzeme sütunlarının kararlılığı boy/çap oranına bağlı olarak artar. Bu durum, benzer malzemelerin malzeme yoğun fazlı taşıma sırasında kontrol dışı olarak yığılma ve sütun oluşturma eğiliminde olmalarına karşılık gelir. Eğer malzeme tanecikleri arasındaki sürtünme açısı boru cidarlarındaki sürtünme açısından büyükse, dökme malzemeleri sütunlar halinde taşımak mümkün olur. Bu durum, B ve D grubundaki malzemelerin neden sütunlar meydana getirme eğiliminde olduklarını açıklamaktadır.

2.3.4 Yükleme Faktörünün Etkisi

Pnömatik sistemlerde toz ve taneli malzemeler gaz-katı karışımı şeklinde taşınır ve iki fazlı akış söz konusudur. Taşıma sırasındaki yükleme faktörü (faz yoğunluğu) ($X_{p,g}$); taşınan malzemenin kütesel debisinin (M_p) taşıyıcı havanın kütesel debisine (M_g) oranı olarak tarif edilir. Buna göre boru sistemindeki akışın şeklini belirlemede önemli olan yükleme faktörü

$$X_{p,g} = M_p / M_g \quad (2.32)$$

ifadesinden hesaplanır. Bu değer, sistemde taşınan malzemenin taşıyıcı havadaki konsantrasyonunu gösterir ve boyutsuzdur. Genel olarak yükleme oranı 10'un altındaki değerlerde çalıştırılan sistemler "seyrek fazlı" taşıma sistemler olarak bilinir. Bununla beraber, pek çok durumda yükleme faktörü 10 ve üzerinde olan uzun mesafe taşıma sistemleri, "malzeme yoğun fazlı" taşıma sistemler olarak kabul edilebileceği Krambrock tarafından belirtilmiştir.

Hava sıkıştırılabilir bir akışkan olduğundan yoğunluğu basınca bağlı olarak değişir. Bir boru hattı boyunca taşıyıcı havanın volümetrik debisi önemli derecede artar. Bu nedenle de taşıma

sisteminin borularında farklı akış şekilleri ortaya çıkabilir. Bir pnömatik taşıma sisteminde havanın kütleli debisi sabit tutulmak suretiyle taşınmak istenen malzeme debisinin sabit olması sağlanabilir. Bu durumda sistemin yükleme faktörü sabittir. Son derece sıkışmış olan havanın genişlemesiyle volümetrik debi arttığından yükleme oranı sabit kaldığı halde iki fazlı akışın akış şekilleri farklıdır. Buna bağlı olarak boru sistemlerindeki akış durumunu sadece yükleme oranı ile açık bir şekilde izah etmek mümkün değildir.

2.4 Pnömatik Taşıma Sistemlerinin Performansı

Pnömatik taşıma sistemleri ile ilgili önemli bir problem, taşıma kabiliyetlerinin belirlenmesidir. Verilen bir malzeme debisinin sağlanabilmesi bakımından bir pnömatik sistemin taşıma kabiliyeti esas olarak; boru sisteminin çapı, taşıma uzunluğu ve boru sistemindeki basınç düşmesi olmak üzere üç parametreye bağlıdır. Hava debisi, boru çapı ve hava basıncına bağlı olup ikinci derecede önemli olmakla beraber verilen bir boru hattında optimum taşıma şartlarının sağlanması bakımından önemlidir.

2.4.1 Boru sisteminin çapı

Pnömatik sistemlerde taşınacak olan bir malzemenin kütleli debisi, (2.30) nolu bağıntıya göre, faz yoğunluğuna bağlı olarak:

$$M_p = X_{p,g} \cdot M_g \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir. V_g hacimsel gaz debisi olup, havanın kütleli debisi;

$$M_g \approx V_g \quad (2.34)$$

dir. Hava hızı U_f ve boru kesit alanı, $A_b = \pi \cdot D^2/4$ olursa:

$$V_a = U_f \cdot A \quad (2.35)$$

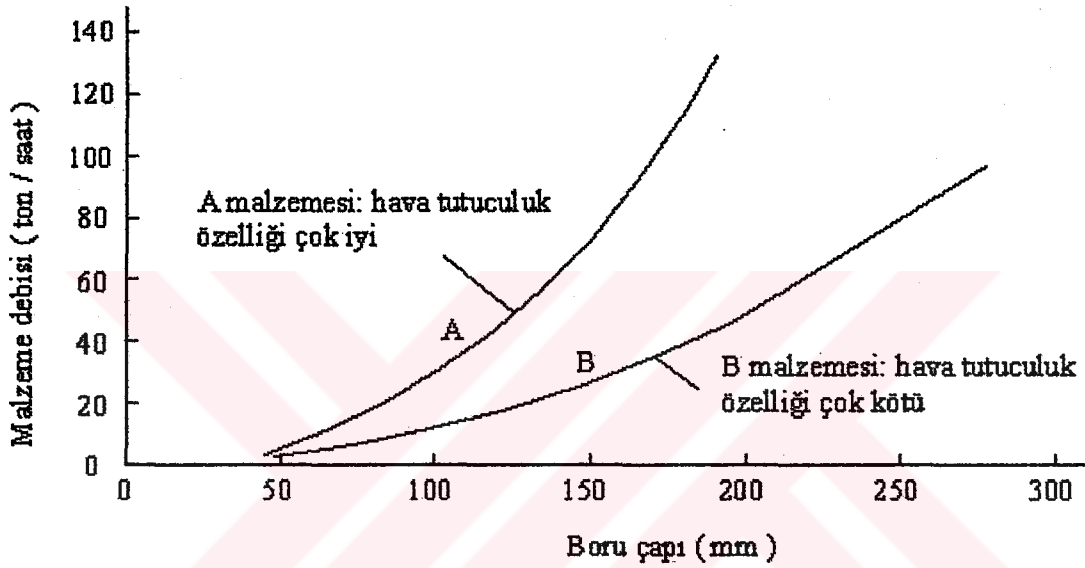
yazılabilir. Buna göre;

$$M_g \approx U_f \cdot d^2 \quad (2.36)$$

olur. Denklemleri sadeleştirmek için hava hızı sabit kabul edilirse

$$M_p \approx X_{p,g} \cdot d^2 \quad (2.37)$$

olur. O halde verilen bir pnömatik taşıma sistemi için boru çapları büyütülmek suretiyle daha büyük malzeme debileri elde edilebilir. Boru çapları büyütüldüğünde eşit bir hava hızının sağlanabilmesi için de ihtiyaç duyulan hava miktarını aynı oranda artırmak gerekir. Bu ise taşıma için gerekli gücün artması demektir.



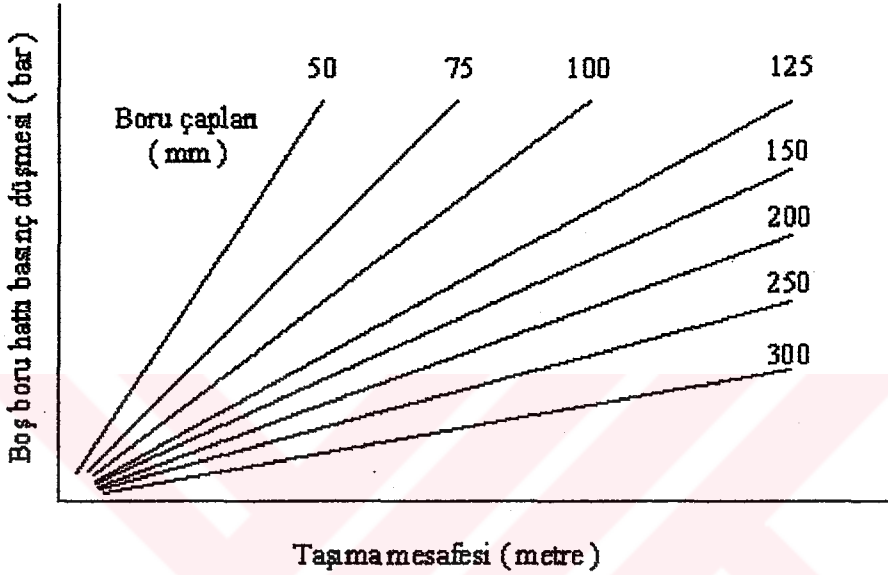
Şekil 2.12 Boru çapının malzeme debisine etkisi bakımından A ve B malzemelerinin karşılaştırılması (Tuç ve Gemalmayan, 2003)

Malzeme debisinin boru çapına bağlı olarak değişimi, hava tutuculuğu iyi olan malzemeler ve hava tutuculuğu zayıf olan malzemeler için Şekil 2.12'de verilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi boru çapları büyütülerek malzeme debileri önemli miktarda artırılabilir. Hava tutuculuğu iyi olan bir malzeme için küçük boru çapında elde edilen malzeme debisini, hava tutuculuğu zayıf olan bir malzemede elde edebilmek için boru çaplarının çok daha büyük olması gerektiği de Şekil 2.12'de görülmektedir.

2.4.2 Taşıma uzaklığı

Bir malzemenin taşınabileceği akışkan yükü öncelikle taşıma hattı basınç düşmesine ve taşınmak istenen uzaklığa bağlıdır. Bir pnömatik sistemde istenen bir malzemeyi taşımak için mevcut olan basıncın bir kısmı, boru içerisinde sadece hava bulunması halindeki sürtünme direncini yenmeye harcanır. Geriye kalan basınç ise malzemenin boru içinde taşınmasını sağlar.

Şekil 2.13'den görüleceği gibi bir pnömomatik taşıma sisteminde büyük çaplı borular kullanılırsa, sistemde sadece hava bulunması halindeki basınç düşmesi azalabilir. Dolayısıyla hava basıncının büyük bir kısmı malzemenin taşınması için kullanılabilir. Her durumda taşıma mesafesinin artması ile boru sistemindeki basınç düşmesi artar ve uzun mesafe taşımalar için borularda sadece hava bulunması halindeki basınç düşmesi taşıma sisteminin toplam basınç düşmesinin önemli bir yüzdesini temsil edebilir.



Şekil 2.13. Boru çapı ile taşıma uzaklığının sadece hava akan boru sistemindeki basınç düşmesine etkisi (Tuç ve Gemalmayan, 2003)

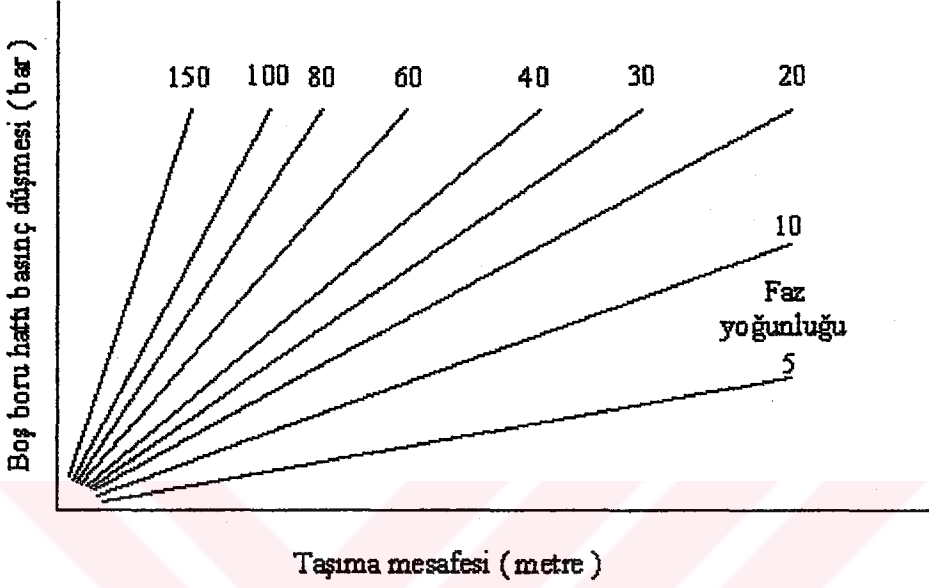
2.4.3 Boru sisteminde basınç düşmesi

Taşıma hattı basınç düşmesi ve taşıma uzaklığının yüksek basınçlı taşıma sistemlerindeki etkileri, Şekil 2.14'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi belirli bir taşıma mesafesi için sistem basıncı arttırılacak olursa, akışkan yükü değeri (faz yoğunluğu) artar. Yani daha fazla malzeme taşınabilir. Sistemdeki hava basıncı sabit tutularak boru boyu arttırılırsa, akışkan yükü değeri azalır, daha az malzeme taşınabilir. Eğer çok uzun mesafe taşıma isteniyorsa, akışkan yükünün ($X_{p,g}$) oldukça küçük, hava basıncının büyük olması gerekmektedir. Düşük basınçlı bir taşıma sisteminde gerçekleştirilebilen maksimum akışkan yükü çok küçük değerlerdedir.

2.4.4 Tane Boyut Küçülmesinin Taşımaya Etkileri

Pnömomatik taşıma sistemlerinde malzeme taneciklerinin kırılarak küçülmesi, tanecik şeklinin ve tanecik boyut dağılımının değişmesine ve bu nedenle bazı problemlere yol açar. Kolay kırılan malzemelere ait taneciklerin şeklinin değişmesi bazı malzemeler için takip eden

kimyasal proseslerde zorlukların ortaya çıkmasına neden olur. Tanecik boyut dağılımındaki değişimler daha önce açıklanan nedenlerden malzemenin akış özelliklerini değiştirir. Ekstrem bir durum olarak serbest akan bir malzeme çok zorlukla taşınabilen bir malzeme haline gelebilir.



Şekil 2.14. Hava basıncı ve taşıma uzaklığının akışkan yüküne etkisi (Tuç ve Gemalmayan, 2003)

Eğer tanecik küçülmesi yüksek oranlarda ince tanecikler üretiyorsa, özellikle filtrelerin ince tanecikleri tutma kabiliyetleri yeterli değilse, taşıma sisteminin işletiminde zorluklar ortaya çıkabilir. Eğer filtrelere beklenmeyen derecede yüksek oranlarda ince toz malzemeler gelecek olursa filtre kumaşları ve örtüleri çabucak tıkanır. Belirgin bir şekilde, genellikle filtrelerdeki basınç kaybında artış olur. Bu halde malzemeyi taşımak için gerekli olan hava basıncının daha büyük olması gerekir ki bunun anlamı taşınacak olan malzeme debisinin azalması demektir. Bu durum sistem basıncının düşük olması hallerinde çok önemlidir. Alternatif olarak eğer filtreler taneciklerin küçüleceği dikkate alınarak tasarlanacak olursa, maliyetin daha yüksek olması muhtemeldir. Bundan dolayı malzemenin kendisi açısından bir problemin söz konusu olmaması halinde dahi tanecik küçülmesinin minimize edildiğinden emin olmak gerekir.

