

# TEĞETSEL GİRİŞLİ TERS AKIŞLI SIKLONLARDA DALMA BORUSU ÇAP DEĞİŞİMİNİN BASINÇ KAYBINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

**Ferit FIÇICI\*, Vedat ARI\*\***

\*Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 41400, Gebze, Kocaeli

\*\*Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi, 54187, Sakarya

Geliş Tarihi : 12.09.2007

Kabul Tarihi : 08.04.2008

## ÖZET

Siklonlar içinde katı parçacıklar bulunan bir gaz akımının sınırları belli bir girdaba dönüştürülmesi sonucu meydana gelen merkezkaç kuvveti ile katının gazdan ayrılması işleminde kullanılan sabit parçalı cihazlardır. Basit yapılı olması, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gibi ağır şartlarda çalışması siklonların en büyük avantajlarıdır. 5 µm'den küçük partiküllerde veriminin düşük olması ise dezavantajdır. Siklonlarda mühendislik açısından iki önemli parametre vardır. Bu parametreler, siklon basınç kaybı ve toz tutma verimidir. Bunlardan siklon basınç kaybının ekonomi açısından önemi vardır. Bunun nedeni siklon basınç kaybının fan gücünü etkilemesidir. Siklonlarda basınç kaybı siklon giriş kesitinde, siklon iç duvarında ve siklon çıkış borusu yani dalma borusunda meydana gelir. Bu çalışmada teğetsel girişli ters akışlı siklonlardaki dalma borusu çap değişiminin basınç kaybına etkisi deneysel olarak incelendi.

**Anahtar Kelimeler :** *Siklon, Dalma borusu, Basınç kaybı.*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECT OF VENT PIPE DIAMETER CHANGING IN TANGENTIAL INLET REVERSE FLOW CYCLONES ON PRESSURE DROP

### ABSTRACT

Cyclones which are useful to separate particles from particle-gas mixture by spinning movement of centrifugal forces, are stationary pieced devices, main advantages of Cyclones are that they are simple and also operate under heavy conditions such as high temperature and high pressure. However, it is the disadvantage that for the particles whose size is less than 5 µm, collection efficiency is low. From an engineering point of view, there are two important parameters in Cyclones. They are the cyclone pressure loss and particle collection efficiency. One of them, cyclone pressure loss has got economically importance since cyclone pressure loss effects fan power. Cyclone pressure losses occur in cyclone inlet cross-section, cyclone inner wall, and cyclone vent pipe. In this study, the effect of vent pipe diameter changing in tangential inlet reverse flow cyclones on pressure drop is investigated experimentally.

**Key Words :** *Cyclone, Vent pipe, Pressure drop.*

## 1. GİRİŞ

Siklonlar, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle gaz+partikül karışımından girdap hareketiyle partikülleri gazdan ayırmaya yarayan sabit parçalı cihazlardır (Arı, 2000). Basit yapılı olmaları, düşük maliyet bedelleri ve kolay bakımlarından dolayı diğer pahalı ön temizleyicilerden örneğin elektrostatik çöktürücülerden daha ideal olarak kullanılırlar (Jiao v.d., 2006). Siklonlar kaba dizaynları ve esnek bileşen malzemelerinden dolayı yüksek sıcaklık ve basınç şartlarında çalışmaya daha uygundur. Siklon tutma verimliliği 5 µm'den daha büyük partiküllerde % 99'a yakındır (Cooper ve Alley, 1986). Çok yüksek toz yüklemelerinde, yani toz yoğunluğunun daha yüksek olduğu gaz+partikül karışımlarında, rahatlıkla çalışılabilir. Siklonlar hem hava kirliliği hem de diğer endüstriyel proses işlemlerinde büyük partiküllerin uzaklaştırılmasında kullanılır. Örneğin, güç santrallerindeki kömür tozlarının uzaklaştırılmasında, sprey kurutucu veya gazlaştırıcı reaktörler gibi aşırı çalışma şartlarını içeren uygulama alanlarıdır (Gimbun v.d., 2005).

