

SİKLON TASARIMI VE SİMÜLASYONU

E. Kalafatoğlu*, N. Örs*, E. Erencek**

* TÜBİTAK - Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme ve Kimya Teknolojileri
Araştırma Enstitüsü P.K.21, 41470 Gebze.

** EKO Bilgisayar ve İletişim Hizmetleri, Murat Sok. No:4/1, Akatlar, 80630 İstanbul.

ÖZET

Siklonlar yaygın olarak kullanılan endüstriyel toz tutuculardır. Genelde bir siklon, girdap oluşturan bir gaz girişi, aksel bir temiz gaz çıkışı ve toz boşaltma açıklığından meydana gelir. Bir siklonun performansı toz tutma verimi ve basınç düşüşüyle belirlenir. Siklonun tasarım kriterleri kullanım amacına bağlı olarak yüksek verimli veya yüksek kapasiteli olabilir. Dolayısıyla siklonlar için tek bir optimum tasarım yöntemi yoktur. Bu çalışmada toz tutma verimi ile ilgili kuramlar ve bağıntılar incelenmiş ve mevcut bir siklonun simülasyonu veya belirli bir amaç için siklon tasarımına yönelik bir yazılım geliştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: siklon tasarımı; siklon simülasyonu; toz tutma verimi.

GİRİŞ

Siklonlar, içinde katı taneler bulunan bir gaz akımını, teğetsel giriş etkisiyle sınırları belli bir girdap hareketine dönüştüren ve taneler üzerine etkiyen santrifüj kuvveti yardımıyla katı taneleri gazdan ayırarak gazın temizlenmesinde kullanılan, sabit (hareketsiz) parçalı cihazlardır. Uygulamada çok çeşitli geometrilere sahip siklonlar mevcuttur. Ancak gaz temizlemede en yaygın olarak kullanılan siklon tipi, teğetsel girişli, tek silindir ve tek konili ve aksel çıkışlı olanlardır. Çalışmamızda bu tip siklonlar gözönüne alınmıştır ve **CYCLONE** adlı bir yazılım geliştirilmiştir.

SİKLON TASARIMI ESASLARI

Yeni bir siklon sistemi tasarlamak veya mevcut bir sistemi iyileştirmek için siklon veriminin ve siklondaki basınç düşüşünün doğru bir şekilde öngörülebilmesi gerekir. Bunun için gaz karakteristikleri ve tanelerin siklon içindeki hareketiyle ilgili varsayımlara bağlı olarak çeşitli yaklaşımlar vardır [1-5].

Siklonlarda basınç düşüşü genellikle gaz giriş hızının karesiyle orantılıdır ve 6 ile 200 mm su sütunu arasında kalmaktadır [6]. Siklonlardaki basınç düşüşünü belirlemek için geliştirilen pek çok kuramda siklon içinde dönmeden dolayı kinetik enerji kaybı ve duvar sürtünme etkilerinden kaynaklanan kayıplar en önemli faktörler olarak alınmıştır [1-3,7-9].

Siklona giren toz genelde tek tane boyutuna sahip olmadığından, her bir tane boyutu için fraksiyonel tutma veriminden bahsedilir ve siklon içinde tutulan o tane fraksiyonunun ağırlığının siklona giren fraksiyonun toplam ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Toz tutma verimi genelde, tane boyut ve yoğunluğunun, gaz giriş hızının, siklon girdap dönme hızının ve siklon boyunun artması, siklon çapının ve

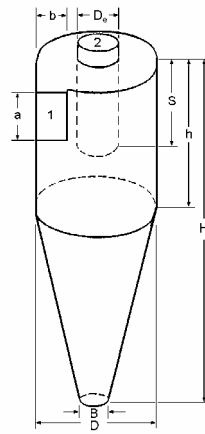
gaz viskozite ve yoğunluğunun azalması, toz çıkışından bir miktar gaz çekilmesi ve siklon duvarlarının ıslatılması ile artar [10].

