



PENGENDALIAN EMISI PARTIKULAT

DODY GUNTAMA, ST., M.Eng



Partikulat

Partikulat adalah substansi yang berada dalam atmosfer pada kondisi normal yang secara ukuran dinyatakan dalam satuan mikron (μm – micrometer). Sifat fisis partikel yang penting adalah ukurannya, yang berkisar antara diameter 0,0002 mikron sampai sekitar 500 mikron. Partikulat yang memiliki ukuran lebih dari 100 mikron dikategorikan sebagai kelompok yang mudah mengendap, sedangkan yang memiliki ukuran kurang dari 100 mikron dikategorikan sebagai partikulat tersuspensi di udara. Partikulat untuk ukuran kurang dari 10 mikron dapat berpotensi berpengaruh terhadap sistem pernapasan (*inhalable particulate*) dan yang berukuran kurang dari 1 mikron merupakan kelompok *permanently suspended* di udara (BPSDM PU, 2018).



Partikulat

Pencemar partikel bersumber dari sumber alami dan sumber antropogenik. Berbagai proses alami, mengakibatkan penyebaran partikel di atmosfer, misalnya letusan gunung berapi dan hembusan debu serta tanah oleh angin. Aktivitas manusia juga berperan dalam penyebaran partikel, misalnya dalam bentuk partikel – partikel debu dan asbestos dari bahan bangunan, abu terbang dari proses peleburan baja dan asap dari proses pembakaran tidak sempurna, terutama dari batu arang. Sumber partikel yang utama yaitu pembakaran bahan bakar dari sumbernya, diikuti oleh proses-proses industri (Ratnani, 2008).



Dasar-dasar Pengendalian Pencemaran Partikulat

- Penggunaan alat-alat penurun konsentrasi partikulat
- Pertimbangan pemilihan alat
 - Teknis : tingkat penyisihan, kuantitas & karakteristik pencemar, sistem pemadam kebakaran, explosion control
 - Ekonomis : energi



Perencanaan Pengendalian Debu

Parameter gas yang diproses:

Suhu, Tekanan, Volume alir, Kerapatan, Komposisi, Volume kandungan air, toksitas, dew point, korositas, viskositas, sifat mudah terbakar, dsb.

Parameter Eksternal:

Nilai target konsentrasi Emisi, Level batasan kebisingan, Suplai air dan kondisi emisi, Pengolahan dan daur ulang debu terkumpul, Hubungannya dengan peraturan per-UU-an terkait.

Peralatan dan Instrumen:

Hood, Fan, Sistem pembuangan debu terkumpul, pipa duct, control panel, peralatan elektrik, peralatan pendingin gas, Peralatan pengolah air limbah.

**Pertimbangan
Parameter proses dan
peralatan**

**Pemilihan
Peralatan**

Sistem Desain

Parameter debu:

Konsentrasi, distribusi diameter partikel, Densitas, Komposisi, Sifat Gesek, Sifat melarut, sifat ledak, Resistensi, Daya Rekat, Sifat larut ke air.

Karakteristik Peralatan:

Rasio Debu terkumpul, loss pressure, Biaya peralatan, Biaya operasi, Debit yang dialah, Luas instalasi, dsb.

Item Desain Peralatan yang dipilih:

Kecepatan alir dasar, Sistem Operasi (Start up – Shutdown, Kestabilan system, potensi ekonomis.



Karakteristik Partikulat: Distribusi Ukuran

- **Distribusi ukuran partikel :**

- informasi mengenai kisaran variasi ukuran partikel dari yang terkecil sampai ukuran terbesar
- berguna dalam menentukan jenis alat pengendali yang akan dipilih

- **Alat sampling :**

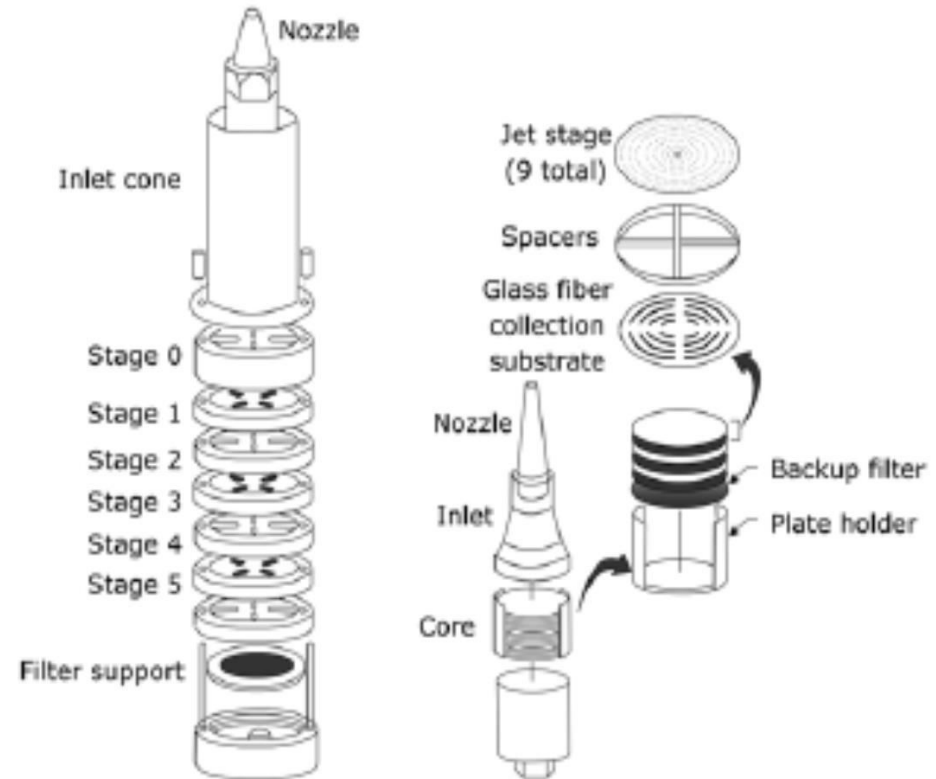
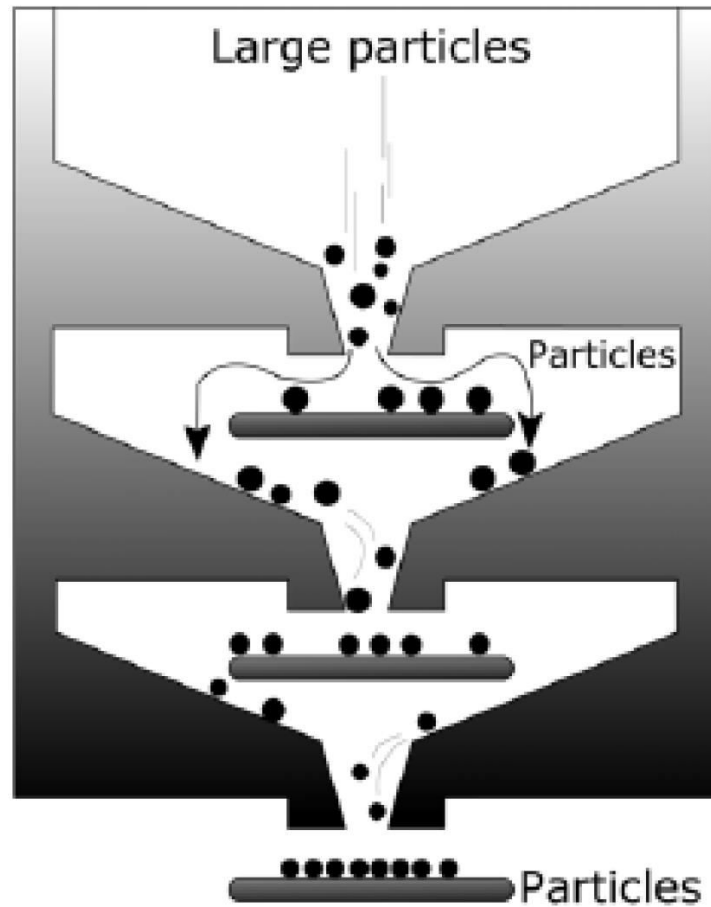
- *cascade impactor*
- bekerja seperti saringan yang dapat memisahkan ukuran partikel.