Mühendisler siklon performansını değerlendirmek için siklonun iki parametresiyle ilgilenirler. Bu parametreler siklon basınç kaybı ve partikül tutma verimliliğidir. Siklon basınç kaybını net olarak belirlemek çok önemlidir. Çünkü basınç kaybı işleme maliyetleriyle doğrudan ilişkilidir. Bunun nedeni siklon basınç kaybının fan gücünü belirlemesidir (Qian v.d., 2007).

## 2. SIKLON BASINÇ KAYBI

Genellikle basınç kaybı siklon giriş ve çıkış arasındaki statik basınç farkı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Chen and Shi, 2007):

$$\Delta P = P_{si} - P_{so}$$

Siklonlarda toplam basınç kaybı siklon giriş, çıkış ve siklonun gövdesinde meydana gelen kayıpları içerir. Basınç kaybının asıl kısmı örneğin % 80'i, türbülanslı ve girdaplı akıştan kaynaklanan enerji dağılımı ile oluşur. Geriye kalan % 20'lik kısım ise siklon duvar yüzeyinde oluşan akışkan sürtünmesi, girişteki genişleme ve çıkıştaki büzülmeden kaynaklanan basınç kaybıdır (Wang v.d., 2004).

Geleneksel siklon ayırıştırıcılarda toplam basınç kaybı dört kısma ayrılır (Zhao, 2004):

1. Siklon girişinde gaz genişlemesinden dolayı basınç kaybı
2. Siklon içindeki duvar sürtünmesinden dolayı basınç kaybı
3. Gazın girdap hareketinden dolayı basınç kaybı
4. Dalma borusu boyunca gaz akışından dolayı basınç kaybı

### 2. 1. Siklon Girişinde Gaz Genişlemesinden Dolayı Basınç Kaybı

Siklon girişindeki gaz genişlemesinden dolayı basınç kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta P_{in} = \xi_{in} \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot V_{in}^2 \right) \quad (1)$$

Bu basınç kaybı sağ borudan sınırlanmış alana kadar uniform akış kabul edilerek hesaplanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\xi_{in} = \left[ 1 - \frac{ab}{(R_w - re)H} \right]^2 \quad (2)$$

### 2. 2. Siklon İçindeki Duvar Sürtünmesinden Dolayı Basınç Kaybı

Siklon içindeki duvar sürtünmesinden dolayı basınç kaybı, siklon separatörlerin içindeki statik denge altında belirtilir.

$$\Delta P_{fr} = \left[ \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D^2 - de^2) \right] = c1 [\tilde{\tau}_{\theta v} (\pi \cdot D \cdot L)] \quad (3)$$

c1, siklon separatör duvarındaki düzgün akışla ilgili girdap akış düzeltme faktörüdür. Stepherd ve Lapple'nin metoduna göre:

$$c1 = \frac{\pi \cdot D}{a} \quad (4)$$

$\tilde{\tau}_{\theta v}$ , dış girdap içindeki gazın ana kayma gerilimidir ve Fanning'in denklemine göre hesaplanabilir:

$$\tilde{\tau}_{\theta v} = f \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot \bar{V}_{\theta w}^2 \right) \quad (5)$$

Burada,  $f=0,0055$

$\bar{V}_{\theta w}$ , dış girdap içindeki ana teğetsel hızdır ve aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\bar{v}_{\theta w} = \frac{1}{(R_w - re)} \int_{re}^{R_w} v_{\theta} dr \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemler birleştirilip son haliyle aşağıdaki gibi yazılır;

$$\Delta P_{fr} = \frac{(\pi D/a)(\pi DL)f}{1/4\pi(D^2 - de^2)} \left[ \frac{1}{(R_w - re)_{in}} \int_{re}^{Re} v_{\theta} dr \right]^2 \left( \frac{1}{2} \rho_g \cdot v_{in}^2 \right) \quad (7)$$

### 2. 3. Gazın Girdap Hareketinden Dolayı Basınç Kaybı

Silindirik koordinatlardaki Navier-Stokes denklemlerinden, basınç ve 3D hız arasındaki ilişki aksenal etkiler ihmal edilerek basitleştirilebilir:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho_g \cdot v_{\theta}^2}{r} \quad (8)$$