Siklon tutma verimini kuramsal irdelemelerle hesaplayan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir: siklon verimi için kritik boyut yaklaşımı, siklon verimi için kesme boyutu yaklaşımı, Sproull verim eşitliği, Leith ve Licht yaklaşımı [11,12]. Leith ve Licht bu dört yaklaşımı yayınlanmış deneysel verilerle kıyaslayarak Leith ve Licht bağıntılarının en iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

CYCLONE PROGRAMI

CYCLONE Programında Kullanılan Eşitlikler

Bir siklonun geometrisi genelde Şekil 1'de gösterilen sekiz boyutla tanımlanır. Siklon veriminin hesabı için bu boyut oranlarının bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Teğetsel bir siklonun boyutları.

Siklonun toplam verimi herbir tane boyutu aralığı için verimlerin hesaplanıp ağırlıklı toplanması yoluyla elde edilir. **CYCLONE** programında herhangi bir tane boyutu için verim, Koch ve Licht tarafından modifiye edilmiş Leith ve Licht bağıntısından

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G \tau_i Q_g}{D^3} (n+1) \right]^{1/2(n+1)} \right\} \quad (1)$$

hesaplanmaktadır [13]. 1 eşitliğinde

$$\tau_i = \rho_p d_{p,i}^2 / 18 \mu_g \quad (2)$$

$$G = 8 K_c / (K_a K_b)^2 \quad (3)$$

dir. Girdap üstel sabiti n, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$n = 1 - (1 - 0.669 D^{0.14})^{0.3} (T / 283.15) \quad (4)$$

G'nin hesaplanması için gerekli olan siklon giriş kesiti sabitleri

$$K_a = a / D, K_b = b / D \quad (5)$$

K_C siklon hacim sabiti ise

$$K_c = (2 V_s + V_{nl} \text{ (veya } V_H)) / 2 D^3 \quad (6)$$

dir. Burada V_s giriş kanalı ortası altında kalan giriş bölümü hacmi, V_H çıkış kanalı altındaki siklon hacmi (iç çekirdek hariç) ve V_{nl} girdap uzunluğundaki siklon hacmi dir (iç çekirdek hariç). Doğal girdap uzunluğu l

$$l = 23 D_e \sqrt[3]{D^2 / a b} \quad (7)$$

eşitliğinden bulunur. Eşitlik 6'da K_C hesaplanırken $l < (H-S)$ ise V_{nl} , $l > (H-S)$ ise V_H kullanılır.

CYCLONE programında basınç kaybı Shepherd ve Lapple tarafından ileri sürülen aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır:

$$\Delta P_c = \rho_g v_i^2 N_H / 2 g \quad (8)$$

Bağıntıda geçen giriş hız kayıp sayısı N_H

$$N_H = K a b / D_e^2 \quad (9)$$

eşitliği ile hesaplanır. K değeri perdesiz ve yarım perdeli siklon için sırasıyla 16 ve 7.5 değerini almaktadır.

Eşitlik 1 gaz debisi Q_g yada gaz hızı v_i 'nin artmasıyla verimin artacağını ve sonunda % 100'e yaklaşacağını söylemektedir. Ancak gerçekte durum böyle değildir ve gaz hızı bir üst sınırın üstüne çıktığında verim azalmağa başlar. Bu durum yüksek hızlarda toz çökmesinin azalması veya yeniden sürüklenmenin artması ile ilgilidir ve yatay borularda yatay taşınma hızı ile açıklanmıştır [14]. Kalen ve Zenz yatay sürüklenme hızı kavramını siklonlara taşıyarak bir optimum gaz giriş hızı ve yeniden sürüklenmenin önemli mertebelere ulaştığı limit gaz giriş hızlarını tanımlamışlardır [15]. Gaz giriş hızına bağlı olarak yatay sürüklenme hızı

$$v_s = 4.91 w (b / D)^{0.4} \sqrt[15]{D} v_i^{2/3} (1 - b / D)^{1/3} \quad (10)$$

şeklinde bir deneysel eşitlikten hesaplanır. Buradaki w fiziksel bir parametre olup