Taşıma hızları pnömatik taşıma sistemlerinde taneciklerin küçülmesini etkileyen en önemli faktördür. Tanecik hızı arttıkça taneciklerin parçalanma derecesi de artar. Bu nedenlerden tanecik küçülmesinin bir probleme yol açtığı malzemeler için malzeme yoğun fazlı taşımayla sağlanabilen en düşük taşıma hızları tavsiye edilir. Taşınacak dökme malzemeler için en düşük taşıma hızları, yani alt sınır değerler, Wypych ve ortağı tarafından kullanılan yöntemle bulunabilir.

Taşıma hattının kendisi olarak taneciklerin küçülmesine sebep olan tek etken dirseklerdir. Taneciklerin boru cidarlarına çarpması sonucu kırılmalar meydana gelir ve daha küçük boyutlu tanecikler oluşur. Bu sorun eğrilik yarıçapı büyük olan dirsekler kullanılmak suretiyle azaltılabilir. Parçacıkların taşıyıcı hava içindeki konsantrasyonu yüksek olduğu zaman taneciklerin çok az bir miktarı ile boru cidarları arasında etkileşim olur. Dolayısıyla malzeme yoğun fazlı taşıma bu nedenle de avantajlıdır.

2.5 Akış Şekilleri

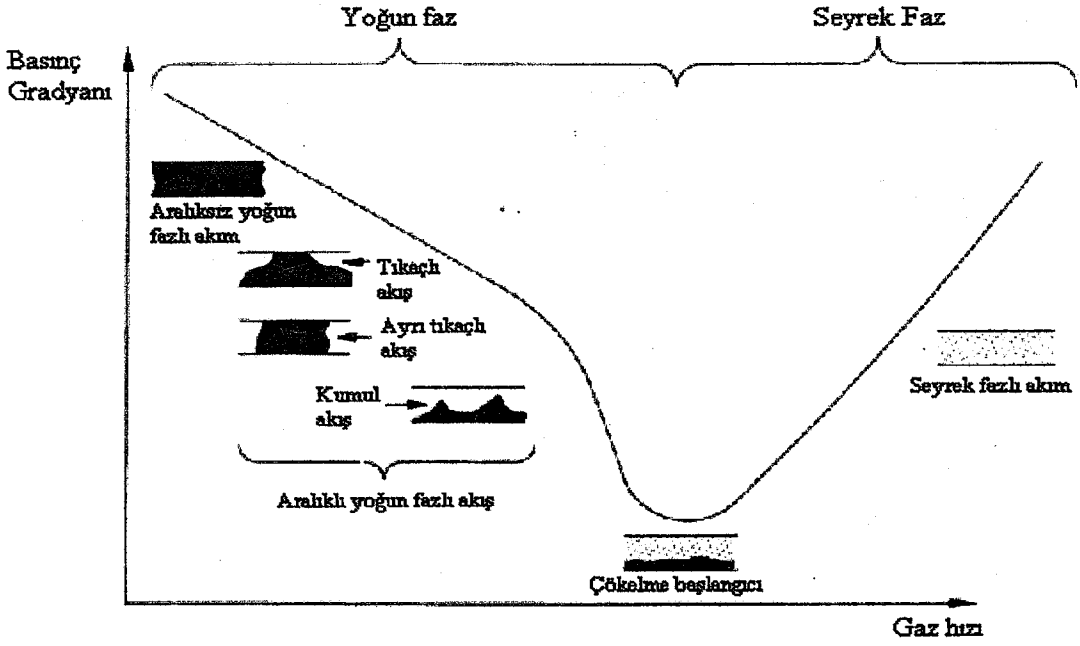
Daha önce yoğun fazlı akım ile seyrek fazlı akım tanımının çok farklı şekillerde yapılabileceğinden bahsetmiştik. Şekil 2.15'de bu akım tipleri için geçiş şekilleri ve basınç gradyanında ki değişim görülmektedir.

Yoğun fazlı akımın kendi içinde dahi birçok değişik akım tipinin oluşabileceği yine Şekil 2.15'de görülmektedir. Bu akış tiplerinin her birinde partiküllerin birbirleri ile ilişkileri, gaz hızları ve basınç kayıpları ayrı birer karakter göstermektedir. Şekil 2.15'de Yoğun fazlı akımın beş değişik biçimi verilmiştir.

Partiküllerin boru kesitini hemen hemen tamamen doldurduğu aralıksız yoğun fazlı akımda basınç kaybı çok yüksektir. Bu tip akımlar düşük taşıma mesafeleri için ve geçirgenliği fazla granül taneli malzemeler için uygundur.

Aralıklı yoğun fazlı akım kendi içinde üç değişik karakter gösterebilir. Bu akış tipinde boru kesiti malzeme ile tamamen doldurulur fakat bu malzeme demetleri bir trenin vagonları gibi aralarında bir boşluk olacak şekilde hareket ederler.

Kumul akışta ise bir partikül katmanı boru dibinde birikir ve taşıyıcı gazın etkisi ile bu katmandaki tanecikler yuvarlanarak hareket eder.



Şekil 2.15 Akış tipleri için geçiş şekilleri ve gaz hızı ile basınç kaybı arasındaki ilişki

Partiküllerin boru içinde çökmesi, taşıyıcı gaz hızının çökeltme hızına gelmesiyle başlar ve boru dibinde ince bir mal katmanı oluşur. Bu esnada borunun üst tarafında ki tanecikler seyrek fazlı akımdakine benzer olarak gaz içinde asılı biçimde hareket ederler. Bu noktadan sonra gaz hızı düşürülecek olursa boru dibinde çökelmiş olan mal katmanının kalınlığı artacaktır ve kumul akış durumuna doğru bir gidişat olacaktır.

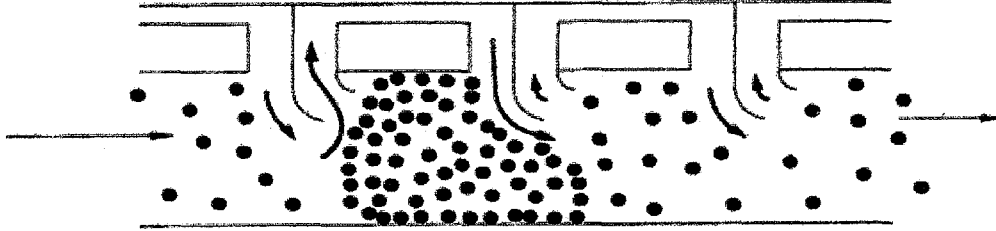
Bu arada, bütün tanecikli malzemeler için bu faz durumlarının gözükmesi gibi bir zorunluluğun olmadığı veya bu fazların birkaçının bir arada bulunabileceğinin söylenmesinde yarar vardır.

Yoğun fazlı akımın ana avantajı çok fazla taşıyıcı gaz ihtiyacının olmaması ve partikül hızlarının düşük olmasıdır. Az gaz ihtiyacının manası genellikle taşınan birim kütle mal başına ihtiyaç duyulan enerji miktarının az olması ve daha küçük gaz/partikül ayırıcı sistemine ihtiyaç göstermesidir. Hatta partiküllerin gaz içinde asılı kalmaması sonucu bazı sistemlerde boru hattı sonuna filtre koyma gereksiniminin ortadan kalktığı görülmüştür. Düşük partikül hızı ise taşıyıcı borularda aşınmaya ve tahribata yol açmadan uzun süre iletimin gerçekleştirilmesini mümkün kılar.

Pnömatik transferde taşınacak madde için en uygun taşıma tipinin seçilmesi mühendisin dikkat etmesi gereken önemli konulardan biridir. Sürekli yoğun fazlı akım, taşıyıcı gaz gereksinimi ve partikül hızları bakımından en çekici yöntem olarak gözükse de, kısa taşıma hatları ve yüksek basınç kayıpları gibi ciddi sakıncalara sahiptir.

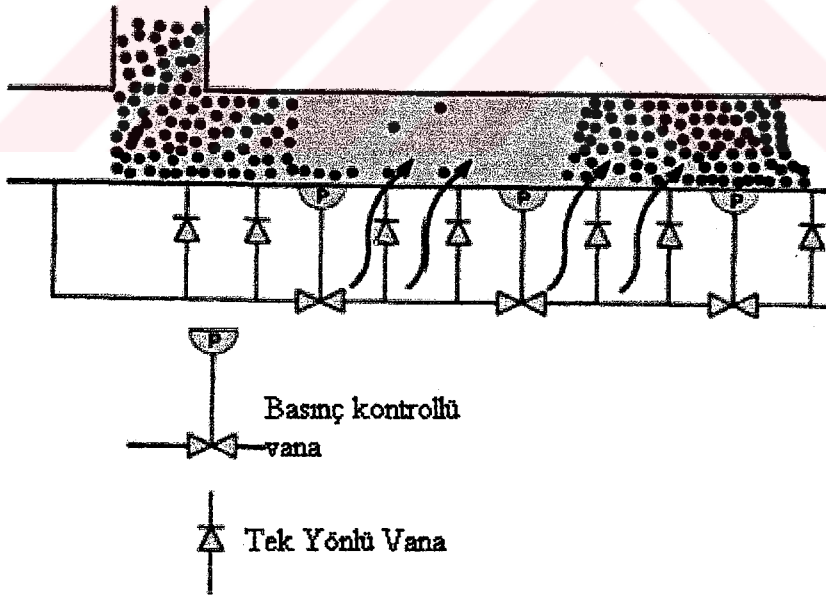
Yoğun fazlı akımda boru içinde mal tarafından oluşturulan tıkaçları önlemek amacıyla çeşitli tertibatlar geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda incelenmiştir.

İlk yöntem Şekil 2.16'da gösterildiği gibi boru içinde bir by-pass hattı kullanarak gaz akışını rahatlatmak ve böylece tıkalı bölgenin by-pass edilen gaz ile çözülmesini sağlamaktır.



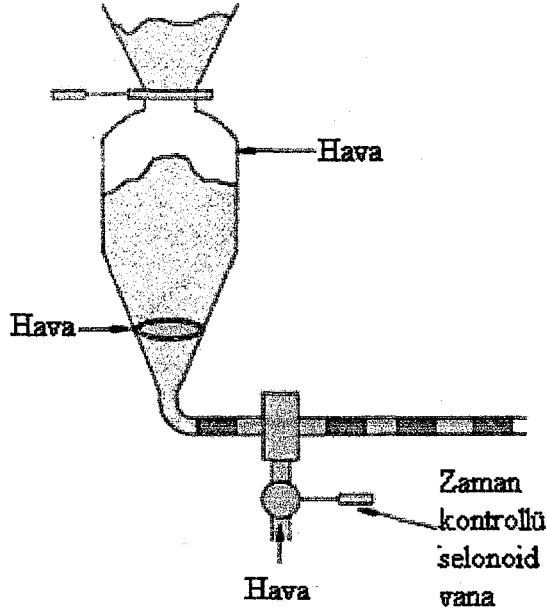
Şekil 2.16. By-pass hattı kullanılarak tıkanmanın önlenmesi

Bahsedeceğimiz ikinci yöntem basınç artışıyla çalışan valflerin kullanılarak yardımcı gazın sisteme verilmesiyle tıkanmanın önüne geçilmesi. Bu tip sistem için şematik gösterim Şekil 2.17'de verilmiştir.



Şekil 2.17 Basınç kontrolü ile tıkanmanın önlenmesi

Burada bahsedeceğimiz son yöntem Şekil 2.18'de bahsedilen hava bıçağı kullanılarak tıkaçların parçalanmasıdır. Bu yöntemde boruda tıkaçlı akım şeklinde hareket eden malın hareketinin sağlanması amacıyla zaman kontrollü bir vanadan sisteme hava verilerek borudaki malın tıkaç uzunlukları küçültülerek malın daha kolay hareket etmesi sağlanır.



Şekil 2.18 Hava bıçağı kullanılarak tıkanmanın önlenmesi

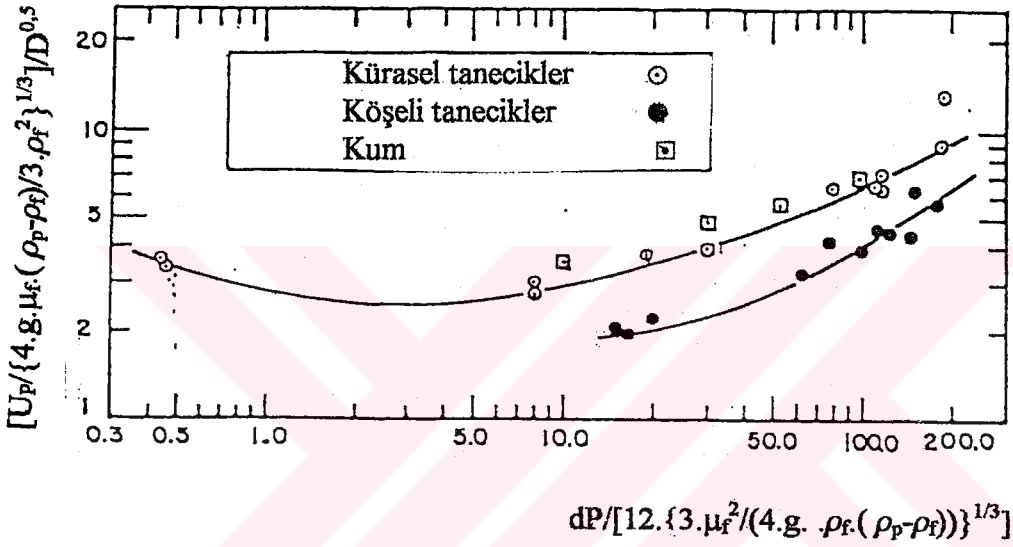
Yoğun fazlı sistemlerin dizaynı için çeşitli kolerasyonlar bulunmaktadır fakat bunlar çoğu zaman gerçek sonuçlardan oldukça farklı neticeler verdikleri için kullanımlarında ciddi çekinceler bulunmaktadır. Bu tip sistemlerin tasarımı deneysel sonuçlara ve tecrübeye dayandırılmaktadır.