Casal v.d. (1983)'e göre, akış modeli çevresi veya duvar pürüzlülüğünü içeren hız profili aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v_{\theta} = \frac{v_{\theta w}}{(r/R_w) \left[ (1 + P(1 - r/R_w)) \right]} \quad (9)$$

$$v_{\theta w} = \frac{vd}{\xi \cdot h^*} \left( \sqrt{\frac{1}{4}} + \xi \cdot h^* \frac{v_{\theta w}^*}{vd} - \frac{1}{2} \right) \quad (10)$$

$$v_{\theta w}^* = vd \frac{\pi R^2 w}{ab \left[ -0,204(b/R_w) + 0,889 \right]} \quad (11)$$

$$vd = \frac{Q}{\pi R^2 \cdot w} \quad (12)$$

$$h^* = \frac{a}{R_w} \left[ \frac{2\pi - \arccos(b/R_w - 1)}{2\pi} - 1 \right] + \frac{h}{R_w} \quad (13)$$

$$P = \frac{v_{\theta w}}{vd} \left( \xi + \frac{\xi}{\sin \epsilon} \right) \quad (14)$$

$$Q = (a \cdot b) v_{in} \quad (15)$$

Burada;

$$\xi = 0,0065 \sim 0,0075$$

Yukarıdaki denklemler birleştirilip son haliyle aşağıdaki gibi yazılır;

$$\Delta P_{vf} = \left[ \int_{re}^{R_w} \frac{2(v_{\theta w} / vd)^2 (a \cdot b / \pi R_w^2)^2}{r(r/R_w)^2 (1 + P - Pr/R_w)^2} dr \right] \left( \frac{1}{2} \rho_g \cdot v_{in}^2 \right) \quad (16)$$

### 2. 4. Dalma Borusu Boyunca Gaz Akışından Dolayı Basınç Kaybı

Bu basınç kaybı kısmi basınç kaybı ve dalma borusu içindeki sürtünme basınç kaybını içerir.

$$\Delta P_{out} = \Delta P_{al} + \Delta P_{of} \quad (17)$$

Yerel basınç kaybı, siklon gövdesinden çıkış borusuna kadar gaz akış konsantrasyon kaybı olarak ele alınır.

$$\xi_{ol} = \frac{1}{2} \left( \frac{a \cdot b}{\pi \cdot re^2} \right) \left[ 1 - \left( \frac{re}{R_w} \right)^2 \right] \left( \frac{1}{2} \rho_g \cdot v_{in}^2 \right) \quad (18)$$

Dalma borusu içindeki güçlü girdap akışı yüzünden, bu basınç kaybı benzer yolla hesaplandı.

$$\Delta P_{of} \left( \frac{1}{4} \pi \cdot de^2 \right) = \dot{c}_2 \left[ \bar{v}_{\theta v} \cdot \pi \cdot de (S + \Delta S) \right] \quad (19)$$

$$\dot{c}_2 = \frac{\pi \cdot de}{de} \quad (20)$$

$$\bar{v}_{\theta v} = f \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot \bar{v}_{\theta v}^2 \right) \quad (21)$$

Burada  $\bar{v}_{\theta v}$ , iç girdap içindeki gazın ana kayma gerilmesidir ve  $\bar{v}_{\theta v}$ , iç girdap içindeki ana teğetsel hızdır ve teğetsel hız  $r=re$  eşit kabul edilerek elde edilebilir:

$$\bar{v}_{\theta v} = \frac{v_{\theta w}}{(re/R_w)(1 + P - P \cdot re/R_w)} \quad (22)$$

Denklemler birleştirilirse;

$$\xi_{of} = \frac{\pi^2 \cdot (S + \Delta S) f \left[ \frac{v_{\theta w} / vd}{(re/R_w) / (1 + P - P \cdot re/R_w)} \cdot \frac{a \cdot b}{\pi \cdot R_w^2} \right]^2}{1/4 \cdot \pi \cdot de} \quad (23)$$

### 2. 5. Toplam Basınç Kaybı

Toplam basınç kaybı toplanarak ifade edilirse;

$$\Delta p = \Delta p_{in} + \Delta p_{fr} + \Delta p_{vf} + \Delta p_{out} \quad (24)$$

Siklon geometrik boyutlarının bir fonksiyonu olan basınç kaybı katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