- **Contoh :** hasil sampling distribusi partikulat :

Kisaran ukuran (μm)	0-2	2-5	5-9	9-15	15-25	>25
Berat (mg)	4.5	179.5	368	276	73.5	18.5
Persen berat (%)	0.5	19.5	40.0	30.0	8.0	2.0



Karakteristik Partikulat: *Cascade Impactor*





Alat Pengendali Partikulat

- ***Gravity Settling Chamber***
- ***Cyclone***
- ***Electrostatic Precipitator (EP)***
- ***Fabric Filter (FF)***
- ***Wet Scrubber***

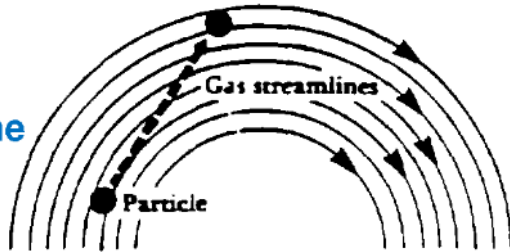


Mekanisme Penyisihan

Gravity Settling chamber

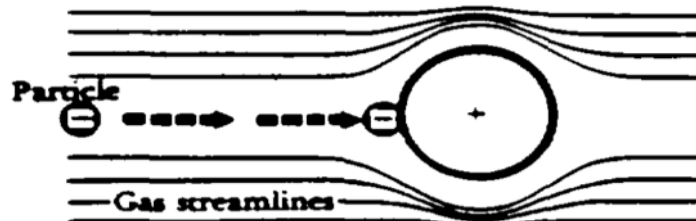


Cyclone



Gaya Sentrifugal

Electrostatic Precipitator



Gaya Elektrostatik

a. Proses Gravitasi

Pada proses ini penyisihan dilakukan dengan memanfaatkan gaya berat/gravitasi dari partikulat itu sendiri yang menghasilkan kecepatan pengendapan. Sehingga mekanisme penyisihannya memanfaatkan ruang yang mampu menghasilkan kecepatan terminal saat partikulat terpisah dari stream aliran gas buang. Proses ini hanya efektif pada ukuran partikulat lebih dari 70 mikron. Skema mekanisme pengendalian partikulat proses gravitasi dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *gravity settler*.

b. Proses Sentrifugal

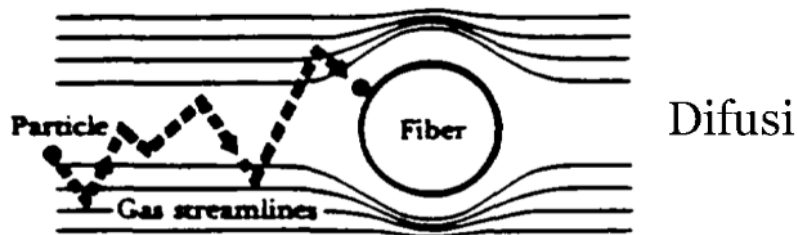
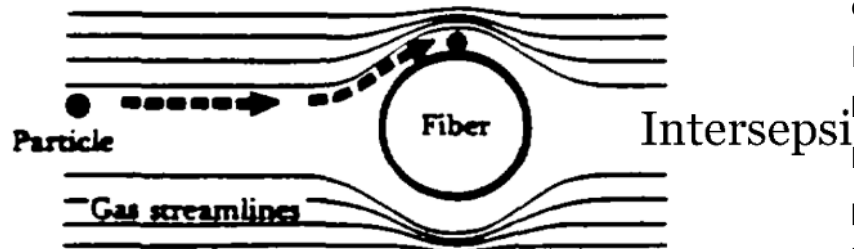
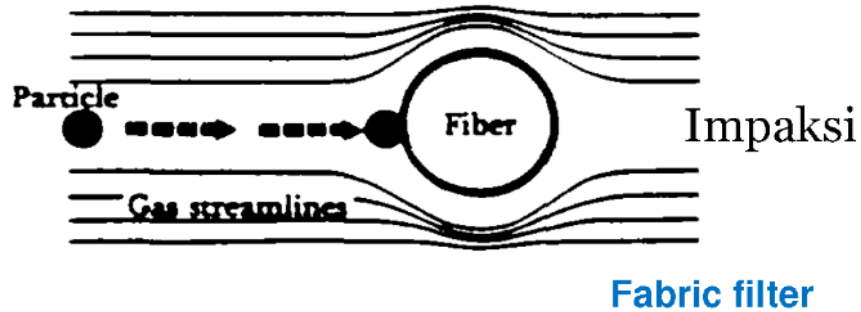
Pada proses ini, kelemahan pada mekanisme gravitasi dicoba diatasi dengan memberikan percepatan gaya sentrifugal dan pembentukan vortex. Sehingga partikulat dapat terpisah dari stream aliran gas buang. Penambahan gaya sentrifugal ini mampu menyisihkan partikulat hingga ukuran 5 mikron. Skema mekanisme pengendalian partikulat dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *cyclone*:

b. Proses Sentrifugal

Pada proses ini, kelemahan pada mekanisme gravitasi dicoba diatasi dengan memberikan percepatan gaya sentrifugal dan pembentukan vortex. Sehingga partikulat dapat terpisah dari stream aliran gas buang. Penambahan gaya sentrifugal ini mampu menyisihkan partikulat hingga ukuran 5 mikron. Skema mekanisme pengendalian partikulat dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *cyclone*:



Mekanisme Penyisihan



d. Proses Impaksi (Tumbukan)

Proses penyisihan pada proses ini adalah melalui menumbukkan partikel dengan bidang material tertentu yang tegak lurus dengan garis edar gas buang. Proses impaksi akan efektif jika pada titik tumbukan tercapai kecepatan terminal sehingga tidak terpantul kembali dan terbawa aliran gas buang. Skema mekanisme pengendalian partikulat dengan proses impaksi dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *fabric filter*.

e. Proses Intersepsi (Singgungan)

Pada proses intersepsi, partikulat masih akan terbawa dalam garis edar gas buang namun ketika memasuki zona porositas, partikel akan mengalami kehilangan tekan sehingga terpisah dari gas buang. Skema mekanisme pengendalian partikulat dengan proses intersepsi dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *fabric filter*.

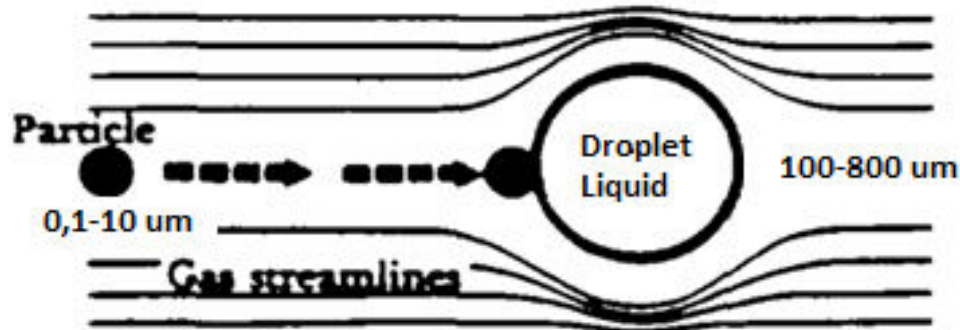
f. Proses Difusi

Proses ini merupakan mekanisme lebih lanjut dari partikulat dengan proses impaksi namun terjadi kesetimbangan momentum sehingga perilaku partikel akan mengalami perubahan sesuai materi atau bidang yang terkena impaksi. Skema mekanisme pengendalian partikulat dapat digambarkan sebagai berikut, dimana proses akan terkait dengan jenis alat pengendali *wet scrubber*.

