

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK SICAKLIKTA ÇALIŞAN BİR SİKLON TASARIMI VE
UYGULAMASI**

İSMAİL KESKİN

KOCAELİ 2013

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK SICAKLIKTA ÇALIŞAN BİR SİKLON TASARIMI VE
UYGULAMASI**

İsmail KESKİN

Prof.Dr. Hüseyin Şinasi Onur

Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. İlhan Tekin Öztürk

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Hasan Rıza Güven

Jüri Üyesi, İstanbul Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 12-07-2013

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Ülkemizin önemli sanayi kollarından birisi seramik sektörüdür. Bu sanayide, hemen her alandan yüksek sıcaklıklarda çalışan fırınlar kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlarda önemli bir sorun ise baca gazından bulunan toz maddelerin ayrıştırılmasıdır. Yüksek baca gazı sıcaklıklarından ötürü, ayrıştırma zor bir işlemdir. Baca gazında bulunana toz maddelerin, hem çevre bilinci açısından temizlenmesi gerekmekte, hem de ekonomik bir değer olarak geri kazanılması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek sıcaklıklarda seramik tozunu ayrıştıran bir siklon konusunda çalışma yapılmıştır.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Hüseyin Şinasi Onur'a ayrıca, siklon test düzeneğinin çizim ve uygulamasını yapan tüm çalışma arkadaşlarıma, çalışmalarımda bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Yahya Keskin'e, projenin finansmanında katkısı bulunan Faruk Keskin'e, tüm bu imkânları sağlayan Keskin Kimya AŞ, ye teşekkür ederim

Temmuz-2013

İsmail KESKİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. SİKLON ÇALIŞMASINDA TEMEL KAVRAMLAR.....	2
1.1. Statik ve Dinamik Basınç.....	2
1.2. Akışkan İçinde Parçacık Hareketi.....	2
1.3. Parçacık Boyutu	5
1.4. Parçacık Boyut Dağılımı	5
2. SİKLON ÇALIŞMA PRENSİBİ	7
2.1. Siklonlarda Gaz Akışı	7
2.2. Parçacık Hareketi	7
2.3. Toplam Ayırma Verimi.....	8
2.4. Toplanan Toz Boyut Dağılımı	9
2.5. Basınç Düşüşü.....	9
2.6. Siklonlarda Ölçüm Teknikleri.....	10
2.6.1. Siklonlarda hız ölçümleri	10
2.6.2. Basınç düşüşü	11
2.7. Siklon Boyutlandırılması	11
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	13
3.1. Literatür Çalışmaları	13
3.2. Deney Düzenegi.....	14
3.3. Siklon Hesaplamaları	22
3.3.1. Baca gazı debisi.....	22
3.3.2. Baca çıkış kesitleri ve hava hızları	24
3.3.3. Siklon giriş hızı ve siklon boyutlandırması	24
3.3.4. Siklon performans hesaplamaları	26
3.4. Siklon Hesaplamaları	30
3.4.1. Hava debisi ölçümleri.....	30
3.4.2. Basınç kaybı	33
3.4.3. Ayırma verimi	35
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	38
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	41

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Siklon içinde bir parçacığın hareketi	5
Şekil 1.2. Hacim eşdeğer ve yüzey eşdeğer çap şematik gösterimi	5
Şekil 1.3. Lazer yöntemiyle ölçülmüş boyut dağılım grafiği	6
Şekil 2.1. Teğetsel girişli siklonda akış yörüngesi	7
Şekil 2.2. Siklon içinde parçacığın izlediği yol	8
Şekil 2.3. Genel bir siklon çizimi ve boyut parametreleri	11
Şekil 3.1. Seramik frit ergitme fırını baca üç boyutlu görüntüsü	14
Şekil 3.2. Frit fırını, fırın içi üç boyutlu görüntüsü	15
Şekil 3.3. Frit fırını iç görüntüsü üç boyutlu çizimi	15
Şekil 3.4. Fırın baca çıkışı - siklon girişi arası tünelli resmi	16
Şekil 3.5. Fırın çıkışı gaz yolu üç boyutlu çizimi	16
Şekil 3.6. Siklon hava giriş detayı	17
Şekil 3.7. Kupol tuğlası	18
Şekil 3.8. Siklon iç borusu	18
Şekil 3.9. Siklon iç borusu taban detayı	19
Şekil 3.10. Siklon tavan detayı	20
Şekil 3.11. Siklon – reküperatör bölgesi baca kanalı	21
Şekil 3.12. Frit fırını baca montaj şeması	21
Şekil 3.13. Deney siklonu önden görünüşü	25
Şekil 3.14. Deney siklonu üstten görünüşü	25
Şekil 3.15. Siklon ebatlarını gösterir simgeler	26
Şekil 3.16. Siklon performans parametreleri	27
Şekil 3.17. Orifis plaka montaj resmi	31
Şekil 3.18. Orifis plaka ölçüleri	32
Şekil 3.19. Siklon basınç ölçüm noktaları resmi	33
Şekil 3.20. Siklon çıkış basınç ölçüm noktası resmi	34
Şekil 3.21. Baca hattı ölçüm noktaları şematik gösterimi	34
Şekil 3.22. Siklonunda tutulamayan tozların boyut dağılımı	36
Şekil 3.23. Siklondan önce bacada biriken toz görüntüsü	37
Şekil 3.24. Siklondan sonra bacada biriken toz görüntüsü	37

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Standart siklon geometrileri.....	12
Tablo 3.1. Refrakter tuğla özellikleri	17
Tablo 3.2. Baca gazları kütleli debileri.....	23
Tablo 3.3. Baca gazları hacimsel akış değerleri.....	24
Tablo 3.4. Siklon ölçüleri ve baca gaz değerleri.....	26
Tablo 3.5. Siklon hesaplama parametreleri.....	29
Tablo 3.6. Siklon hesaplama sonuçları	30
Tablo 3.7. Orifis deşarj katsayıları	32
Tablo 3.8. Deneyde ölçülen baca gazı debileri	33
Tablo 3.9. Siklon basınç düşüşü ölçümleri	35
Tablo 3.10. Siklon performans sonuç tablosu.....	35

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a	: İvme, (m/s ²)
A	: Kesit alanı, (m ²)
A_R	: Siklon içinde sürtünmeye maruz kalan alanlar toplamı, (m ²)
C_D	: Sürükleme katsayısı
C_d	: Orifis deşarj katsayısı
F	: Kuvvet, (N)
f	: Sürtünme faktörü
F_D	: Sürükleme kuvveti, (N)
h	: Siklon yüksekliği, (m)
m	: Kütle, (kg)
M_A	: Molekül ağırlığı, (gr/mol)
\dot{m}_c	: Siklonda tutulan toz kütleli debisi, (kg/s)
\dot{m}_e	: Siklonda tutulamayan toz kütleli debisi, (kg/s)
\dot{m}_f	: Siklona beslene toz kütleli debisi, (kg/s)
\dot{m}_g	: Siklona giren gaz kütleli debisi, (kg/s)
\dot{m}_p	: Siklona giren parçacık kütleli debisi, (kg/s)
n	: Mol sayısı
P	: Basınç, (Pa)
\dot{Q}	: Hacimsel debi (m ³ /s)
r	: Yarıçap, (m)
\bar{R}	: Evrensel gaz sabiti, (J/mol.K)
R_d	: Siklon gövde yarıçapı, (m)
R_i	: Siklon iç boru yarıçapı, (m)
R_{in}	: Siklon girişinin radyal pozisyonu, (m)
T	: Sıcaklık (K)
U_t	: Parçacık terminal hızı, (m/s)
v	: Hız, (m/s)
v_{in}	: Siklon giriş kesiti hızı, (m/s)
v_x	: Siklonda yüzeysel aksel hız, (m/s)
v_z	: Siklon gövdesinde ortalama aksel hız, (m/s)
v_θ	: Açısal hız, (m/s)
$v_{\theta CS}$: Siklon iç çekirdek çapındaki gaz hızı, (m/s)
$v_{\theta w}$: Siklon duvar hızı, (m/s)
x	: Siklon ayırıcısında, tutulan parçacık çapı, (μ m)
X_{50}	: Siklonun yakalayabildiği minimum parçacık çapı, (μ m)
μ	: Viskozite, (Pa.S)
α	: Siklon giriş daralma katsayısı
ΔP	: Basınç düşüşü, (Pa)
ΔP_b	: Siklon gövdesinde meydana gelen basınç düşüşü, (Pa)
ΔP_T	: Siklonda meydana gelen toplam basınç düşüşü, (Pa)
ΔP_x	: Siklon çekirdek ve iç borusunda meydana gelen basınç düşüşü, (Pa)
η	: Siklon toplam verimi
ρ	: Yoğunluk, (kg/m ³)

ρ_p : Parçacık yoğunluğu, (kg/m³)

Kısaltmalar

Eu : Euler Sayısı
Nm³ : Normal Metreküp
Re : Reynolds Sayısı

YÜKSEK SICAKLIKTA ÇALIŞAN BİR SIKLON TASARIMI VE UYGULAMASI

ÖZET

Günümüzde birçok endüstriyel uygulamada küçük parçacık boyutlu malzemeler kullanılmaktadır. Bu kullanım sonucu, çalışma ortamlarında ve bacalarda, toz deşarjı gözlenmektedir. Bu sebeple geliştirilen çeşitli toz tutma sistemlerinden biri de, siklonlardır. Bu çalışmada, yüksek sıcaklıklarda çalışan, seramik frit fırınında baca gazı ile beraber hareket eden ince tozların toplanabileceği bir siklon sistemi ve uygulaması konusunda çalışılmıştır. Yapılan literatür taraması sonucunda görülmüştür ki, bu çalışma, frit fırınları için yüksek sıcaklıkta çalışan bir siklon olması itibariyle bir ilk değeri taşımaktadır. Öncelikle, imal edilecek yüksek sıcaklık siklon seperatörünün hesaplamaları yapılarak, boyutları belirlenmiş, ardından ne tür bir malzeme ile üretileceğine karar verilip, tasarımı tamamlanarak üretimi yapılmıştır. Yapılan üretim sonrası siklon seperatörün bacaya taşınan tozların %88 ini, 1100 derece sıcaklıkta, yakaladığı belirlenmiştir. Siklondan kurtulan tozların ortalama çapı 6,47 µm olarak gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fırın, Refrakter, Seramik, Siklon, Toz Tutma.

DESIGN AND APPLICATION OF A CYCLONE SEPERATOR THAT OPERATED AT HIGH TEMPERATURE

ABSTRACT

Today, low particle size materials are widely used in many industrial applications which are causes dust discharge to environment. In order to collect the dust, one of the collection systems is called cyclone separator. This thesis is about the collection of the dust inside high temperature ceramic frit furnace chimney, with a cyclone separator located inside the chimney. According to literature survey, it has been found that, this study is the first about high temperature cyclones for frit furnaces. First of all, the cyclone calculations have been carried out. Then, the selection of material which will be used for construction of cyclone, is done. And finally the application of cyclone is finished. When the cyclone is produced then it has been tested. It has been found that the cyclone separator has collected 88% of the dust that has been flowed to chimney. The average particle diameter of the dust that did not collected by cyclone is found as $6,47\mu\text{m}$.

Keywords: Furnace, Refractory, Ceramic, Cyclone, Dust Collection.

GİRİŞ

Günümüzde birçok endüstriyel uygulamada toz toplama önemli bir problemdir. Proses esnasında, genellikle kullanılan malzeme ve hammaddelerden dolayı, ortama toz yayılır. Bu sebeple çeşitli toz toplama sistemleri geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olanı filtrelerdir. Filtrelerin geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen, eğer yüksek sıcaklıkta yapılan bir işlem esnasında toz meydana geliyorsa, bu durumda toz toplamak için filtreler kullanılamaz duruma gelmektedir. Özellikle endüstriyel fırın bacaları, 800 - 1200 derece gibi yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadırlar. Bu sıcaklıklara dayanıklı filtreler bulunmadığından dolayı, alternatif bir sistem gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Böyle bir durumda kullanılan yöntem, “önce soğut, sonra tozu yakala” şeklindedir. Genellikle bu yaklaşım maliyeti artıran bir etki içerir.

Yüksek sıcaklıkta çalışan fırınlarda, fırın içerisinde işlenen hammadde veya malzemedan dolayı, fırın bacasına toz sürüklenmektedir. Baca içerisindeki yüksek sıcaklıktaki tozlar genellikle elektrostatik filtrelerde tutulabilmektedir. Buna alternatif olarak, fırın çıkışına bir siklon yerleştirmek suretiyle, yüksek sıcaklıktaki tozların yakalanması hedeflenen çalışmamızda, cam fırını benzeri bir sistemle çalışan frit fırını bacasında çalışma yapılmıştır. Bacalarda toz tutmak için siklon kullanımı tozların sıvı fazda da olabildiği frit fırınlarında çok umut vaat edici sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada amaç frit fırınlar ve benzeri prensiple çalışan yüksek sıcaklık fırınları için, baca tozlarını tutmaya yönelik siklon geliştirmek ve uygulamaktır.