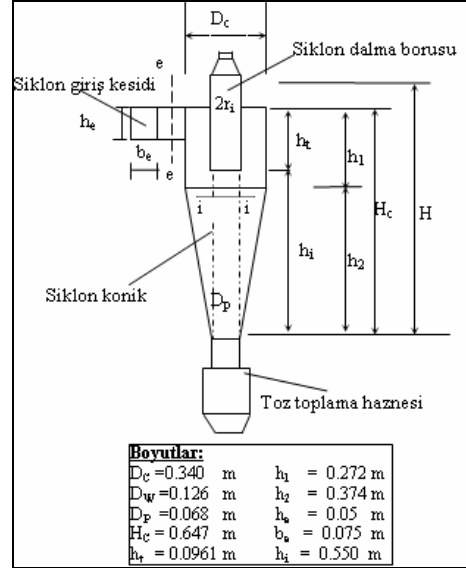
$$\xi = \frac{\Delta P}{1/2 \cdot \rho_g \cdot v_{in}^2} \quad (25)$$

### 3. DENEYSEL DÜZENEK

Şekil 1’de deney amaçlı bir Humboldt siklonunun boyutları yer almaktadır. Deneyde motorin brülörüyle (1) 1100 °C sıcaklıktaki baca gazı üretilmektedir. Siklon giriş debisi bir pitot tüpüyle ölçülmektedir. Gerekli gaz debisi çıkış vantilatörünün devir sayısı değiştirilerek ayarlanmaktadır. İstenen miktardaki farin bir dozajlama birimiyle (2) test siklonunun (6) girişinden önce sisteme verilmesi sağlanır ve rejim sağlandıktan sonra alınan ölçümler kaydedilir. Analog sinyal olarak elde edilen bu ölçüm sonuçları bir PC ile kumanda edilen veri toplama ve kontrol sisteminde değerlendirilir. Deneyde TG,1,2,3,4,5,C olmak üzere siklonun girişinden çıkışına kadar yedi değişik noktada termokuple ile sıcaklık ölçülür. Bunlardan başka siklon giriş ve çıkışında ölçülen basınç değerleri ve bunların farkı alınarak basınç kayıpları saptanmaktadır.

Deneylerde basınç düşüşü siklon dalma borusu dalma derinliği değişimi, siklon giriş hızı, giriş sıcaklığı, giriş konsantrasyonu değişken parametre olarak seçilmiş bunlara bağlı olarak basınç kayıpları incelenmiştir.

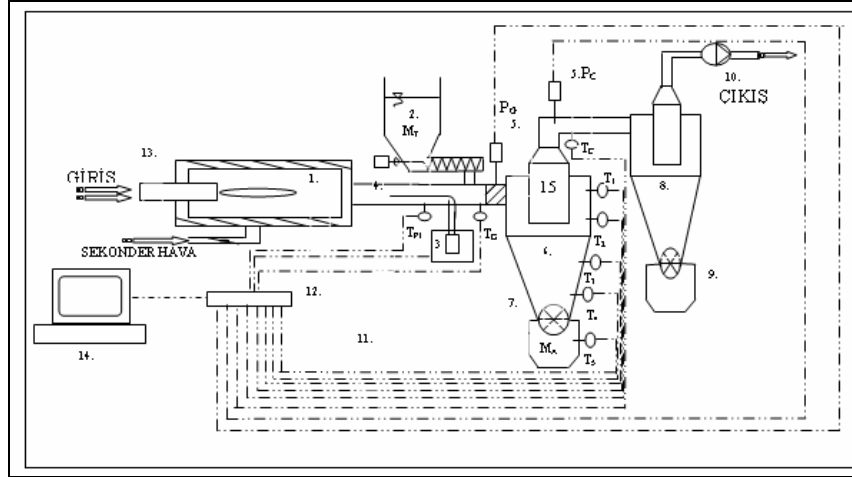
Siklondaki dalma derinliğine bağlı olarak ortaya çıkan toz tutma verimi ve basınç kaybını incelemek için tasarlanan mekanizma Şekil 3 ve Şekil 4’de görülmektedir. Burada dalma derinliği  $h_4$ , 10 mm den 220 mm ye kadar 8 değişik boyda olabilmektedir.