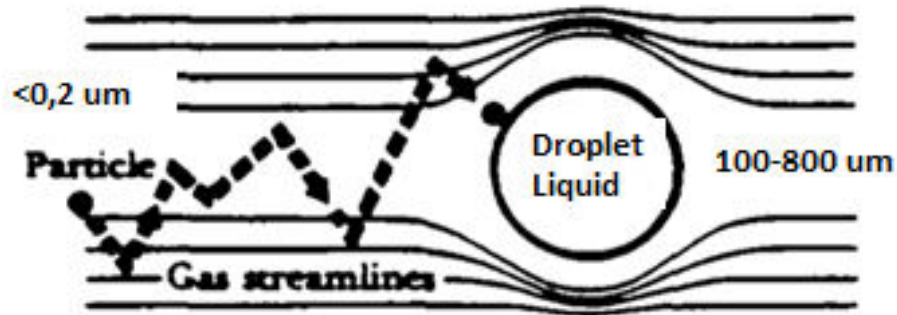


Mekanisme Penyisihan

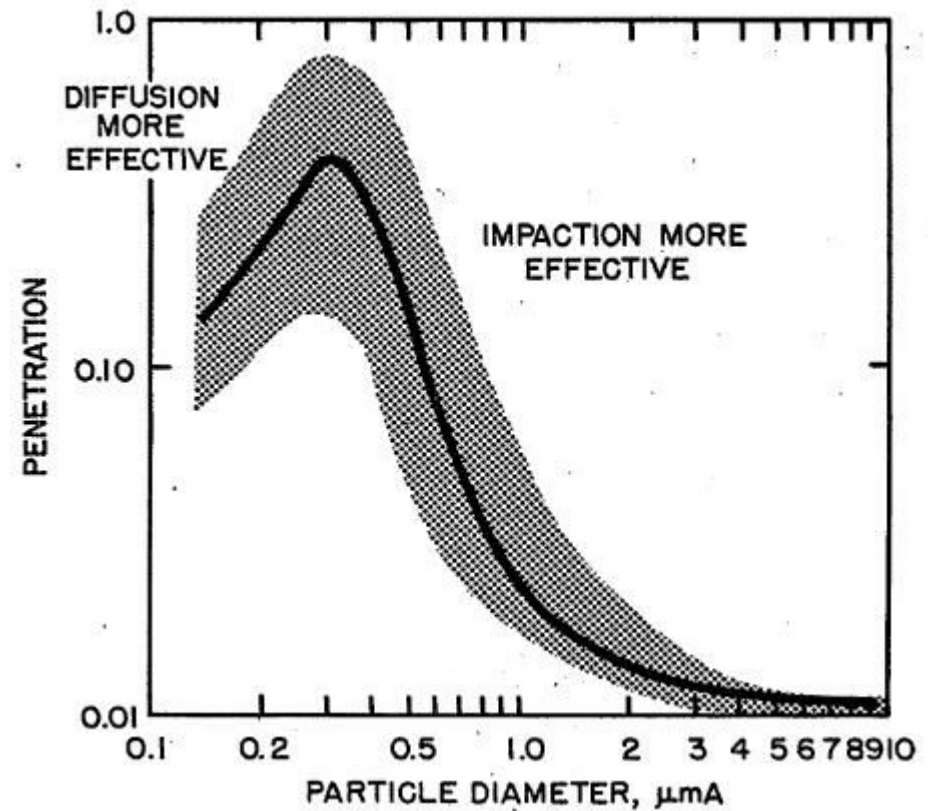
Wet Scrubber



Impaksi



Difusi





1. *Gravity Settling Chamber*

a) **Gambaran umum**

- Alat pengendali pertama dan sekarang sangat jarang dipakai. Efektif menyisihkan partikel ukuran 80-120 μm
- Aplikasi: Industri logam dengan partikel besar dan metalurgi

b) **Prinsip penyisihan**

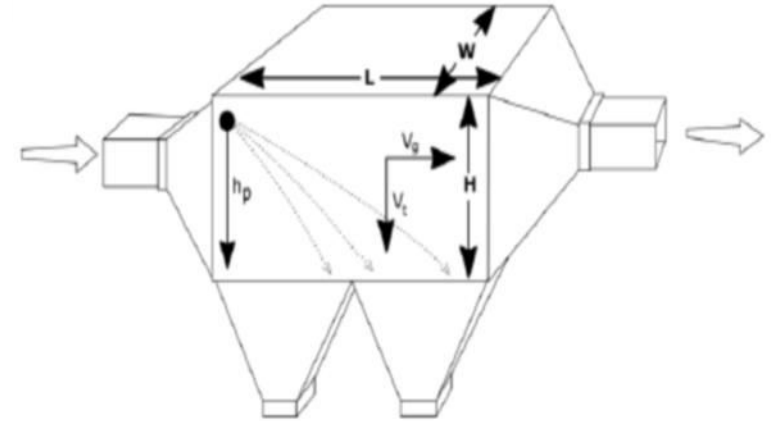
aliran gas yang mengandung partikulat dialirkan melalui suatu ruang (*chamber*) dengan kecepatan rendah sehingga memberikan waktu yang cukup bagi partikulat untuk mengendap secara gravitasi ke bagian pengumpul debu (*dust collecting hoppers*).



1. Gravity Settling Chamber

c) Deskripsi alat

- Luas area penampang ($W \times H$) > Luas inlet/outlet, sehingga aliran dalam chamber lebih lambat
- Dipasang *baffle* pada inlet untuk meratakan aliran & memudahkan pengendapan



d) Kelebihan & Kekurangan

Kelebihan:

- Desain alat sederhana, mudah untuk dibuat konstruksinya
- Pemeliharaan yang mudah dan biaya pemeliharaan sangat rendah

Kekurangan:

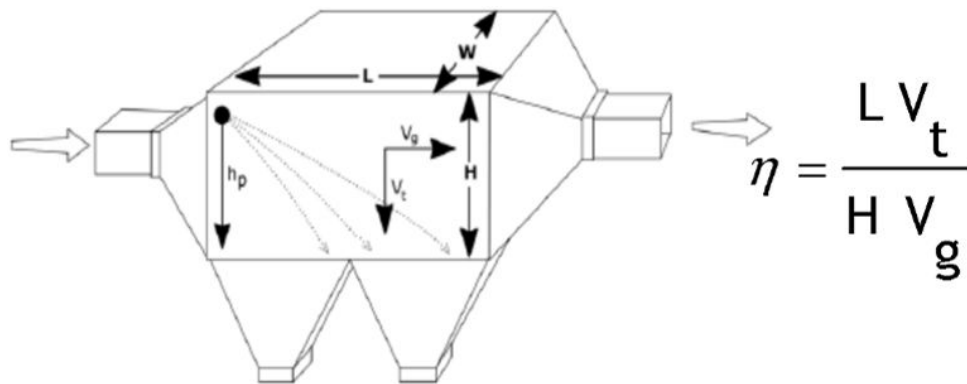
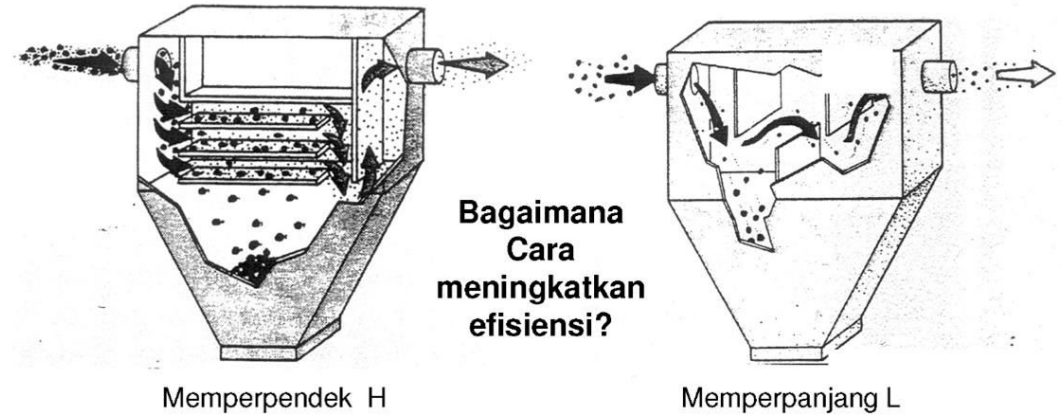
- Ukurannya besar, perlu lahan yang luas
- Harus dibersihkan secara manual dalam interval waktu tertentu
- Hanya dapat menyisahkan partikel berukuran besar



1. Gravity Settling Chamber

$$V_t = g d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho_g)}{18\mu}$$

V_t	=	Terminal settling velocity	m/detik
g	=	percepatan gravitasi, 9.81	m/detik ²
d_p	=	diameter partikel	m
ρ_p	=	massa jenis partikel	kg/m ³
ρ_g	=	massa jenis gas	kg/m ³
μ	=	viskositas kinematik fluida (udara)	kg/(m.detik)



η	=	Efisiensi penyisihan	%
L	=	total panjang chamber	m
V_t	=	Terminal settling velocity	m/detik
H	=	tinggi chamber	m
V_g	=	kecepatan aliran gas horizontal	m/detik