1. SIKLON ÇALIŞMASINDA TEMEL KAVRAMLAR

1.1. Statik ve Dinamik Basınç

Navier Stokes denklemlerinden elde edilmiş olan, zamandan bağımsız akışa sahip, sabit yoğunluğu olan akışkanlar için sürtünmesiz, yatay bir düzlem için çıkarılan Bernoulli denklemi çok iyi bilinmektedir. Bu denklem [1];

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bir kesitte hız artarsa basıncın düşeceği, hız azalırsa basıncın artacağı bu eşitlikten anlaşılabilir. P basıncına statik basınç denerek, bir statik basınç bir de toplam basınç olduğu vurgulanır. Toplam basınç, statik basınç ile dinamik basıncın toplamına eşittir.

1.2. Akışkan İçinde Parçacık Hareketi

Siklonlarda toz parçacıkları, akışkan içinde bir terminal hızı ile hareket eder. Bu terminal hızı parçacığın yakalanıp, yakalamayacağını belirler. Bu bakımdan parçacık terminal hızının belirlenmesi önem taşır. Akışkan içinde hareket eden parçacığa, temel olarak yerçekimi kuvveti, merkez kaç kuvvet ve akışkan sürüklenme kuvveti etki eder. Merkez kaç kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (1.2)$$

Burada,

F :	merkez kaç kuvveti	N
m :	kütle,	kg
v :	radyal hız ,	m/s
r :	dönme çapı,	m

dir.

Dönen akışlar için parçacık terminal hızının hesaplanması için, akışkan içinde

hareket eden bir parçacığa ait eşitlikleri yazarak başlanabilir. Akışkan içinde hareket eden parçacığa, Newton kanunu uygulandığında, parçacığın kütlesi ile ivmesinin çarpımı, kendisine etkiyen kuvvetlerin toplamına eşittir. Bu durum;

$$F = m.a = \begin{matrix} \text{Kütle} \\ \text{kuvvetleri} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{Sürüklenme} \\ \text{kuvvetleri} \end{matrix} \quad (1.3)$$

şeklinde tanımlanabilir. Denklem (1.3) deki kuvvet denkliği silindirik koordinat sisteminde uygulanmıştır. Burada kütle kuvvetleri, yerçekimi kuvveti ve/veya merkezkaç kuvvetinden meydana gelmektedir. Sürüklenme kuvveti ise akışkan içinde zamandan bağımsız bir terminal hızı ile hareket eden parçacığa etkiyen kuvvettir. Denklem (1.3) de gerekli eşitlikleri yerine koyduğumuzda [1];

$$\left(\frac{\pi x^3}{6}\right) \rho_p \frac{dU'}{dt} = \left(\frac{\pi x^3}{6}\right) (\rho_p - \rho) a - C_D \left(\frac{1}{2} \rho U' \|U'\|\right) \left(\frac{\pi x^2}{4}\right) \quad (1.4)$$

denklemini meydana gelir. Bu denklemde U' silindirik koordinata, gaza göre parçacık hız vektörüdür. Hız vektörü bileşenleri (U'_r, U'_θ, U'_z) dir. a , dış kuvvet alanına göre ivme vektörüdür. ρ_p, ρ , parçacık ve akışkan yoğunluğu, x , parçacık çapıdır.

Sağ taraftaki ilk terim kütle kuvvetini, ikinci terim sürüklenme kuvvetini temsil eder, C_D sürüklenme katsayısıdır. Denklem (1.4) de sağ taraftaki ikinci terim gaz siklonlarına göre basitleştirilebilir. Gaz siklonlarında küçük parçacık boyutu ve düşük akışkan yoğunluğu olmasından dolayı, parçacık Reynolds sayısı [1];

$$Re_p \equiv \frac{\rho \|U'\| x}{\mu} \quad (1.5)$$

denklemini ile elde edilir ve göreceli olarak çok küçüktür. Eğer akışkan ile parçacık yüzeyi arasında kayma yoksa (bu durumda, akışkan hızı yüzeyde, yüzey hızına eşittir) bu durumda Stokes sürüklenme kanunu kullanılabilir [1] ve sürüklenme kuvveti;

$$F_D = -3\pi x \mu U' \quad (1.6)$$

bağıntısı ile elde edilir. Bu formülü Denklem (1.4) deki sürüklenme terimi ile karşılaştırıp, Denklem (1.5) de yerine koyduğumuzda, laminar akış için parçacık sürüklenme katsayısı [1];

$$C_D = 24 / Re_p \quad (1.7)$$

olduğu görünür. Bu ifadeleri Denklem (1.4) de yerine koyup, sadeleştirmeleri yapmak suretiyle, gaz siklonları ($\rho_p \gg \rho$) için gerekli ihmalleri yaptığımızda; parçacık yoğunluğunun, akışkan yoğunluğunda çok büyük olduğu durumlar için, parçacık terminal hızı aşağıdaki şekilde elde edilir [1];

$$U_t = \frac{x^2 \rho_p}{18\mu} a \quad (1.8)$$

Denklemdaki sembollerde aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

U_t : Parçacık terminal hızı (m/s)

x : Parçacık çapı (m)

ρ_p : parçacık yoğunluğu (kg/m^3)

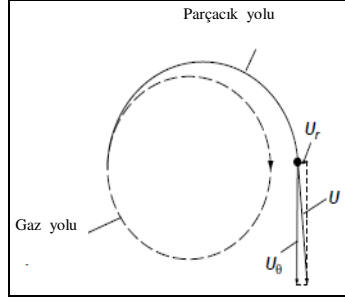
ρ : gaz yoğunluğu (kg/m^3)

a : ivme (m/s^2)

Eğer parçacık gaz ile aynı çevresel hızda hareket ediyorsa, dairesel koordinat sisteminde, Denklem (1.8) deki ivme terimini merkez kaç ivmesi ile değiştirebiliriz. (v_θ^2 / r). Burada merkezkaç kuvveti $m_p v_\theta^2 / r$ dir ve m_p parçacık kütlesidir. Parçacık yoğunluğunun gaz yoğunluğundan çok büyük olduğu durumlarda, parçacık [1] ;

$$U_r = \frac{x^2 \rho_p}{18\mu} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \quad (1.9)$$

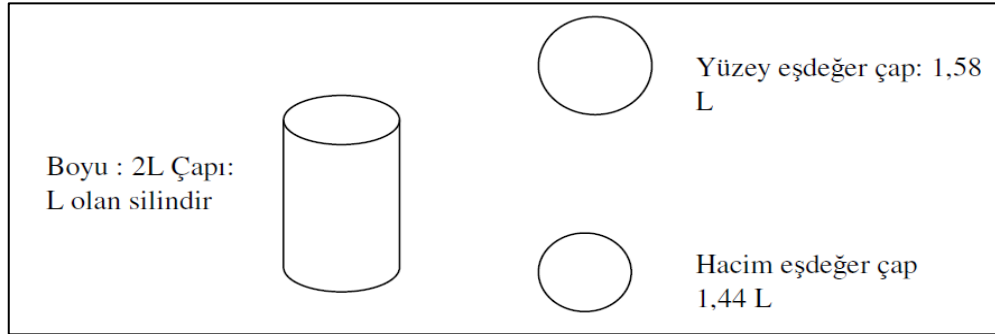
hızıyla dairenin dışına itilir. Denklem (1.9) dan da görüldüğü üzere parçacık boyutu büyüdükçe daha büyük hızla daire dışına itilirken, küçük çapta olanlar dairenin dışına itilemeden iç boru tarafından toplanır. Bununla beraber açılal hızın artması da toz parçacıklarının duvara doğru olan hızını artırır. Siklonlarda amaç dairenin dışına doğru olan hızı mümkün olduğunca artırmaktır ki, bu durumda toplama verimi de artar. Merkez kaç kuvveti etkisiyle, duvara doğru hızlanan toz maddeler, sürüklenme kuvveti etkisiyle de iç boruya doğru sürüklenir. Sürüklenme hızının, duvara doğru itilme hızından büyük olduğu duruma karşılık gelen parçacık çapındaki malzemeler, siklondan kurtularak iç boruya yönlendirilir.



Şekil 1.1. Siklon içinde bir parçacığın hareketi [1]

1.3. Parçacık Boyutu

Siklonların ayırma verimini etkileyen önemli parametrelerden biri de parçacık boyutudur. Burada boyut olarak kast edilen parçacık çapıdır. Parçacık çapı farklı şekillerde ifade edilebilir. Bunlardan biri hacim eşdeğer çapıdır. Hacim eşdeğer çapı, parçacık ile aynı hacme sahip kürenin çapı olarak ifade edilir. Diğer bir ifade biçimi ise yüzey eşdeğerdir. Yüzey eşdeğer çap, parçacık ile aynı yüzeye sahip kürenin çapıdır. Bu tanımlar dışında, parçacık çapını ifade etmek için kullanılan farklı tanımlamalar da mevcuttur. Şekil 1.2 de hacim ve yüzey eşdeğer çaplarının farkı bir silindirik madde örneği ile gösterilmiştir [1].



Şekil 1.2. Hacim eşdeğer ve yüzey eşdeğer çap şematik gösterimi [1]

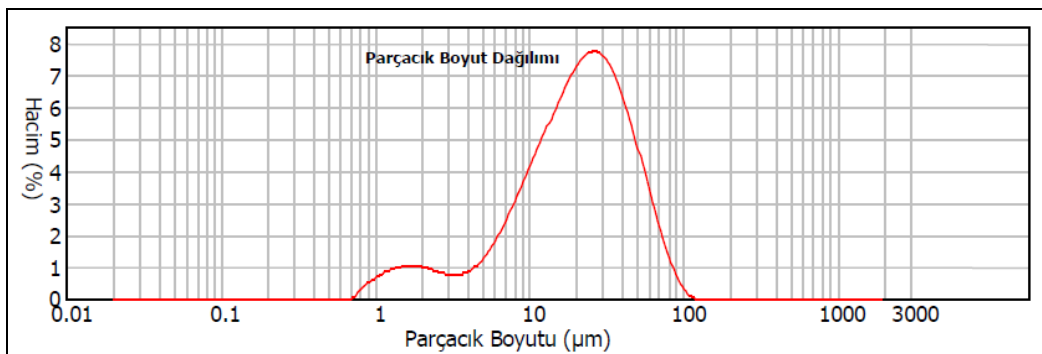
1.4. Parçacık Boyut Dağılımı

Bir toz karışımını oluşturan parçacıkların boyutları bir birinden farklıdır. Bu sebeple bir toz malzemenin boyutundan bahsederken, tek bir eşdeğer çap verilmesi mümkün değildir. Toz boyutu bir minimum çaptan başlayarak, maksimum bir çap a kadar dağılım gösterir. Toz maddelerin boyut ölçümleri, genellikle boyutları birbirinden farklı delik çaplarına sahip bir elek sistemi ile yapılır. İnce toz maddelerin boyut

analizi için, genellikle 180, 150, 100, 75, 45, 30 mikron metre (μm) delik çaplarında sahip elek sistemi kullanılır. Elekler kare kesitli olup, karenin iç kenar uzunluğu elek çapı olarak adlandırılır. Bununla beraber 1 cm^2 alandaki delik sayısı gibi ölçüler de mevcuttur. Ancak en çok kullanılan delik çapı ölçüleridir.

100 gr toz numunesi, 180 μm , ila 30 μm çapındaki elek sisteminden sırayla geçirilir. Her elek üzerinde takılan toz miktarı tartılarak boyut dağılımı bulunur. Bununla beraber eğer analiz edilen toz numunesinin büyük bölümü 30 μm den küçük ise, 30 μ altı tozların elek dağılımını bu yöntemle ölçmek olanaksızdır. Bu sebeple, parçacık boyut dağılımını, daha hassas ve geniş bir aralıkta ölçmek için ,lazer yöntemle çalışan cihazlar kullanılmaktadır.

Lazer kırınım yöntemiyle çalışan boyut analiz cihazları, bir lazer kaynağı önünden tam olarak dispers edilmiş tozu geçirmek suretiyle, boyut analizi yapabilmektedir. Analiz edilecek toz madde, bir lazer bombardıman alanından geçerken, parçacıklar, lazer ışığının saçılmasına sebebiyet verir. Ölçüm sistemi, saçılan lazer ışığının, hassas detektörler de toplanıp, bir yazılım yardımıyla analiz edilerek, parçacık boyut dağılımı hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Boyut dağılımı grafiği Şekil 1.3 dekine benzer bir dağılım göstermektedir. Şekildeki logaritmik grafikte, bir noktadan, başka bir boyut noktaya kadar grafiğin altında kalan alan; bu iki parçacık çapı arasındaki yüzdesel toz miktarını verir. Örneklendirmek gerekirse 10 ila 100 μm arasında, grafiğin altında kalan alan 68 ise, tozun %68 inin parçacık çapı 10 ila 100 μm arasındadır.