2.6. Yatay Borularda Sürüklenme Hızı

Önceki bölümlerde yatay borularda seyrek fazlı akım için çeşitli denklemler geliştirilmiştir. Bununla birlikte katı-gaz oranının büyümesi veya gaz akış debisinin taşıma hattında azaltılması halinde katı parçacıkların yatay borunun dip tarafı boyunca çökmeye ve borunun kesit alanını daraltmaya başladığını belirtmiştik. İşte parçacıkların bu durumda durmasına engel olacak minimum hız sürüklenme hızıdır ve bu hız gaz-katı sistemlerinde çok önemlidir. Önceki bölümde verilmiş bulunan seyrek fazlı akış süspansiyonlarına ait akış karakteristikleri yoğun fazlı katı-gaz karışımlarının karakteristiklerinden tamamen farklıdır. Bu akış türünde akış şekli için herhangi bir denklem verilmeden önce akış rejiminin doğru olarak tespit edilmesi gereklidir. Yatay borulardaki akış için Zenz tarafından tek bir parçacık için sürüklenme hızını veren ampirik bir bağıntı verilmiş olup Şekil 2.19'de verilmiştir. Bu şekilden şu sonuçlar çıkarılabilir;

Sürüklenme hızı (parçacıkla akışkan arasındaki sürtünme sonucunda ortaya çıkan hareket) U_s azalan parçacık boyutuyla birlikte azalır. Fakat bazı özel parçacık boyutlarında sürüklenme

hızı parçacık boyutlarından bağımsızdır. Daha sonrada azalan parçacık boyutuyla sürüklenme hızının artması söz konusudur. Değişik parçacık boyutları için bulunan sürüklenme hızı noktalarının bir eğri ile birleştirilmesiyle sürüklenme hızı için bir minimum değer bulunur. Bu çok küçük parçacıkların çok güç süspansiyon olduğu ve taşıma olayı için çok yüksek hızların gerekli olduğu bir bölgenin seyrek fazlı akımlarda mümkün olduğunu gösterir. Bu özellik küçük parçacıklarda mevcut olan elektrostatik olarak yüklenme etkisine ve yüzey etkisine dayandırılmıştır.



Şekil 2.19 Yoğun fazlı akış için sürüklenme hız kolerasyonu (Marchello, 1976)

Sürüklenme hızının değişik boyutlu parçacık karışımlarının yatay borularda taşınması halinde Zenz tarafından teklif edilen bir metotla bulunması mümkündür. Bu metoda göre Şekil 2.19'den en küçük ve en büyük parçacık boyutları için sürüklenme hızı bulunur. Daha sonra hızı veren nokta eğri parçasının eğimi olan S bulunur. Son olarak iki sürüklenme hızından büyük olan değer seçilir ve kontrol edilir. Zenz farklı boyutlu tanecikler için minimum taşıma hızını veren aşağıdaki formülü teklif etmiştir.

$$W/\rho_p = 0,7.S^{1,5}.(U_p - U_s)/U_{SALT}$$

(Marchello, 1976)

(2.38)

2.7 Yoğun Fazlı Yatay Taşımada Basınç Düşmesi

Şekil 2.19'de görüldüğü gibi gaz hızının sürüklenme hızının altına düşürülmesi ve gaz-katı oranının yükseltilmesi halinde parçacıklar borunun dibinde çökerek bir kayma hareketi yapmaya başlarlar. Böyle yoğun fazlı katıların taşınması genellikle akışkanlaşmış yataklı besleyicilerle sağlanır.

Yoğun fazlı katı-gaz karışımlarının akışkanlaşmış yataktan boşaltılması bir kesitli boşaltma tüpü ile yapılır. Klasik pnömatik taşıma tesislerinde katı-gaz oranının 0,1-5,0 arasındaki değerleri söz konusu iken akışkanlaştırılmış yataklı besleyiciler kullanılması halinde bu oran 25-900 arasındaki değerleri bulabilir (Arun ve Akkoç, 1997). Yoğun fazlı katı karışımları için söz konusu olan akış türleri daha önce gösterilmiştir. Akışkanlaşmış besleyiciler civarında katı parçacıkları üniform olarak dağılmış görülür. Fakat sonraki bölgelerde katı parçacıkları durma ve periyodik aralıklarla tepelikler oluşturma eğilimi gösterir. Akıştaki böyle düzensizlikler parçacık hızının değişik boru kesitleri için tahmin edilmesini gerektirir. Olayda katı parçacıkların hızı boru içinde noktadan noktaya değişir. Hatta parçacıklar belli bir bölgede hızlandırıldıktan sonra alternatif olarak hızlanır ve yavaşlarlar. Basınç düşmesi ancak tahmini olarak bulunabilir.

Yoğun fazlı taşımada katıların az veya çok kolektif olarak hareket etmeleri bunların tek parçacık durumuna göre anlaşılması daha güç bir durum oluşturmaya yol açan tekil durumun etkisi hem boyut hem de şekil bakımından farklılık yaratır. Önemli olan nokta şudur ki parçacık kütlelerinin ortalama hızının mantıklı bir şekilde belirlenebilmesi için taşıma borusunun her yerinde ölçümler yapılmıştır. Önce boru içindeki karışımın ortalama yoğunluğu aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\rho_{ds} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{Giriş ve çıkış valflerinin aynı anda kapatılmasıyla} \\ \text{elde edilen ölçüm kesiti içindeki katı malzemenin} \\ \text{ağırlığı.} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{Ölçüm kesitleri} \\ \text{arasındaki boru} \\ \text{hacmi} \end{array} \right)} \quad (2.39)$$

Ortalama parçacık hızı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$U_p = G_p / \rho_{ds} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.40)$$

Yoğun fazlı taşıma halinde karışımın yoğunluğu katı-gaz oranına bağlı olarak görünür durumda 2-3 defa daha büyüktür. Bu katı ve gaz akışları arasındaki kaymanın kanıtıdır. Wen ve Simons isimli araştırmacılar akışkanlaştırılmış besleyiciye sahip cam borulu bir sistem içerisinde taşınan parçacıkların üç boyutu için basınç düşmesi ve hızı bulmuşlardır. Gaz ve katı arasındaki kayma miktarının ki gaz hızı parçacık hızından en az iki kat daha büyüktür ve pratik olarak parçacık boyutlarından bağımsız olduğu deneysel olarak anlaşılmıştır.

Basınç düşmesi (2.41)'de ki ampirik bağıntı ile verilmiştir.

$$[\Delta P_f / (\rho_{ds} L)] \cdot (D^{1/4} / d_p) = 2,5 \cdot U_p^{0,45} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.41)$$

Parçacık basınç ve şeklinin basınç düşmesine etkisi oldukça küçüktür.

$$[\Delta P_f / (W_p L)] \cdot (D / d_p)^{0,25} = 3,8 \cdot U_f^{-0,55} \quad (\text{Marchello, 1976}) \quad (2.42)$$

(2.42) denklemi basınç düşmesini verir. Gerekli veriler Holden isimli araştırmacı tarafından 25, 50 ve 75 mm'lik boru çapları halinde maden kömürü için, Zenz tarafından cam tanecikleri için, Wen ve Simons tarafından cam tanecikleri ve kömür için ve Koble tarafından Feldspat Quartz için verilmiştir.

(2.42) denklemi yoğun fazlı pnömatik taşımayla katı yükleme oranının 25-900 arasındaki değerleri için yaklaşık olarak değer verir ve dikkatli olmak gerekir. Basınç düşmesinin belirlenmesinde parçacık hızlanma mesafesi ve boru çapının etkisi konularında elde yeterli bilgi yoktur.

3 TEMEL BAĞINTILAR

Bu bölümde pnömomatik taşımada etkili olan ve gaz ile akışkan arasındaki ilişkileri belirleyen temel denklemler verilecektir.

3.1 Gaz ve Partikül Hızları

Gaz ve partikül hızları tanımlanırken dikkatli olunup bu hızların, gaz ve partiküller arasındaki bağıl hız (kayma hızı) ile karıştırılmaması gerekir.

Denklem (3.1) ile verilen yüzeysel gaz hızı en çok kullanılan ifadelerden biridir.

$$U_{fs} = [\text{gaz debisi}] / [\text{Boru kesiti}] = V_g / A \quad (3.1)$$

Partiküller için ise hız;

$$U_{ps} = [\text{kati debisi}] / [\text{boru kesiti}] = V_p / A \quad (3.2)$$

s indisi ifadenin yüzeysel olduğunu, f ve p indisleri ise sırasıyla gaz ve partiküle ait olduğunu ifade eder. Boru kesitinde yalnızca gazın geçtiği alanın toplam boru kesiti alanına oranı ϵ ile gösterilecek olursa, katıların boru kesitinden geçebildikleri oran $(1 - \epsilon)$ olur.

Bu tanımlardan yola çıkarak gerçek gaz hızı (U_f);

$$U_f = V_g / (A \cdot \epsilon) \quad (3.3)$$

ve gerçek partikül hızı (U_p);

$$U_p = V_p / [A \cdot (1 - \epsilon)] \quad (3.4)$$

Yüzeysel hızlar ile gerçek hızlar arasındaki ilişki ise;

$$U_f = U_{fs} / \epsilon \quad (3.5)$$

$$U_p = U_{ps} / (1 - \epsilon) \quad (3.6)$$

Genel olarak uygulamalarda yüzeysel hızlar kullanılır ve bu hız basitçe “U” ile gösterilir. Bu bölümde de bu yöntem kullanılacaktır. Kullanılacak olan bir başka sembolde “G” dir ve bu da katı partikül besleme oranını ifade eder ($G=M_p/A$).

Partiküller ve gaz arasındaki bağıl hız;

$$U_{rel} = U_f - U_p \quad (3.7)$$

ile gösterilir ve bu hız kayma hızı (U_{SLIP}) da denebilir. Seyrek fazlı düşey akışta kayma hızı tek bir partikülün terminal hızına (U_T) eşit alınabilir.

Şimdi akışkanlaştırma yada pnömatik taşıma için gerekli olan temel yasaları inceleyelim.

3.2 Süreklilik

İçinden sırasıyla M_p ve M_f kütle miktarlarında katı ve gaz geçen bir iletim borusu düşünelim ve boru kesitinde katı ve gaz için süreklilik denklemini yazalım.

Partiküller için;

$$M_p = A U_p (1 - \epsilon) \rho_p \quad (3.8)$$

Gaz için;

$$M_f = A U_f \epsilon \rho_f \quad (3.9)$$

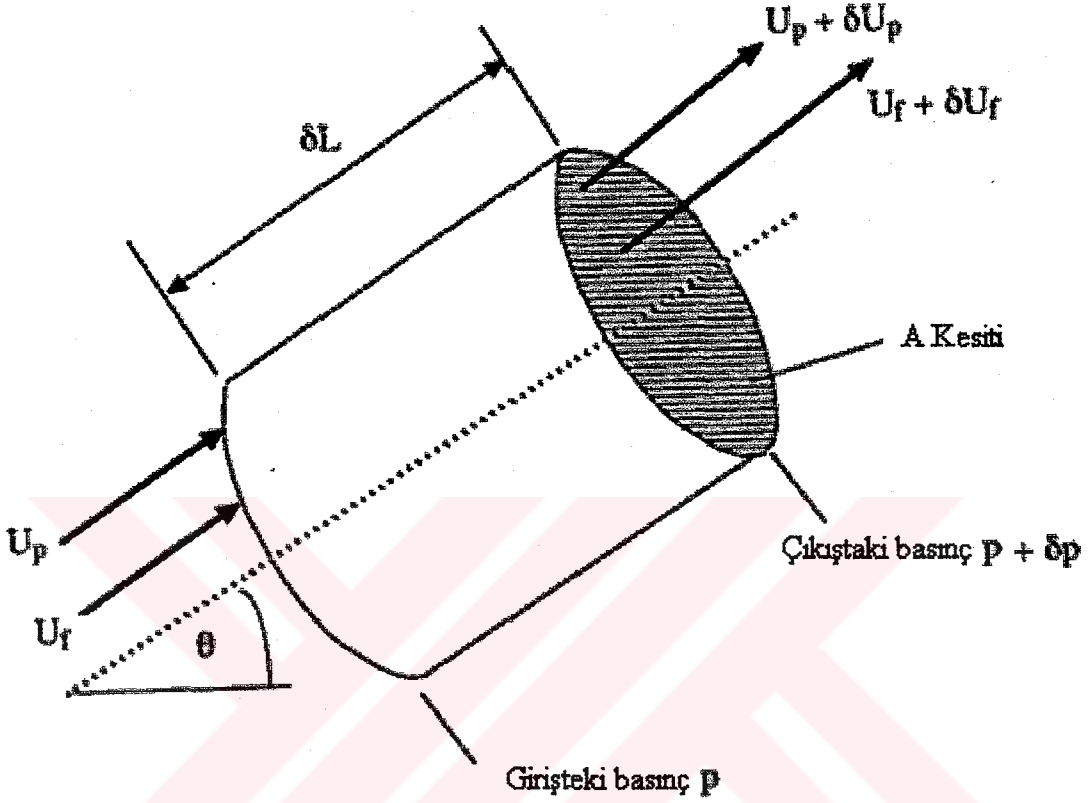
Bu iki denklemin birbirine oranlanmasıyla karışım oranı ifadesi elde edilir.

Karışım oranı;

$$\frac{M_p}{M_f} = \frac{U_p (1 - \epsilon) \rho_p}{U_f \epsilon \rho_f} \quad (3.10)$$

3.3 Basınç Kaybı

Toplam basınç kaybını hesaplayabilmek için borunun kesiti boyunca momentumun korunumu yazılacaktır.



Şekil 3.1. Momentumun korunumu için boru kesiti

Şekil 3.1 'de görülen boru kesiti için momentumun korunumu yazılırsa;

$$\left(\begin{array}{c} \text{Basınç} \\ \text{Kuvveti} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Gaz/Cidar} \\ \text{Sürtünmesi} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Katı/Cidar} \\ \text{Sürtünmesi} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Kütlesel} \\ \text{Kuvvetler} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Gaz Momentum} \\ \text{Değişimi} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Partikül Momentum} \\ \text{Değişimi} \end{array} \right)$$

Şekil 3.1 için ifadeler yerlerine yazılırsa:

$$-A \cdot \delta P - F_{fw} \cdot A \cdot \delta L - F_{pw} \cdot A \cdot \delta L - [A \cdot (1-\epsilon) \cdot \rho_p \cdot \delta L] \cdot g \cdot \sin\theta - (A \cdot \epsilon \cdot \rho_f \cdot \delta L) \cdot g \cdot \sin\theta = A \cdot \epsilon \cdot \rho_f \cdot U_f \cdot \delta U_f + A \cdot (1-\epsilon) \cdot \rho_p \cdot U_p \cdot \delta U_p \quad (3.11)$$

ifadesi elde edilir.

