

Ön Siklon Ayırıcı Kullanılan Jet-Pulse Torbalı Filtre Sistemlerinin Filtrasyon Hızı ve Can Velocity Parametreleri Üzerindeki Etkileri: Teorik, Standart ve Uygulamalı Mühendislik Analizi

Ön Siklon – Jet Pulse Toz Toplama Sistemleri Mühendislik Çalışması

Özet

Yüksek toz konsantrasyonuna ve kaba/aşındırıcı partikül yapısına sahip endüstriyel proseslerde, doğrudan torbalı filtre (baghouse) kullanımı filtre medyasında aşırı toz yüklenmesi, yüksek basınç düşüşü, hızlı bez körlenmesi (blinding) ve mekanik aşınma gibi ciddi işletim problemlerine yol açmaktadır. Bu çalışmada, jet-pulse temizlemeli torbalı filtre ünitelerinin önüne yerleştirilen siklonik ön ayırıcıların (cyclone pre-separator) filtrasyon hızı (air-to-cloth ratio), basınç düşüşü, Can Velocity ve re-entrainment parametreleri üzerindeki etkileri teorik, standart bazlı ve uygulamalı mühendislik açılarından incelenmiştir. Çimento, ahşap ve ağır metal döküm sanayilerinden derlenen vaka çalışmaları, ön siklon entegrasyonunun filtreye ulaşan toz yükünü %80–%95 oranında azalttığını, filtrasyon hızının %15–%30 oranında güvenle yükseltilebildiğini ve filtre elemanı ömrünün 3–4 katına uzadığını göstermektedir. Çalışma, ACGIH, NFPA, VDI ve EPA standartları çerçevesinde tasarım sınır değerlerini belirlemekte ve mühendisler için pratik bir tasarım rehberi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ön siklon ayırıcı, jet-pulse torbalı filtre, filtrasyon hızı, Can Velocity, re-entrainment, çimento toz kontrolü, toz keki direnci, ACGIH, NFPA

1. Giriş ve Teorik Temeller

Endüstriyel toz kontrolü ve gaz temizleme proseslerinde, torbalı filtre (baghouse) üniteleri mikron altı partikül tutma yüksek verimliliği (%99,9+) sunan birincil filtrasyon ekipmanlarıdır [1]. Ancak çimento, madencilik, ahşap ve ağır metal işleme gibi yüksek toz konsantrasyonuna ($>10 \text{ g/m}^3$) ve kaba/aşındırıcı partikül yapısına sahip proseslerde doğrudan torbalı filtre kullanımı; filtre medyasında aşırı toz yüklenmesi, yüksek basınç düşüşü (ΔP), hızlı bez körlenmesi (blinding) ve mekanik aşınma gibi ciddi işletimsel problemlere yol açmaktadır [1].

Bu olumsuzlukların önüne geçmek ve aerodinamik performansı optimize etmek amacıyla filtre ünitesi öncesinde ön toz tutucu siklon (cyclone pre-separator) kullanımı, modern toz toplama mühendisliğinde temel bir tasarım kuralı haline gelmiştir [5]. Ön siklon, hareketli parça içermeyen,

santrifüj kuvvetine dayalı pasif bir ayırıcı olarak, kaba ve ağır partiküllerin büyük bölümünü torbalı filtreye ulaşmadan önce tutar; böylece filtre medyasına gelen toz yükünü belirgin şekilde düşürür.

Bu çalışmanın amacı, ön siklon ayırıcı ile jet-pulse temizlemeli torbalı filtre kombinasyonunun temel aerodinamik parametreler — filtrasyon hızı (air-to-cloth ratio), basınç düşüşü, Can Velocity ve re-entrainment — üzerindeki nicel etkilerini teorik modeller, uluslararası standartlar ve saha vaka verileri üzerinden derinlemesine incelemektir.

1.1. Siklon Ön Ayırıcının Çalışma Prensibi ve Santrifüj Ayırıştırma Mekanizması

Siklon ayırıcılar, herhangi bir hareketli parça veya filtre medyası kullanmaksızın, gaz akımı içerisindeki partikülleri eylemsizlik ve santrifüj kuvvetleri etkisiyle ayırıştıran mekanik ayırıcılardır [5]. Toz yüklü gaz, siklon silindirik gövdesine teğetsel (tanjansiyel) olarak yüksek bir giriş hızıyla ($v_i = 15\text{--}25$ m/s) sevk edilmektedir [1]. Bu teğetsel giriş, gaz akışını siklon iç duvarı boyunca aşağıya doğru spiral çizen bir dış vortekse (outer vortex) dönüştürür [1].

Dönme hareketi sırasında partiküller üzerine etki eden santrifüj kuvveti (F_c), gazın sürüklenme kuvvetine (F_d) galip gelerek partikülleri siklon çeperine doğru fırlatır:

$$F_c = (m_p \cdot v_t^2) / R$$

Burada m_p partikül kütlelerini, v_t teğetsel hızı ve R dönme yarıçapını temsil eder. Çepere çarpan ve momentumunu kaybeden kaba ve ağır partiküller, yerçekimi etkisiyle alt konik bunker alanına süzülür [5]. Koninin tabanına ulaşan gaz akımı yön değiştirerek merkezde yukarı doğru yönelen dar bir iç vorteks (inner vortex / vortex finder) oluşturur ve kısmen temizlenmiş olarak siklon tepe çıkışından downstream aşamasındaki torbalı filtreye aktarılır [5].