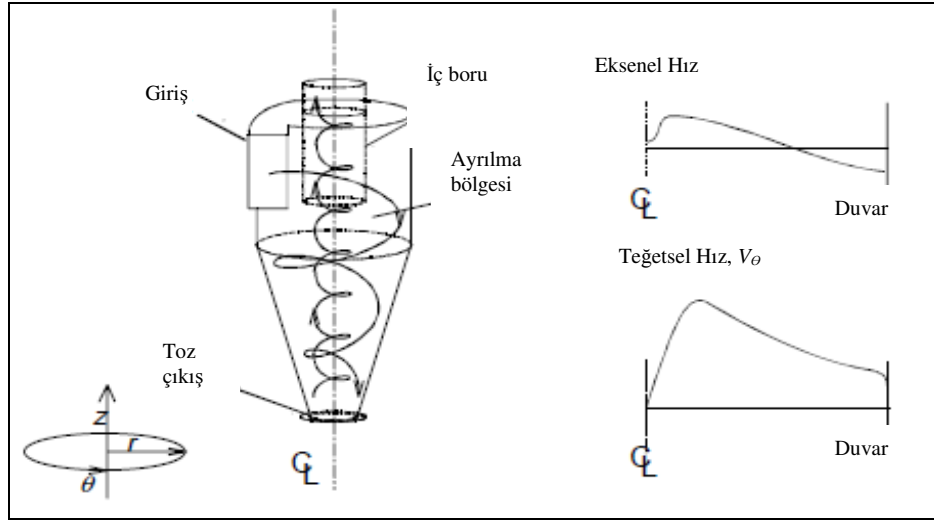


Şekil 1.3. Lazer yöntemiyle ölçülmüş boyut dağılım grafiği

2. SIKLON ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1. Siklonlarda Gaz Akışı

Siklonlarda hız alanları, kızgın tel anemometresi, pitot tüp ve son zamanlarda lazer dopler anemometresi ile ölçülmüştür. Şekil 2.1 de genel bir siklon için, akış yörüngesi gösterilmektedir. Dönen akış olmasının sebebi, siklonun teğetsel girişi olmasıdır. Gaz, siklonun gövdesinden aşağı doğru, iç borudan ise yukarı doğru hareket eder. Gazın içinde bulunan toz parçacıkları ise cidara doğru savrulur. Cidardaki tozlar yerçekimi kuvveti etkisiyle koni boyunca sürüklenerek siklon tabanına ulaşır.

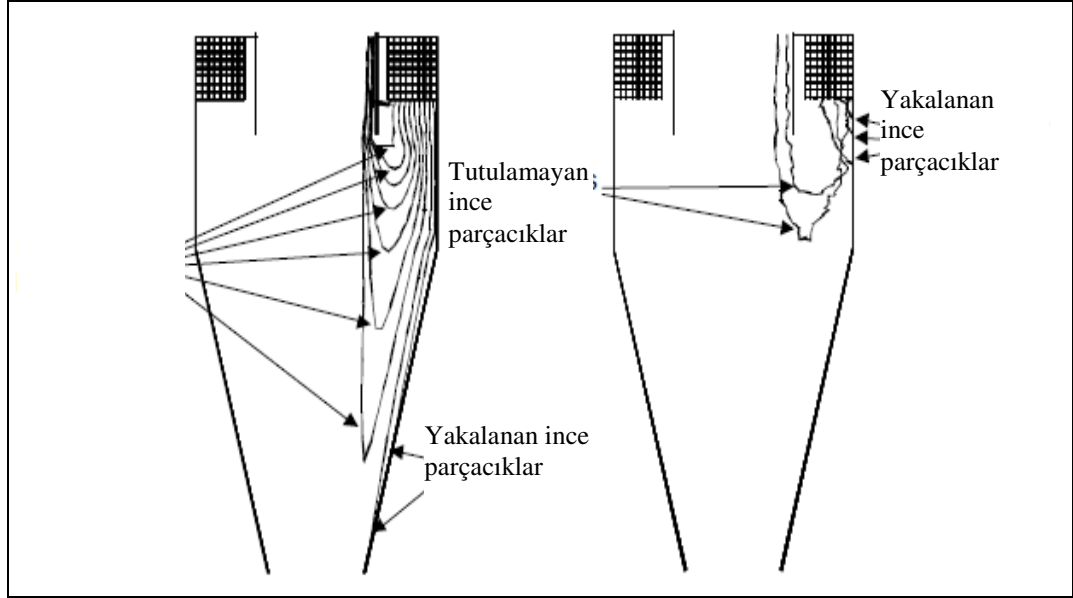


Şekil 2.1. Teğetsel girişli siklonda akış yörüngesi [1]

2.2. Parçacık Hareketi

Siklonlarda, ayırma bölgesine giren bir parçacık, merkeze doğru sürüklenme kuvveti, cidara doğru merkezkaç kuvveti etkisinde kalır. Parçacık, ayırma bölgesine girdiğinde dönme hareketi başlar. Merkezkaç kuvveti parçacık kütlesi ile, dolayısıyla parçacık çapının küpüyle: x^3 doğru orantılıdır. Dış gövdeden iç boruya doğru olan sürüklenme kuvveti ise parçacık çapıyla: x ile doğru orantılı olduğu için daha büyük çaptaki parçacıkların ayrılması çok daha kolay olur. Siklonlarda amaç parçacığın

merkezkaç kuvveti etkisiyle duvarda doğru hareket etmesini sağlamaktır. Şekil 2.2 de görüldüğü gibi, çapları küçük parçacıklar, merkezkaç etkisinden kurtularak iç boruya doğru hareket edebilmektedirler.



Şekil 2.2. Siklon içinde parçacığın izlediği yol [1]

2.3. Toplam Ayırma Verimi

Siklonlarda toplam ayırma verimi giriş ve çıkıştaki toz konsantrasyonları farkından faydalanarak bulunabilir. Girişteki toz konsantrasyonu, siklon seperatöre giren gaz debisi ölçülmek suretiyle bulunabilir. Gaz debisini ölçmek için, genellikle, pitot tüp yardımıyla boru çapı boyunca hız dağılımı bulunur. Ardından ölçülen hızlara karşılık gelen kesit alanları hesaplanır, hız ve kesit alanlar çarpımı sonucunda da m^3/s cinsinden gaz debisi hesaplanır. Hız ölçümüyle beraber, ölçüm noktasındaki gazın sıcaklığı ve basıncı ölçülmelidir. Sıcaklık ve basınç bilgileri kullanılarak gaz debisi nm^3/s cinsinde çevrilir. Maddenin korunumu kanunu gereği siklon girişinde ve çıkışında nm^3/s cinsinden hava debisi eşittir. Siklonun girişinde ve çıkışında hava içindeki toz konsantrasyonu ölçülerek, hem gr/nm^3 cinsinden hem de $kg/saat$ cinsinden siklona giren ve çıkan toz miktarı;

$$\dot{m}_f = \dot{m}_c + \dot{m}_e \quad (2.1)$$

formülünden hesaplanabilir. Siklona beslenen toz miktarı (\dot{m}_f): siklonda tutulan toz

(\dot{m}_c) ile siklondan kaçan toz (\dot{m}_e) miktarının toplamıdır. Siklon toz toplama verimi ise;

$$\eta = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_f} \quad (2.2)$$

olup, siklonda tutulan toz miktarının siklona beslenen toz miktarına oranıdır.

2.4. Toplanan Toz Boyut Dağılımı

Siklon ayırma verimi parametrelerinden biri de, ayrılmış olan tozun boyut dağılımıdır. Buradan siklon ayırıcısının toplayabildiği minimum parçacık çapı bulunabilir. Bu amaçla toplanmış tozdan alınan örneğin, lazer parçacık boyut dağılımı ölçüm sisteminde analizini yapmak mümkün olmaktadır. Siklon seperatörlerde toplanan tozun, belli bir boyut dağılımı vardır. Boyut dağılım grafiği ile gösterilen bu özellik için d10, d50, d90 olmak kaydıyla üç adet parametre tanımlanarak tozun genel boyut dağılımı ile ilgili bilgi edinilebilir. Bu parametrelerden d90, toz maddenin %90 ının küçük olduğu parçacık çapı, d50 toz maddenin %50 sinin, d10 ise %10 unun küçük olduğu parçacık çapı anlamına gelir.

Siklonların verim parametrelerinden birisi de, siklonun ne kadar ince tozları yakalayabildiğidir. Bu değer, pratik olarak d50 değerine bakarak belirlenebilir. d50 ne kadar küçük bir değer ise, siklon o kadar daha ince tozu yakalama kapasitesine sahiptir, anlamı taşımaktadır. D50 değeri tozların %50 sinin bu değerden küçük olduğu parçacık çapı anlamına gelmektedir.

2.5. Basınç Düşüşü

Endüstriyel uygulamalarda, basınç düşüşü iki referans noktası arasında statik basınç farkı ölçülerek hesaplanır. Bu durum siklonlarda biraz daha karmaşık olabilir. Öncelikle dönme hareketi, duvarda ortalama kesit alanından daha yüksek bir statik basınç oluşturur. Aynı zamanda dönme hareketinde depolanmış olan bir dinamik basınç bulunmaktadır. Dolayısıyla siklonlarda basınç düşüşü, statik ve dinamik basınçların toplamı olan toplam basınç düşüşü şeklinde hesaplanması daha doğru olacaktır. Siklonlarda basınç düşüşü; girişteki basınç düşüşü, ayırma bölgesindeki basınç düşüşü, iç borudaki basınç düşüşü olmak üzere üç bölümde ele alınır.

Girişteki diğer bölümlere göre küçük olduğu için ihmal edilebilir. Özellikle teğetsel girişli siklonlarda bu kayıplar küçüktür. Bununla beraber bazı siklon tiplerinde giriş vanaları mevcuttur, bu vanalarda basınç kaybı riski bulunmaktadır. Eğer vana uygun bir şekilde yerleştirilmiş ise, bu basınç kaybı da ihmal edilebilecek seviyelere gelmektedir.

Siklon gövdesindeki kayıplar daha yüksektir. Siklon duvarında meydana gelen kayıpların etkisi, dönme hareketinin büyüklüğünü azaltmak şeklindedir. Duvarlardaki sürtünme, dönme hareketinde sönmleme etkisine sahip olup, girdabı yayıflatıcı şekilde etki eder. Bununla beraber, siklon gövdesindeki kayıplar da, toplam basınç düşüşünde önemli bir role sahip değildir. İç borudaki basınç kayıpları, yüksek toz yüklü siklonlar haricinde, diğer siklonlarda, diğer iki bölgenin toplamından daha büyüktür. Meydana gelen basınç düşüşü hacimsel debinin karesi ile doğru orantılıdır. Siklonlarda tanımlanmış boyutsuz bir sayı olan Euler sayısı;

$$Eu \equiv \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho (v_z)^2} \quad (2.3)$$

basınç kaybının tanımlanmasında kullanılmaktadır. Denklem (2.3) de v_z siklon gövdesindeki ortalama aksel hız olup, hacimsel debinin, siklon gövdesinde, silindirik bölgenin kesit alanına bölünmesi suretiyle bulunmaktadır. Burada kullanılan hız çok kritik değildir. Bazı uygulamalarda euler sayısını bulmak için siklona giriş hızı kullanılmış, bazılarında ise iç borudaki ortalama hız kullanılmıştır. Bu durum sizin sisteminizi nasıl tanımlamak istediğinizle ilgilidir.

2.6. Siklonlarda Ölçüm Teknikleri

Siklonlarda hız, ve basınç düşüşü ölçümleri yapılmaktadır. Bu ölçümlerden hız ölçümü, siklon tasarımının doğru yapılıp yapılmadığıyla ilgili bilgiler verir. Basınç düşüşü ise siklon performansının en önemli parametrelerinden birisidir.

2.6.1. Siklonlarda hız ölçümleri

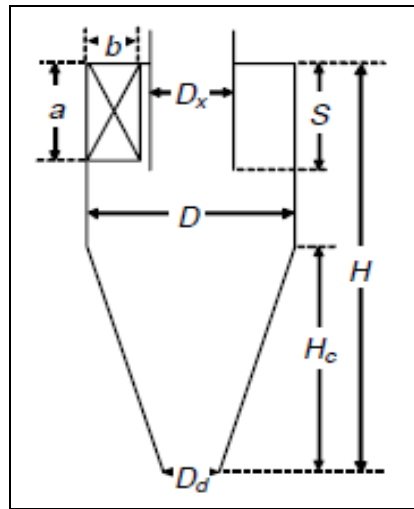
Siklonlarda aksel ve radyal hızlar meydana gelmektedir. Üç boyutlu, kızıgn telli anemometreler ile her hangi bir noktadaki hızı ve yönünü ölçmek mümkündür. Bununla beraber daha hassas ölçümler için lazer dopler anemometresi kullanılır.

2.6.2. Basınç düşüşü

Siklonların yapısı gereği, statik basıncın her hangi bir bölgede ölçülmesi ve girişteki statik basınçtan bu değerin çıkarılması ile basınç düşüşünün bulunması mümkün değildir. Basınç düşüşünü tespit etmek için statik ve dinamik basınçları toplayarak bunları farkını bulmak gerekir ki, bu da toplam mekanik enerjinin kaybı anlamına gelmektedir. Siklon girişinde, herhangi bir dönen akış olmadığı, statik basıncın düzgün dağıldığı için ölçüm yapmak kolaydır. Bunun için her hangi bir basınç ölçüm tapası yeterli olacaktır. Siklon çıkışında ise bir miktar da dönme hareketi olduğu için dönme hareketinde depolanan dinamik basınç bulunmaktadır. Bununla beraber statik basınç dağılımı düzgün değil, her noktada farklı statik basınç bulunması söz konusudur. Siklonlarda basınç düşüşü ölçmek için pratikte, çıkışta akış düzenleyici kanatlar kullanılabilir ya da siklon çıkışı atmosfere açık yapılarak bu problem giderilebilir.

2.7. Siklon Boyutlandırılması

Siklonlar, giriş çapı koni yüksekliği iç boru çapı gibi ebatlarının ölçüleri ve oranları ile boyutlandırılır. Standart bir siklon Şekil 2,3 deki gibidir. Siklon geometrisi aşağıdaki sekiz ebadının ölçüsü ile tanımlanabilir. Silindirik bölümdeki gövde çapı (D), toplam siklon boyu (H), iç boru çapı (D_x), iç boru boyu (S), giriş kesiti, genişliği ve yüksekliği (a, b), konik bölgenin yüksekliği (H_c), toz çıkışı çapı (D_d) ile tanımlanır.