Denklem (3.11)'de F_{fw} ve F_{pw} terimleri sırasıyla borunun birim hacmi için gaz-cidar ve partikül cidar sürtünme kuvvetleridir.

Denklem (3.11)'in sabit gaz yoğunluğu ve sabit boşluk oranı varsayımı ile integre edilip yeniden düzenlenmesiyle;

$$\begin{aligned}
 P_1 - P_2 = & \underbrace{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \epsilon \cdot \rho_f \cdot U_f^2}_{(1)} + \underbrace{\left(\frac{1}{2}\right) \cdot (1 - \epsilon) \cdot \rho_p \cdot U_p^2}_{(2)} + \underbrace{F_{fw} \cdot L}_{(3)} + \underbrace{F_{pw} \cdot L}_{(4)} + \underbrace{(1 - \epsilon) \cdot \rho_p \cdot L \cdot g \cdot \sin\theta}_{(5)} + \\
 & \underbrace{\epsilon \cdot \rho_f \cdot L \cdot g \cdot \sin\theta}_{(6)}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

elde edilir.

Denklem (3.1)'den (3.12)'ye kadar olan bütün bağıntılar herhangi bir gaz-partikül karışımı için uygulanabilir. Ayrıca sözü geçen bağıntılar seyrek fazlı ve yoğun fazlı akımın ikisi içinde kullanılabilir.

Denklem (3.12.)'de ki bileşenleri sırasıyla inceleyecek olursak;

- (1) Gazın hızlandırılması ile oluşan basınç kaybı
- (2) Partiküllerin hızlandırılması ile oluşan basınç kaybı
- (3) Gaz ve boru cidarı arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybı
- (4) Partiküller ve boru cidarı arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybı
- (5) Parçacıklar yüzünden oluşan statik basınç kaybı
- (6) Gaz yüzünden oluşan statik basınç kaybı

Bu terimlerden bazıları şartlara bağlı olarak ihmal edilebilir. Eğer gaz ve partiküller boru içinde hızlanmışlarsa 1 ve 2 numaralı terimler denklemden çıkarılır. Eğer boru yatay ise 5 ve 6 numaralı terimler hesaba katılamazlar. Basınç kaybının hesaplanmasında karşılaşılabilecek gerçek zorluk sürtünme kayıplarının bulunması işleminde ortaya çıkacaktır. Bu durum bir sonraki bölümde açıklanmaya çalışılacaktır.

Denklem (3.12)'nin bütün gaz-partikül karışımları için uygulanabileceğini belirtmiştik. Bu denklemi seyrek fazlı akımlarda kullanabilmemiz için 3 (gaz-cidar sürtünmesi basınç kaybı) ve 4 (partikül-cidar sürtünmesi basınç kaybı) terimlerinin seyrek faz için bulunması gerekir.

Seyrek fazlı akımlarda gaz-cidar sürtünmesi çoğunlukla partiküllerden bağımsız olarak kabul edilir ve gaz için sürtünme katsayısı kullanılabilir. Katı partikül-cidar sürtünmesini hesaplayabilmek için bir çok çalışma yapılmış ve halen yapılmaktadır. Bu çalışmada, Konno ve Saito (1969) seyrek fazlı akımda düşey borular için yapmış olduğu partikül-cidar sürtünme basınç kaybı yaklaşımı verilmiştir. Yatay borular içinse Hinkle (1953)'nin kolerasyonu gösterilmiştir.

Böylece dikey iletim için;

$$F_{pw}.L = 0,057.G.L.(g/D)^{1/2} \quad (\text{Konno ve Saito, 1969}) \quad (3.13)$$

Yatay iletim için;

$$F_{pw}.L = [2.f_p(1-\epsilon). \rho_p . U_p^2 . L]/D \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.14)$$

$$U_p = U.(1-0,0638.d_p^{0,3} . \rho_p^{0,5}) \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.16)$$

$$f_p = (3/8).(\rho_f/\rho_p).(D/d_p).C_D.[(U_f - U_p)/U_p]^2 \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.17)$$

C_D , gaz ile cidar arasındaki sürüklenme katsayısıdır.

Not: Hinkle'nin analizinde basınç kaybının boru cidarlarına çarpan taneciklerin tekrar hızlanması sonucu oluştuğu varsayılmıştır.

Tek bir parçacık için sürtünme kuvveti;

$$F_D = (\pi.d_p^2/4). \rho_f . C_D.(U_f - U_p)^2/2 \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.18)$$

Boşluk oranı ϵ olduğuna göre birim hacim başına tanecik miktarı, N_V

$$N_V = (1- \epsilon)/(\pi.d_p^3/6) \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.19)$$

O halde borunun birim hacminde partiküllere etki eden toplam kuvvet, F_V .

$$F_V = [F_D. (1- \epsilon)]/(\pi.d_p^3/6) \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.20)$$

Hinkle'nin varsayımına dayanarak bunun borunun birim uzunluğu için partikül-cidar sürtünmesine eşit olduğunu söyleyebiliriz.

$$F_{pw}.L = (3/4). \rho_f . C_D.(L/d_p).(1-\epsilon).(U_f - U_p)^2 \quad (\text{Hinkle, 1953}) \quad (3.21)$$

Toplam basınç kaybının hesaplanması için bir başka yöntemden daha bahsedebiliriz. Bu yöntemde de öncekine benzer olarak sistemin her bir bölümünde meydana gelen basınç kayıplarını ayrı ayrı ele alacağız.

Bir pnömomatik iletim sistemindeki toplam basınç kaybı;

$$\Delta P = \Delta P_{\text{siklon}} + \Delta P_{\text{edüktör}} + \Delta P_{\text{dirsek}} + \Delta P_{\text{ivme}} + \Delta P_{\text{yatay}} + \Delta P_{\text{dikey}}$$

ΔP_{siklon} : Siklonda meydana gelen basınç kaybı

$\Delta P_{\text{edüktör}}$: Edüktörde meydana gelen basınç kaybı

ΔP_{dirsek} : Dirseklerde meydana gelen basınç kaybı

ΔP_{ivme} : Malın hızlandırılmasında oluşan basınç kaybı

ΔP_{yatay} : Yatay boruda meydana gelen basınç kaybı

ΔP_{dikey} : Dikey boruda meydana gelen basınç kaybı

Dirseklerde meydana gelen basınç kaybı, dirseklerde yavaşlayan veya duran malın tekrar ivmelendirilmesi için meydana gelen basınç kaybıdır.

$$\Delta P_{\text{dirsek}} = B.(1+X_{p,g}).\rho_f.U_f^2/(2.g_c) \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.22)$$

Burada B, R/D oranına bağlı bir katsayıdır. (R : dirsek yarıçapı)

$$R/D \geq 6 \Rightarrow B = 0,5$$

$$R/D = 4 \Rightarrow B = 0,75$$

$$R/D = 2 \Rightarrow B = 1,5$$

Partiküllerin ve gazın hızlandırılması ile oluşan basınç kaybı:

$$\Delta P_{ivme} = \rho_f U_f^2 / (2 \cdot g_c) + U_p M_p / (A \cdot g_c) \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.23)$$

Yatay borudaki basınç kaybı, gaz ve partiküllerin basınç kayıplarıdır.

$$\Delta P_{yatay} = \lambda_f \rho_f U_f^2 L / (2 \cdot D \cdot g_c) + \lambda_z \rho_f U_f^2 L X_{p,g} / (2 \cdot D \cdot g_c) \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.24)$$

λ_f : Gaz sürtünme katsayısı (Moody diyagramından)

λ_z : Katı sürtünme katsayısı

$$d_p > 500 \mu\text{m} \Rightarrow \lambda_z = 0,082 \cdot X_{p,g}^{-0,3} \cdot Fr^{-0,86} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot (D/d_p)^{0,1} \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.25)$$

$$d_p < 500 \mu\text{m} \Rightarrow \lambda_z = 2,1 \cdot X_{p,g}^{-0,3} \cdot Fr^{-1} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot (D/d_p)^{0,1} \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.26)$$

$Fr = U_f^2 / gD$: Gaz için Froude sayısı

$Fr_s = U_T^2 / gD$: Partiküller için Froude sayısı

Dikey borudaki basınç kaybını sürtünmelerden dolayı oluşan basınç kaybı ve yükseklikten kaynaklanan statik basınç kaybı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Dolayısıyla dikey boruda sürtünmeden dolayı oluşan basınç kaybı;

$$\Delta P_{dikey,sürt.} = \lambda_f \rho_f U_f^2 L / (2 \cdot D \cdot g_c) + \lambda_z \rho_f U_f^2 L X_{p,g} / (2 \cdot D \cdot g_c) \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.27)$$

$$\Delta P_{dikey,statik} = [\rho_p (1+\epsilon)(g/g_c) + \epsilon \rho_f (g/g_c)] \cdot \Delta z \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.28)$$

Δz : Yükseklik farkı

$$\Delta P_{dikey} = \lambda_f \rho_f U_f^2 L / (2 \cdot D \cdot g_c) + \lambda_z \rho_f U_f^2 L X_{p,g} / (2 \cdot D \cdot g_c) + [\rho_p (1+\epsilon)(g/g_c) + \epsilon \rho_f (g/g_c)] \cdot \Delta z \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.29)$$

Burada boşluk oranı olan ϵ (3.30.) ifadesi ile bulunabilir.

$$\epsilon = 1 - [M_p / (A \cdot \rho_p \cdot U_p)] \quad (\text{Rizk, 1986}) \quad (3.30)$$

Siklon ve edüktörlerdeki basınç kaybı üretici firmalardan temin edilebilecek olan performans eğrileri yardımı ile tespit edilebilir.

3.4 Seyrek Fazlı Akım İçin Sistem Dizayn Ölçütleri

Bir seyrek fazlı pnömomatik sistemin dizaynı, taşımanın sağlanması için gerekli boru çaplarının belirlenmesi, seyrek fazın oluşması için gerekli olan taşıyıcı gaz hızlarının tespiti ve bu hızlar sonucu meydana gelen basınç kayıplarının hesaplanması, uygun yardımcı elemanların seçimi ve iletim hattı sonunda taneciklerin ve gazın birbirinden ayrılmasını sağlayacak olan sistemin dizaynı veya seçimi konularını içerir.

3.4.1 Gaz Hızı

Seyrek fazlı akımda da yoğun fazlı akımda da sürtünme kayıplarını azaltmak için mümkün olan en düşük gaz hızları tercih edilir. Fakat U_{SALT} hızı tam olarak hesaplanmadığı için hassas dizaynlarda en düşük basınç kaybının olduğu D noktasına ulaşmaya çalışmak bazı riskleri de beraberinde getirir. Dizayn hızının güvenli bir şekilde hesaplanmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer faktör ise D noktasındaki hızın sabit olmamasıdır.

Eğer sistem yalnızca düşey borulardan oluşuyorsa tıkanma hızı sistem dizaynı için en önemli ölçüt olacaktır. Aynı şekilde hassas dizaynlarda, bu hızın tam olarak tespit edilememesi ciddi tehlikelere neden olmaktadır. Santrifüj üfleycilerin kullanıldığı sistemlerde tıkanma olayı kendiliğinden oluşabilir. Örneğin bu sistemlerdeki küçük bir sorun mal besleme oranında bir artışa neden olur bu durumda basınç kaybı gradyanında bir artma gözlenecektir. Bunun santrifüj üfleycideki sonucu, sisteme verilen gaz miktarının azalması olacaktır. Azalan gaz miktarıyla birlikte basınç gradyanındaki artış artacak ve neticede tıkanmanın başlayacağı şartlara ulaşılabilecektir. Bundan sonra tekrar sistemin çalışır duruma getirilmesi için bu malın borudan akıtılması gerekir.

Bahsedilen tıkanma durumlarının aşılması için, hesaplanan dizayn hızı %50 oranında arttırılarak uygulanmalıdır.

4 PNÖMATİK İLETİM TESİSLERİNİN HESABI

4.1 Havanın Sıkıştırılabilirlik Özelliğinin Pnömatik İletimdeki Etkisi

Havanın sıkıştırılabilir özelliği nedeni ile doğacak basınç kaybının %10 ila %15 arasında olabileceği ve basınç kaybını hesap ederken bu düzeydeki kaybın ihmal edilebileceği literatürlerin bazılarında bildirilmektedir. Atmosferik havada bu tür kayıplar 100 mbar dolayındadır. Böyle bir sınır basınçlı hava gereksinimini tek kademeli bir radyal vantilatörden sağlayan oldukça basit düzenli iletim tesislerinin basınç düzeyini içermektedir. Döner pistonlu bir körüğün düşük basınç düzeyinde ($\Delta P=500$ mbar) ve orta değerli bir hava hızı ile çalışan bir pnömatik iletimin hesabı yapılırken havanın sıkışabilirlik özelliği dikkate alınmayabilir. Ancak döner pistonlu körük veya tek kademeli (3 bar basınç düzeyine ulaşabilen kapasitede) bir kompresörün yukarı basınç düzeyinde çalıştırılacak bir pnömatik tesisin hesabında iletim havasının sıkıştırılabilir özelliğinin dikkate alınması gerekir.

Bir pnömatik tesis hesabının odak noktasını boru çapı ile basınç kaybı arasındaki bağıntı oluşturmaktadır. Bu iki öğeden sonra hava debisi ve körük gücü saptanır ve buna göre körük seçimi yapılır. İletim malı debisi ile vericiyi saptadıktan sonra toz içeriğinin niteliğine göre filtre seçimi gerçekleştirilir.

Geniş çaplı boru seçimi basınç kaybını azaltmakla birlikte tesis ve işletme giderlerini yükseltecektir. Öte yandan dar çaplı borularda tesis ve işletme giderleri genelde düşük ve fakat basınç kaybı yüksektir. Boru çapı daraldıkça körük basıncı yetersizliği tehlikesi de artacaktır.

4.2. Basınç Kayıpları

Pnömatik iletimde basınç kaybı altı ayrı basınç kaybindan oluşur. Bunlardan ikisi salt hava akımından ve dördü iletim malından doğmaktadır.