1.2. Partikül Boyutu Bazlı Ayırma Verimliliği ve Cut-Size (d_{50}) Matematiksel Modeli

Siklonların ayırma performansı tek bir verim oranıyla ifade edilemez; verim, partikül boyut dağılımına (PSD) bağımlı olarak değişir [8]. Siklon tasarımında en kritik aerodinamik parametre, ayırma verimliliğinin %50 olduğu partikül çapını ifade eden kesme çapıdır (d_{50} / cut-size) [1]. Klasik Lapple ve Leith-Licht teorilerine dayanan formülasyonu şu şekildedir [8]:

$$d_{50} = \sqrt[3]{(9 \cdot \mu \cdot W) / (2 \cdot \pi \cdot N_e \cdot v_i \cdot (\rho_p - \rho_g))}$$

Denklemden yer alan değişkenler ve mühendislik tanımları aşağıda açıklanmıştır:

- μ : Taşıyıcı gazın dinamik viskozitesi (Pa·s veya kg/(m·s)) [8]
- W : Siklon teğetsel giriş kanalının genişliği (m) [8]

- N_e : Gazın dış vorteksteki etkili dönme sayısı (effective turns), $N_e = (L_s + L_c)/(2 \cdot H_e)$ formülü ile hesaplanır (L_s : silindir boyu, L_c : koni boyu, H_e : giriş yüksekliği) [8]
- v_i : Siklon giriş gaz hızı (m/s), ideal tasarım aralığı 15–25 m/s'dir [1]
- ρ_p : Toz partikül gerçek yoğunluğu (kg/m³) [8]
- ρ_g : Taşıyıcı gaz yoğunluğu (kg/m³) [8]

Hesaplanan d_{50} değerine göre, herhangi bir çapındaki partikülün kısmi ayırma verimliliği (η_d) ampirik olarak şu şekilde modellenmeyele bulunur [8]:

$$\eta(d) = 1 / (1 + (d_{50}/d)^2)$$

Yüksek verimli (high-efficiency) siklon tasarımlarında d_{50} değeri 2–4 μ m seviyelerine kadar düşürülürken, yüksek debili (high-throughput) endüstriyel siklonlarda 4–10 μ m aralığı mertebesindedir [1]. Dolayısıyla, 10 μ m üzerindeki kaba ve aşındırıcı tozların %80 ilâ %98'i torbalı filtreye ulaşmadan önce ön ayırıcıda tutulmaktadır [1].

1.3. Toz Yüğü (C_i) Azalmasının Torba Filtre Basınç Düşüşü (ΔP) ve Filtrasyon Hızına (v_f) Etkisi

Torbalı filtrelerde hava/bez oranı (air-to-cloth ratio) veya filtrasyon hızı (v_f), birim filtre alanından geçen hacimsel debiyi gösterir [10]:

$$v_f = Q / A_{net} \quad (m/s \text{ veya } m/min)$$

Formülde Q işletme debisini (m³/s veya m³/min), A_{net} ise toplam net filtre alanını (m² veya ft²) ifade etmektedir [4].

Filtre medyası üzerinde biriken toz kekinin oluşturduğu basınç düşüşü (ΔP), Darcy Yasası ve ampirik toz keki direnci bağıntısına göre ifade edilir [13]:

$$\Delta P = (K_1 \cdot v_f) + (K_2 \cdot C_i \cdot v_f^2 \cdot t)$$

Burada K_1 medya temel direncini, K_2 spesifik toz kek direnç katsayısını (m/kg veya inH₂O·min·ft²/gr), C_i torbalı filtreye giren toz yükünü (grain loading / dust loading, g/m³ veya gr/ft³), v_f filtrasyon hızını ve t filtrasyon süresini ifade eder [13].

Ön siklon entegrasyonu ile torbalı filtreye ulaşan giriş toz yükü (C_i), %80–%90 oranında azaltıldığında [1], toz kekinin kalınlaşma hızı ($\Delta P/t$) aynı oranda yavaşlar [13]. Bu durum mühendise iki temel tasarım esnekliği sağlar:

1. Sabit v_f Durumunda: Basınç düşüşü (ΔP) kayda değer oranda düşer, jet-pulse patlatma frekansı azalır, basınçlı hava tüketimi düşer ve filtre torba ömrü %300–%400 oranında uzar [1].

2. Yüksek v_f Tasarımı (Kapasite Artışı): Basınç düşüşünü kabul edilebilir limitlerde ($\Delta P \leq 150\text{--}200$ mmH₂O) tutarak, sistemin v_f değeri %15 ilâ %30 oranında güvenle artırılabilir [4]. Bu da daha küçük filtre gövdesi ve daha az filtre elemanı ihtiyacı anlamına gelir [12].