Şekil 2.3. Genel bir siklon çizimi ve boyut parametreleri [1]

Siklon ölçüleri ve ebat oranları hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından, verimli şekilde çalışabilecek olan siklonların boyut oranları Tablo 2.1 de verilmiştir. Tabloda tüm geometrilerin giriş kesitleri $0,01\text{m}^2$ olarak ayarlanmıştır [1].

Tablo 2.1. Standart siklon geometrileri

İsim	D	D_x	S	H	$H-H_c$	a	b	D_d
Muschelknautz E	680	170	311	934	173	173	58	228
Muschelknautz D	357	119	318	863	262	187	54	195
Storch 4	260	117	176	1616	909	260	38	91
Storch 3	192	107	200	821	462	167	60	92
Storch 2	225	108	239	1097	464	188	53	84
Storch 1	365	123	142	1943	548	100	100	64
Tengbergen C	337	112	145	930	187	100	100	112
Tengbergen B	210	112	224	604	324	179	56	112
Tengbergen A	277	112	157	647	180	135	74	202
TSN-11	348	136	242	959	219	184	54	154
TSN-15	266	158	350	1124	589	166	60	119

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmaya ilk olarak literatür taraması ile başlanmıştır.

3.1. Literatür Çalışmaları

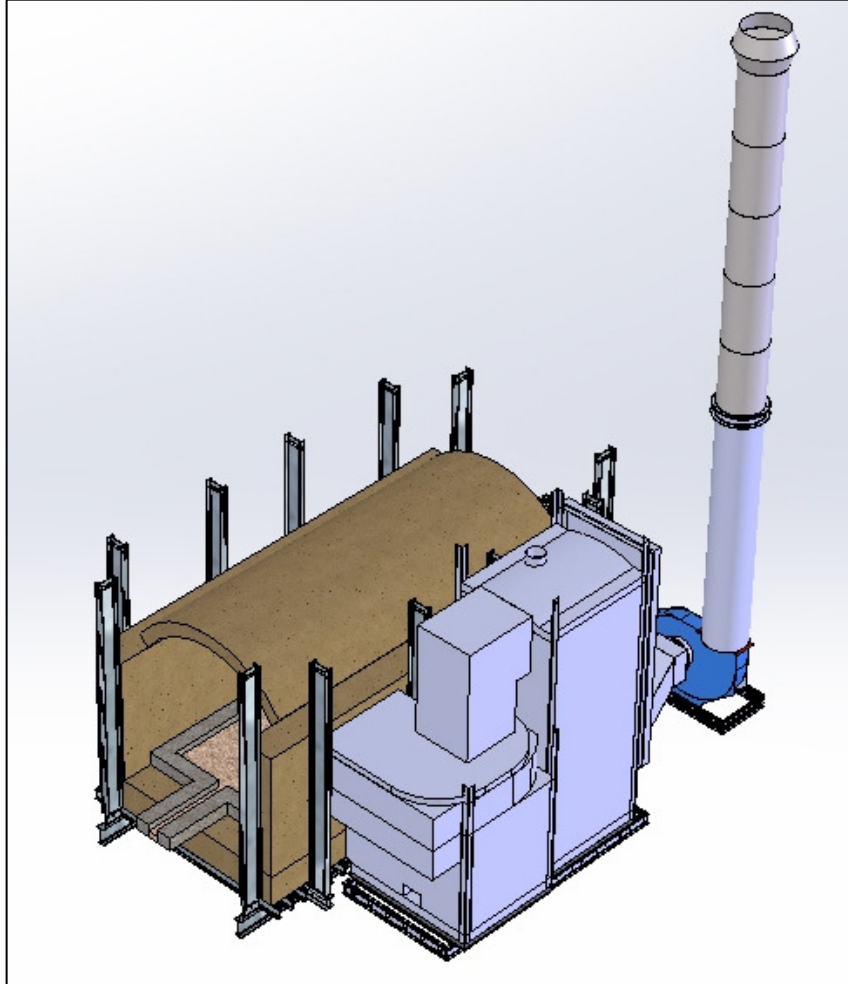
Yüksek sıcaklık ve basınçta siklon davranışı incelemiş olan çalışmada [3], 6 bar ve 400 derece sıcak şartları arasında deneysel ve sayısal yöntem analizleri yapılmıştır. Çalışmanın esas amacı iyi bir siklon tasarımı yapabilen program geliştirmektir. Sayısal yöntemlerle hesaplanmış farklı basınç, sıcaklık ve akış hızlarında basınç düşüşü ve toz toplama verimi, deneysel yöntemlerle kıyaslanmıştır. Yapılan analize göre hesaplanan değerler deneysel sonuçlara paralellik göstermiştir. Basınç arttıkça 10 mikron altı parçacıklarda toplama verimi artmasına rağmen sıcaklık arttıkça bu verim azalmıştır. Sıcaklıkla verim azalmasının sebebi yoğunluk azalmasına bağlı olarak sürükleme katsayısının azalması olarak açıklanmıştır, bu azalmanın teorik hesaplamalarla tam olarak paralellik gösterdiğini belirtilmiştir.

Islak siklon ile kuru siklon arasındaki farkı incelendiği diğer bir çalışmada [4], talk tozu ve uçucu kül kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda ıslak siklonda toplama veriminin %2 daha yüksek olmasına rağmen, toplanan parçacıkların çapları üzerinde yapılan hesaplamada 1 - 3 μm arasındaki parçacıklar, ıslak siklonda %33 daha yüksek verimle yakalandığını tespit edilmiştir.

Siklon dalma borusu çap değişiminin basınç kaybına etkisinin incelendiği başka bir çalışmada ise [5], dalma boyu çapı için optimum bir dalma borusu çapı değeri olduğunu öne sürülmüştür. Bununla beraber dalma borusunun boyunu artırdığında hemen-hemen lineer seviyede basınç kaybı meydana geldiğini de gösterilmiştir.

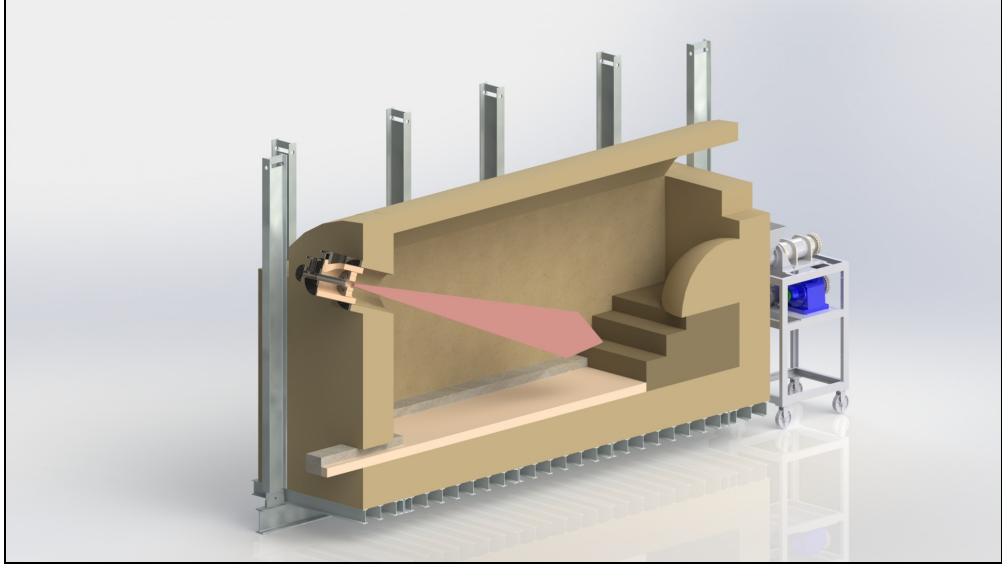
3.2. Deney Düzenegi

Deney düzenegi, seramik Şekil 3.1 deki gibi bir frit ertitme fırını bacasına yerleştirilen, yüksek sıcaklık siklonundan meydana gelmektedir. Söz konusu siklon frit ertitme fırınında, uçşarak baca gazı ile birlikte bacaya giden seramik tozların toplanması için tasarlanmıştır. Frit hammaddelerinin meydana getirdiği toz yoğunluğu, yaklaşık 2500 kg / m^3 civarındadır. Bununla beraber, baca gazı sıcaklığı $1000 - 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındadır. Bu çalışmada baz alınan baca gazı sıcaklığı $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ dir. Bu sıcaklıktaki baca gazı yoğunluğu ile, hammadde yoğunluğu arasında bulunan büyük farktan dolayı, siklon separatörün tozu yüksek bir oranda ayırması beklenmiştir.

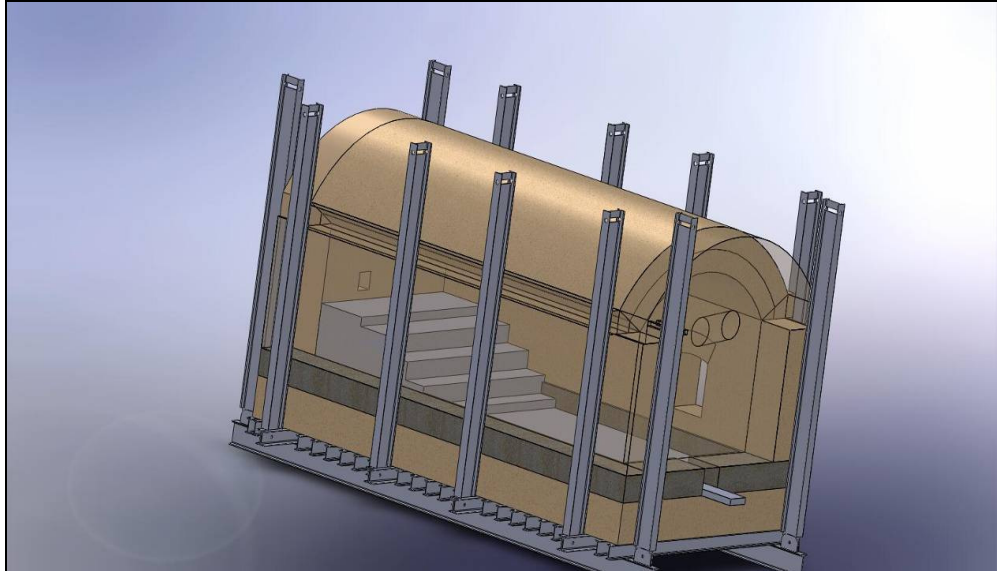


Şekil 3.1. Seramik frit ertitme fırını baca üç boyutlu görüntüsü

Şekil 3.2 de frit fırını iç kesiti görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.3 de ise fırını üç boyutlu olarak görmekteyiz. Frit fırınında baca çıkışı, ön tarafta brülör yanında ve fırın tabanına yerleştirilmiş, hammadde yığınının mümkün olan en uzak bölgeye yerleştirilmiştir. Böylece tozun bacaya penetrasyonunda azalma hedeflenmiştir. Aynı zamanda, baca çıkışının hammaddeden uzak olması, baca gazı ısısının hammaddeye en yüksek orandan aktarılması için gereklidir.



Şekil 3.2. Frit fırını, fırın içi üç boyutlu görüntüsü



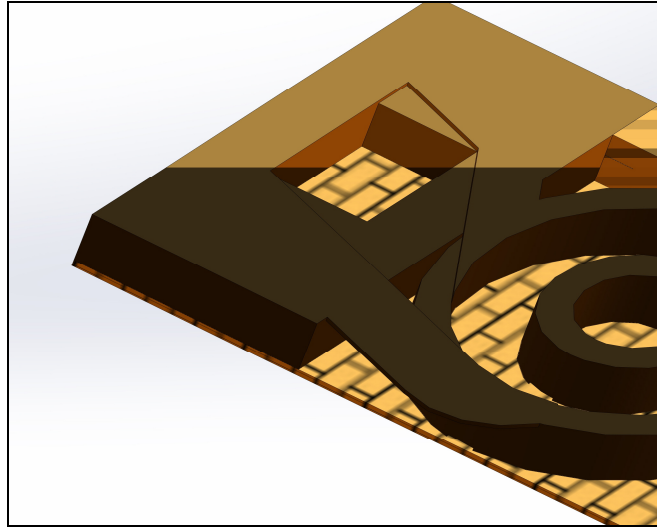
Şekil 3.3. Frit fırını iç görüntüsü üç boyutlu çizimi

Deney düzeneğinde, fırın baca çıkışı fırın zemininde olduğu, siklon girişinin ise üstten olması gerekliliğinden dolayı, fırın baca çıkış kanalı, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 de

görüldüğü üzere, refrakterden bir tünel ile siklon girişine bağlandı. Bu tünelin, basınç kaybı daha düşük olması için yuvarlak yapılması daha uygun olabilirdi, ancak refrakter malzemelerde tuğla kısıtlayıcı etken olduğundan dolayı kare yapıldı. Tünel kare kesitli olarak imal edildi. Tünelin tüm duvarları %45 alümina içeren refrakter tuğla ile örüldü.