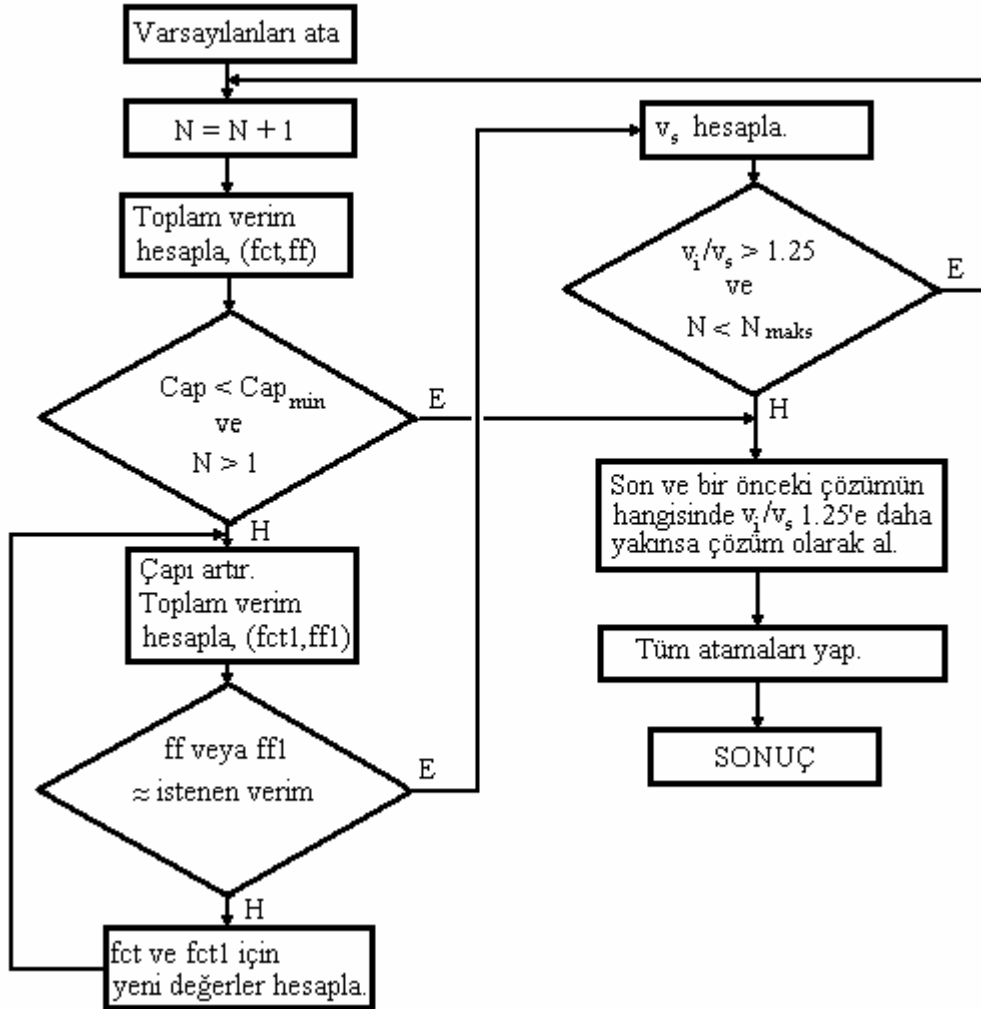
$$w = \left[4 g \mu_g (\rho_p - \rho_g) / 3 \rho_g^2 \right]^{1/3} \quad (11)$$

eşitliğinden bulunur. Kalen ve Zenz maksimum siklon veriminin $v_i/v_s = 1.25$ gibi bir oranda oluştuğunu ve $v_i/v_s = 1.36$ oranında siklonda önemli derecede yeniden sürüklenme ile toz kaybı olduğunu göstermişlerdir.

Bunun yanında boyut oranları standart olmayan bir siklon tasarlanacak ise aşağıdaki sınırlamalara uyulması gerekmektedir: kısa devreyi önlemek için, $a < S$; ani daralmayı önlemek için, $b < (D-D_e)/2$; girdabın siklon içinde kalması için, $S+l \leq H$; geometrik sınırlama, $h < H$; tutulan tozun gazla tekrar uzaklaşmasını önlemek için, $v_i/v_s \leq 1.35$; optimum verim için, $v_i/v_s \leq 1.25$.