- 1) Hava Sürtünmesinden Oluşan Basınç kaybı (ΔP_H)
- 2) Hava direnci ayrıntıları (ΔP_w)
 - a) Kesit yüzeyi değişimleri
 - b) Memeler

- c) Ayırıcılar
- d) Siklonlar
- e) Filtreler

- 3) İletim mali sürtünme kaybı (ΔP_R)
- 4) Dikey iletim kaybı (ΔP_h)
- 5) İvme kaybı (ΔP_i)
- 6) Kıvrımlı dirsek kaybı (ΔP_K)

Toplam basınç kaybı (ΔP) ;

$$(\Delta P) = (\Delta P_H) + (\Delta P_R) + (\Delta P_h) + (\Delta P_i) + (\Delta P_K) \quad (4.1)$$

İfadeyi açık biçimde yazacak olursak;

$$\Delta P = \rho_f U_f^2 / 2 + \{ \lambda_H \Delta L / D + X_{p,g} [\alpha \Delta L + (2 \Delta h \cdot g) / (\beta \cdot U_f^2) + 2 \beta \cdot (1+i/2)] \} \quad (4.2)$$

ΔP : Toplam basınç kaybı [N/m^2]

ρ_f : Hava özgül ağırlığı [kg/m^3]

U_f : Gerekli iletim havası hızı [m/sn]

λ_H : İletim havası basınç kaybı katsayısı (0,02-0,03)

ΔL : Toplam iletim borusu uzunluğu [m]

D : İletim borusu çapı [m]

$X_{p,g}$: Karışım oranı

Δh : Dikey iletim borusu uzunluğu [m]

g : Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

β : İletim malı hızının iletim havası hızına oranı

Tozsuz ve irmiksi iletim malı için : $\beta = 0,8$

Taneli iletim malı için : $\beta = 0,7$

i : Kıvrımlı dirsek sayısı

Kademeli boru düzenlemesine karar verildiğinde, her bir kademenin basınç kaybını hesap ederken (4.2) denklemini uygulamak gerektiğinde denklemde son parantez içindeki 1 rakamı ikinci kademedan başlanarak tüm öteki kademelerde kaldırılacak ve yerini sıfır alacaktır. Bundan başka (4.2) denklemindeki terimleri aşağıda sırasıyla açıkladığı gibi düzenlemek yararlı olur.

$$\Delta P_H = (K_H \cdot \rho_f \cdot U_f^2) / 2$$

$$\Delta P_S = (X_{p,g} \cdot K_S \cdot \rho_f \cdot U_f^2) / 2$$

$$\Delta P = \Delta P_H + \Delta P_S = (K_H + X_{p,g} \cdot K_S) \rho_f \cdot U_f^2 / 2$$

Burada;

$$K = K_H + X_{p,g} \cdot K_S \quad (4.3)$$

$$K_H = \lambda_H \cdot \Delta L / D \quad (4.4)$$

$$K_S = \alpha \cdot \Delta L + (2 \cdot \Delta h \cdot g) / (\beta \cdot U_f^2) + 2 \cdot \beta \cdot (1 + i/2) \quad (4.5)$$

$$K = \lambda_H \cdot \Delta L / D + X_{p,g} \cdot [\alpha \cdot \Delta L + (2 \cdot \Delta h \cdot g) / (\beta \cdot U_f^2) + 2 \cdot \beta \cdot (1 + i/2)] \quad (4.6)$$

ΔP_H : İletim havası akımındaki basınç kaybı [N/m²]

ΔP_S : İletim malı akımındaki katma basınç kaybı [N/m²]

ΔP : Toplam basınç kaybı [N/m²]

K_H : Hava akımındaki basınç kaybı katsayısı

K_S : İletim malı akımındaki basınç kaybı katsayısı

K : Toplam basınç kaybı katsayısı

4.3 Boru Çapı

Ekonomik çalışan çoğu iletim tesislerinde karışım oranı μ , 10'dan büyüktür. İletim borusu çapının tahminlenmesi (4.2) formülü ile yapılabilir.

$$D = [(2 \cdot K_s \cdot M_p \cdot U_f) / (\pi \cdot \Delta P_s)]^{1/2} \quad (4.7)$$

Döner pistonlu körük ile (basınç kapasitesi 1 bar) çalışan orta basınçlı tesislerde tahkik hesabı yapılırken körük basınç kapasitesinin yaklaşık olarak %70 bölümünün ΔP_s için dikkate alınması önerilmektedir.

Bu konular hakkında daha kapsamlı bilgi için (1) nolu kaynaktan faydalana bilinir.

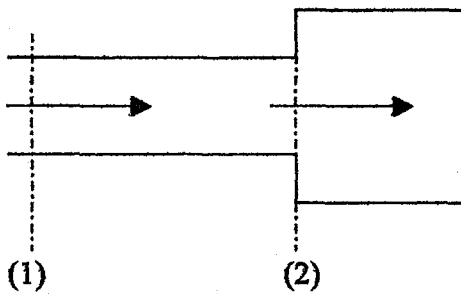
4.4 Hava Debisi

Seçilen boru çapı (D) ve daha önce saptanan hava hızı yardımı ile hava debisi elde edilir.

$$V_f = (\pi/4) \cdot D^2 \cdot U_f \quad (4.8)$$

4.5 İletim Borusundaki Olguya İlişkin Temel Denklemler

Pnömatik iletimde Şekil 4.1'de görüldüğü gibi salt hava akımında olduğu üzere akışkanlar prensibini uyguladığımızda (1) kesitindeki V_{H1} debisi ile (2) kesitindeki V_{H2} debisi eşit olur.



$$V_{H1} = V_{H2}$$

$$\rho_{H1} \cdot (\pi/4) \cdot D_1^2 \cdot U_{H1} = \rho_{H2} \cdot (\pi/4) \cdot D_2^2 \cdot U_{H2}$$

$$\rho_{H1} \cdot D_1^2 \cdot U_{H1} = \rho_{H2} \cdot D_2^2 \cdot U_{H2}$$

Boru çapının değişmediği kabul edilirse

$$\rho_{H1} \cdot U_{H1} = \rho_{H2} \cdot U_{H2} \quad \text{olur ve}$$

Şekil 4.1 Değişken kesitli boruda hava akımı

$$(\rho_{H1}/\rho_{H2}) = (P_1/P_2) \quad (4.9)$$

bulunur ve

$$(U_{D2}/U_{D1}) = (P_1/P_2) \quad [\text{Mutlak Basınç}] \quad (4.10)$$

Atmosferik olguda yüzer ortamlı bir iletimde en az düzeyde hava hızına gerek görüldüğünde basınç artırılması yapılır. Bu suretle hızı düşürülen havanın özgül ağırlığı da artmış olacağından daha iyi bir taşıyıcı nitelik kazanmış olur. Böylece havanın özgül ağırlığı da artınca yüze hızı da azalacaktır.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi boru çapı d_1 'den d_2 'ye genişlediğinde aynı dinamik basınç için

$$\Delta P_{\text{dinamik1}} = \Delta P_{\text{dinamik2}}$$

$$(\rho_{D1}/2) \cdot U_{D1}^2 = (\rho_{D2}/2) \cdot U_{D2}^2 \quad (4.11)$$

denklemini geçerli olur.

İletim hattındaki olgu değişimlerinin saptanması için (4.9), (4.10) ve (4.11) denklemlerinden

$$(P_1/P_2) = (U_{D2}/U_{D1})^2 = (D_2/D_1)^4 \quad (4.12)$$

elde edilir. Bu denkleme göre aşağıdaki iki önlemin alınması gerekir.

- a) Bir pnömatik tesisatın sonunda eğer P_2 basıncı (örneğin basınç yöntemi bir tesisatta atmosferik basınç) egemen oluyorsa, ondan daha yüksek olan P_1 basıncında başlangıç hava hızı P_2/P_1 oranının karekökü kadar düşürülebilir. Bu açıklamaya göre ;
- b) Boru çapı D_1 'den D_2 'ye kademelendirilirken P_2/P_1 oranı d_2/d_1 oranının 4. kuvvetine eşit olmalıdır.

Dinamik basınç, gerekli minimum değerden daha büyük olsa bile iletim hiç kuşkusuz devam edecektir. Boru kesitinin sabit olması halinde iletimin başlangıcında daima en küçük dinamik basınç egemendir. İletim hattı sürecinde hava hızının yükselmesi ile dinamik basınç artar. İletim hattında boru çapı kademelendirilmesi gerçekleştirilmediği takdirde, boru içinde tıkanma olayı oluşur. Genellikle mal akış rejiminin bozulmaya yüz tuttuğu noktada oluşan tıkanmanın asıl nedeni de budur.

4.6.3 Basınç Kaybı

Sıkıştırılabilir hava ve iletim malı karışımını içeren akımda oluşan basınç kaybı

$$\Delta P = P_0 \cdot [(1 + K \cdot \rho_{H_2O} \cdot (U_{H_2O}^2 / P_0))^{1/2} - 1] \quad (4.13)$$

ΔP : Toplam basınç kaybı (N/m^2)

P : İletim havası basıncı (N/m^2)

P_0 : Atmosferik hava basıncı (N/m^2)

K : Basınç kayıp katsayısı (Bkz. Denklem 4.6)

ρ_{H_2O} : Atmosferik havanın özgül ağırlığı (kg/m^3)

U_{H_2O} : Gerekli iletici havasının hızı (m/s)

(4.13) denklemi ile hesaplanan basınç kaybı, iletim hattındaki tüm basınç kayıplarının toplamını içermekte olup, gerçek basınç kaybının biraz üzerindedir. Bu nedenle uygulanan hesap biçimi yararlı görülmektedir. Bir örnekleme olarak bir silo doldurma tesisatının sonunda çok sayıda kıvrımlı dirseklerin yer aldığı saptanmıştır. Bunların tek tek sonradan yapılan tahkik hesabında yapılan proje hesabı sonucundan çok farklı olmadığı bildirilmiştir.

4.7 Basınç Yöntemli Bir İletim Tesisatının Boru Çapı Kademelendirilmesi Uygulamasına Gidilmeden Tasarımı

Çizelge 4.1 Boru çapı kademelendirilmesi olmadan basınç yöntemi bir iletim tesisatının tasarım gidiş diyagramı.

1. Aşama

Bildirilen veriler		
İletim malı cinsi		
İletim malı kitle debisi	M_p	(kg/s)
İletim hattı tüm uzunluğu	ΔL	(m)
Borunun dikey bölümü	Δh	(m)
Kıvrımlı dirsek sayısı	i	

2. Aşama:

Kabul edilen veriler	
Hava hızı	U_{f0} (m/s)
Boru çapına bağlı basınç kaybı katsayısı	α
Hız orantısı	β
Havanın özgül ağırlığı	ρ_{H0}

3.Aşama:

Boru çapı
Vantilatör veya kompresör seçimi
Boru çapının (4.7) denklemine göre hesaplanması
Bulunan çapa göre standartlardan boru seçimi

4.Aşama:

Basınç kaybı
Karışım oranının (4.17) denklemine göre hesabı
K katsayısının (4.6) denklemine göre hesabı
ΔP basınç kaybının (4.13) denklemine göre hesabı
U_{f0} hava hızının kontrolü

5.Aşama:

Hava debisi
Çıkış borusu çapı seçimi
Hava hızı seçimi
Sistemde ki kaçak hava debisi tespiti
Hava debisi

6.Aşama:

Körük
Tip
Hava debisi
Basınç
Karakteristik eğrisi
Sıcaklık

Devir sayısı
Güç gereksinimi
Motor dönme hızı
Motor gücü

7.Aşama:

Verici
Tip
Devir sayısı veya takt süresi
Kaçak hava debisi tespiti
Basınç kaybı

8.Aşama:

Boru hattı
a) İletim hattı başlangıcında Çap, uzunluk, basınç kaybı
b) İletim hattının ardısına Çap, uzunluk, basınç kaybı

9.Aşama:

Ayırıcı veya filtre
Hava debisi
Filtre yüzeyi
Filtre kapasitesi
Basınç
Basınç kaybı
Temizleme havası (basınç,miktar)

1.aşamada veriler bildirilecektir. Bunlar tesisi yaptıracak olan girişimci tarafından yapımcıya aktarılır.

2.Aşamada yapımcı firma kendi bilgilerine göre yapacağı hesap için gerekli ek değerleri hesaplar.

3.Aşamada boru çapının tahminlenmesi yapılır. Bu tahminle meye kadar havanın sıkıştırılabilir özelliği dikkate alınmayabilir. Basınç ve emme yöntemli tesislerin tasarımı 3.aşamaya kadar aynıdır.

4.Aşamada basınç kaybı (4.13) denklemine göre ve tüm gerekli ön etüd çalışmaları ile birlikte hesaplanır. Bundan başka basınçlı tesislerin hesabı, ancak iletim hattının sonunda egemen olan atmosferik olguya bağlantılı olarak yapılabilir. Malın basınçlı tesisata verilmesi esnasında dinamik basıncın düşük olması, hava hızının arttırılmasını zorunlu kılar.

Başlangıç noktasında hava hızı U_a ve son noktada hava hızı U_0 olsa (4.12) denklemine göre $P_0 + \Delta P$ basıncında gerekli başlangıç hızı için;

$$U_a = U_{f0} \cdot [(P_0 / (P_0 + \Delta P))^{1/2}] \quad \text{olur}$$

ve son noktadaki olgu, izotermik olguya çevrilince;

$$U_{f01} = U_a \cdot [(P_0 + \Delta P) / P_0] = U_{f0} \cdot [(P_0 + \Delta P) / P_0]^{1/2}$$

$$U_{f01} = U_{f0} \cdot [1 + (\Delta P / P_0)]^{1/2} \quad (4.14)$$

Bu suretle 4.Aşamada (4.17) denklemine göre karışım oranı ve (4.6) denklemine göre toplam basınç kayıp katsayısı küçülecektir. İkinci kez hesapta (4.13) denklemini uygulandığında ΔP basınç kaybı yükselecektir. Çünkü burada hava hızının karesi yer almış bulunmaktadır. Böylece (4.14) denklemine göre hava hızının tekrar yüksek çıkması durumunda yeni bir hesap işlemine geçilmelidir. Bu belirtilen hesap 3 ila 4 kez deneysel olarak hesaplandığında basınç kaybının önemsiz miktarda artacağı görülecektir ki sonuçta basınç hesabı tamamlanmış olacaktır.

5.Aşamada daha önce hesaplanan basınç kaybı, 3.Aşamada olanaklı görülen boru çapı kademelendirilmesinde bulunan basınç kaybı ile karşılaştırılır ve boru çapı kesin olarak hesaplanır. Bundan sonra (4.8) denklemine göre hava debisi bulunur.