2. *Cyclone*

a) **Gambaran umum**

- Menyisihkan partikel ukuran 7-15 μm
- Digunakan sebagai *pre-cleaner*
- Pelindung alat pengendali partikulat efisiensi tinggi (seperti fabric filter, electrostatic precipitator)
- Efisiensi 80% untuk kandungan partikel $>20 \mu\text{m}$
- Aplikasi pada industry makanan, besi, baja, aspal, semen, kertas, kimia, batubara, dll.

b) **Prinsip penyisihan**

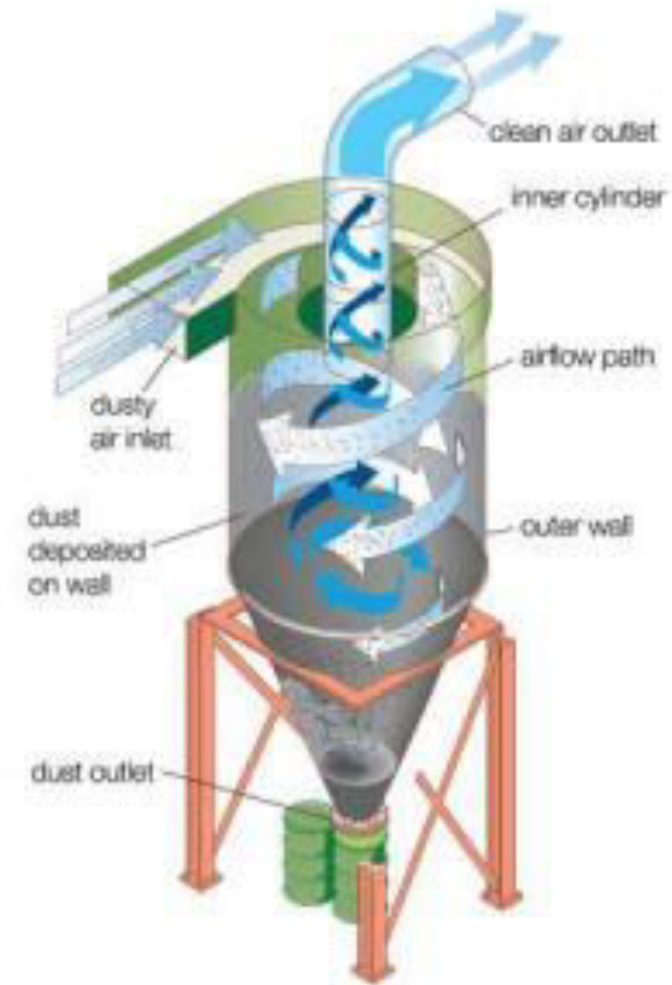
- Aliran gas bermuatan partikel masuk inlet, terjadi gaya sentrifugal dan inersia, partikel bergerak ke bawah dan gas bergerak berbalik arah ke atas keluar melalui outlet pada bagian atas *cyclone*



2. Cyclone

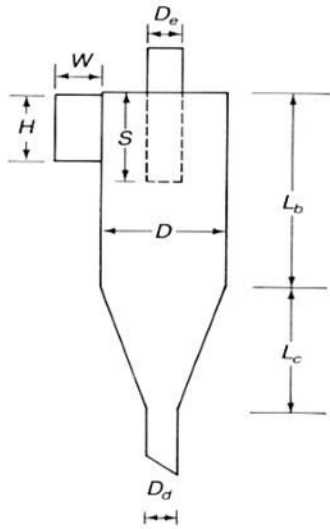
c) Deskripsi Alat

- *Inlet:* Gas masuk harus ditransformasikan menjadi aliran sirkular sehingga terbentuk vorteks,. Keberhasilan modifikasi sistem inlet akan membantu peningkatan efisiensi.
- *Body:* Cyclone yang lebih panjang dibandingkan diameter menyebabkan vorteks yang lebih besar sehingga partikel terkumpul lebih banyak.
- *Hopper:* digunakan untuk pembuangan debu, dapat dilakukan periodic.
- *Outlet:* gas yang keluar dari cyclone akan berputar secara kontiniu. Bila aliran keluar tanpa turbulensi, maka akan dapat mengurangi jumlah energi pada system.





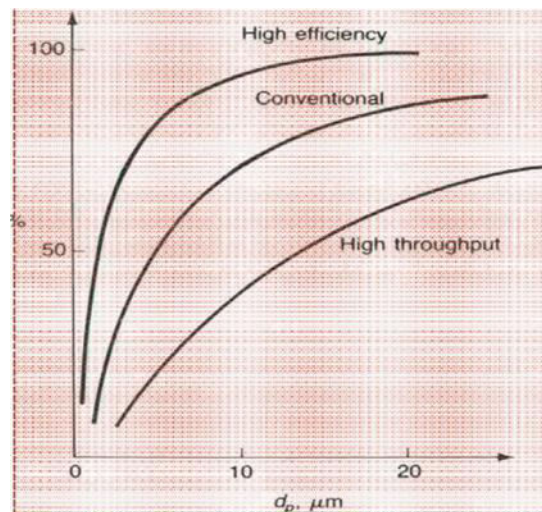
2. Cyclone



Dimana:

- D = body diameter
- H = inlet height
- W = inlet width
- D_e = exit tube diameter
- S = length of vortex
- L_b = length of the body
- L_c = length of cone
- D_d = diameter dust outlet

Perbandingan ukuran	Jenis Cyclone					
	High Efficiency		Conventional		High Throughput	
	1	2	3	4	5	6
Diameter Badan (D_b/D_b)	1	1	1	1	1	1
Tinggi inlet (H/D_b)	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
Lebar inlet (W/D_b)	0,2	0,21	0,25	0,25	0,325	0,35
Diameter keluar gas (D_e/D_b)	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
Panjang Vortex finder (S/D_b)	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
Panjang badan (L_b/D_b)	1,5	1,4	2	1,75	1,5	1,7
Panjang cone (L_c/L_b)	2,5	2,5	2	2	2,5	2
Diameter outlet debu (D_d/D_b)	0,375	0,4	0,25	0,40	0,375	0,4



Ukuran (μm)	Efisiensi penyisihan (%)	
	Kovensional	Efisiensi tinggi
<5	<50	50-80
5-20	50-80	80-90
15-40	80-95	95-99
>40	95-99	95-99



2. *Cyclone*

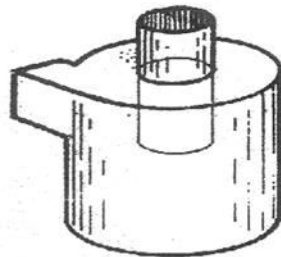
d) Kelebihan & kekurangan

- Kelebihan:
 - *Capital cost* yang rendah
 - Peralatan relatif sederhana
 - Dapat dioperasikan pada temperatur tinggi
 - Pemeliharaan mudah
 - Merupakan sistem pengumpul kering
 - Kebutuhan lahan relatif tidak luas
- Kekurangan:
 - Efisiensi rendah untuk partikel yang sangat kecil
 - Biaya operasi tinggi karena tingginya *pressure drop*

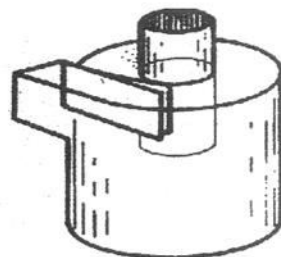


2. Cyclone

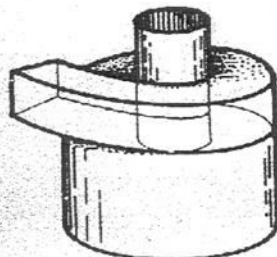
Inlet



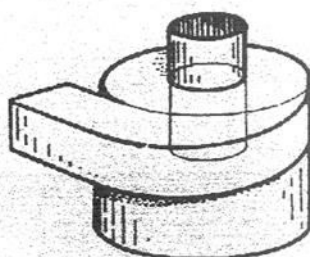
a. Tangential entry



b. Tangential entry with deflector vanes

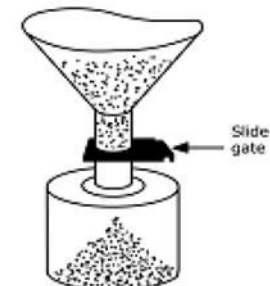


c. Helical entry

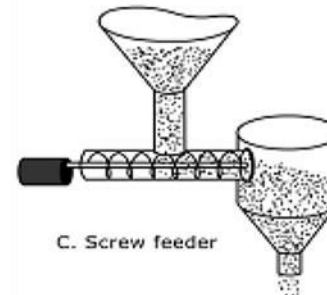


d. Involute entry

Pembersihan Hopper



A. Simple manual slide gate



C. Screw feeder



B. Rotary valve



D. Double flap valve



2. Cyclone

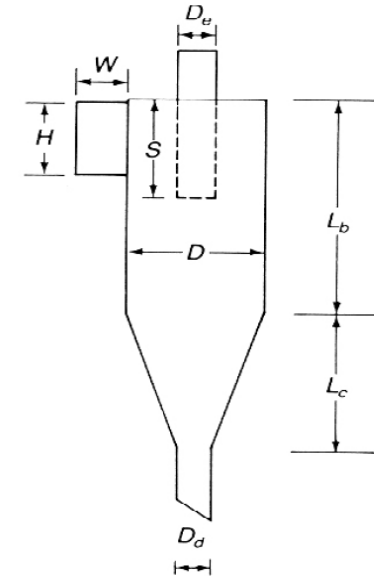
- Ukuran partikel yang dapat diendapkan

$$d_p = \left(\frac{9\mu_g W}{\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{0.5}$$