CYCLONE Programının Yapısı

Sunulan çalışmada, tasarım kısmında belirli şartlarda kullanılacak bir siklonun uygun çap ve boyutlarının, simülasyon kısmında ise boyutları ve debisi bilinen bir siklonun veriminin hesaplanabildiği bir algoritma geliştirilmiştir [5]. Siklon Tasarım ve Simülasyonu Programının (CYCLONE) C dilinde yazılan kaynak kodu derlenerek PC üzerinde kendi başına çalışabilir bir dosya oluşturulmuştur. Programın siklon tasarımına yönelik özet algoritması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. CYCLONE programı özet tasarım algoritması blok şeması.

Veri işlemleri alt menüsü yardımıyla siklona ilişkin her türlü verinin girilmesi, değiştirilmesi, dosya işlemleri ve tasarım/verim hesabı seçimi gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Toza ilişkin bilgiler ve tozun tane boyut dağılımı (elek analizi), tane fraksiyon sayısı maksimum 10 olacak şekilde girilebilmektedir. Siklon boyut oranları seçiminde literatürdeki standart siklon boyut oranları seçilebildiği gibi standart olmayan bir siklonun tasarımı da menünün son seçeneği yardımıyla yapılabilir. Çıktı alma menüsü yardımıyla veri çalıştırma menüsü ile daha önceden yapılan hesapların ekranda görüntülenmesi, yazıcıdan alınması veya bu bilgilerin diske kaydedilmesi mümkün olmaktadır.

Programın tasarım algoritmasında önce gerekli verilerin girileceği menüler gelir ve atamalar yapılır. Tasarım yapılacak çap için 0.6 m varsayılan değerini alır. Bu siklon çapı için her bir tane fraksiyonunun tutulma verimi ve tüm toz için toplam verim hesaplanır. Çap ve diğer boyutlar belirli bir faktörle büyütülerek verim hesabı tekrarlanır. Hesaplanan ara verimler kıyaslanır. Her ikisi de % 100 ise faktör

değiştirilerek % 100'den farklı iki toplam verim bulunur. Bulunan verimler istenen toplam verimle kıyaslanır. Farklar 0.0001'den az ise yada fazla olup iki durum için hesaplanan ara verimler eşit ise verim kıyaslama döngüsünden çıkılarak $v_i/v_s \leq 1.25$ ile verilen kriter incelenir. Kriter sağlanmıyorsa paralel siklon sayısı artırılarak başa dönülür. Hesaplanan iki ara verim birbirinden farklı ve istenen toplam verimden uzaksa interpolasyonla yeni bir çap düzeltme faktörü bulunur. Bu düzeltme faktörü ve önceki faktörlerden kendisine yakın olanı ile birlikte yeniden iki ara verim hesaplanır. Bu işleme ara verimlerden birisinin istenen toplam verime yakınsamasına kadar devam edilir. Paralel siklon sayısının artırılmasına $v_i/v_s \leq 1.25$ ile verilen kriterin altına inene kadar yada izin verilen yada maksimum siklon sayısına ulaşıldığında son iki çevrimden hangisi kritere daha yakınsa kesin çözüm olarak alınır ve gerekli diğer hesaplamalar yapılır.

SONUÇ

Katı-gaz ayırımında çok yaygın olarak kullanılan gaz siklonların tasarımı için ya sınırlı geometrilerde yada belirli toz incelik gruplarına göre çeşitli yaklaşımlar vardır. Koch ve Licht'in yaklaşımı uzun ve iç içe birçok iterasyon içermekte ve her iterasyonda çokça grafik okuması bulunmaktadır [13]. Ayrıca bazı durumlarda hiç yakınsama olmamaktadır. CYCLONE programının tasarım algoritması ise her durumda yakınsamaktadır. Ayrıca bu program 7 standart tip siklon içerdiği gibi, standart dışı siklonlar için de tasarım ve simülasyon yapabilmektedir.

Yazılım çalışmasına paralel olarak deneysel bir çalışma ile tasarımın veya simülasyonun doğruluğu kontrol edilememiş ancak genel kimyasal prosesleri simüle eden ve ciddi mühendislik ve sanayi firmaları tarafından dünya çapında kullanılan AspenTech'in ASPEN PLUS programı ile yapılan karşılaştırmalarda da önemsiz farklar elde edilmiştir. Buna karşılık ASPEN PLUS daha az sayıda siklon tipi için tasarım ve simülasyon yapmaktadır.