6.Aşamada, 5.Aşamada saptanan hava debisi ve 4.Aşamada bulunan basınç kaybı yardımı ile körük tanımlanmış olur. Körük böylece 3.Aşamada boru çapının saptanması için ilke oluşturur. 4.aşamadan sonra hesaplanan basınç kaybı ile birlikte 7., 8, ve 9. aşamalarda saptanan basınç kayıpları körüğün ürettiği basınç farkından daha büyük olursa seçilecek boru çapı geniş tutulur. Bu olmadıği takdirde körük değiştirilebilir. Sonuçta körüğün mevcut basınç

farkında gerekli debiyi sağlayabilecek kapasitede olduğu kanıtlanmalıdır. Körük gücünün hesap edilmesine gerek kalmaz. Buna karşın körüğün yapımcısı olan firmadan sağlanan gerçeğe yakın doğrulukta hesaplanmış olan karakteristik eğrilerden körük gücü tahkik edilir. Genellikle körük tahkik motoru %10 bir güç rezervi ile seçilmelidir.

Basınç yöntemli bir iletim tesisatını kapsamlı bir biçimde projelendirirken verici, hava boruları ve filtre aynı proje kapsamında ele alınır (7., 8, ve 9. aşamalar). Bunlar yalnız kendi işlevlerini yerine getirmekle kalmaz aynı zamanda basınç yöntemli iletim tesisatının işlevine çeşitli biçimde etkili olurlar.

4.7.1 Çok Kademeli Boru Çapı Uygulamalı Basınç Yöntemli İletim Hattı

Çok kademeli yüksek basınç yöntemli bir iletim planını hazırlamadan önce Çizelge 4.1'e göre kademersiz iletim tesisatı gibi konuya değinmek faydalı olur. Böylece yüksek basınç yöntemli iletim tesisatını projelendirirken çalışmalar 3. ve 4. aşamalar üzerine yoğunlaştırılır. 3.Aşamada, sonradan bulunacak olan boru çapı dolayında bir boru çapı elde edilir. Piyasada mevcut borulardan bu çapa en yakın çapta boru seçimi yapılır.

İlk boru çapından n boru çapına kadar olan kesitlerdeki basınç kayıpları (4.15.) denklemi ile kademelendirilebilir.

$$(P_{11}/P_{n2}) = P_{11} \cdot [1 - (D_1/D_n)^4] \quad (4.15)$$

(4.15) denklemindeki birinci endeks kademeye aittir. İkinci endekste ki 1 rakamı kademenin başlangıcını ve 2 rakamı kademenin sonunu belirtir. Böylece Şekil 4.3'de ki işaretler saptanır. Başlangıç basıncı olarak daha önce Çizelge 4.1 gereğince hesaplanan mutlak basınç, kademe başlangıcı için denkleminde yerine koyulabilir. Bu hesap işlemleri ne kadar tekrar edilirse sonuç o kadar sağlıklı olur.

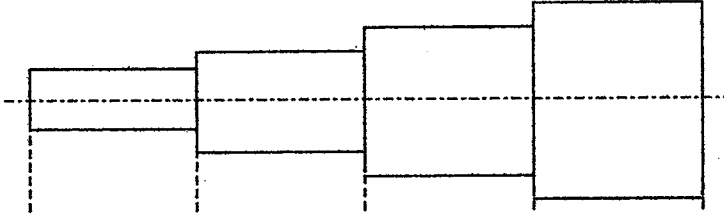
İletim borusunun giriş ağzında U_{f11} hava hızı (4.15.a) denklemi yardımı ile hesaplanır. Burada U_{f0} referans hava hızı ve P_0 (bar) atmosferik hava basıncıdır. Pnömatik iletim sürecinde boru içerisinde gelişen basınç kaybı P_{11} (bar mutlak) (4.13) denklemi ile hesaplanabilir.

$$U_{f11} = U_{f0} \cdot [P_0/P_{11}]^{1/2} \quad (4.15.a)$$

İletim hattı çıkış noktasındaki v_{42} hızını bulmak için (4.15.b) denklemi geçerlidir. Burada v_{11} iletim borusunun giriş ağzındaki hava hızıdır ve yukarıdaki (4.15.a) denklemi ile bulunur.

$$U_{f42} = U_{f0} = U_{f11} \cdot (P_{11}/P_0) \cdot (D_1/D_0)^2 \quad (4.15.b)$$

Şekil 4.3 Değişken kesitli boruda havanın özellikleri



P_{11}	$P_{12}=P_{21}$	$P_{22}=P_{31}$	$P_{32}=P_{41}$	$P_{42}=P_0$	Hava basıncı (bar)
ρ_{f11}	$\rho_{f12}=\rho_{f21}$	$\rho_{f22}=\rho_{f31}$	$\rho_{f32}=\rho_{f41}$	$\rho_{f42}=\rho_{f0}$	Hava Özg. Ağırl. (kg/m^3)
U_{f11}	U_{f12}, U_{f21}	U_{f22}, U_{f31}	U_{f32}, U_{f41}	$U_{f42} = U_{f0}$	Hava hızı (m/s)
D_1	D_{12}, D_{21}	D_{22}, D_{31}	D_{32}, D_{41}	$D_{42} = D_0$	Boru çapı (m)

1. Aşama:

Çizelge 4.2. Yüksek basınç yöntemli bir iletim tesisatının çok kademeli boru çapı uygulamasına göre tasarım gidiş diyagramı.

D_1 ile D_n Boru çaplarının tayini (genellikle kademe sayısı 4 alınır).

2. Aşama:

(4.15) Denklemine göre birinci kademe başlangıç noktası ile sıradaki her kademenin bitim noktası arasında oluşan basınç kaybının hesap edilmesi

3. Aşama:

2. Aşamada elde edilen sonuçlara göre her kademe boru hattı içinde oluşan ΔP_n basınç kaybının hesap edilmesi.

4. Aşama:

(4.16) Denklemine göre her kademenin ΔL_n boru hattı uzunluğunun hesaplanması

5. Aşama:

Her kademe üzerinde yatay ve dikey iletim boru hatları ile kıvrımlı

dirseklerin boru izometrisi üzerinde ayırımı

6. Aşama:

(4.15.a) Denklemine göre v_{11} başlangıç ve (4.15.b) denklemine göre son uçtaki v_0 hava hızının hesaplanması (4.17) denklemine göre karışım oranı ve (4.6) denklemine göre K katsayısının bulunması

7. Aşama:

Son kademedan geriye doğru her kademedeki basınç kaybının (4.13) denklemine göre hesaplanması

8. Aşama:

Kademelerdeki basınç kayıplarının toplamının alınması

İkinci aşamada bulunan basınçlar her kademedeki basınç kaybına çevrilir. Her kademenin ΔL_n uzunluğu bu kademelerdeki basınç kaybı ile orantılı olarak ΔL toplam iletim borusu uzunluğuna bölüştürülür.

$$\Delta L_n = \Delta L \cdot [(P_{n1}/P_{n2}) / (P_{11}/P_0)] \quad (4.16)$$

Bundan sonra iletim hattı sürecinde ne kadar yatay iletim, dikey iletim ve kıvrımlı dirseğin mevcut olduğu saptanır.

Her kademedeki basınç kaybını hesap etmek için karışım oranı ($X_{p,g}$) gerekmektedir.

$$X_{p,g} = M_p/M_g = [(4 \cdot M_p) / (\pi \cdot \rho_f \cdot D^2 \cdot U_f)] \quad (4.17)$$

M_p : İletim malı kitle debisi (kg/s)

M_g : İletim havası kitle debisi (kg/s)

ρ_f : Kademedeki iletim havasının özgül ağırlığı (kg/m³)

D : Kademe boru çapı (m)

U_f : Kademe sonundaki iletim havasının hızı (m/s)

Şimdi en sonuncu yani (n) kademesinde basınç kaybı (4.13) denklemine göre hesaplanır. Son kademenin başlangıcındaki olgu bundan bir önceki kademenin bitimindeki olguya bağlanmak sureti ile bu zincirleme bağlantı birinci kademeye kadar sürdürülür.

(K) katsayısının hesabı yapılırken (4.6) denkleminde en son parantez içinde yer alan (1) rakamı, ikinci kademedan başlanarak en sonuncu kademeyi de içermek üzere tüm öteki kademelerden kaldırılacaktır. Açık bir deyimle (1) rakamının yerini bu durumda (0) alacaktır. Bunun asıl nedeni, malın hız ivme kaybının ancak birinci kademede oluşması ve bundan sonraki kademelere yükselen hızla girmesidir.

İletim hattındaki tüm kademelerin basınç kayıpları toplamı ΔP basınç kaybını verir.

Böylece yeniden elde edilen başlangıç basıncı;

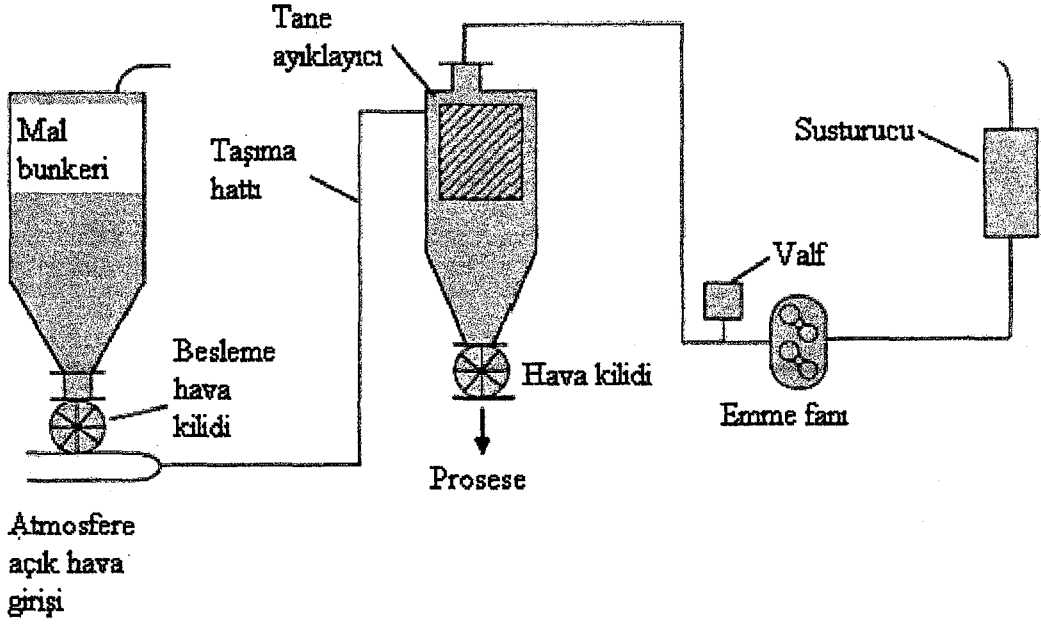
$$P_{11}=P_0+\Delta P \text{ olur.}$$

Bu basınç değeri, daha önce kabul edilen başlangıç basıncı ile karşılaştırıldığında eğer her iki basınç birbirinden farklı çıkıyorsa, aşağıdaki üç olabirlikten söz edilmelidir.

- a) P_{11} başlangıç basıncı, körük basınç kapasitesinden hayli farklıdır. Bu durumda boru çapları yeniden seçilmelidir.
- b) P_{11} başlangıç basıncı, Çizelge 4.1'de ki basınç kayıpları ile birlikte körük basınç kapasitesinin oldukça yakınında bulunmakta. Bu durumda daha sağlıklı değerler elde etmek için Çizelge 4.2'ye göre hesap tekrar edilebilir.
- c) Körük kapasitesi P_{11} ve Çizelge 4.1'de ki basınç kayıpları toplamını karşılayabilecek düzeydedir.

Tüm bu olabirliklerin yanında hesabın gidiş biçimine proje mühendisi kararını verecektir. Yapılan çok sayıda hesaplamalara göre sağlıklı bir P_{11} başlangıç basıncı elde edebilmek için sürdürülen tekrarlamalar sonunda bulunmuş olan değerlerin tipik bir yakınsama düzeyi izlediği bildirilmiştir. Kademeli yüksek basınçlı bir iletim tesisatı için önce bir hesap programı düzenlenmesi önerilir. Böyle bir program bu konu ile ilgili deneyimsel bilgilere göre kolaylıkla gerçekleştirilir ve özellikle yapılacak tekrarlamalarda hayli vakit kazandırır.

4.8 Havanın Sıkıştırılabilir Özelliği İlkesine Göre Emme Yöntemli Pnömatik İletim



Şekil 4.4 Emme yöntemi pnömatik iletim tesisatı

4.8.1 Genel

Pnömatik emme yöntemi iletim tesisatının başlangıcında atmosferik basınç, sonunda yani körük öncesinde bir negatif egemendir. Böylece emme yöntemi iletim tesisatında ki basınç kaybı 1 bar (atmosferik basınç) ile sınırlıdır. Bu bölümde açıklanacağı üzere ekonomik bir işletme ancak 0,5 bar düzeyinde bir basınç farkına göre düzenlenir.

4.8.2 Hava Hızı

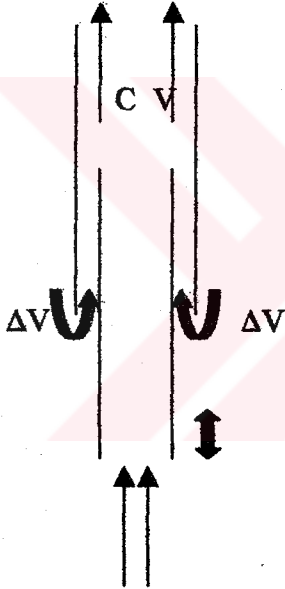
Pnömatik emme yöntemi iletim tesisatında başlangıçta, yani emme ağızlığında hava hızı v_0 olup iletim malının türüne göre EK-1 'de verilen tablodan seçilebilir. İletim hattı sürecinde dinamik basınç havanın genişmesi ile artacağından v_0 ve boru çapı sağlıklı bir şekilde seçildiği takdirde iletim hattının hangi noktasında olursa olsun gerekli minimum dinamik basıncın altına düşülmemiş olur.

Emme yöntemi bir tesisatta iletim hattı sürecinde ki hava hızının artışı, ΔP farkı aynı olan basınç yöntemi bir tesisatın hava hızı artışından daha şiddetli olur. Çünkü (4.10) denklemine göre hava hızları mutlak basınçlarla orantılıdır. İletim hattının sonunda aşırı hava hızlarından kaçınmak için iletim borusunun çapı, basınç yöntemi tesisatta olduğu gibi (4.12) denklemine göre kademelendirilir. Basınç yöntemi tesislerde iletim borusunu dört veya daha çok kez

kademlendirme olanağı varken emme yöntemli tesislerde ancak bir kez kademlendirme yapılabileceği bildirilmektedir.