Şekil 1. Deneyde kullanılan siklonun boyutsal özellikleri.

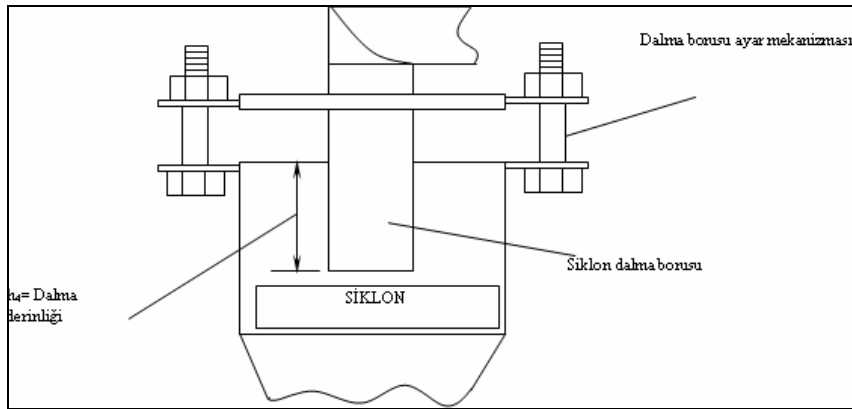


Şekil 2. Deney düzeneğinin önden görünümü.



1 = Yanma odası; 2 = Farin dozajlama ünitesi; 3 = Debi ölçer (pitot tüpü, fark basınç transmitteri); 4 = Boru; 5 = Basınç transmitteri; 6 = Ön ısıtıcı siklon reaktör; 7 = Dönel palet; 8 = Toz tutucu siklon; 9 = Toz toplama silosu; 10 = Vantilatör; 11 = Analog giriş sinyalleri; 12 = Veri Toplama Kartı; 13 = Brülör; 14 = Bilgisayar ve scada programı ve 15 = Dalma borusu.

Şekil 3. Deney düzeneğinin şematik görünümü.



Şekil 4. Siklon dalma boyu ayarlama mekanizması.

### 3. 1. Deney Programı

Deney programı 3 ana grupta toplanmaktadır: ilk olarak dalma borusu çapı değiştirilen siklon deney setine monte edilir. Daha sonra sızdırmazlıkları yapılır. Dalma borusunun dalma derinliğinin değişimine göre basınç kaybı ve toz tutma verimlerinin değişimini bulmak üzere ayarlanan her dalma boyunda akış hızı 12,44 m/sn olacak şekilde vantilatör devri sabitlenir ve sistemin rejime gelmesi beklenir. Daha sonra sisteme  $0,556 \text{ kg/m}^3$  konsantrasyonunda farin yüklenir. Yükleme sonrasında siklon giriş sıcaklığı sabit bir değere düşene kadar beklenir. Bundan sonra diğer deney verileri siklon çıkış sıcaklığı, akış ölçüm sıcaklığı, siklon konik kısım sıcaklığı, siklon silindirik kısım sıcaklığı, farin depolama sıcaklığı, siklon giriş basıncı ve siklon çıkış basıncı kontrol ünitesinden alınarak kaydedilir. Deney durdurularak siklon toz

toplama bunkerinden alınan ve ısıtılmaya tabi tutulmuş çimento hammaddesi farin(kireçtaşı+kil) hassas bir şekilde toplanarak dijital göstergeli teraziyle tartılır.

İkinci grup deneylerde hızın değişmesi halinde siklon karakteristikleri ölçülmüştür, (9,5 m/s'den 10,3 m/s'ye artan.). Burada toz konsantrasyonu sabit tutulmuştur.

Üçüncü son grup deneylerde ise, partikül konsantrasyonunun artırılması durumunda testler tekrarlanmıştır.

Bütün deneylerde ölçümler hem partiküllü hem de partikülsüz olarak alınarak kaydedilmiştir (Fıçıcı, 2006).

## 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Deneylerde kullanılan üç farklı dalma borusu çapına ait siklonlardan elde edilen veriler, dalma borusu yüksekliği, giriş hızı ve konsantrasyon değerlerine göre basınç kaybındaki değişimler gözlemlenmiştir. Siklon dalma borusu çapları 80, 120 ve 160 mm olarak deneylerde kullanılmıştır.