Şekil 3.4. Fırın baca çıkışı - siklon girişi arası tüneli resmi



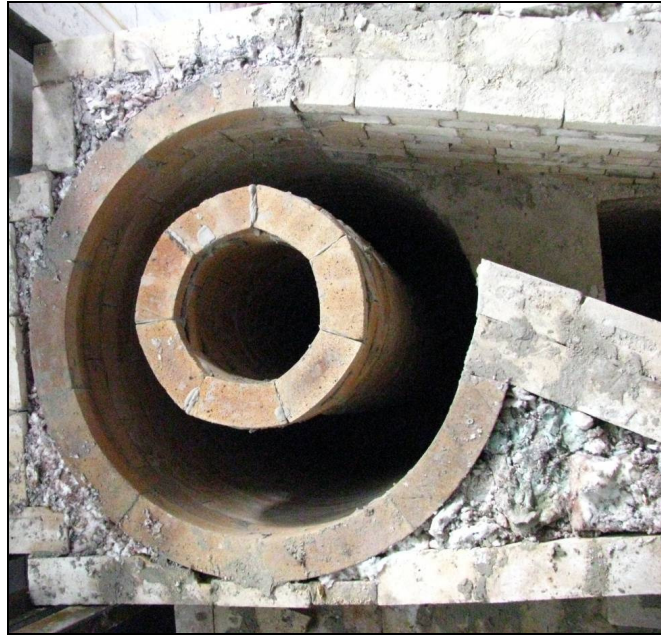
Şekil 3.5. Fırın çıkışı gaz yolu üç boyutlu çizimi

Siklon giriş için, Şekil 3.6 da gösterildiği üzere, teğetsel bir geometri seçildi. Bu geometriye uygun olarak baca -siklon tünelinden bir açıyla, siklon gövdesine girildi. Siklon gövdesi Tablo 3.1 de kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmiş olan %45 Al_2O_3 kupol tuğlaları ile üretildi. Şekil 3.7 de gösterilen kupol tuğlaları, örme işleminden

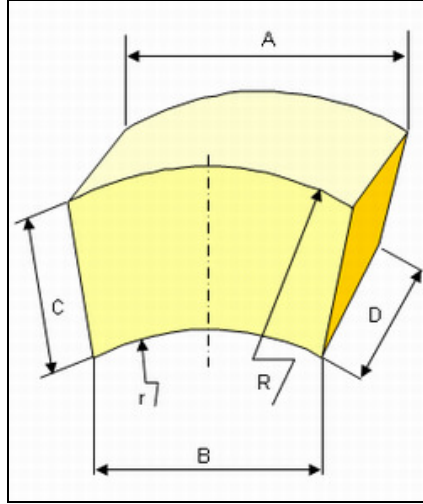
sonra, mükemmel bir daire meydana getirmektedir. Ayrıca kupol tuğlalarının iç yüzeyi pürüzsüz olduğu için, bu durum sürtünmeden kaynaklı basınç kaybının azaltılmasında önemli rol oynamıştır. Bununla beraber kupol tuğlaları, kalınlığı yalnızca 10 cm olan tuğlalardır. Siklon içinde sıcaklık ortalama 1100 °C olacağı ön görüldüğü için, bu kalınlığın yalıtım açısından yeterli olmadığı açıktır. Bu sebepten dolayı siklon seperatör, refrakterden yapılmış dikdörtgen bir prizma içine alınarak ara bölgeler izole malzeme ile dolduruldu.

Tablo 3.1. Refrakter tuğla özellikleri

Kimyasal Özellikleri							Fiziksel Özellikleri	
Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Na ₂ O+ K ₂ O%	CaO%	MgO%	Yoğunluğu gr/cm ³	Porozitesi %
45	49	1,5	1,4	1	0,50	0,5	2,3	17



Şekil 3.6. Siklon hava giriş detayı



Şekil 3.7. Kupol tuğlası

Siklonlarda iç boru genellikle havada, üstten asılmış şekilde, durur. Yüksek sıcaklık siklonunda, siklon içi 1100 derece santigrat olacağından dolayı, iç boruyu havada tutturmanın bir yolu bulunmamaktadır. Bu nedenle siklon içi borusu, Şekil 3.8 de olduğu gibi, kupol tuğlalarından yapılmak suretiyle zemine oturturulmuştur. İç boru çapı 0,3 m olarak belirlenmiştir. Ancak bu çapta standart üretim tuğla bulunmadığı için bu çapa en yakın çaptaki kupol tuğlaları alınmış ve köşelerin kesilmesi suretiyle yuvarlağa yakın bir geometri elde edilmiştir. Bu durum iç boruda girintili bir yüzey oluşmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 3.8. Siklon iç borusu

Siklon iç borusunun 1100 °C de ayakta durabilmesi için zemine oturması gerekmektedir. Siklon iç borusunun alt kısmının zemine oturması, iç boruya havanın girmesini engellemektedir. Bu sebeple siklon iç borusu bir elek formunda yapıldı. Şekil 3.9 da gösterildiği biçimde, siklon zeminine dik biçimde koyulan tuğlalar, aralıklı olarak biçimlendirildi, böylece aralarından hava akışına izin verecek bir şekle gelmiş oldu.



Şekil 3.9. Siklon iç borusu taban detayı

Siklon iç borusu ve dış borusu üretilip montajı yapıldıktan sonra siklon dış borusunun tavanını kapatmak, iç boruyu ise dışarı çıkarmak gerekti. Refrakter malzemeler ile yüksek sıcaklıkta tavan kapatmanın en çok kullanılan yöntemi kemer yapmaktır. Böylece tavandaki refrakter ağırlığından meydana gelecek yük duvarlara taşınmış olur. Ancak siklonda duvarlar silindirik olduğu için kemer yapma imkânı bulunmamaktadır. Bu sebeple siklonun üzerine yüksek sıcaklığa dayanıklı ancak daha hafif malzeme seçmek gerekliliği vardır. Dolayısıyla Şekil 3.10 da gösterildiği gibi, 50 mm kalınlığında kordierit plakalar, bir daire oluşturacak şekilde kesilerek

tavan kapatıldı. Ancak 50 mm izolasyon açısından çok ince olması bir problem meydana getirmektedir. Bunun için kordierit plakalar üzerine 126 kg/m^3 yoğunluğunda seramik yünü kullanıldı. Bu ürün hem $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa dayanıklı, hem hafif hem de ısı iletim katsayısı çok düşük olan bir malzemedir.

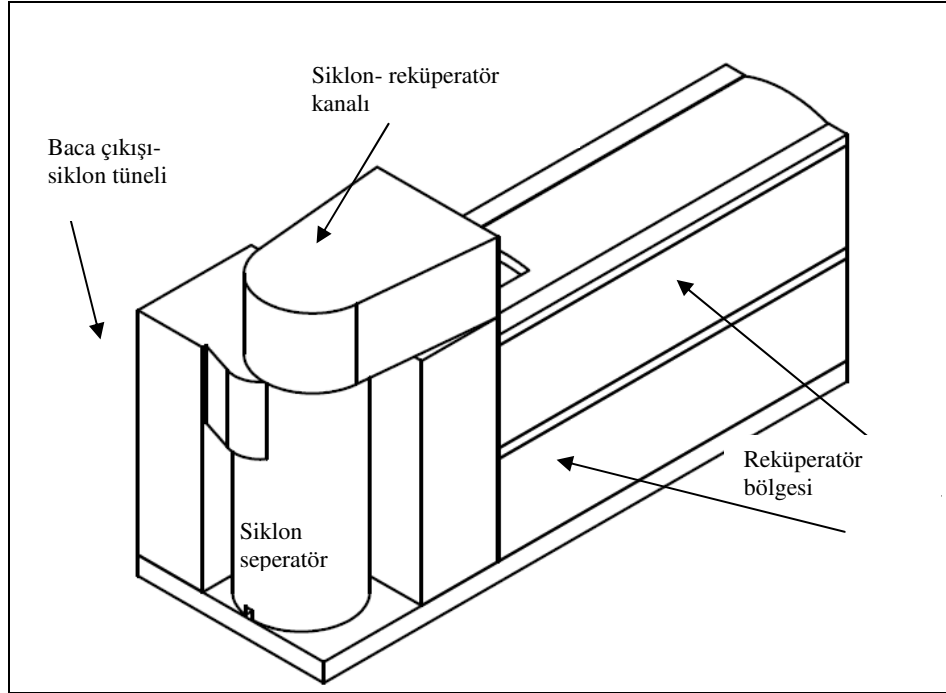


Şekil 3.10. Siklon tavan detayı

Şekil 3.11 da; siklon dış borusu üzeri kapatıldıktan ve izole edildikten sonra, iç boru yükseltilip, bir kanal vasıtasıyla, baca gazının reküperatör bölgesine gönderilmesi sağlandı. Reküperatör bölgesinde, baca gazı, içinden yakma havası geçirilen bir ısı değiştirici vasıtasıyla soğutuldu. Soğutma esnasında baca gazında bulunan buhar halindeki hammaddeler, reküperatör boruları üzerinde yoğunlaşarak beyaz bir tabaka meydana getirdi. Şekil 3.12 de siklon ve reküperatör bölgesi ile birlikte toplam baca bölgesinin şeması bulunmaktadır. Yapılan tüm montaj bu şemada görünmektedir.



Şekil 3.11. Siklon – reküperatör bölgesi baca kanalı



Şekil 3.12. Frit fırını baca montaj şeması

3.3. Siklon Hesaplamaları

Siklonun boyutunu belirleyecek olan birinci etken baca gazı debisi olduğu için, siklon tasarım hesaplamalarında, öncelikle baca gazı debisi hesabı yapıldı. Ardından siklon giriş hızı yaklaşık 20 m/s olacak şekilde, siklon giriş kesitleri belirlenerek, standart siklon tasarımı seçildi. Seçilen tasarım ölçülerinden basınç düşüşü ve siklonun tutabileceği minimum parçacık çapı hesabı yapıldı. Daha sonra yapılan hesaplama değerleri, ölçüm değerleri ile kıyaslandı.

3.3.1. Baca gazı debisi

Mevcut deney düzeneğinde, siklon içerisinden geçecek baca gazı miktarını, brülördeki hava ve gaz debisi belirlemektedir. Fırın yakma sistemine beslenen hava ve gaz miktarı ile baca gazının kütleli değeri aynı olmak zorundadır, bununla beraber hacimsel değerleri aynı olma zorunluluğu yoktur. Brülöre beslenen hava ve gaz miktarı, fırın sıcaklığına bağlı olarak artıran ve azaltan bir kontrol sistemine bağlandı. Fırın ısı ihtiyacı olduğunda hava ve gaz miktarı artacak, ısı ihtiyacı azaldığında ise azalacak şekilde ayarlandı. Hesaplamalarda, baz olarak minimum ve maksimum değerler göz önünde bulundurularak ortalama değer alındı.

Hava debisi, minimum: 1200 Nm³/saat, maksimum 2000 Nm³/saat olarak belirlendiğinden, frit fırını için ortalama 1500 Nm³/ saat hava debisi; hesaplamalarda baz olarak kullanıldı.

Baca gazı debisini belirlemek için yanma gazı ürünleri ve bunların debilerini belirlemek gerekti. Doğal gaz bileşimi büyük oranda metan içerdiği için hesaplamalarda tamamı metan olarak değerlendirildi. Hava ile doğal gaz yanma reaksiyonu;



şeklinde. Hava debisi 1500 kg /Nm³ olarak kabul edilmişti, Denklem (3.1) de reaksiyon denkliği kullanılarak havanın Kütleli akış hızı;

$$1500 \cdot \frac{\text{Nm}^3}{\text{saat}} * 1,205 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} = 1807 \text{kg/saat}$$

,O₂ akış hızı;

$$1807 \frac{\text{kg.Hava}}{\text{saat}} * \frac{23,2\text{kg.O}_2}{100\text{kg.Hava}} = 419\text{kg/saat}$$

N₂ akış hızı; 1807 kg/saat -419 kg / saat = 1388 kg / saat olarak hesaplandı. Reaksiyon ifadesine göre, oksijen debisi oranlanarak Tablo 3.2 deki baca gazlar debileri bulundu;

Tablo 3.2. Baca gazları kütleli debileri

CO ₂ kütleli debisi	288 kg/saat
H ₂ O kütleli debisi	235,7 kg/saat
N ₂ kütleli debisi	1388 kg/saat
Toplam baca gazı kütleli debisi	1911,7 kg/saat

Siklon tasarım hesaplamalarında hız bilgisine ihtiyacımız olduğundan tüm akış hızları hacimsel olarak hesaplanması gerekti. Bu sebeple her gazın normal şartlar altındaki yoğunluğu baz alınarak, ideal gaz yasasından faydalanıp yüksek sıcaklıktaki yoğunluğu tespit edildi. İdeal gaz yasası;

$$P.V = n.\bar{R}.T \quad (3.2)$$

şeklindedir. Bu ifadede P,V, sırasıyla basınç ve hacim terimleri, n, mol sayısı, \bar{R} , evrensel gaz sabiti, T ise sıcaklık terimleridir. Mol sayısı ise,

$$n = \frac{m}{M_A} \quad (3.3)$$

dır. ifadede, m, kütle, M_A, bir mol maddenin molekül ağırlığıdır. Her iki ifade birleştirilirse;

$$P.M_A = \rho.\bar{R}.T \quad (3.4)$$

elde edilir. T₁ ve T₂ sıcaklıkları için bu ifade yazıldığında ve oranlandığında;

$$\frac{P.M_A}{P.M_A} = \frac{\rho_1 * \bar{R}.T_1}{\rho_2 * \bar{R}.T_2} \quad (3.5)$$

Formülü meydana gelmektedir. İfade sadeleştirildiğinde;

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \quad (3.6)$$

formülüne ulaşılmaktadır. Yukarıdaki formül CO₂ H₂O ve N₂ ye uygulanarak yoğunluk değerleri ve hacimsel akış hızları Tablo 3.3 deki gibi olduğu belirlendi.