Emme yöntemli tesislerin çoğunda dikey veya yatay bir veya iki teleskopik emme ağızlığı bulunur. Teleskopik borular birbiri içerisine sokulmuş (Bkz. Şekil 4.5) borulardır. Bu borular genellikle yapımdaki olanakların eğerdiği tolerans düzeyinde birbirleri ile uyumlaşır. Bunların çoğunda sızdırmazlık söz konusu değildir. Böylece hava basınç farkı nedeni ile geçme aralığı yüzeyini yalayarak akın eder.

Burada emilen yalama havasının miktarı dinamik basıncı yükseltirken boru çapının genişlemesi ile düşürür. Yalama havasının miktarı bu aralığın uzunluğuna bağımlı olarak teleskopik borunun bütünü ile dışarı çekilmesi durumunda maksimuma erişir.



Şekil 4.5 Emme yöntemli pnömatik iletim tesisatında teleskopik boru

v: iletim havası akımı

c: iletim malı akımı

ΔV : yalama havası akımı

4.8.3 Basınç Kaybı

Emme yöntemli bir pnömatik iletim tesisatında oluşan basınç kaybı aşağıdaki denklem ile hesap edilir.

$$\Delta P = P_0 \cdot \{1 - [1 - (K \cdot \rho_{f0} \cdot U_{f0}^2 / P_0)]^{1/2}\} \quad (4.18)$$

ΔP : Toplam basınç kaybı (N/m^2)

P_0 : Atmosferik hava basıncı

K : Toplam basınç kayıp katsayısı

ρ_{f0} : Atmosferik havanın özgül ağırlığı (kg/m^3)

U_0 : Gerekli iletim havası hızı (EK-1'den bulunabilir.)

4.8.4 Emme Yöntemli Pnömatik İletim Tesisatında Basınç Kaybının Sınırları

(4.18) denklemine göre yapılan basınç kaybı hesabında ΔP reel değerinin tahkik edilmesi gerekir. Bunun için (4.18.a) ve (4.18.b) denklemleri geçerlidir.

$$K \leq P_0 / (\rho_{f0} \cdot U_0^2) \quad (4.18.a)$$

$$1 - (K \cdot \rho_{f0} \cdot U_0^2) / P_0 \geq 0 \quad (4.18.b)$$

Önce elde edilebilecek olan maksimum teorik karışım oranı $X_{p,g}$ 'nin sınır değerinin tahkiki yapılır. Bunun için (4.18.a) denklemi yardımı ile K değeri bulunur. Sonra (4.3) denkleminde yerine koyularak karışım oranı hesaplanır.

$$K \leq K_H + X_{p,g} \cdot K_S$$

$$X_{p,g} \leq (K - K_H) / K_S \text{ olur.}$$

Bundan sonra emme basıncının (mutlak) sınır değeri (4.18.b) denklemine göre tahkik edilir. Bu denklemle bulunacak sonuç değerinin sıfırdan büyük olması gereklidir.

Emme yöntemli bir pnömatik iletim tesisatının boru çapı ve iletim yolu verilmiş olsa, malın debisi belli bir değer ile sınırlanır. Bunun tersi, belli bir mal debisi ve iletim yolu bildirildiğinde boru çapı belirlerken (4.18.b) denklemi doğrultusunda gereği yapılmalıdır.

4.8.5 Havanın Sıkıştırılabilir Özelliği İlkesine Göre Emme Yöntemli Pnömatik

İletim Tesisatının Tasarımı

Çizelge 4.3'de emme yöntemli bir pnömatik iletim tesisatının hesabına ilişkin diyagram düzenlenmiştir. Bu diyagram 1., 2. ve 3. aşamalarında basınç yöntemli iletimde olduğu gibi havanın sıkıştırılabilir özelliği dikkate alınmayacaktır. Dördüncü aşamada karışım oranı ve toplam basınç katsayısının hesabı basınç yöntemli tesisatta olduğu gibi yapılır.

1., 2. ve 3.Aşama: Çizelge 4.3 Emme yöntemi bir pnömatik iletim tesisatının tasarım akış şeması

Çizelge 4.1'de olduğu gibi

4.Aşama:

Basınç kaybı
Karışım oranının (4.17.) denklemine göre hesabı
K katsayısının (4.6.) denklemine göre hesabı
ΔP basınç kaybının (4.18.) denklemine göre hesabı
Kademelendirme olasılığı (4.12. denklemine göre)

5.Aşama:

Hava debisi
Hava debisi (4.19. denklemine göre)
Sistemde ki kaçak hava debisi tespiti
Tüm hava debisi (4.20. denklemine göre)
Körük hava debisi (4.21. denklemine göre)

7., 8. ve 9.Aşama:

Çizelge 4.1'de olduğu gibi

Önce ΔP basınç kaybı (4.18) denklemine göre hesaplanır.

Beşinci aşamada hava debisi V_{H0} ve körük debisi V_K hesaplanır.

$$V_{g0} = (\pi/4).D^2 . U_0 \quad (4.19)$$

V_{g0} : Emme hava debisi (m^3/s)

D : Boru çapı (m)

U_0 : İletim havası hızı (m/s)

Hesaplanan V_{g0} hava debisine göre mal çıkış ağızlığındaki olası hava kaçağı debisi V_z eklenecektir. Böylece ;

$$V_g = V_{g0} + V_Z \quad (4.20)$$

Pnömatik iletim tasarımında, henüz yeni görev alan genç mühendislerin körük emiş hunisi ağzında ki çok önemli olan hava debisini bazı kez unuttukları bildirilmektedir. Halbuki körük verdisi daima emiş hunisi ağzındaki olguya dayandırılacağından (4.20) denklemine göre elde edilen V_H hava debisinin egemen olan basınca göre izometrik olguya çevrilmesi gerekir.

(4.21) denkleminde yer alan ΔP mal giriş ağızlığından körük emiş hunisine kadar oluşan basınç kaybıdır.

$$V_K = V_g + P_0 / (P_0 - \Delta P) = V_g / (1 - \Delta P / P_0) \quad (4.21)$$

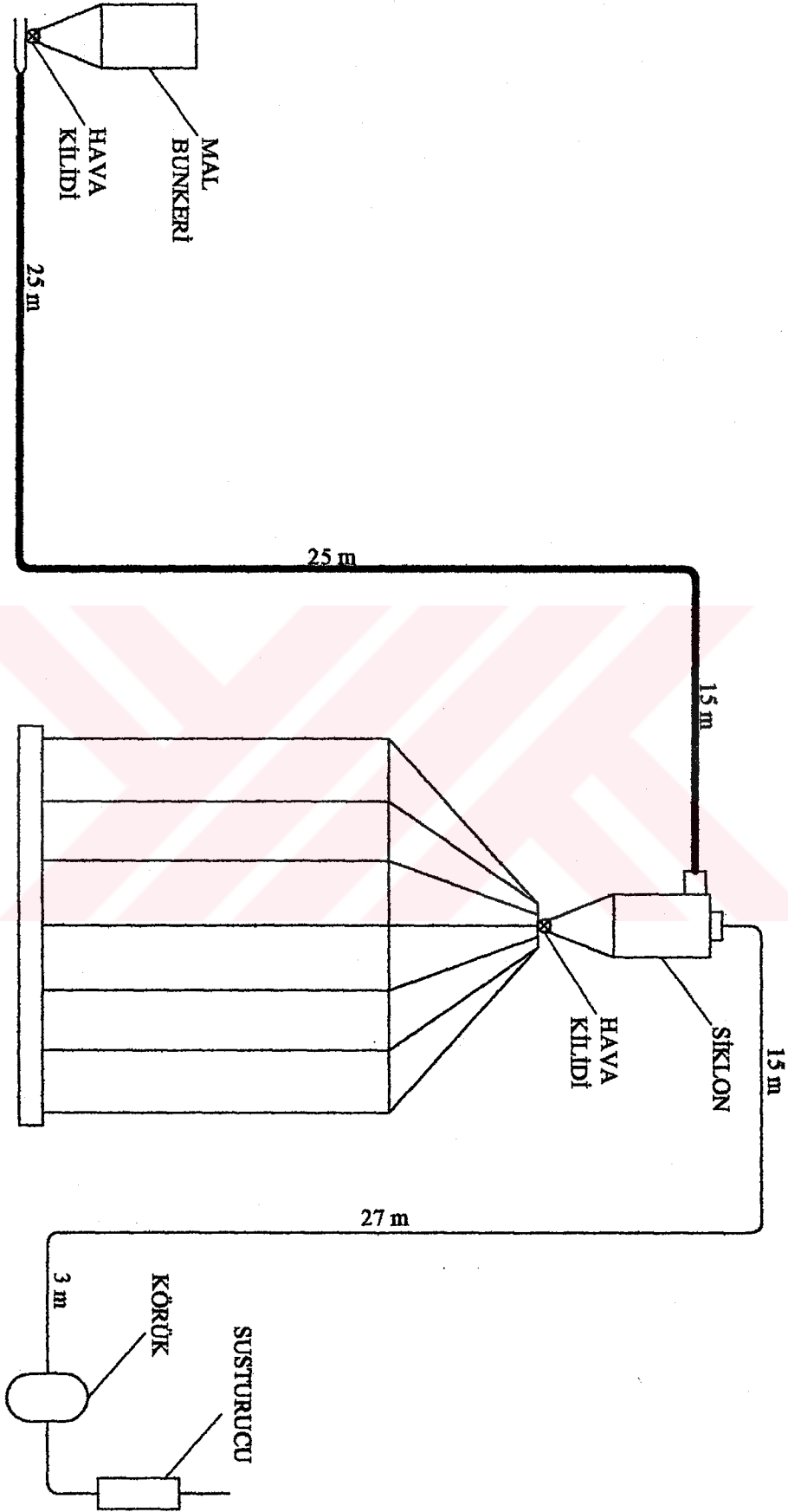
V_K : Körük debisi (m^3/s)

V_g : İletim havası debisi (m^3/s)

P_0 : Atmosferik hava basıncı (N/m^2)

ΔP : İletim boru hattı sürecinde mal emme ağızlığından körük emiş hunisi ağzına kadar oluşan toplam basınç kaybı (N/m^2) (4.18 denklemine göre)

4.9 Hesap Örneği



Şekil 4.6 Örnek problem için emme yöntemli pnömatik iletim tesisi şeması

2 kg/s mal debisine sahip Şekil 4.6 'deki gibi bir taşıma yolunda buğday için gerekli hesapların yapılması ile ilgili bir örnek yapalım.

Taşınacak mal : Buğday

Buğday için EK-1'den malzeme özellikleri bulunabilir.

Buğday tane çapı : $d_p = 3,9$ mm

Buğday yoğunluğu : $\rho_p = 1380$ kg/m³

Gerekli taşıma havası hızı : $U_f = 25$ m/s

Basınç kayıp katsayısı: $\alpha = 0.04$

Mal debisi : $M_p = 2$ kg/s

Hava sürtünme katsayısı: $\lambda = 0.02$

Hız oranı: $\beta = 0.7$

Kıvrımlı dirsek sayısı: $i = 2$

Sistemde $\Delta P = 0,7$ bar ve $V_K = 3000$ m³/h olan bir pistonlu körükten yararlanılması düşünülsün.

$\Delta P_s = 0,75$. $\Delta P = 0,75 \cdot 0,7 = 0,525$ bar = 52500 Pa.

(4.5) formülü ile K_s ;

$$\begin{aligned} K_s &= \alpha \cdot \Delta L + (2 \cdot \Delta h \cdot g) / (\beta \cdot U_f^2) + 2 \cdot \beta \cdot (1+i/2) \\ &= 0,04 \cdot 65 + (2 \cdot 25 \cdot 9,81) / (0,7 \cdot 25^2) + 2 \cdot 0,7 \cdot (1+2/2) \\ &= 2,6 + 1,12 + 2,8 = 6,52 \end{aligned}$$

(4.7) formülü ile boru çapı D;

$$\begin{aligned} D &= [(2 \cdot K_s \cdot M_p \cdot U_f) / (\pi \cdot \Delta P_s)]^{1/2} \\ &= [(2 \cdot 6,52 \cdot 2 \cdot 25) / (\pi \cdot 52500)]^{1/2} \\ &= 0,063 \text{ m} = 63 \text{ mm} \end{aligned}$$

DIN 2448'e göre boru çapını $D = 82,5$ mm (88,9x3,2 – DIN 2448) seçebiliriz.

(4.17) ile karışım oranı;

$$X_{p,g} = M_p / M_g = [(4 \cdot M_p) / \pi \cdot \rho_f \cdot D^2 \cdot U_f]$$

$$= [(4.2)/\pi \cdot 1,2 \cdot 0,0825^2 \cdot 25]$$

$$= 12,47$$

Basınç kaybı katsayısı K ;

$$K = K_H + X_{p,g} \cdot K_S$$

$$K_H = \lambda_H \cdot \Delta L / D$$

$$K_H = 0,02 \cdot 65 / 0,0825 = 15,76$$

$$K = K_H + X_{p,g} \cdot K_S = 15,76 + 12,47 \cdot 6,52 = 97,1$$

Basınç kaybı (4.18) formülü yardımı ile

$$\Delta P = P_0 \cdot \{1 - [1 - (K \cdot \rho_{f0} \cdot U_{f0}^2 / P_0)]^{1/2}\}$$

$$= 100000 \cdot \{1 - [1 - 97,1 \cdot 1,2 \cdot 25^2 / 100000]\}$$

$$= 47870 \text{ Pa} = 0,478 \text{ bar}$$

Siklondaki basınç kaybı ;

EK 2'de verilen orta basınçlı siklon ebat tablosundan OBS-82 tipi siklon seçilirse basınç kaybı 112 mmSS okunur.

$$\Delta P_{\text{siklon}} = 0,011 \text{ bar}$$

sadece hava akımının olduğu boru kısmındaki basınç kaybı;

$$\Delta P = \lambda \cdot (L/2D) \cdot \rho_f \cdot U_f^2 = 0,02 \cdot (45/2 \cdot 0,0825) \cdot 1,2 \cdot 25^2 = 4091 \text{ Pa} = 0,041 \text{ bar.}$$

Toplam basınç kaybı ;

$$\Delta P_{\text{top}} = 0,478 + 0,011 + 0,041 = 0,53 \text{ bar.}$$

Şimdi yatay boruda ve dikey boruda tıkanma ve çökme hızlarını tespit edelim.