1.4. Can Velocity ve Interstitial Velocity Kavramları, Re-Entrainment Mekanizması ve Ön Ayırmanın Etkisi

Pulse-jet torbalı filtre tasarımında en kritik fakat sıklıkla göz ardı edilen parametreler Can Velocity (yaklaşma/gövde hızı) ve Interstitial Velocity (torbalar arası yükselme hızı) değerleridir [15].

- Can Velocity (v_{can}): Torbalı filtre gövdesinde, hopper (bunker) üst seviyesi ile torbaların alt uçları arasındaki boş kesit alanındaki yukarı yönlü dikey gaz hızıdır [3]:

$$v_{can} = Q / A_{gövde}$$

- Interstitial Velocity (v_{int}): Torbaların dizili olduğu bölgede, torba dış çeperleri arasında kalan net serbest geçiş alanındaki dikey gaz yükselme hızıdır [4]:

$$v_{int} = Q / (A_{gövde} - N \cdot A_{torba})$$

Denklemden $A_{gövde}$ gövde yatay kesit alanını (m²), N torba sayısını ve A_{torba} tek bir torbanın dış kesit alanını (m²) temsil eder.

Gaz akışı torbalı filtre gövdesine girdiğinde, yerçekimi etkisine karşı yukarı doğru hareket eder. Pulse-jet patlatma sistemi torba üzerindeki toz kekini silkelediğinde, ayrıışan toz bloklarının yerçekimiyle bunkere düşmesi gerekmektedir [18]. Ancak dikey gaz yükselme hızı (v_{can} veya v_{int}), toz partiküllerinin veya aglomeratlarının serbest düşüş terminal hızından (v_t) yüksekse, silkilen toz bunkere ulaşmadan yükselen gaz akımı tarafından tekrar tutulur ve komşu torbaların yüzeyine yapışır [11]. Bu kısır döngü "re-entrainment" (yeniden sürüklenme) olarak adlandırılır [11].

Ön siklon kullanılmadığında, sisteme giren yüksek toz yükü kütleli süspansiyon yoğunluğunu artırmaktadır [19]. Patlatma anında yoğun bir toz bulutu oluşur ve yüksek v_{can} altında re-entrainment kaçınılmaz hale gelir [18]. Ön siklon kullanıldığında ise filtreye giren kütleli toz konsantrasyonu azaldığı için patlatma esnasında oluşan toz bulutunun kütleli yoğunluğu düşmekte [1], iri partiküller önceden ayrıştırıldığı için ince tozlar daha kolay aglomerasyon göstererek sürüklenme riski olmaksızın bunkere çökmektedir [3]. Böylece yüksek toz yükünün yarattığı tıkanma riski ortadan kalktığı için mühendisler v_{can} sınır değerlerini risk olmaksızın %15–%20 daha yüksek seviyelerde tasarlayabilmektedir [4].

2. Mühendislik Formülasyonları, Ampirik Bağıntılar ve Sayısal Hesaplama Örnekleri

2.1. Temel Tasarım Denklem Takımı

Aşağıdaki tablo, ön siklonlu ve ön siklonsuz torbalı filtre boyutlandırmasında kullanılan temel mühendislik formüllerini ve birim dönüştürme bağıntılarını özetlemektedir [4].

Parametre / Tanım	Sembol	Denklem / Formül	Birimler (SI / Imperial)
Hacimsel Debi Dönüşümü	Q	$Q \text{ (m}^3/\text{s)} = Q \text{ (CFM)} \times 4.719 \times 10^{-4}$	m ³ /s CFM
Hava / Bez Oranı	v _f (A/C)	$v_f = Q / A_{\text{net}}$	m/s ft/min
Tek Torba Alanı	A _{torba}	$A_{\text{torba}} = \pi \cdot D_t \cdot L$	m ² ft ²
Toplam Torba Sayısı	N	$N = A_{\text{net}} / A_{\text{torba}}$	adet
Siklon Kesme Çapı	d ₅₀	$d_{50} = \sqrt{[(9\mu W)/(2\pi N_e v_i(\rho_p - \rho_g))]}$	m
Siklon Basınç Düşüşü	ΔP _{siklon}	$\Delta P = \xi \cdot (\rho_g \cdot v_i^2)/2$	Pa inH ₂ O
Can Velocity	v _{can}	$v_{\text{can}} = Q / A_{\text{gövde}}$	m/s ft/min
Interstitial Velocity	v _{int}	$v_{\text{int}} = Q / (A_{\text{gövde}} - N \cdot A_{\text{torba}})$	m/s ft/min
Toplam Basınç Kaybı	ΔP _{toplam}	$\Delta P_{\text{toplam}} = \Delta P_{\text{siklon}} + \Delta P_{\text{filtre}} + \Delta P_{\text{kanal}}$	Pa inH ₂ O

2.2. Kapsamlı Mühendislik Hesaplama Örneği

Bir çimento fabrikası klinker kırma ve nakil hattında açığa çıkan tozun emilmesi hedeflenmektedir. Tasarım giriş verileri aşağıdaki gibidir:

- İşletme Debisi (Q): 20.000 m³/h (≈ 5.56 m³/s)
- Giriş Toz Yüğü (C_i): 15 g/m³ — Kaba ve aşındırıcı çimento/klinker tozu [4]
- Partikül Yoğunluğu (ρ_p): 3.150 kg/m³
- Gaz Sıcaklığı: 80 °C (ρ_g ≈ 1.0 kg/m³, μ ≈ 2.1×10⁻⁵ Pa·s)
- Filtre Torba Ebatları: Çap 130 mm, Boy 2.500 mm. Tek torba alanı ≈ 1.02 m²

Durum A: Doğrudan Torbalı Filtre Tasarımı (Ön Siklonsuz)

C_i = 15 g/m³ gibi yüksek ve doğrudan gelen toz yükünde, hızlı körlenmeyi ve yüksek basınç kaybını önlemek için mühendislik standartlarına göre muhafazakar bir hava/bez oranı seçilir [4]:

- v_f = 1.0 m/min (≈ 3.28 ft/min) — Ağır toz yükü için ACGIH önerilen alt sınır
- Gerekli Filtre Alanı: A_{net} = Q / v_f = 333.3 m²
- Torba Sayısı: N = 333.3 / 1.02 ≈ 327 adet

- Gövde kesit alanı ve hız parametreleri hesaplandığında: $v_{can} \approx 120$ m/min, $v_{int} \approx 180$ m/min

Mühendislik Değerlendirmesi: $v_{can} \approx 120$ m/min değeri çimento tozu için aşırı yüksektir [19]. Patlatma sırasında ince klinker tozları re-entrainment nedeniyle çökelmeyecek, filtre keki sürekli kalınlaşarak ΔP değerini 250–350 mmH₂O seviyelerine fırlatacaktır [17].

Durum B: Ön Siklon Entegrasyonlu Jet-Pulse Sistem Tasarımı

Sisteme yüksek verimli bir ön siklon ($d_{50} = 4$ μ m, $N_e = 5$, $v_i = 20$ m/s) entegre edilmektedir [1]. Klinker/çimento tozu elek analizine göre >10 μ m partikül oranı %85'tir [1]. Siklon toplam kütleli ayırma verimi $\approx$ %85 olarak gerçekleşmektedir [1].

Torbalı Filtreye Gelen Yeni Toz Yükü ($C_{i'}$):

$$C_{i'} = C_i \times (1 - \eta_{siklon}) = 15 \times 0.15 = 2.25 \text{ g/m}^3$$

İzin Verilen Yüksek v_f Seçimi: Toz yükü 15 g/m³'den 2.25 g/m³'e düştüğü için [1], güvenli filtrasyon hızı %30 artırılarak ($v_f = 1.3$ m/min) olarak belirlenir [4].

- Yeni Gerekli Filtre Alanı: $A_{net} = Q / v_f = 256.4$ m²
- Yeni Torba Sayısı: $N = 256.4 / 1.02 \approx 252$ adet
- Bu durum, ihtiyaç duyulan filtre alanında $\approx$ %23 oranında net tasarruf sağlamaktadır.

Gövde ve hız parametreleri yeniden hesaplandığında: $v_{can} \approx 145$ m/min, $v_{int} \approx 215$ m/min. Her ne kadar v_{can} değeri küçülen gövde nedeniyle yükselmiş görünse de, sisteme giren kütleli toz miktarı %85 azaldığı için patlatma esnasında süspansiyona geçen toz miktarı son derece düşüktür [1]. Re-entrainment riski tamamen bertaraf edilmiş, işletme basınç düşüşü 100–150 mmH₂O aralığında kararlı kılınmıştır [18].

3. Kabul Görmüş Enstitü ve Standart Kaynakları

Ön siklon ve torbalı filtre tasarımında uluslararası kabul görmüş mühendislik standartları, sistem konfigürasyonunun sınır değerlerini belirlemiştir.

3.1. ACGIH (Industrial Ventilation Manual) Standartları

ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice kılavuzunda toz toplama sistemlerinin tasarımı için temel tasarım standartları yer almaktadır [3]:

- Kanal Taşıma Hızları (Duct Transport Velocities): Çimento, klinker, kireçtaşı ve döküm kumu gibi ağır ve aşındırıcı tozların kanallarda çökmesini önlemek için minimum kanal taşıma hızı 18–23 m/s (3.500–4.500 ft/min) olarak tanımlanmaktadır [3].
- Açık Davlumbaz Yakalama Hızları (Capture Velocities): Yüksek konveyör döküş noktaları ve kırıcı beslemelerinde tozun kaçışını önlemek için yakalama hızı 1.0–2.0 m/s (200–400 ft/min) aralığında seçilmelidir [16].
- A/C Ratio Limitleri: ACGIH, ağır toz yüklerinde doğrudan filtreye giren akışlarda A/C oranının 1.0 m/min (3.5 ft/min) üzerine çıkarılmamasını, ön ayırıcı kullanıldığı takdirde bu limitlerin 1.2–1.5 m/min (4–5 ft/min) seviyelerine kadar yükseltilebileceğini belirtmektedir [4].