Tablo 3.3. Baca gazları hacimsel akış değerleri

	20°C de yoğunluk	1100 °C de yoğunluk	Hacimsel debi (m ³ /saat)	Hacimsel debi (m ³ /sn)
CO ₂	1,205	0,257	1120	0,311
H ₂ O	0,598 (100 °C de)	0,162	1455	0,404
N ₂	1,165	0,248	5597	1,555
Toplam Gaz			8172	2,270

3.3.2. Baca çıkış kesitleri ve hava hızları

Baca gazı debisi belirlendikten sonra baca hızları da belirlenerek kesit alanları hesaplandı. Baca kanalı kesitlerinde, baca gazı hızı 5 m/s olarak belirlendi. Bu hız referansına göre kesitleri;

$$\dot{Q} = v.A \quad (3.7)$$

$$A = \dot{Q}/v \quad (3.8)$$

formülleri ile hesaplandı. Burada \dot{Q} , baca gazı hacimsel debisini (m³/s), v , baca gazı hızını (m/s) ifade etmektedir. Hacimsel debinin hıza bölünmesiyle, v hızındaki baca gazı için gerekli baca kesit alanı (A) bulundu. Deney düzeneğindeki kesit alanı;

$$A = 2,270/5 = 0,454m^2$$

olarak hesaplandı. Siklon girişine ve siklondan sonra baca ya kadar olan baca kanalları 0,454 m² kesit alanı olacak şekilde, refrakter tuğla kullanılarak yapıldı.

3.3.3. Siklon giriş hızı ve siklon boyutlandırması

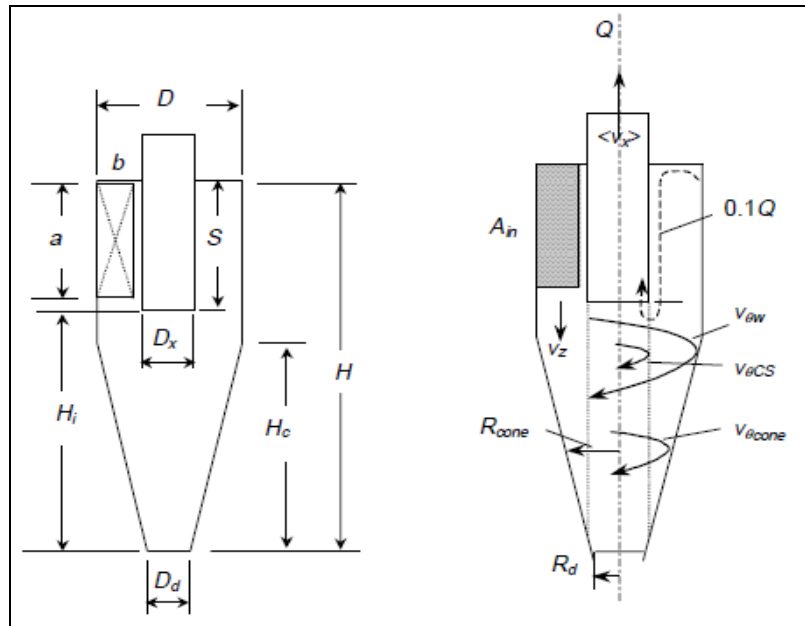
Siklon boyutlandırmasında esas olarak, Tablo 2.1 de bulunan standart siklon ölçülerinden faydalanıldı. Araştırmada üretilen siklon, refrakter tuğladan yapıldığı için, konik bir kısım yapılmadı, siklon silindirik ölçülerde yapıldı. Siklon iç borusu,

Tablo 3.4. Siklon ölçüleri ve baca gaz değerleri

Siklon Verileri	Anlamı	Değeri	Birimi
$\mu_{\text{ baca gazı}}$	Baca gazı viskozitesi	0,0000469	Pa.S
Y	Baca gazı debisi	2,27	m ³ /s
B	Siklon giriş kesiti genişliği	0,25	m
A	Siklon giriş kesiti yüksekliği	0,5	m
R_d	Siklon Dış boru çapı	1	m
R_{io}	Siklon iç boru çapı	0,3	m
H	Siklon yüksekliği	1,5	m
$\rho_{\text{ katı}}$	Frit tozu yoğunluğu	2500	kg/m ³
$\rho_{\text{ baca gazı}}$	Baca gazı yoğunluğu	0,234	kg/m ³

3.3.4. Siklon performans hesaplamaları

Siklon tasarımı, gaz debileri, siklon ölçüleri belirlendikten sonra, siklon basınç düşüşü ve siklonun yakalayabileceği en küçük parçacık boyut çapı hesaplamaları yapıldı. Siklon basınç ve en küçük parçacık boyutu, hesaplamaları için literatürde birçok model geliştirilmiştir. Bu çalışmada Muschelknautz modeli [1], kullanıldı. Hesaplamalarda kullanılan siklon ebatlarını gösteren simgeler, Şekil 3.15 de verilmiştir [1].



Şekil 3.15. Siklon ebatlarını gösteren simgeler

Hesaplamalarda, öncelikle giriş daralma katsayısı [1];

$$\alpha = \frac{1}{\xi} \left\{ 1 - \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{\xi}{2} \right)^2 - \frac{\xi}{2} \right] \sqrt{1 - \frac{(1 - \xi^2)(2\xi - \xi^2)}{1 + C_0}}} \right\} \quad (3.9)$$

deneysel formülü kullanılarak α katsayısı hesaplandı. Formülde bulunan ξ ;

$$\xi = 2b/D \quad (3.9.a)$$

eşitliği ile, C_0 ise;

$$C_0 = \dot{m}_p / \dot{m}_g \quad (3.9.b)$$

eşitliği ile hesaplandı. Burada \dot{m}_p , siklona girişteki toz kütlesi, \dot{m}_g , siklona giren gaz kütlesidir. Daha sonra, duvar hızı [1];

$$v_{\theta w} = \frac{v_{in} R_{in}}{\alpha R} \quad (3.10)$$

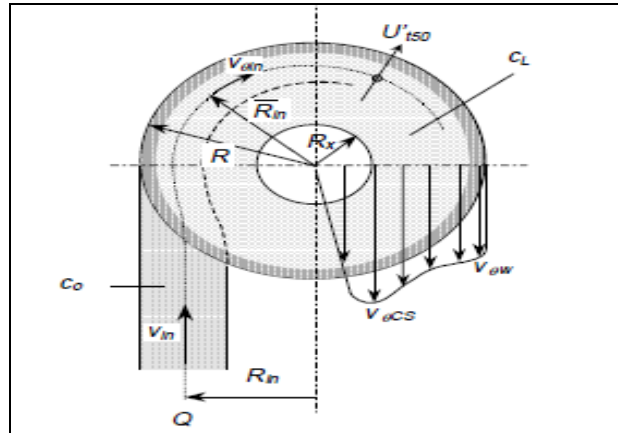
eşitliğinden hesaplandı. Eşitlikte bulunan V_{in} ;

$$v_{in} = \frac{Q}{A_{in}} = \frac{Q}{ab} \quad (3.10.a)$$

eşitliğinden hesaplanmış olup, Şekil 3.16 de görünen siklon girişinin radyal pozisyonu (R_{in}) ise ;

$$R_{in} = (R - b/2) \quad (3.10.b)$$

olarak hesaplandı.



Şekil 3.16. Siklon performans parametreleri [1]

Siklonun yakalayabildiği minimum parçacık çapı, (x_{50}) hesaplamak amacıyla, öncelikle, Şekil 3.15 de şematik olarak gösterilen iç çekirdek çapındaki (R_{CS}) gaz hızı [1];

$$v_{\theta CS} = \frac{(R/R_x)}{1 + \frac{f \cdot A_R v_{\theta w} \sqrt{R/R_x}}{2Q}} \quad (3.11)$$

formülünden hesaplandı. Denklem (3.15) de bulunan, sürtünmeye maruz kalan tüm alanları ifade eden (A_R) ifadesi [1];

$$A_R = \pi \left[R^2 - R_x^2 + 2R(H - H_c) + (R + R_d) \sqrt{H_c^2 + (R - R_d)^2} + 2R_x S \right] \quad (3.11.a)$$

formülü ile hesaplandı. Bununla beraber Denklem (3.11) de, sürtünme faktörün (f), [1];

$$f = 0,005(1 + 3\sqrt{C_0}) \quad (3.11.b)$$

bağıntısı kullanılarak belirlendi. Sürtünme faktörü, sürtünmeye maruz kalan alanlar toplamı ve iç çekirdek çapındaki gaz hızı hesaplandıktan sonra, siklonun yakalayabileceği minimum parçacık çapı (X_{50}) [1];

$$x_{50} = \sqrt{\frac{18\mu(0.9Q)}{2\pi(\rho_p - \rho)v_{\theta CS}^2(H - S)}} \quad (3.12)$$

formülü ile hesaplandı. Daha sonra siklon da meydana gelen basınç düşüşü hesaplamaları yapıldı. Basınç kaybı iki bölümde incelendi; gövdede meydana gelen basınç kaybı (ΔP_b), iç boruda meydana gelen basınç kaybı (ΔP_x). Bu iki kayıp toplam basınç kaybını meydana getirdi. Gövdede meydana gelen basınç kaybı [1];

$$\Delta P_b = \frac{f A_R \rho (v_{\theta CS})^{1.5}}{2x0.9Q} \quad (3.13)$$

formülü ile hesaplandı. Çekirdekte ve iç boruda meydana gelen basınç düşüşü ise [1];

$$\Delta P_x = \left[2 + \left(\frac{v_{\theta CS}}{v_x} \right)^2 + 3 \left(\frac{v_{\theta CS}}{v_x} \right)^{4/3} \right] \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3.14)$$

formülü kullanılarak hesaplandı. Denklem (3.14) de görünen yüzeysel aksenal hız (v_x) [1];

$$v_x = \frac{v_{in} ab}{(\pi D_x^2 / 4)} \quad (3.14a)$$

eşitliği kullanılarak hesaplandı. Siklon basınç kaybı ve en küçük parçacık çapı hesaplamalarında kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 3.5 de özetlendi.

Tablo 3.5. Siklon hesaplama parametreleri

Semboller	Anlamı	Değeri	Birimi
A	Siklon giriş kesit yüksekliği	0,5	m
b	Siklon giriş kesit genişliği	0,3	m
D	Siklon gövde çapı	1	m
D _x	Siklon iç boru çapı	0,3	m
H	Siklon toplam yüksekliği	1,5	m
H _c	Siklon konik yüksekliği	0	m
D _d	Siklon taban toz çıkış çapı	1	m
S	Siklon iç borusu dalma yüksekliği	1	m
Q	Baca gazı hacimsel debi	2,27	m ³ /s
m _p	Siklona beslenen katı madde kütleli debisi	0,853	gr/nm ³
μ	Baca gazı viskozitesi	4,69x10 ⁻⁵	Pa.S
ρ	Baca gazı yoğunluğu	0,23	kg/m ³
ρ _p	Katı madde yoğunluğu	2500	kg/m ³

Tablo 3.5. de listelenen parametreler kullanılarak yukarıda verilen formüller ile hesaplamalar yapıldı. Bu çalışmada deney düzeneği 1200 santigrat derece gibi yüksek bir sıcaklıkta çalışacağı öngörüldüğü için, hesaplamaların deney sonuçları ile bire bir uyması beklenmemektedir. Çalışma sonucunda Muschelknautz modelinin [1], bu tip bir uygulama için ne derecede kullanışlı olacağı, ne kadar hata ile doğru sonuca yaklaşacağı belirlenmiş olacaktır. Deney düzeneği şekli, standart siklon geometrisine tam olarak uymadığından, bazı ölçüler benzetme yoluyla elde edilmiştir. Örneğin, deney düzeneğindeki siklonda konik bir bölge bulunmamaktadır. Bu gibi farklı geometri kabulleri, Tablo 3.5 de verilmiştir. Yapılan hesaplama sonuçları Tablo 3.6. da listelenmiştir.

Tablo 3.6. Siklon hesaplama sonuçları

Semboller	Anlamı	Değeri	Birimi
ξ	Siklon giriş kesit genişliğinin/ siklon gövde yarıçapı	0,6	
C_0	Siklona giren toz kütlesi / siklona giren gaz kütlesi	0,0037	
α	Siklon giriş daralma katsayısı	0,577	
A_R	Siklonda sürtünmeye maruz kalan tüm alanlar toplamı	0,3	m ²
v_{in}	Baca gazı, siklon giriş kesitindeki hızı	15,13	m/s
R_{in}	Siklon girişinin radyal pozisyonu	0,35	m
$v_{\theta w}$	Duvar hızı	18,36	m/s
f	Sürtünme faktörü	0,007	
$v_{\theta CS}$	İç çekirdek çapındaki gaz hızı	46,28	m/s
v_x	Yüzeysel aksenal hız	0,853	m/s
x_{50}	Siklonun yakalayabileceği en küçük parçacık çapı	10,12	μm
ΔP_b	Siklon gövdesinde meydana gelen basınç kaybı	60,94	Pa
ΔP_x	Çekirdekte ve iç boruda meydana gelen basınç kaybı	1062,7	Pa
ΔP_T	Siklonda meydana gelen toplam basınç kaybı	1123,6	Pa

Yapılan hesaplamalarda, siklon basınç kaybının 1123,6 Pa seviyesinde olacağı, siklonun yakalayabileceği minimum parçacık çapının da 10,12 μm olacağı hesaplandı.