d_p = ukuran partikel terkecil yang dapat diendapkan (*Partikel lebih besar dari d_p akan disisihkan 100%*)

$$d_{pc} = \left(\frac{9\mu_g W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right)^{0.5}$$

d_{pc} = ukuran partikel yang dapat diendapkan sebanyak 50%, disebut juga "cut size diameter 50%"



$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right]$$

d_p	=	diameter partikel	m
μ_g	=	viskositas gas	kg/(m detik)
W	=	Lebar inlet	m
N_e	=	Banyaknya putaran pada outer vortex	
V_i	=	Kecepatan masuk gas	m/detik
ρ_p	=	massa jenis partikel	kg/m ³
ρ_g	=	massa jenis gas	kg/m ³



2. Cyclone

- Efisiensi penyisihan partikel ukuran tertentu

$$\eta_j = \frac{1}{1 + \left(d_{pc} + \bar{d}_{pj} \right)^2}$$

η_j = Efisiensi pengumpulan untuk kisaran ukuran partikel ke-j

d_{pc} = Diameter partikel yang tersisihkan sebanyak 50%

d_{pj} = Diameter partikel ke-j

- Efisiensi siklon secara keseluruhan

$$\eta_o = \sum \eta_j m_j$$

η_o = Efisiensi penyisihan secara % keseluruhan

η_j = Efisiensi pengumpulan untuk kisaran % ukuran partikel ke-j

m_j = Fraksi massa partikel pada kisaran ukuran ke j



2. Cyclone

- **Kehilangan tekanan** (*pressure drop*), persamaan *Shepperd* dan *Lapple*

$$H_v = K \frac{H W}{D_e^2}$$

H_v = Kehilangan tekan dinyatakan dalam jumlah head kecepatan inlet
 K = Konstanta yang tergantung dari konfigurasi siklon dan kondisi operasi
 H = Tinggi inlet m
 W = Lebar inlet m
 D_e = Diameter outlet gas m

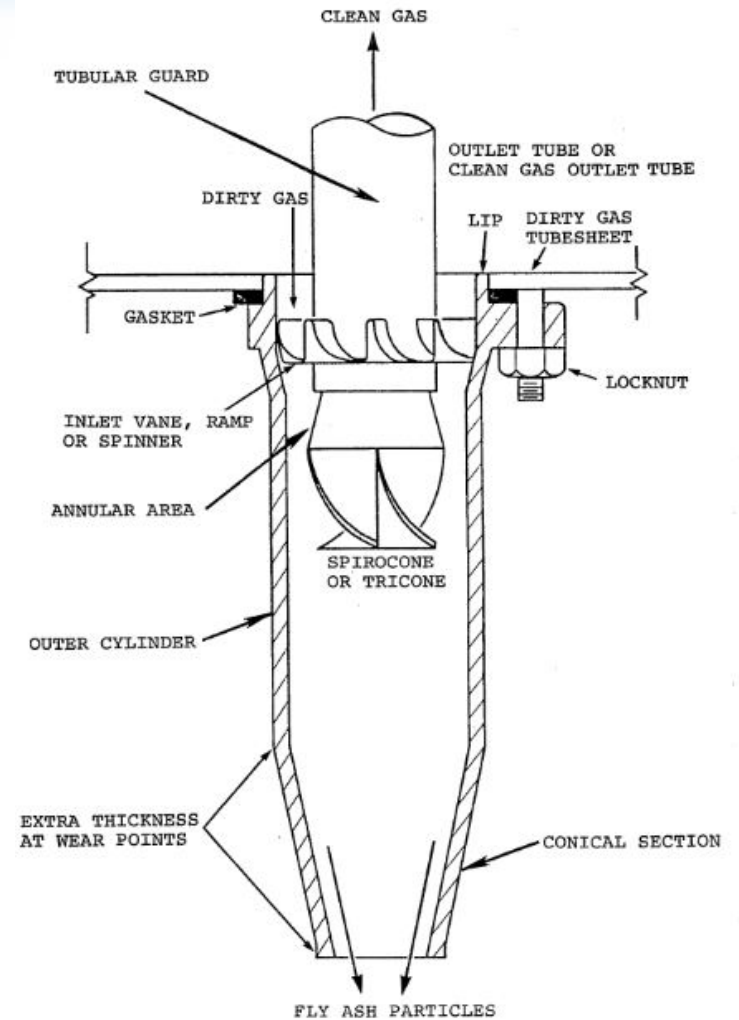
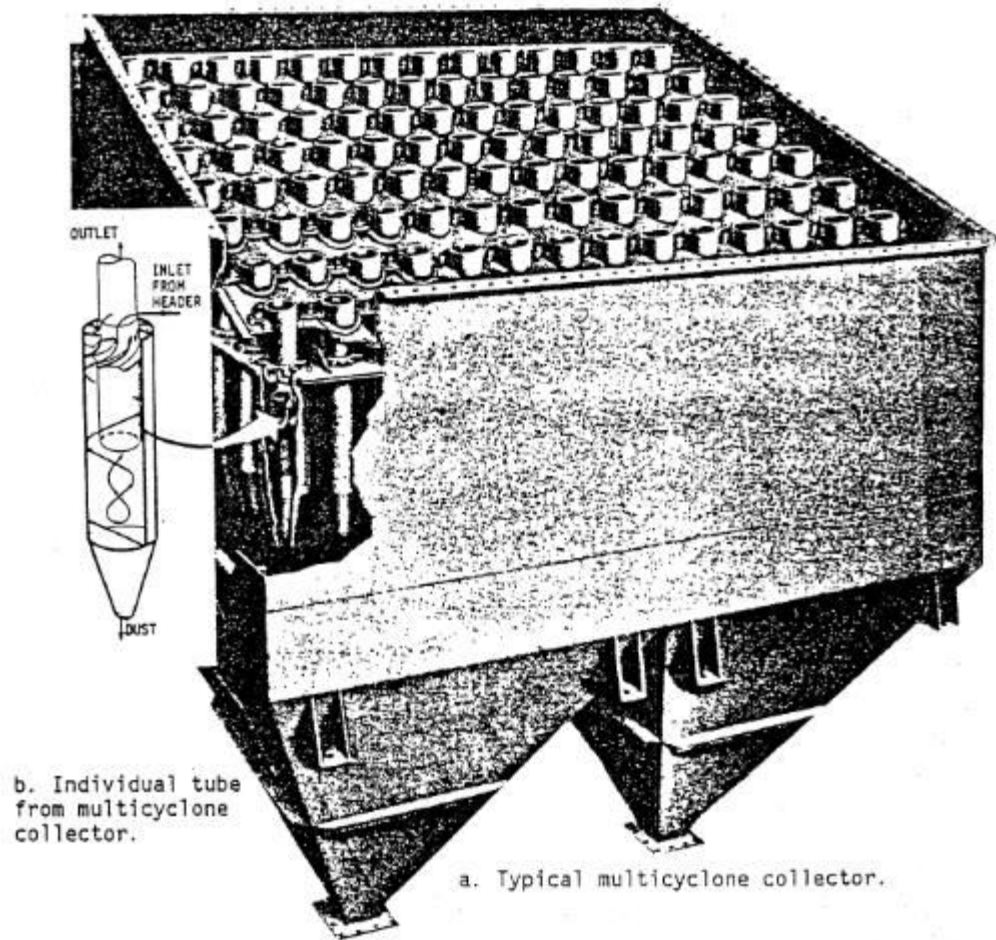
$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_g V_i^2 H_v$$