3.2. NFPA Standartları (NFPA 91, NFPA 654, NFPA 68/69) ve Yanıcı Toz Yönetimi

NFPA (National Fire Protection Association) standartları, endüstriyel tozların patlama ve yangın risklerini düzenlemektedir [4]:

NFPA 654 ve NFPA 68: Yanıcı tozların (ahşap, kömür, gıda, ilaç, belirli metal tozları) deflagrasyon indeksine (K_{st}) göre sınıflandırılmasını şart koşar [4].

Dust Explosion Class	K_{st} Değeri (bar·m/s)	Patlama Özelliği	Tipik Örnekler
St-0	0	Patlamasız	Kireçtaşı, Çimento, Kuvars Kumu
St-1	0–200	Zayıf / Orta	Ahşap Tozu, Nişasta, Kömür, İlaç Etken Maddeleri
St-2	201–300	Güçlü	Selüloz Tozu, Epoksi Reçine, İnce Organik Pigmentler
St-3	>300	Çok Güçlü	Alüminyum Tozu, Magnezyum, İnce Titanyum

Tablo 2. NFPA 68'e göre toz patlama sınıflandırması (K_{st} indeksi)

Ön Siklonun Güvenlik Katkısı: NFPA 68 uyarınca, patlamaya yol açabilecek organik ve metalik toz proseslerinde ön siklon entegrasyonu, torbalı filtre ünitesindeki toplam ince toz kütsel birikimini hafifletir [4]. Ayrıca ön siklon, proses hattından gelebilecek olası kıvılcımları santrifüj bölmesinde sönümleyerek (kıvılcım tutucu görevi görerek) filtre torbalarının tutuşma riskini minimize eder.

3.3. EPA APTI (Course 413/415), VDI 3677 ve Diğer Uluslararası Regülasyonlar

- VDI 3677 (Verein Deutscher Ingenieure — Alman Mühendisler Birliği): Filterable Dust Separators standardında, gaz-partikül ayırma mekanizmaları detaylandırılmıştır [4]. VDI 3677, ön ayırıcı

siklonların ana filtre ünitesine ulaşan partikül konsantrasyonunu düşürerek kumaş üzerindeki spesifik toz keki direncini (K_2) nasıl optimize ettiğini matematiksel modellerle doğrulamaktadır [4].

- EPA APTI Course 413 ve 415: ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) Eğitim Dokümanlarında (Control of Particulate Matter Emissions), siklonların eylemsizlik ayırıcıları (inertial separators) olarak ön temizlemedeki rolü ve torbalı filtre ömrünü 3 ilâ 4 kat uzattığı belgelenmektedir [1].

4. Sektörel Tasarım Kriterleri ve İmalatçı Yaklaşımları

4.1. Sektör Lideri İmalatçıların Teknik Dokümanlarındaki Tasarım Parametreleri

Dünya çapındaki toz toplama sistemi üreticilerinin (Donaldson Torit, Camfil APC, Nederman, AAF Farr, Parker BHA, Scheuch) teknik dokümanları incelendiğinde öne çıkan tasarım parametreleri şunlardır [1]:

- Donaldson Torit ve Camfil APC: Yüksek toz yükü içeren proseslerde ($>5 \text{ g/m}^3$) ön ayırıcı kullanılmadığında filtre medyasının derinlemesine yükleme (depth loading) yaşayarak kısa sürede tıkanıp vurgulanmaktadır [10]. Ön siklon eklendiğinde air-to-cloth oranının %20–%25 yükseltilebileceği ifade edilmektedir [11].
- Scheuch ve Parker BHA: Çimento ve ağaç sanayiinde yüksek giriş toz konsantrasyonunun Can Velocity limitlerini aştığı durumlarda re-entrainment kaçınılmazdır [18]. İmalatçılar, hopper içi yönlendirici sistemler ve ön siklon kombinasyonu ile Can Velocity olumsuzluklarının nötralize edildiğini doğrulamaktadır [19].

5. Endüstriyel Vaka Çalışmaları ve Deneysel Karşılaştırma Verileri

Ön siklon entegrasyonunun sahadaki mühendislik etkileri, belgelenmiş endüstriyel vaka çalışmaları üzerinden incelenmiştir.

5.1. Vaka 1: Çimento Sanayii — Klinker Kırma ve Bilyalı Değirmen Havalandırma Hattı

- Tesis/Sektör: Çimento Üretim Tesisleri (Klinker kırma, çimento öğütme) [22]
- Mevcut Durum (Ön Siklonsuz): $15.000 \text{ m}^3/\text{h}$ kapasiteli torbalı filtre ünitesine doğrudan 15 g/m^3 konsantrasyonda yüksek derecede aşındırıcı klinker ve alçı tozu girmektedir [4].
- Saha Problemleri: Yüksek Can Velocity ($>100 \text{ m/min}$) ve yoğun toz keki nedeniyle filtre difüzörlerinde ve torba altlarında şiddetli mekanik aşınma [31]; ortalama 5 ayda bir torba patlaması ve kirlenmesi; sürekli yüksek basınç düşüşü ($\Delta P > 300 \text{ mmH}_2\text{O}$) [13].