3.4. Siklon Hesaplamaları

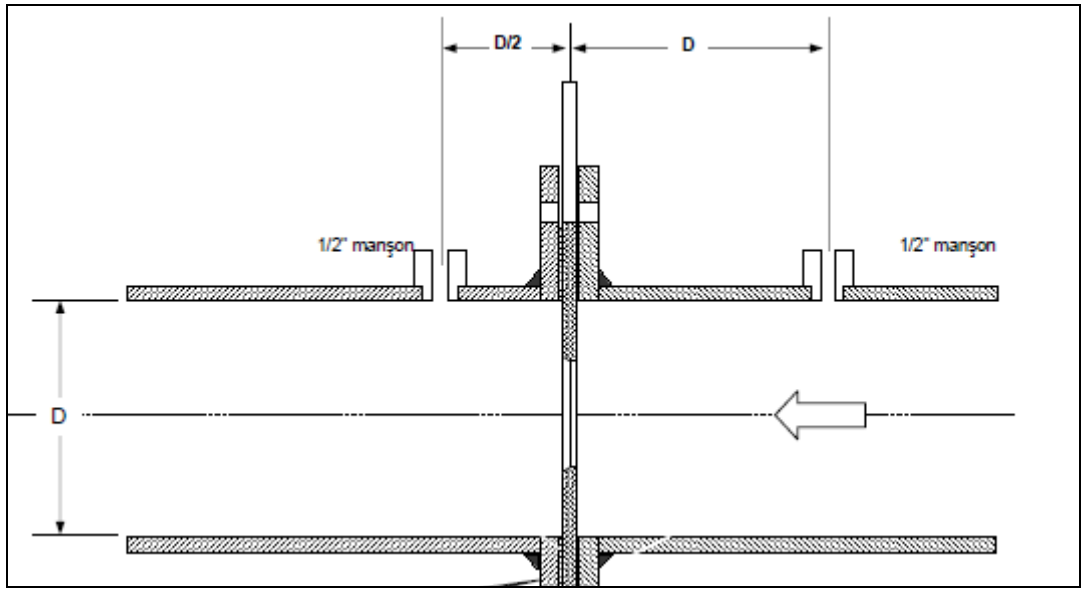
Yukarıda boyutları belirtilen, siklon seperatörün imalatı yapılmış olup, frit fırınına bağlantısı gerçekleştirilerek sistem iki gün boyunca çalıştırılarak, kararlı rejime gelmesi beklendi. Daha sonra, seperatör üzerinden ilgili ölçümler yapılarak, hesaplanmış değerlerle karşılaştırıldı.

3.4.1. Hava debisi ölçümleri

Siklona beslenen baca gazı debisini, fırına beslenen doğal gaz ve yakma havası meydana getirmektedir. Yukarıda hesaplamalar kısmında baca gazının debisinin yakma havası ve doğal gaz debisi kullanılarak nasıl hesaplandığı anlatılmıştır.

Fırında baca gazı debisini oluşturan, yakma havası ve doğal gaz debisi, sırasıyla gaz borusu ve yakma havası borusu üzerine koyulan birer orifis metre ile ölçüldü. Orifis

metreler, bernoulli i kullanılarak akışkan debisini ölçen plakalardır. Orifis metreler ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup, orifis standartları oluşturulmuştur. Orifis plaka hava hızını ölçmek için, Şekil 3.17. de görüldüğü gibi, akışın geldiği yönde orifis plakasından bir çap boyu kadar uzakta, orifis plakasından sonra da yarı çap kadar uzakta, basınç ölçüm delikleri bırakıldı. Havanın giriş ve çıkış basınçları arasındaki fark, hava hızının karesi ile orantılıdır. Bu basınç farkı değerleri, ölçülen hava hızı, hava borusu kesit alanı yardımıyla hacimsel debiye dönüştürüldü. Aynı zamanda, hava basıncı ve sıcaklığı ölçülerek, sonuç nm³/saat biriminde hesaplandı.



Şekil 3.17. Orifis plaka montaj resmi

Orifis debisi hesabı için [9];

$$\dot{m} = Cd * \frac{\pi \cdot D_o^2}{4} * \rho * \sqrt{2 * \frac{\Delta P}{\rho} * (1 - D_b^4)} \quad (3.15)$$

formülü kullanıldı. Burada, (\dot{m}), orifisten geçen akışkan kütesel debisi, (D_o), orifis çapı, (D_b), orifis çapı, (ρ), akışkan yoğunluğu, (ΔP), orifis giriş çıkışı arasındaki basınç farkı, (Cd), orifis deşarj katsayısı olup orifris çapının boru çapına oranı ve reynolds sayısına göre Tablo 3.7. da listelenmiş olup, 0,64 olarak alındı.

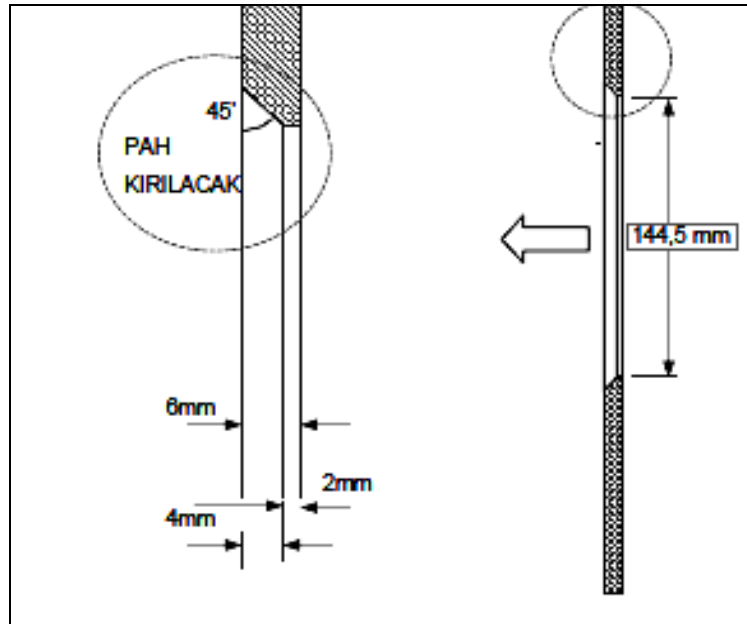
Fırın brülör hava hattında brülörün kapasitesi göz önünde bulundurularak, yakma havası boru çapı (D_b) 0,20274 m olarak belirlendi. Bununla beraber orifis çapı (D_o) Şekil 3.18 de olduğu gibi (D_o) 0,1445m olarak belirlendi. Orifis giriş ve çıkışındaki

basınç ölçüm delikleri bir basınç transmitterine bağlanarak, anlık debinin dijital olarak sürekli ölçülmesi sağlandı.

Tablo 3.7. Orifis deşarj katsayıları [9]

Çap Oranı	Reynolds Sayısı - Re			
	1×10^4	1×10^5	1×10^6	1×10^7
0.2	0.60	0.595	0.594	0.594
0.4	0.61	0.603	0.598	0.598
0.5	0.62	0.608	0.603	0.603
0.6	0.63	0.61	0.608	0.608
0.7	0.64	0.614	0.609	0.609

Yakma havası için yapılan işlemlerin aynısı doğal gaz için de yapıldı ve çalışma süresince anlık doğal gaz debileri kaydedilmesi sağlandı. Yapılan kontrol sistemi yazılımı ile yanma için gerekli hava/yakıt oranı, sisteme set değeri olarak verilerek, hava gaz ve hatları üzerinde bulunan vanaların kontrol edilmesi sağlandı. Böylece örneğin anlık hava miktarı $1500 \text{ nm}^3/\text{saat}$ ölçüldüyse ve oran 10 olarak verildiyse, doğal gaz vanasının pozisyonu otomatik olarak değişerek $150 \text{ nm}^3/\text{saat}$ değerine gelmesi sağlandı.



Şekil 3.18. Orifis plaka ölçüleri

3.4.2. Basınç kaybı

Siklonda meydana gelen basınç kaybını ölçmek amacıyla, siklon giriş ve çıkışına ölçüm delikleri bırakıldı. Bu ölçüm delikleri arasındaki basınç farkından, siklonda meydana gelen basınç düşüşü değerleri hesaplandı. Basınç kaybı ölçümleri esnasında, siklondaki baca gazı akış değerleri, yukarıda anlatıldığı yöntemle, nm^3/saat biriminde ölçüldü. Yapılan ölçümde yakma havası akış değeri $1897 \text{ nm}^3/\text{h}$ ve doğal gaz akış değeri, $190 \text{ nm}^3/\text{h}$ olarak belirlendi. Ölçülen hava ve doğal gaz akış değerlerinin, yanma reaksiyonunda yerine koyularak yapılan kütle denklikleri sonucunda, yanma gazları kütleli debileri elde edildi. Baca gazları kütleli debileri, Tablo 3.8. deki yoğunluk değerleri kullanılarak, $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ hacimsel akış debilerine çevrilmiştir.

Tablo 3.8. Deneyde ölçülen baca gazı debileri

	1100 °C de yoğunluk değeri (kg/m^3)	Hacimsel debi (m^3/s)
CO_2	0,257	0,393
H_2O	0,162	0,511
N_2	0,248	1,967
Toplam Gaz	0,234(ortalama)	2,872

Yanmanın gerçekleştiği fırın içindeki basınç değeri, fırın içine yerleştirilen iç basınç transmitterinden alınan bilgiye göre ölçüldü. Şekil 3.19 ve Şekil 3.21 de, görüldüğü gibi, baca hattı üzerinde; fırın çıkışı, siklon girişi, siklon çıkışı noktalarına metal borular yerleştirilerek, statik basınç ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler birbirinden çıkarmak suretiyle baca hattında ve siklonda meydana gelen basınç düşüşü değerleri ölçüldü.

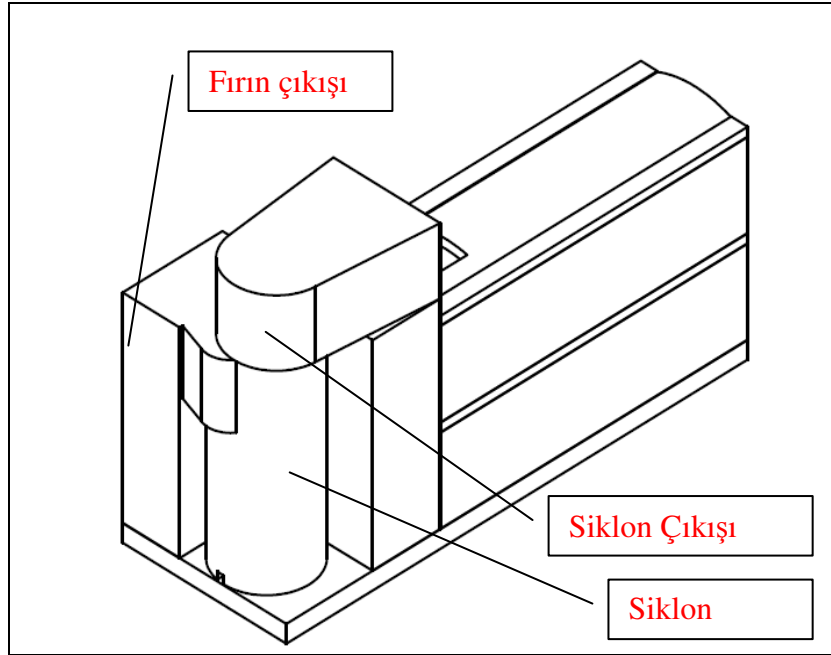


Şekil 3.19. Siklon basınç ölçüm noktaları resmi

Baca hattı üzerine yerleştirilen ölçüm boruları, hava akışına 90° olacak şekilde yerleştirildi. Şekil 3.20. de gösterildiği şekilde, borular refrakter tuğlaları delerek yerleştirildi, her hangi bir sızdırma problemini engellemek amacıyla, tuğla boru arası özel bir refrakter harç ile izole edilerek sızdırmazlık sağlandı.



Şekil 3.20. Siklon çıkış basınç ölçüm noktası resmi



Şekil 3.21. Baca hattı ölçüm noktaları şematik gösterimi

Siklon ölçüm sonuçları Tablo 3.9 de verilmiştir. Fırından baca gazı akışı bir emiş fanı vasıtasıyla yapıldı. Fan girişinde -790 Pa basınç değeri ölçüldü. Böylece tüm hatta meydana gelen basınç düşüşü 810 Pa dır. Bu ölçüm sonuçlarına göre Siklon giriş ve çıkışı arasında 700 Pa basınç farkı meydana gelmiştir.

Tablo 3.9. Siklon basınç düşüşü ölçümleri

Fırın iç basıncı	Fırın çıkışı	Siklon Girişi	Siklon çıkışı	Emiş fanı hava girişi
20 Pa	-20 Pa	- 40 Pa	-1345	-1390 Pa

Siklon tasarımı esnasında hesaplanan basınç düşüşü değeri 1126,3 Pa dı. Yapılan siklon uygulaması neticesinde ölçülen basınç kaybı, 1305 Pa olarak gerçekleşti.