ΔP = Kehilangan tekan
 ρ_g = Massa jenis gas
 V_i = Kecepatan masuk gas
 H_v = Kehilangan tekan dinyatakan dalam jumlah head kecepatan inlet

- **Efisiensi dan Kehilangan Tekan**
 - Efisiensi rendah : 5 - 10 cm kolom air
 - Efisiensi sedang: 10 - 15 cm kolom air
 - Efisiensi tinggi : 20 - 25 cm kolom air



Multi cyclone





3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

a) **Gambaran umum**

- Dasar konsep presipitasi electron akibat gaya elektrostatis
- Efektif untuk penyisihan partikulat ukuran 1-5 μm
- Aplikasi pada PLTU batubara untuk menyisihkan fly ash, industry semen, pulp dan kertas.

b) **Prinsip penyisihan**

- Pemberian electron oleh corona discharge menimbulkan gaya elektrostatis. Partikulat akan menempel pada plat yang bermuatan positif
- *Discharging* muatan terjadi pada bidang kolektor dan ternetralisir oleh jumlah partikulat yang menempel
- Tebal penempelan efektif 0,08-1,52 cm
- Proses pelepasan partikulat pada kolektor menggunakan sistem *wet rapping* (*air spray*) dan *dry rapping* (vibrasi)
- Hasil rapping terkumpul pada hopper

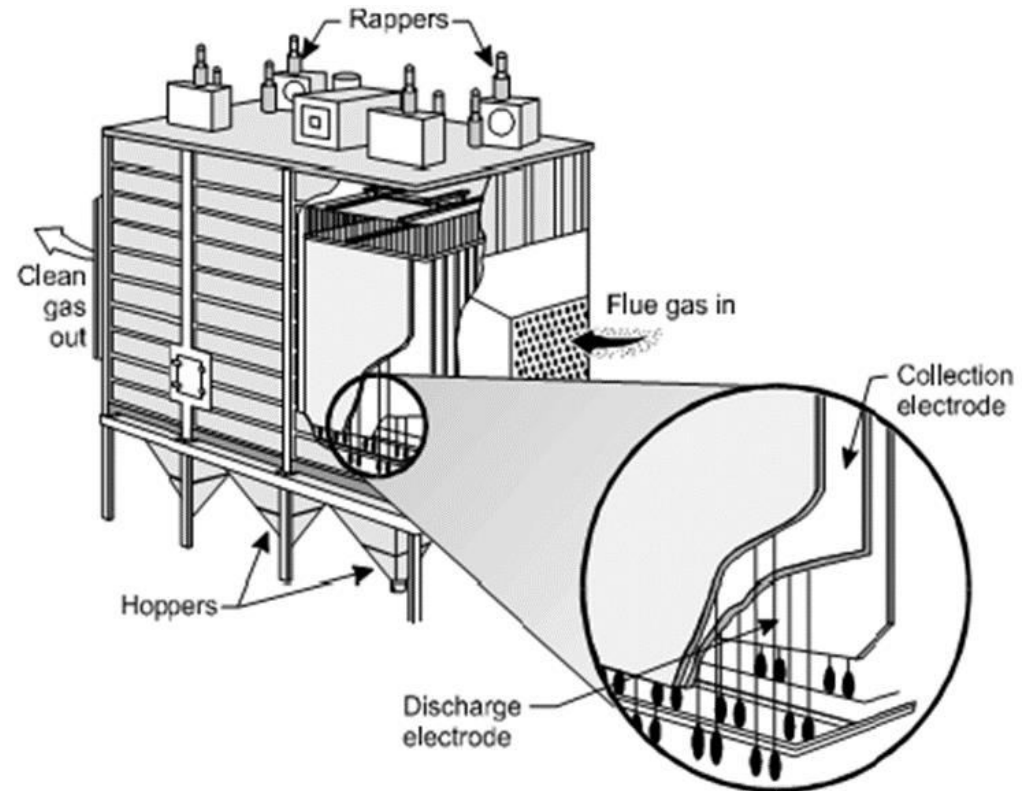


3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

c) Deskripsi Alat

3 Komponen utama EP:

- *Discharge electrode*: berupa kawat pemberi muatan bervoltase tinggi
- *Collection electrode*: area pengumpul berbentuk plat atau tabung
- *Rapper* untuk menjatuhkan partikel yang terakumulasi ke dalam hopper





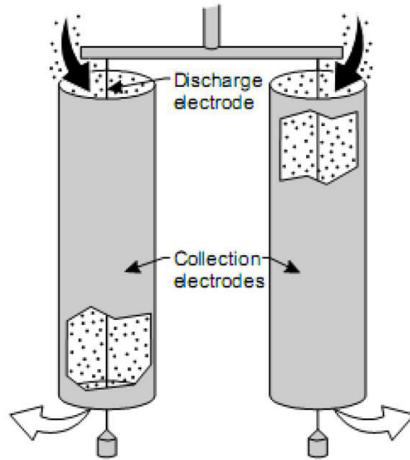
3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

Klasifikasi EP:

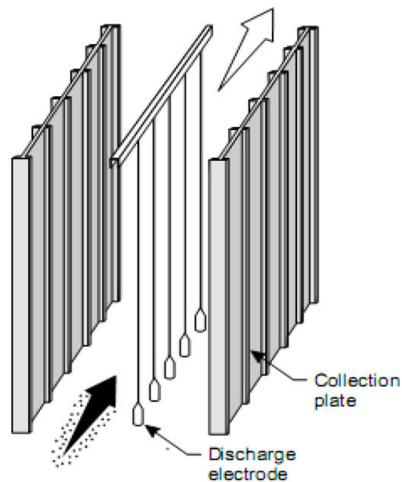
- Desain struktur *discharge electrode* dan *collection electrode*
 - *Tubular EP*
 - *Plate EP*
- Pemberian muatan
 - *Single Stage EP*
 - *Two Stage EP*
- Temperatur gas buang
 - *Hot side EP* ($T_{\text{gas buang}} > 300^{\circ}\text{C}$)
 - *Cold side EP* ($T_{\text{buang}} \leq 204^{\circ}\text{C}$)
- Pembersihan elektroda pengumpul
 - *Wet EP*, untuk industri gas buang eksplosif (closed hood basic oxygen furnace pada industri baja)
 - *Dry EP*



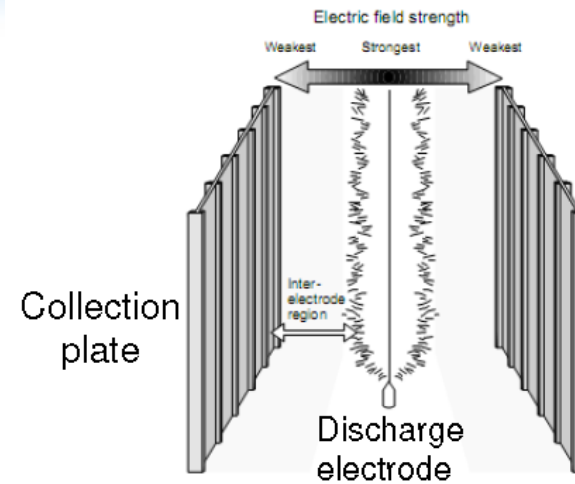
3. *Electrostatic Precipitator (EP)*



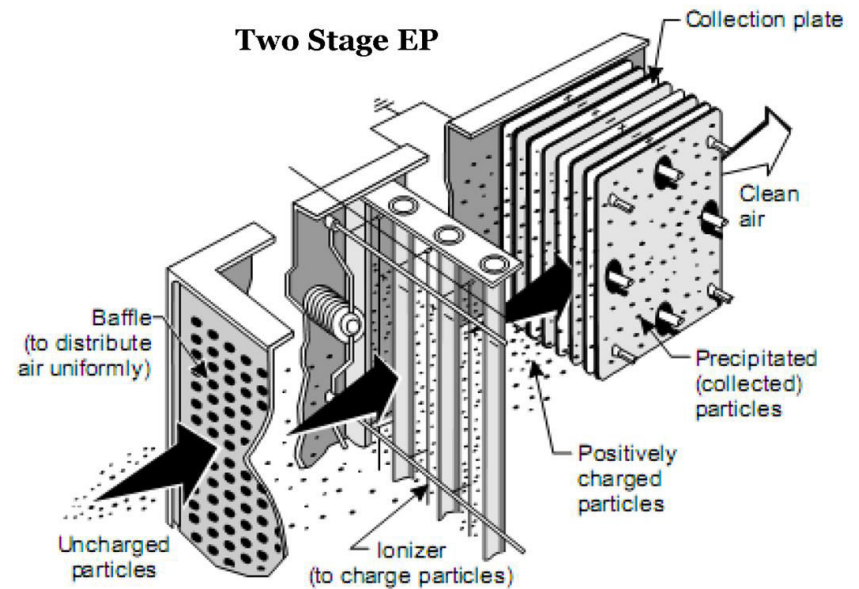
Turbular EP



Plat EP



Two Stage EP





3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

d) Kelebihan & kekurangan

Kelebihan:

- Efisiensi penyisihan partikel sangat tinggi
- Mampu menyisihkan partikel berukuran kecil (0.1 -10 mikron)
- Dapat menangani debit aliran gas besar dengan kehilangan tekan yang rendah.
 - Kehilangan tekanan sekitar 2,54 cm H₂O
 - (<< jika dibandingkan dengan *scrubber* ataupun *baghouse* dengan Δp : 25 – 250 cm H₂O)
- Dapat digunakan untuk pengumpul sistem kering bagi materi yang bernilai, atau pengumpul sistem basah untuk *fume* dan *mist*
- Dapat didisain aliran gas dengan temperatur cukup tinggi
- Biaya operasional rendah, kecuali untuk efisiensi yang sangat tinggi



3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

Kekurangan:

- *Capital cost* yang tinggi
- Hanya menyisihkan partikulat dan tidak dapat menyisihkan pencemar dalam bentuk gas
- Tidak terlalu fleksibel
- Memerlukan lahan yang luas
- Tidak dapat digunakan untuk partikel yang memiliki resistivitas elektrik (*electrical resistivity*) yang terlalu tinggi ($> 10^{10}$ ohm.cm) atau terlalu rendah (10^4 - 10^7 ohm.cm)
- Ozon dihasilkan dari pemberian muatan negatif terhadap elektoda pada saat ionisasi gas
- Dibutuhkan personel yang memiliki keahlian khusus dalam pemeliharaan EP

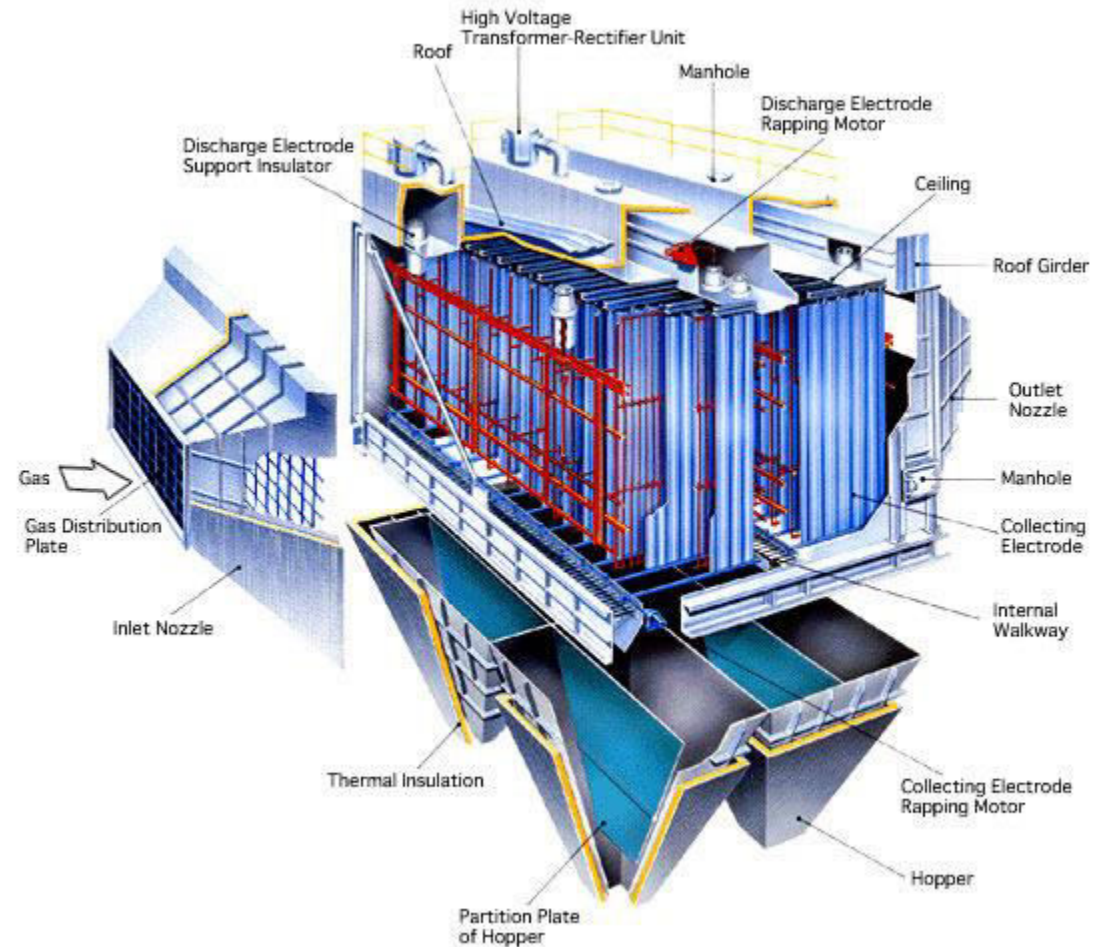


3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

e) Desain

Mempertimbangkan:

1. Tingkat efisiensi
2. Resistivitas
3. Luas kolektor spesifik
4. Aspek rasio
5. Distribusi laju aliran
6. Electricity
7. Kelengkapan EP





3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

1) Tingkat efisiensi, tergantung pada kecepatan melayang

$$W = \frac{dp \cdot E_o \cdot E_p}{4\pi\mu}$$

w = kecepatan melayang (m/dtk)

dp = diameter partikel (μm)

E_o = kekuatan medan listrik tempat partikel diberikan muatan (volt/m)

E_p = kekuatan medan listrik tempat partikel dikumpulkan, dekat elektroda pengumpul (volt/m)

μ = viskositas gas

π = 3,14

η = Efisiensi

e = 2,718

$$\eta = 1 - e^{-w \left(\frac{A}{Q}\right)}$$

w = kecepatan melayang (m/dtk)

A = Luas area pengumpul efektif (m^2)

Q = Luas gas buang yang diolah (m^3/dtk)

Aplikasi	Kecepatan melayang (m/dtk)
abu batubara (fly ash)	0,1-0,13
industri kertas (pulp & paper mills)	0,07
Uap asam sulfat (sulfuric acid mist)	0,05-0,07
semen (proses kering)	0,05-0,07
gypsum	0,15-0,19
blast furnace	0,12

Sumber: Noel, Air pollution control engineering



3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

- 2) Resistivity: daya tahan partikel terhadap pengaruh kuat medan listrik (ohm-cm)
- *Resistivity* rendah: 10^4 - 10^7 ohm.cm (*fly ash, carbon black*): mudah kehilangan muatan saat mendekati pengumpul, kurang kuat tertahan pada permukaan pengumpul -> efisiensi berkurang
 - *Resistivity* normal 10^7 - 10^{10} ohm.cm -> tidak mudah kehilangan muatan, tertahan kuat pada permukaan pelat pengumpul
 - *Resistivity* tinggi: $> 10^{10}$ ohm.cm (pembakaran batubara rendah sulfur)
 - Mengurangi perbedaan voltase, mengurangi daya tarik menarik
 - Terjadi *back corona*: terjadi perbedaan potensial yang besar pada lapisan debu terkumpul -> terbentuk ion gas positif -> netralisasi muatan negatif pada partikel yang sedang bermigrasi ke pelat pengumpul -> kecepatan tergantung kuat medan listrik



3. *Electrostatic Precipitator (EP)*

- 3) ***Luas pengumpulan spesifik (SCA)***: luas area pengumpulan terhadap laju gas menuju kolektor. Nilai SCA untuk mencapai efisiensi 95% adalah 20-25 m² per 1000 m³/jam
- 4) ***Aspek rasio (AR)***: perbandingan antara panjang total terhadap tinggi permukaan kolektor. Nilai AR untuk efisiensi 99,5% harus 1
- 5) ***Distribusi Aliran Gas***: laju alir inlet 6-24 m/dtk, mengalami perlambatan menjadi 0,6-2,4 m/dtk
- 6) ***Electricity***: pengefektifan kerja power supply ke dalam EP
- 7) ***Sistem ducting & konsumsi energy***: disesuaikan dengan jumlah kompartemen.