- Uygulanan Çözüm: Filtre önüne yüksek verimli ön siklon eklenmesi [5].
- Sayısal Sonuçlar: Giriş toz yükü 15 g/m³'den 1.8 g/m³'e düşürülmüştür (%88 ön ayırma verimi) [1]. Torbalı filtre ΔP değeri 120 mmH₂O seviyesinde sabitlenmiştir [13]. Torba değişim ömrü 5 aydan 22 aya yükselmiştir (4.4 kat artış) [1].

5.2. Vaka 2: Ahşap ve Yonga Levha Sanayii — Yüksek Hızlı Zımpara ve Talaş Hattı

- Tesis/Sektör: MDF ve Yonga Levha İmalat Tesisi (Kalibre zımpara ve ebatlama hatları) [6]
- Mevcut Durum (Ön Siklonsuz): 25.000 m³/h debide iri talaş ve ince ahşap tozu karışımı (8 g/m³) jet-pulse filtreye sevk edilmektedir [6].
- Saha Problemleri: İri talaş parçalarının torba aralarında sıkışarak Can Velocity yükselmesi nedeniyle lifli tozların re-entrainment ile torbalara tekrar yapışması [4]. Günde onlarca kez jet-pulse patlatması yapılmasına rağmen filtre keki temizlenememekte, basınçlı hava kompresörleri aşırı yüklenmektedir [4].
- Uygulanan Çözüm: Ön siklonik ayırıcı entegrasyonu [5].
- Sayısal Sonuçlar: İri talaş parçalarının %95'i siklonik aşamada tutulmuş [1], filtreye sadece ince zımpara tozu aktarılmıştır. Patlatma aralığı 15 saniyeden 60 saniyeye çıkarılmış; kompresör elektrik tüketimi %35 azaltılmıştır [5]. Torbalı filtrenin v_f değeri 1.0 m/min'den 1.4 m/min'e yükseltilmesine rağmen kararlı çalışma sağlanmıştır [4].

5.3. Vaka 3: Ağır Metal ve Döküm Sanayii — Kumlama ve Saçma Püskürtme Ünitesi

- Tesis/Sektör: Otomotiv Dökümhanesi (Çelik saçma kumlama / Shot blasting) [10]
- Mevcut Durum (Ön Siklonsuz): Kumlama makinesinden çıkan çelik bilye tozu, döküm kumu ve metalik ince tozlar (12 g/m³) doğrudan kartuş filtre ünitesine çekilmektedir [6].
- Saha Problemleri: Yüksek kinetik enerjiye sahip çelik bilye parçacıkları kartuş medyasını delmekte, kumlama tozunun yüksek özgül ağırlığı nedeniyle hopper bölgesinden kalkan tozlar re-entrainment ile kartuş filtreyi tıkamaktadır [10].
- Uygulanan Çözüm: Ön siklon entegrasyonlu jet-pulse toz toplama ünitesi kurulumu [5].
- Sayısal Sonuçlar: Ağır metalik parçacıklar ve kumlama bilyeleri siklonik alt bölmede tutulmuş [5], filtre kartuşlarına delinme hasarı oluşması engellenmiştir. Filtre elemanı değişim periyodu 3 aydan 14 aya çıkmış, bakım masrafları %75 azalmıştır [1].

5.4. Vakalara İlişkin Sayısal Karşılaştırma Özeti

Aşağıdaki tablo, uygulamalarda elde edilen deneysel verileri özetlemektedir [1].

Parametre / Metrik	Vaka 1: Çimento	Vaka 2: Ahşap	Vaka 3: Metal Döküm
İşletme Debisi (Q)	15.000 m ³ /h	25.000 m ³ /h	18.000 m ³ /h
Filtreye Giren Toz Yüğü (C _i)	15 → 1.8 g/m ³	8 → 0.4 g/m ³	12 → 1.5 g/m ³
Ön Ayırma Verimliliği (η)	%88	%95	%87
Filtrasyon Hızı (v _f)	1.0 → 1.2 m/min	1.0 → 1.4 m/min	0.9 → 1.2 m/min
Basınç Düşüşü (ΔP)	300 → 120 mmH ₂ O	250 → 110 mmH ₂ O	280 → 130 mmH ₂ O
Torba / Element Ömrü	5 → 22 ay (4.4×)	6 → 21 ay (3.5×)	3 → 14 ay (4.7×)
Basınçlı Hava Tüketimi	−%60	−%35	−%55
Sistem Durma Süresi	−%80	−%70	−%75

Tablo 3. Üç endüstriyel vaka çalışmasında ön siklon entegrasyonu öncesi ve sonrası deneysel veriler

6. Sentez, Mühendislik Tasarım Limitleri ve Sonuçlar

6.1. Ön Siklon Entegrasyonunun Tasarım Parametrelerine Nicel Katkıları

Gerçekleştirilen teorik modellemeler, uluslararası standart analizleri ve saha vaka verilerinin sentezi sonucunda, ön siklon kullanımının temel tasarım parametrelerine somut katkıları belirlenmiştir:

- Toz Yüğü Düşüşü: >10 µm boyutundaki kaba partikül içeren endüstriyel proseslerde torbalı filtreye ulaşan kütsel toz yüğü %80 ilâ %95 oranında azalmaktadır [1].
- Filtrasyon Hızı (v_f) Artışı: Toz keki direncinin (K₂) düşmesi sayesinde, kabul edilebilir basınç kaybı sınırları içerisinde v_f değeri %15 ilâ %30 oranında artırılabilir [4]. Bu durum, aynı debi için gerekli filtre medyasını ve ekipman boyutunu %20–%25 oranında küçültür [12].
- Can Velocity Tolerans Yükselmesi: Toz bulutu yoğunluğunun azalması sebebiyle, re-entrainment riski oluşmaksızın mühendislik Can Velocity limitleri %15–%20 daha yüksek değerlerde tasarlanabilir [4].
- Filtre Eleman Ömrü: Medyaya çarpan mikron altı toz kütsesi ve aşındırıcı etki azaldığı için torba/kartuş ömrü 3 ilâ 4 kat uzamaktadır [1].

6.2. Tasarım Mühendisleri İçin Pratik Rehber ve Sistem Sınırlamaları

Tasarım mühendislerinin ön siklonlu toz toplama sistemleri kurgularken dikkat etmesi gereken kritik hususlar ve sınırlamalar şunlardır:

- Partikül Boyut Dağılımı (PSD) Bağımlılığı: Toz profili ağırlıklı olarak <5 µm olan (örneğin plazma/lazer kesim dumanı, mikronize silika dumanı) proseslerde siklonun ayırma verimi %40–%50 seviyelerine düşer [1]. Bu tür çok ince tozlu uygulamalarda ön siklon entegrasyonu ek basınç

kaybından (ΔP_{siklon}) başka fayda sağlamaz [5]. Ön siklon, geniş PSD aralığına sahip ve kaba partikül oranı yüksek proseslerde maksimum verim sunar [5].

- Basınç Düşüşü (ΔP) Dengesi: Standart bir ön siklon sisteme 500–1.500 Pa (2–6 inH₂O) ek statik direnç getirir [6]. Ancak torbalı filtredeki basınç düşüşü azaldığı için toplam sistem basınç dengesi nötrlenir veya çok az bir fan gücü artışı gerektirir [5].
- Nem ve Yapışkan Toz Riski: Çiğlenme noktasında (dew point) çalışan gaz hatlarında veya nemli/yapışkan toz proseslerinde ön siklon iç duvarlarında birikme ve tıkanma riski oluşabilir. Bu durumlarda siklon gövdesinin cidarlı ısıtılması veya izolasyonu şarttır.
- Alt Bunker Hava Sızdırmazlığı: Siklonun konik alt boşaltma ağzında hava sızdırmazlığı kritik önem taşır [4]. Yanlış seçilmiş bir klape nedeniyle alt bunkerden içeri giren kaçak hava, siklon iç vorteksini bozar ve toplanan tozları tekrar yukarı sürükleyerek ayırma verimini düşürür [5]. Kesintisiz çalışma için kaliteli hücre tekeri (rotary valve / hava kilidi) veya çift klape kullanılmalıdır [4].

7. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada sunulan teorik modeller, standart analizi ve vaka verileri, ön siklon ayırıcı ile jet-pulse torbalı filtre kombinasyonunun yüksek toz yüküne sahip endüstriyel proseslerde — özellikle çimento sanayiinde — belirgin mühendislik avantajları sunduğunu göstermektedir. Ön siklon entegrasyonu yalnızca filtre ömrünü uzatmakla kalmaz; aynı zamanda daha kompakt filtre gövdesi tasarımına, daha düşük basınçlı hava tüketimine ve daha istikrarlı işletim koşullarına olanak tanır.

Bununla birlikte, ön siklon entegrasyonu her proses için eşit derecede uygun değildir. Çok ince partikül dağılımına sahip ($<5 \mu\text{m}$) toz türlerinde siklon ayırma verimi düşük kaldığından, ek basınç düşüşü dışında anlamlı bir kazanç sağlanmamaktadır. Benzer şekilde, nemli ve yapışkan toz koşullarında siklon iç duvarlarında birikme riski, uygun ısıtma/izolasyon önlemleri alınmadan çözülemez. Tasarım mühendislerinin bu sınırlamaları göz önünde bulundurarak, partikül boyut dağılımı, toz yükü, gaz sıcaklığı ve nem parametrelerini bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmesi gerekmektedir.

Gelecekteki çalışmalar, ön siklon geometrisinin (giriş açısı, silindir/koni oranı, vortex finder derinliği) ayırma verimliliği ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri ile optimize etmeye odaklanabilir. Ayrıca, farklı endüstriyel toz türleri için siklon–torbalı filtre kombinasyonunun enerji verimliliği ve toplam sahip olma maliyeti (TCO) açısından yaşam döngüsü analizinin yapılması, tasarım kararlarının ekonomik temelini güçlendirecektir.