Dikey boruda tıkanma anındaki boşluk oranı formül (2.4.) ile;

$$\varepsilon_{CH} = 0,03 \cdot \rho_p + 0,91 \quad (\rho_p \text{ [gr/cm}^3\text{)])}$$

$$= 0,03 \cdot 1,38 + 0,91 = 0,951$$

Dikey boruda tıkanma anındaki hava hızı formül (2.3.) ile;

$$G_{ch} = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_{CH}) \cdot (U_{CH} - U_T) \Rightarrow U_{CH} = 17 \text{ m/s bulunur.}$$

Yatay boruda çökme hızı

$$U_{SALT} = \left[\frac{4M_p 10^\alpha g^{\frac{\beta}{2}} D^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi \rho_f} \right]^{\frac{1}{\beta+1}}$$

$$\alpha = 1440.dp + 1,96 \text{ ve } \beta = 1100.dp + 2,5$$

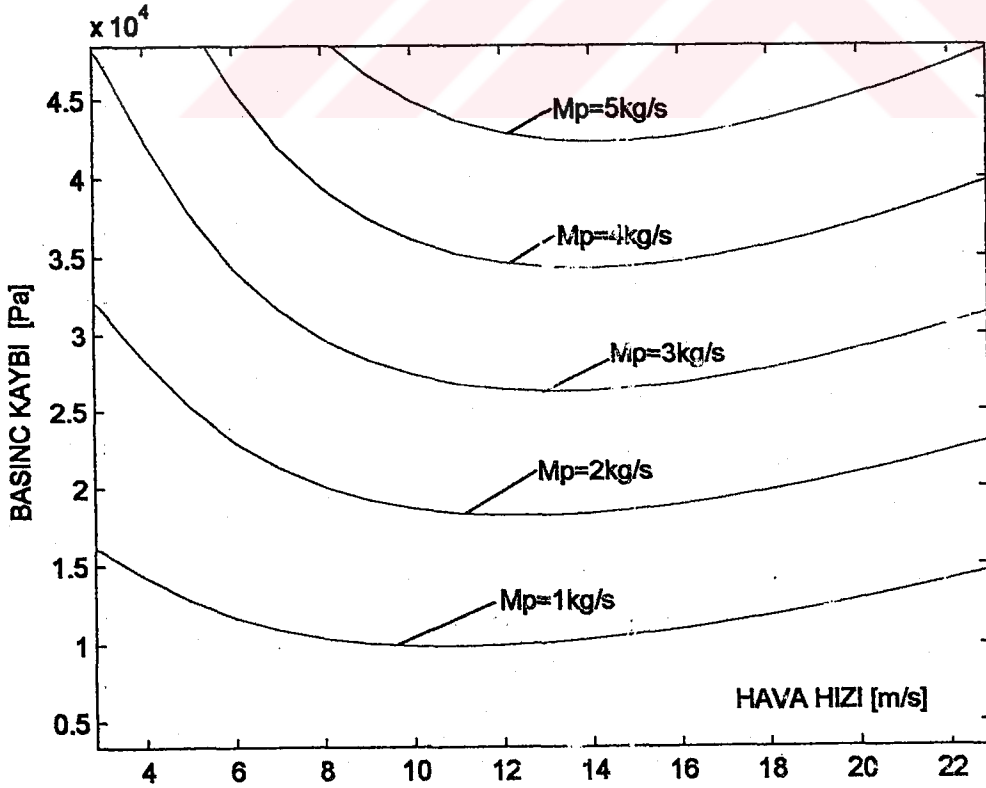
$$\alpha = 1440.0,0039 + 1,96 = 7,576$$

$$\beta = 1100.0,0039 + 2,5 = 6,79$$

$$\Rightarrow U_{SALT} = 21,2 \text{ m/s bulunur.}$$

Hesap edilen sistemde hava hızını değiştirip buna bağlı olarak basınç kaybını değişik yükleme oranları için hesaplırsak Şekil 4.7'deki grafiği elde ederiz.

Bu grafikten de görüldüğü gibi yavaşlayan hava ile birlikte basınç kaybı azalmaktadır ancak bir noktadan sonra basınç kaybında boru yüzeyine çöken tanecikler nedeni ile artma meydana gelmektedir.



Şekil 4.7 Değişken yükler için hava hızı ile basınç kaybı ilişkisi

5 SONUÇ

Dökme malzemelerin pnömatik taşınmasında en önemli parametrelerden biri olarak karşımıza taşıma hızı çıkmaktadır. Taşıma hızının düşük olması enerji kullanımını, boru ve parçacık aşınmalarını azaltır. Ancak taşıma hızının çok azaltılması, sistemde taşınan dökme malzemenin boru tabanına toplanarak kalıcı bir tabaka oluşturmasına ve pnömatik taşıma sisteminde basınç kaybının artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla gaz hızı, optimum taşıma hızı adı verilen bir hızın altına düşürülmemelidir.

Bu çalışmada optimum taşıma hızı ile ilgili araştırmalar yapmış araştırmacıların belirli sınırlamalar altında tavsiye ettikleri korelasyonlar verilmiştir. Ayrıca uygulamada çeşitli malzemeler için hız sınırları çizelge halinde sunulmuştur.

Pnömatik taşıma sistemlerinin dizaynında akım tipi olarak genellikle seyrek fazlı akım kullanılmakla birlikte son zamanlarda çeşitli avantajlarından dolayı yoğun fazlı akımda taşıma sistemlerinin dizaynı konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Ancak yoğun fazlı akımda taşıma hız sınırının bilinmesi taşıma karakterinin kararsızlığı yüzünden çok önemli bir problem oluşturmaktadır ve henüz kesin olarak tanımlanamamıştır. Bu tip sistemlerde çoğunlukla tecrübi değerler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada seçilen örnek pnömatik nakil sistemi araştırmacıların deneysel verileri kullanılarak sabit katı partikül naklinde nakil hızları değiştirilerek basınç kayıpları teorik olarak hesaplanmıştır.

Sonuçta mal debisi arttırıldıkça minimum hava taşıma hızının da yükseldiği görülmüştür. Ayrıca yüksek mal debilerinde aynı hızlardaki basınç kayıplarının da orantılı olarak yükseldiği bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 4.7'de diyagram halinde verilmiştir.

Pnömatik taşıma sistemlerinin her türlü probleme cevap verebilmesi için bilgi birikiminin daha güncel hale getirilmesi gereklidir. Sınırlı deneysel tecrübelerle dayanarak yapılan dizaynlar bu konuda ancak bir ilk adım teşkil edebilir. Taşıma hızının belirlenmesi için gerekli olan korelasyonların gerçek şartlar ile daha büyük yaklaşıklık düzeyine getirilmesi ve bu korelasyonlarda sistemle ilgili parametrelerin bütün olarak kullanılması gerekmektedir. Böylelikle yapılacak daha kapsamlı akademik çalışmalarda pratik uygulamaların daha başarılı sonuçlar vermesi sağlanabilecektir. Sadece teori ve uygulama olarak değil diğer temel bilimler ve ileri teknolojilerle bu çalışmaların desteklenmesi gerekir.

KAYNAKLAR

- Arastoopour, H., (1986), "Pneumatic Transport of Solids", Gulf Publishing, Houston.
- Arun, N., Akkoç, H., (1997), "Pnömatik İletim Temel Bilgileri", Makine Mühendisleri Odası, Yayın No:205
- Colijn, H., (1987), "Achieving high reliability from gravity flow hoppers and bins and pneumatic conveying system", National Material Handling Forum, Washington.
- Gerchow, F.J., (1986), "Dilute Phase Pneumatic Conveying", Gulf Publishing, Houston.
- Karakuş, C., Akalın, H., (2002), "Pnömatik Taşıma Sistemlerinde İki Fazlı Katı-Gaz Akışında Optimum Taşıma Hızının Belirlenmesi", Mühendis ve Makine, Sayı:514
- Matsumoto, S., Hara, M., Saito, S., Maeda, S., (1974), "Minimum Transport Velocity For Horizontal Pneumatic Conveying", J. Chemical Engineering of Japan, Vol.7, No.6.
- Marchello, J.M., Gomezplata, A., (1976), "Gas Solids Handling In The Process Industries", Marcel Dekker, Inc., New York.
- Peter, W., (2000), "Prediction of Optimal Operating Conditions For Dense Phase Pneumatic Conveying System", International Fine Particle Research Institute, New York.
- Reed, A.R., (1991), "Advances In The Design Of Pneumatic Conveying System", A United Kingdom Perspective, Bulk Solids Handls, London.
- Rizk, F., (1986), "Principles Of Pneumatic Conveying", Gulf Publishing, Houston.
- Tuç, B., Gemalmayan, N., (2003), "Malzeme Yoğun Fazlı Pnömatik Taşıma Sistemleri", Makine Mühendisleri Odası İletim Teknolojileri Kongre Ve Sergisi, İstanbul.
- Wright, P.H., Ashford, N.J., (1989), "Transportation engineering", John Wiley & Sons, New York.

INTERNET KAYNAKLARI

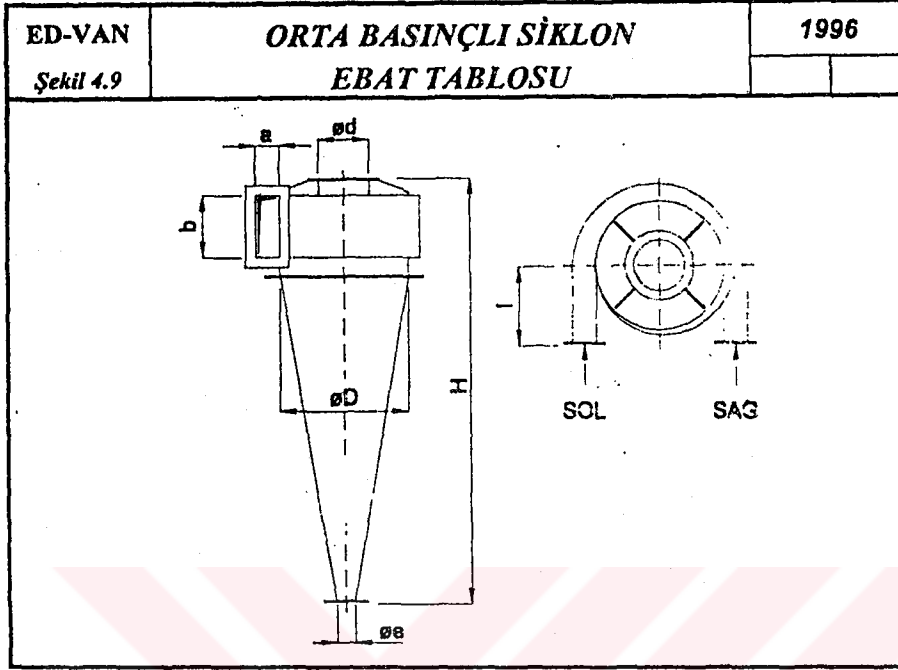
- [1]www.bulk-online.com
- [2]www.cheresources.com
- [3]www.directindustry.com
- [4]www.egnetglobal.com
- [5]www.engineeringtoolbox.com
- [6]www.erpt.org

EKLER

Ek 1 Pnömatik Yüzer Ortamlı İletimde Önemli Bazı Yiğın Mallara İlişkin Veriler

İleti malı	Tane çapı d_p (mm)	Tanenin öagül ağırlığı ρ_p (kg/m ³)	Yiğın malın yoğunluğu ρ_b (kg/m ³)	İletim borusunda gerekli hava hızı U_f (m/s)	Boru çapına bağlı basınç kayıp katsayısı α
Arpa	4,0	1420	690	20-25	0,04
Ağaç dilimleri	100x50x4	720	500	23-27	0,08
Ağaç talaşı	50x20x1	470	150-400	22-25	0,04
Buğday	3,9	1380	730	22-27	0,04
Buğday kepeği	1,0	1470	300	20-25	0,06
Buğday unu	0,09	1470	540	18-23	0,08
Cam bilyacıklar	1,14	2990	1780	22-27	0,06
Çavdar	3,0	1180	620	22-25	0,04
Çelik bilyacıklar	1,08	7850	4420	25-35	0,12
Çimento	0,05	3100	1420	20-25	0,18
Çimento (farin)	0,05	3100	960	20-25	0,15
Çinko oksidi	0,1	4850	2000	25-30	0,15
Testere tozu	0,7	470	190	20-25	0,04
Hayvan yemi	0,86	1370	540	22-25	0,06
Kaya tuzu	1,6	2190	1200	22-27	0,08
Malt	3,7	1370	540	20-22	0,04
Mısır (kuru)	7,7	1300	680	22-25	0,04
Mısır irmiği	0,75	1440	450	23-25	0,06
Mısır unu	0,19	1400	460	23-25	0,1
Mika (ham)	0,93	2550	830	25-30	0,09
Odun selülozu	0,35	1230	370	22-25	0,06
Pirinç	2,7	1620	800	20-25	0,06
Pirinç kabuğu	2,5	1280	105	18-20	0,04
P.Propilen granülü	3,5	1000	500	20-25	0,04
PVC-Pulver	0,2	1320	570	20-25	0,1
P.Etilen granülü	3,5	1070	500	20-25	0,04
Prina (kuru)	0,96	680	260	20-22	0,04
Sellüloz-pulver	0,04	1380	230	20-25	0,04
Soya	6,3	1270	690	22-25	0,04
Sabun (rende)	20x5	1100	600	23-27	0,08
Toz şeker	0,52	1610	860	20-25	0,08
Yulaf	3,4	1340	510	22-25	0,04

Ek 2 Siklon Seçim Tablosu



Tablo 4.3 Spiral akımlı orta basınçlı siklon ölçüleri

TİP	ØD	GİRİŞ AĞZI		Ød	Øe	I	H	DEBİ m ³ /h	BASIN Ç KAYBI mmSS
		a	b						
OBS 35	350	65	170	150	50	201	945	576	118
OBS 46	460	80	240	210	100	300	1370	1080	124
OBS 58	580	100	280	260	150	365	1620	1620	123
OBS 70	700	120	340	315	150	420	2050	2340	120
OBS 82	820	140	400	380	150	500	2450	3240	112
OBS 94	940	170	480	450	200	550	2700	4320	100
OBS 115	1150	200	570	530	250	650	3250	6480	117
OBS 137	1370	240	680	630	250	780	3970	9360	120
OBS 155	1550	275	700	710	300	880	4300	11160	120
OBS 185	1850	320	900	850	300	1050	5200	16560	118
OBS 204	2040	360	1000	960	400	1135	5800	20160	111
OBS 236	2360	410	1200	1120	400	1275	6800	27360	110
OBS 275	2750	480	1300	1250	450	1550	8100	36000	120

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	22.02.1980	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1994-1997	50. Yıl Avcılar İnsa Lisesi
Lisans	1997-2001	Uludağ Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Çalıştığı kurum	2001-2003	T.K.M. Yem Makinaları San. Ltd Şti.