### 4. 1. Dalma Borusu Derinliğinin Basınç Kaybına Etkisi

Siklon çıkışındaki dalma borusu derinliği 8 değişik boyda seçilmiştir. Dalma borusu derinliğinin basınç kayıplarına etkileri ele alınır.

Bu deneylerde dalma boyu değiştirilerek, yüksek sıcaklıktaki partikül yüklü gazlarla testler yapılmıştır. Siklon giriş ve çıkış noktaları arasında ölçülen basınç kaybı grafikte gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre her bir dalma borusu çapına göre basınç kayıplarında bir artış gözlenmiştir. Bununla beraber dalma borusu çapı 80 mm olan deney siklonunda bu ölçüyü 120 mm'ye çıkardığımızda bu kayıpların mertebesi daha fazla artmakla beraber dalma borusu çapını 160 mm'ye çıkardığımızda bu değer tekrar 80 mm dalma borusu çapı için geçerli olan değerlere yaklaşmaktadır. Bu durum bize dalma borusu çap parametresinin kritik bir çapa kadar basınç kayıplarında artış eğilimi, bu mutlak çap (120 mm) değerinden sonra azalma eğilimi olduğunu göstermektedir.

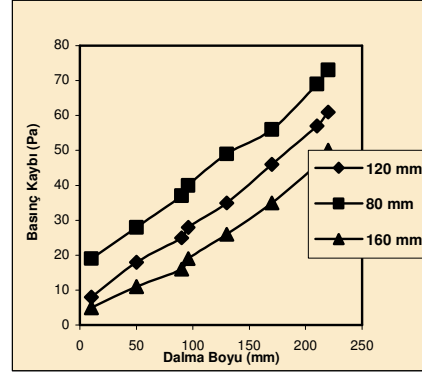
### 4. 2. Siklon Giriş Hızının Basınç Kaybına Etkisi

Siklona giren hızı yüksek partikül+gaz karışımı, deneylerde değişik hızlarda denenmiştir. Siklona giren partiküllü akışkanın hızı arttığında her üç dalma borusu çapına ait siklonda basınç kayıpları farklılık göstermektedir. Bununla beraber dalma borusu çapı 80 mm olan deney siklonunda bu ölçüyü 120 mm'ye çıkardığımızda bu kayıpların değişiminin azaldığı görülmektedir. Dalma borusu çapını 160 mm'ye çıkardığımızda azalma yine görülmektedir. Giriş hızının artmasıyla girdap dönmesi sayısı birbiriyle ilişkilidir. Dalma borusu çapı ufak olanda daha fazla girdap dönüşü olacağı için basınç kaybı büyük olanlara göre daha fazladır.

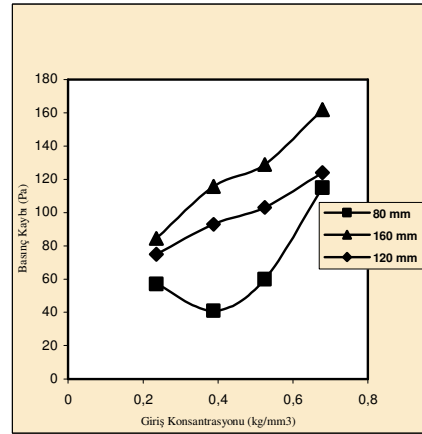
### 4. 3. Siklona Giren Toz Konsantrasyonunun Basınç Kaybına Etkisi

Deneyler de siklon konsantrasyonu 0.19 kg/m<sup>3</sup>-0.55 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştirilerek yapılmıştır. Siklona giren partikül miktarı arttığında her üç dalma borusu çapına ait basınç kayıplarında artış görülmektedir.