SEMBOLLER

a	siklon giriş düşey uzunluğu, [m]
b	siklon giriş yatay uzunluğu, [m]
B	siklon toz çıkış borusu çapı, [m]
d_{pi}	i. fraksiyon ortalama tanecik çapı, [m]
D	siklon çapı, [m]
D_e	gaz çıkış boru çapı, [m]
g	yerçekimi ivmesi (= 9.81), [m/san ²]
G	siklon konfigürasyon sabiti (<i>denklem 3</i>), [-]
h	siklon silindirik bölge yüksekliği, [m]
H	siklon toplam yüksekliği, [m]
K	hız kayıp katsayısı (<i>denklem 9</i>), [-]
$K_{a,b,c}$	siklon giriş kanalı ve hacim sabitleri (<i>denklem 5 ve 6</i>), [-]
l	doğal girdap uzunluğu (<i>denklem 7</i>), [m]
n	girdap üstel sabiti (<i>denklem 4</i>), [-]
N_H	giriş hız kayıp sayısı, [-]
ΔP_c	siklon basınç düşüşü (statik), [kg/m ²]
Q_g	gaz debisi, [m ³ /san]
S	gaz çıkışborusu dalma derinliği, [m]
T	gaz sıcaklığı, [°C]
v_i	siklon girişinde gaz hızı, [m/san]
v_s	yatay taşınma hızı, [m/san]
V_S	giriş kanalı ortasının altında kalan giriş bölümü hacmi, [m ³]

V_H	çıkış kanalı altındaki siklon hacmi, [m ³]
V_{nl}	girdap uzunluğundaki siklon hacmi, [m ³]
w	fiziksel parametre (<i>denklem 11</i>), [-]
μ_g	gaz viskozitesi, [kg/m san]
η_i	fraksiyonel toz tutma verimi, [-]
$\rho_{g,p}$	gaz ve toz yoğunluğu, [kg/m ³]
τ_i	parçacık zaman sabiti, [san]

KAYNAKLAR

1. Shepherd, C.B., Lapple, C.E., "Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors", *Ind.Eng.Chem.*, **31**, 972-984, 1939.
2. First, M.W., "Fundamental factors in the design of cyclone dust collectors", Doktora tezi, Harvard Üniversitesi, 1950 (Leith ve Mehta, 1973'den).
3. Alexander, R.McK., "Fundamentals of cyclone design and operation", *Australasian Inst Mining & Met. Proc. [N.S.]*, **152**, 3, 202-228, 1949.
4. Erencek, E., Kalafatoğlu, E., Örs, N., İzgi, Y., "Siklon tasarım ve simülasyonu", TÜBİTAK-MAM Kimya Müh. Bölümü, Rapor No:255, 1994.
5. Erencek, E., Kalafatoğlu, E., Örs, N., İzgi, Y., "Siklon tasarım ve simülasyonu sonuç raporu", TÜBİTAK-MAM Kimya Müh. Bölümü, Rapor No:260, 1994.
6. Ogawa, A., *Separation of Particles*, **2**, CRC Press Inc., Florida, 1984.
7. Stairmand, C.J., "Pressure drop in cyclone separators", *Engineering*, **16 B**, 409-411, 1949.
8. Barth, W., "Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations", *Brenn. Wärme Kraft*, **8**, 1-9, 1956.
9. Leith, D., Mehta, D., "Cyclone performance and design", *Atmospheric Environment*, **7**, 527-549, 1973.
10. Cheremisinoff, P.N., Young, R.A., "Cyclones", *Pollution Engineering Practice Handbook*, 110-123, Ann Arbor Science Publ. Inc., Ann Arbor, 1975.
11. Sproull, W.T., *Air Pollution and Its Control*, Exposition Press, New York, 1970.
12. Leith, D., Licht, W., "Collection efficiency of cyclone type particle collectors, a new theoretical approach", *A.I.Ch.E.Symp.Ser., Air-1971*, 1972.
13. Koch, W., Licht, W., *Chem. Eng.*, **84**, Nov.4, 80, 1977 (Licht, 1979'dan).
14. Zenz, F.A., *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **3**, 65, 1964 (Licht, 1979'dan).
15. Kalen, B., Zenz, F.A., *A.I.Ch.E.Symp.Ser.*, **70**, No.137, 388, 1974 (Licht, 1979'dan).