3.4.3. Ayırma verimi

Siklon da toplanan tozlar yüksek sıcaklıktan dolayı sıvı hale geldiklerinden, siklon altında bir boşaltma deliği bırakıldı. Bu delik kullanılarak, çalışma esnasında periyodik olarak sıvı macun kıvamında olan erimiş emaye tozların siklondan uzaklaştırılması sağlandı. Böylece ergimiş tozun siklonu tıkmaması engellendi.

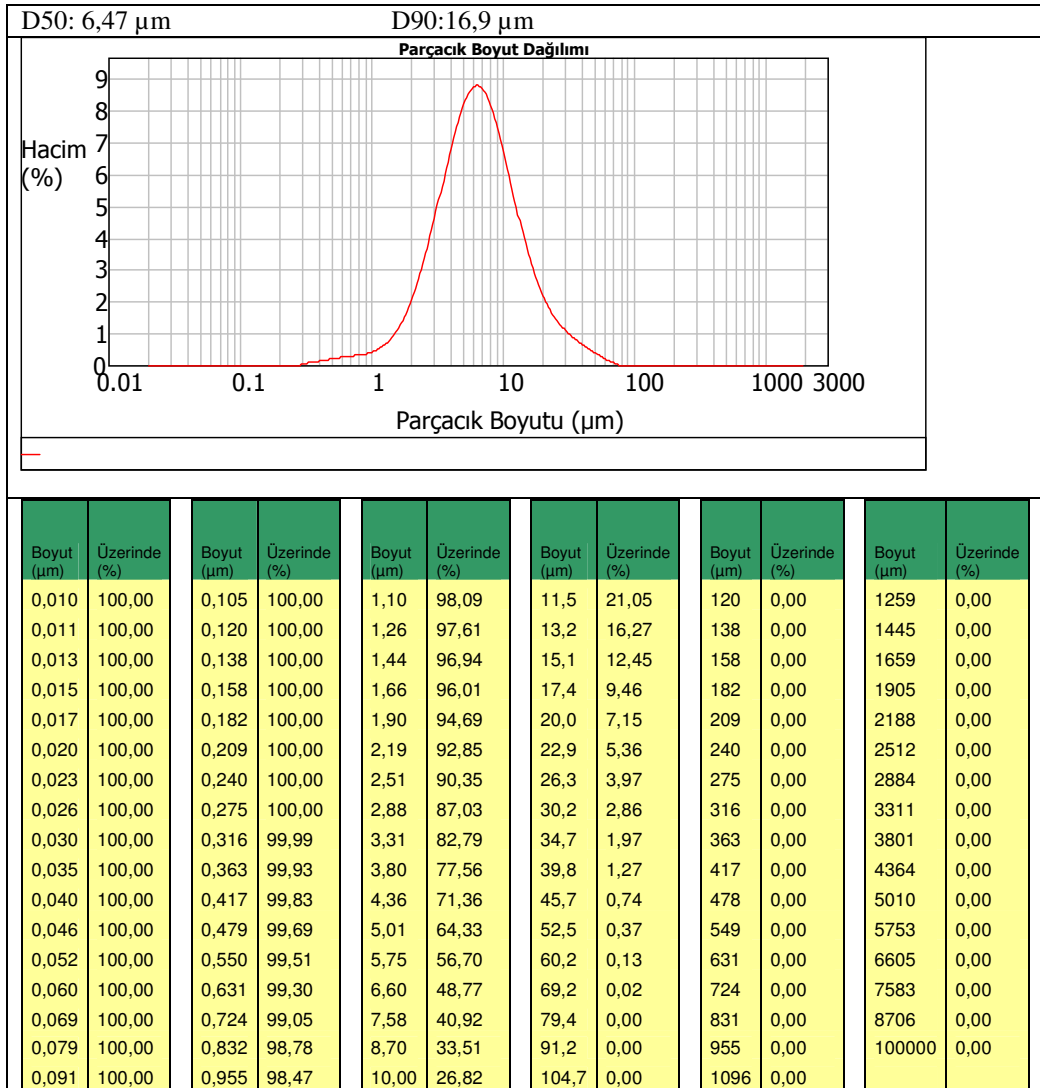
Siklon ayırma verimi hesaplanması amacıyla; frit fırını bacasında, siklon yapılmadan önce, toz debisi ölçümü yapıldı. Bu ölçüm, siklon yapıldıktan sonra yapılan toz ölçümü ile karşılaştırıldı. Aynı şartlar altında baca gazında azalan toz miktarı siklon tarafından tutulan toz miktarına eşit olduğu kabul edildi.

Tablo 3.10. Siklon performans sonuç tablosu

Baca üzerinde Ölçüm Noktasında Parametreler	Siklondan önce	Siklondan sonra
Gaz sıcaklığı	259	202,5
Baca gazı hızı (m/s)	1,05	1,02
H ₂ O %	5,1	4,8
N.Ş. larda Baca gazı debisi (nm ³ /h)	2.082	2.263
Toz (mg/nm ³)	4650	444
Toz (kg/saat)	2,234	0,1966

Frit ergitme fırınında, siklon yapılmadan önce 2,234 kg /saat olan toz çıkışı, siklondan sonra 0,1966 kg /saat değerine düştüğü gözlemlendi. Önce ve sonra toz değerleri oranlandığında, siklonun bacaya gelen tozların %88 ini yakaladığı tespit edildi.

Şekil 3.24 de görünen, siklondan tutulamayan tozlar, reküperatör üzerinde birikmiştir. Reküperatör üzerinde toplanan toz maddelerden alınan örneklerin, malvern mastersizer cihazında boyut analizi yapıldı. Şekil 3.22 de boyut analiz grafiği görünen tozların ortalama boyutu (D_{50}) 6,47 μm dir. Siklondan kurtulan tozların %90 16,9 μm boyutundan daha küçüktür. Tasarım hesaplamalarında, siklonun tutabileceği en küçük parçacık çapı, 10,12 μm olarak belirlenmişti. Ölçülen değerler siklonda tutulamayan tozların ortalama çapının 6,47 μm olduğunu gösterdiği düşünüldüğünde, araştırma konusu siklon daha yüksek bir ayırma verimi ile çalıştığı söylenebilir. Bu durumun ana nedeni olarak siklon duvarlarına emayenin ergimiş halde bulunmasından dolayı, siklonun, ıslak siklon, gibi çalıştığı değerlendirildi.



Şekil 3.22. Siklonunda tutulamayan tozların boyut dağılımı

Ergimiş frit tozunu yakalamak için araştırması yapılan baca siklonu çalışma performansı, siklon olmadan (Şekil 3.23.) reküperatör bölgesinde biriken tozların görüntü ile siklonlu durumda bacada biriken tozların görüntüsü (Şekil 3.24) arasındaki farktan kolayca anlaşılmaktadır. Şekil 3.23 de baca hattında siklon bulunmadığı durumda; ergimiş fritin, bir hafta süre içinde, reküperatör boruları üzerinde siyah renkte bir katman olarak biriktiği gözlenmektedir, bununla beraber siklon olduğu durumda, Şekil 3.24 de reküperatör borularında yalnızca ince bir katman olarak biriken beyaz renkte bir toz görünmektedir.



Şekil 3.23. Siklondan önce bacada biriken toz görüntüsü



Şekil 3.24. Siklondan sonra bacada biriken toz görüntüsü

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan araştırmada, yüksek sıcaklıkta frit ergitme fırını üzerinde çalışılmıştır. Frit ergitme fırınlarında, hammadde tozlarının bacaya doğru sürüklenmesi ve baca da eriyik halinde bulunması önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu problemten ötürü, yüksek maliyetli toz toplama sistemleri kurulmakta ve düşük verimle çalışmaktadırlar.

Çalışmamız sonucunda, frit fırınları bacasında, toz toplamak amacıyla siklon kullanılmasından, çok başarılı sonuçlar elde edildiği görünmektedir. %88 oranında toz toplama verimi ve D50 boyutu 6,47µm in üzerindeki tozların siklon tarafından toplanabildiği tespit edildi. Teorik hesaplarda bu siklonun 10,12 µm boyutundan daha küçük tozları yakalayamayacağı belirlenmişti. Ancak siklonun yaş siklon prensibine göre çalışması neticesinde, Ahuja (2009), çalışmasında bulduğu sonuçlara paralel olarak, siklonun küçük parçacık çapına sahip tozları daha yüksek verimde yakaladığı tespit edilmiştir.

Siklonda meydana gelen basınç kaybı, 1305 Pa olarak gerçekleşti. Çelik siklonun kullanıldığı teorik hesap modelinde, 1123 Pa basınç düşüşü elde edilmiştir. Bu iki basınç düşüşü karşılaştırıldığında, tuğla olarak tasarlanan siklonun basınç düşüşü %16,2 civarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada görülen diğer bir husus ise, ergimiş frit maddelerinin baca kesitlerine yapışıp, kolaylıkla tıkanmalara sebebiyet vereceğidir. Bu durumdan kaçınmak için baca kanallarında, hızın belli bir değerin altına düşürülmemesi ve keskin köşelerden kaçınılması gerektiğidir.

Frit ergitme fırınında baca gazlarındaki tozların, üç halde olduğu, katı maddelerin siklon gövdesine yapışarak ergidiği, sıvı maddelerin siklonda yakalandığı ve gaz olan maddelerin siklondan kurutularak reküperatör borularında süblimleşmeye uğradığı belirlenmiştir. Siklonda yakalanan tozlar sıvı halde olduğu için siklon gövdesinde bir

film tabakası meydana gelmiş olup, siklon sıvı siklon prensiplerine göre çalıştığı tespit edildi.

Yüksek sıcaklıkta yapılan toz ayırma işlemi ardından, baca gazını soğutacak bir ısı değiştiricisi gerekmektedir. Bu ısı değiştirici, siklondan hemen sonra yerleştirilerek, baca gazını soğutur. Aynı zamanda bu ısı değiştirici, yakma havasını ısıtarak enerji verimliliği sağlar. Baca ısı değiştiricileri, yüksek sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilmesine karşın, borular üzerinde biriken ergimiş emaye, reküperatörü hızla delerek, 3 ay gibi kısa bir sürede kullanılmaz duruma getiriyordu. Yapılan siklon sayesinde baca ısı değiştiricisi üzerinde yalnızca katı halde süblimleşen tozların biriktiği, bu tozların ise korozyona sebep olmadığı belirlendi. Böylece daha uzun süre bozulmadan çalışan reküperatör (baca ısı değiştiricisi) imal etmek mümkün oldu. Bununla beraber, baca gazlarından daha yüksek enerji elde etmek için reküperatörün daha yüksek sıcakta çalışmanın önündeki, korozyon kısıtlaması kalkmış oldu. Yüksek sıcaklık siklonu kullanılan frit fırınlarında, reküperatör hava sıcaklığı 450 dereceden 600 dereceye kadar çıkarılması mümkün görünmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, yüksek sıcaklık siklonu tuğla yerine dökme ateş betonu ile imal edilmesi suretiyle, birçok tasarım kısıtlamasından kurtulmak mümkün olabilir. Böylece konik siklon üretimi mümkün olabilir.

Siklonda ve baca kesitlerinde meydana gelen basınç kayıplarını yenmek için gerekli olan vakum basıncı, bir emiş fanı ile sağlanmaktadır. Fanlar yapıları gereği sıcak hava ile daha düşük vakum basıncı meydana getiriler. Dolayısıyla, baca gazı çıkış sıcaklığını, reküperatörle veya diğer yardımcı sistemlerle, soğutarak sıcaklığını daha da düşürme imkânı olursa, vantilatörün daha yüksek verimle emiş sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Hoffman C. A., Stein E. L., *Gas Cyclones and Swirl Tubes, Principles, Design and Operation*, 2nd ed., Springer, New York, 2007.
- [2] Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N., *Transport phenomena*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [3] Shin M. S., Kim H. S., Jang D. S., Jin-Do Chung J. D., Bohnet M., A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments, *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**, 1821-1835
- [4] Ahuja S. M., Wetted wall cyclone — A novel concept, *Powder Technology*, 2010, **204**, 48-53
- [5] Fıçıcı F., Arı V., Teğetsel girişli ters akışlı siklonlarda dalma borusu çap değişiminin basınç kaybına etkisinin deneysel olarak incelenmesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2008, **14**, 205-211
- [6] Muschelknautz E., Theorie der Fliehkraftabscheider mit besonderer Berücksichtigung hoher Temperaturen und Drücke, *VDI-Berichte*, 1980, **363**, 49-60
- [7] Clift R., Grace J. R. and Weber M. E., *Bubbles, Drops and Particles*, 1st ed., Dover Publications, New York, 2005
- [8] http://www.engineeringtoolbox.com/orifice-nozzle-venturi-d_590.html (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2012)

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Trabzon'un Maça ilçesinde doğdu. İlköğretimin, ilkini Maça'da olmak üzere üç farklı okulda bitirdi. Orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamlayarak, 1997 yılında Gazi Üniversitesi, Kimya mühendisliğine girdi. Aynı yıl Keskin Kimya Aş, de aktif çalışma hayatına başladı. 2002 yılında Kimya mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2005 yılında askerlik hizmetini tamamladı. 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi, makine mühendisliğinde yüksek lisans eğitimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.