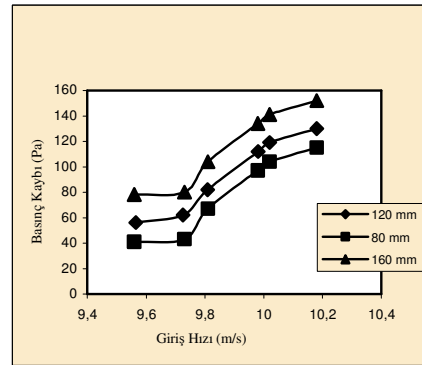
En çok da 160 mm'lik siklonda basınç kaybı meydana gelmiştir. Bunun nedeni 160 mm' de meydana gelen girdap sayısı diğerlerine göre daha azdır. Bundan dolayı 160 mm'de daha fazla basınç kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 4. Siklon dalma boyuna göre basınç kaybı değişimi.



Şekil 5. Siklon giriş konsantrasyonuna göre basınç kaybı değişimi.



Şekil 6. Siklon giriş hızına göre basınç kaybı değişimi.

Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda elde edilen verilerden kritik bir dalma borusu çapı elde edildi. Bu da 120 mm olarak belirlendi. Dalma borusu çapını arttırdığımızda basınç kaybında azalmalar elde edilmesine rağmen siklon tutma veriminde istenilen sonuç elde edilemedi. Yani dalma borusu boyu artırılarak basınç kaybı azaltılabilir ama tutma veriminde istenilen sonucu elde edilemez. Bu çalışmamızda, teoride iddia edilen kritik dalma borusu ifadesi deneysel olarak da ispatlanmıştır.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmamızda deneylerde kullanılmak üzere hammadde ihtiyacı Nuh Çimento Sanayii A.Ş. tarafından karşılanmıştır. Yardımlarından dolayı kendilerine çok teşekkür ederiz.

## 6. SEMBOLLER

$a$	[m]	Giriş yüksekliği,
$b$	[m]	Giriş genişliği,
$B$	[m]	Partikül dış çapı,
$c$	[-]	Girdap akış düzeltme faktörü,
$D$	[b]	Siklon gövde çapı,
$de$	[m]	Gaz dış çapı,
$h$	[m]	Siklon silindir yüksekliği,
$H$	[m]	Siklon yüksekliği,
$L$	[m]	Siklonun doğal uzunluğu,
$p$	[Pa]	Basınç,
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumetrik gaz akış oranı,
$r$	[m]	Yarıçap,
$Rw$	[m]	Siklon gövde yarıçapı,
$re$	[m]	Çıkış veya dış boru çapı,
$S$	[m]	Gaz çıkış deliği dip uzunluğu,
$\Delta S$	[m]	Gaz çıkış deliği genişleme uzunluğu,
$e$	[rad]	Koni eğimi,
$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gaz yoğunluğu,
$\tau$	[Pa]	Kayma gerilimi,
$v$	[m/s]	Gaz hızı,
$\zeta$	[-]	Basınç kaybı katsayısı,
$\zeta$	[-]	Duvar sürtünme katsayısı.

## 7. KAYNAKLAR

- Arı, V. 2000. Çimento endüstrisinde kullanılan önisıttıcı siklon reaktörlerin deneysel incelenmesi Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Casal, J., Martinez, J.M. and Bennet 1983. A better way to calculate cyclone pressure drop. Chemical Engineering Technology 10, 99-100.
- Cooper, C.D. and Alley, F. C. 1986. Cyclones, Dartmouth University Course Notes.
- Chen, J. and Shi, M. 2007. A universal model to calculate cyclone pressure drop. Powder Technology 171, 184-191.
- Fıçıcı, F. 2006. Siklonlarda dalma borusu çap değişiminin basınç kaybına etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- Gimbun, J., Chuah, T.G., Fakhru'l-Razi, A. and Choong, T.S.Y. 2005. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a cfd study. Chemical Engineering and Processing, 44, 7-12.
- Jiao, J., Zheng, Y., Sun, G. and Wang, J. 2007. Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone. Separation and Purification Technology 49, 157-166.
- Qian, F., Huang, Z., Cher, G. and Zhang, M. 2007. Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations. Computers and Chemical Engineering 31, 1111-1122.
- Wang, L., Parnell, C.B. and Shaw, B.W. 2004. Analysis of cyclone pressure drop. ASAE Annual Meeting Paper Number: 044017.
- Zhao, B. 2004. A theoretical approach to pressure drop across cyclone separators. Chemical Engineering Technology 10, 1105-1108.