Kaynaklar

- [1] Darko Tech, "Complete Guide to Cyclone Separator Selection & Use — Maximizing Efficiency and ROI," <https://www.darko-tech.com/complete-guide-to-cyclone-separator-selection-use-maximizing-efficiency-and-roi/>
- [2] Vector Solutions, "Baghouse Basics," <https://www.vectorsolutions.com/courses/baghouse-basics/>
- [3] ACT Dust Collectors, "Your Guide to Dust Collector Terminology," <https://www.actdustcollectors.com/resources/glossary-of-terms>
- [4] PharmaChem Engineering, "Baghouse Sizing, Air-to-Cloth Ratio, Duct Hydraulics & Safety," <https://www.pharmachemeng.com/blogs/dust-collector-system-design-baghouse-air-to-cloth-ratio-pharma>
- [5] Flowmax, "Boosting Your Baghouse Dust Collector with a Cyclone Filter — Here's How It Works," <https://flowmax.in/blog/boosting-your-baghouse-dust-collector-with-a-cyclone-filter-here-s-how-it-works>
- [6] Kasko Makine, "Cyclone Separator Design: Sizing, Efficiency & Cut Point," <https://www.kaskomakine.com/blogs/cyclone-separators-design-sizing-applications>
- [7] VDI 3677, "Filterable Dust Separators — Design and Operation," Verein Deutscher Ingenieure.
- [8] TheAS Engineers, "Cyclone Separator Design Calculation, Pressure Drop & Efficiency," <https://theasengineers.com/cyclone-separator-design-calculation/>
- [9] ACGIH, "Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design," American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- [10] RoboVent, "What Is Air-to-Cloth Ratio, Why Does It Matter?," <https://www.robovent.com/learn/frequently-asked-questions/air-to-cloth-ratio-what-is-it-and-why-does-it-matter/>
- [11] Camfil APC, "Air-To-Cloth Ratio: The Complete Guide," <https://camfilapc.com/blog/air-to-cloth-ratio/>
- [12] Diversitech, "Calculating Air to Cloth Ratio for Industrial Dust Collectors," <https://www.diversitech-air.com/blog/calculating-air-to-cloth-ratio-dust-collectors>
- [13] PDFCOFFEE.COM, "Baghouse Design and Operation (Course Material)," <https://pdfcoffee.com/baghouseppt-pdf-free.html>
- [14] Baghouse.com, "Pleated Dust Collector Filter Conversion Cost Benefit Analysis," <https://baghouse.com/products/baghouse-filters/pleated-dust-collector-filter-conversion-cost-benefit-analysis/>
- [15] Baghouse.com, "Why Interstitial Velocity and Can Velocity Matters in Dust Collector Design," <https://baghouse.com/why-interstitial-velocity-and-can-velocity-matters-in-dust-collector-design/>
- [16] Powder & Bulk Solids, "Five C's to Consider for Effective Dust Collection," <https://www.powderbulksolids.com/dust-collection/five-c-s-to-consider-for-effective-dust-collection>
- [17] Milling and Grain, "Dust Collection Systems," <https://millingandgrain.com/dust-collection-systems-21770/>
- [18] Komtfil, "Can Velocity of Bag Filters Guide and Calculation," <https://komtfil.com/can-velocity-of-bag-filters-guide-and-calculation/>
- [19] Baghouse.com, "The Real Reasons Pulse-Jet Collectors Lose Performance Over Time," <https://baghouse.com/the-real-reason-pulse-jet-collectors-lose-performance-over-time/>

- [20] World Cement, "Common Sense Dust Collector System Maintenance and Troubleshooting — Part Two," <https://www.worldcement.com/special-reports/03082016/common-sense-dust-collector-system-maintenance-and-troubleshooting-part-two-39/>
- [21] PDFCOFFEE.COM, "Dust Collector Operations," <https://pdfcoffee.com/dust-collector-operations-pdf-free.html>
- [22] Scribd, "Design of Dust Extraction System — Air Pollution," <https://www.scribd.com/document/287457892/Design-of-Dust-Extraction-System>
- [23] Torch-Air, "Rubber Dust & Odor Removal in Manufacturing: Hazards, Collectors," <https://torch-air.com/blog/rubber-dust-odor-removal>
- [24] ACGIH, "Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design," (full reference), <https://dokumen.pub/industrial-ventilation-a-manual-of-recommended-practice-for-design-9781607261087.html>
- [25] PDFCOFFEE.COM, "Cement Engineers Handbook," <https://pdfcoffee.com/cement-engineers-handbook-pdf-free.html>
- [26] Scribd, "Fabric Filter Design Variables Explained," <https://www.scribd.com/doc/204734892/Fabric-Filter-Design-Variables>
- [27] Scribd, "Baghouse Dust Collector Design Guide," <https://www.scribd.com/document/693733509/Design-and-Sizing-of-Baghouse-Dust-Collectors>
- [28] EPA, "APTI Course 413/415: Control of Particulate Matter Emissions," U.S. Environmental Protection Agency, Air Pollution Training Institute.
- [29] NFPA 68, "Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting," National Fire Protection Association.
- [30] NFPA 654, "Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids," National Fire Protection Association.
- [31] Scribd, "Dust Collector Design and Operation Guide," <https://www.scribd.com/document/445583262/Dust-Collector-Operations>