4. *Fabric Filter (FF)*

a) **Gambaran umum**

- Menggunakan filter seperti nilon atau wol
- Fleksibel, dapat diterapkan dalam skala pembebanan kecil dan tinggi

b) **Prinsip penyisihan**

- Inisiasi, masuknya partikel dan aliran udara ke dalam FF
- Filtrasi, proses pemisahan antara partikel dengan aliran udara, mekanisme: impaksi, intersepsi dan difusi
- Pembersihan, dilakukan pada kondisi tertentu, agar unjuk kerja meningkat

c) **Deskripsi alat**

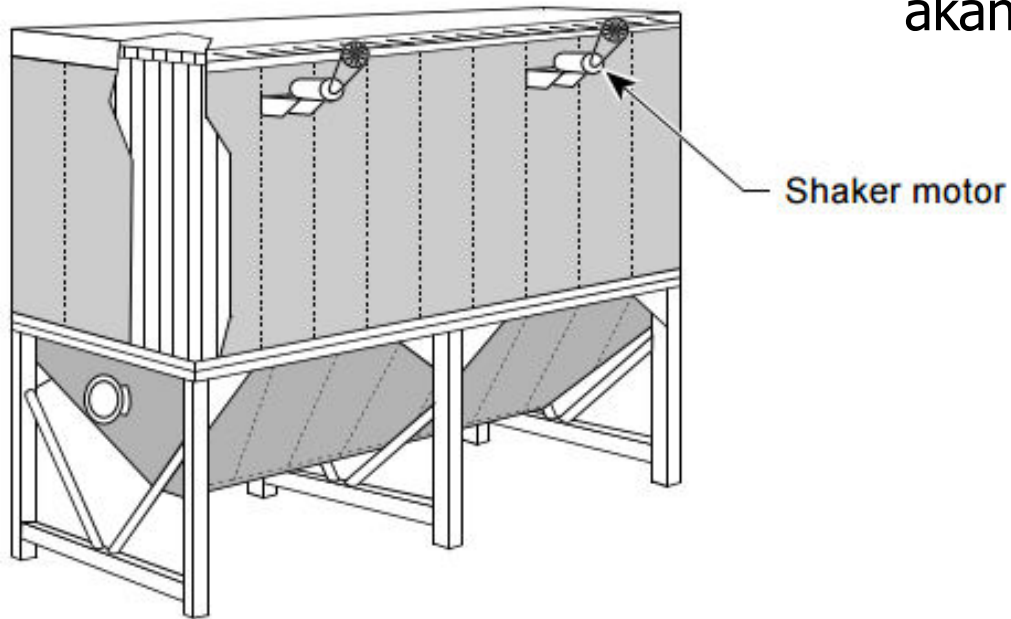
Berdasarkan cara pembersihan:

- Shaking
- Reverse air
- Pulse jet



4. *Fabric Filter (FF)*

- Pembersihan dilakukan dengan menggetarkan bag, sehingga *dust cake* akan terlepas dari bag.

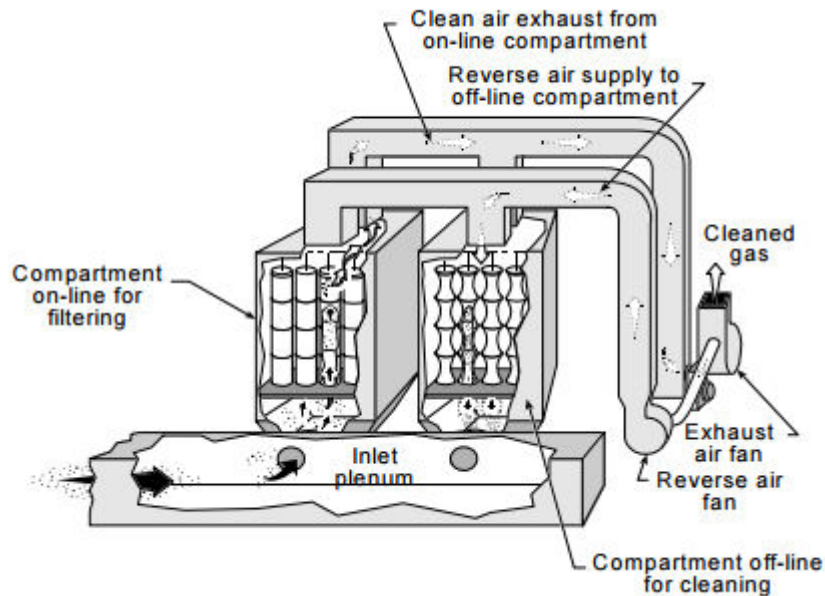


Typical Shaker Baghouse

(Courtesy of North Carolina State University)



4. *Fabric Filter (FF)*



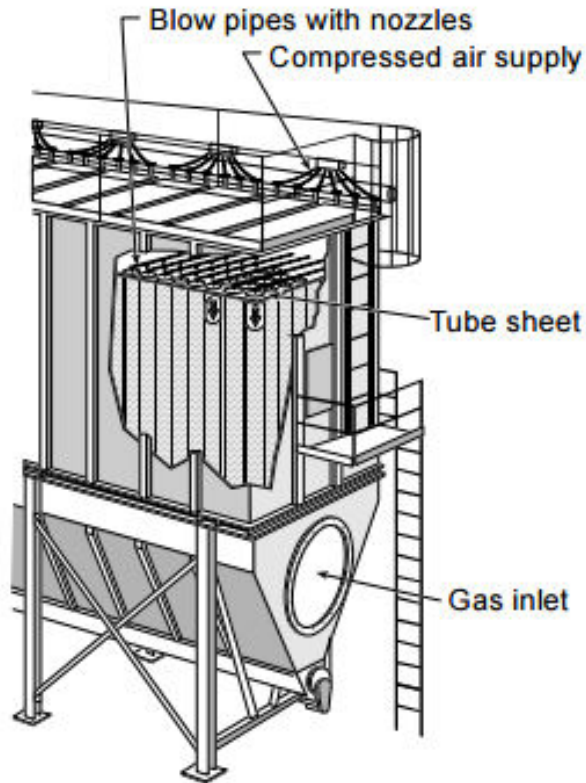
Typical Reverse-Air Baghouse

(Courtesy of North Carolina State University)

- *Reverse-air-type fabric filter:*
 - Banyak digunakan di industri besar
 - Aliran gas bermuatan partikel dialirkan dari bagian bawah melewati bagian dalam bag (kain saring)
- *Dust cake:*
 - Terakumulasi pada bagian dalam permukaan bag
- *Pembersihan:*
 - Aliran gas dilewatkan dengan aliran berlawanan dari luar ke dalam bag, untuk menyisihkan dust cake
 - Gas yang digunakan untuk membersihkan cake ini difilter kembali dan dilepaskan ke udara



4. *Fabric Filter (FF)*



Typical Pulse-Jet Baghouse

(Courtesy of North Carolina State University))

- *Pulse jet fabric filter:*
 - Gas bermuatan partikel dialirkan mengelilingi bagian luar bag
- *Dust cake:*
 - Akan terakumulasi pada bagian luar permukaan bag
- Pembersihan:
 - Aliran udara bertekanan dilewatkan dengan singkat pada bagian atas tiap bag sesuai dengan kolom bag yang akan dibersihkan
 - Aliran udara bertekanan bergerak ke bawah pada tiap bag dan melepaskan *dust cake* dari bag



4. *Fabric Filter (FF)*

d) **Kelebihan dan kekurangan**

- Kelebihan :
 - Efisiensi penyisihan partikulat yang sangat tinggi baik partikel kasar maupun halus, bahkan sangat halus
 - Relatif tidak sensitif terhadap perubahan aliran gas
 - Bahan yang terkumpul dapat direcovery untuk digunakan kembali pada proses atau dibuang
 - Tidak dihasilkan air buangan



4. *Fabric Filter (FF)*

- Kekurangan:
 - ✓ Partikulat tertentu memerlukan pengolahan khusus untuk mengurangi terjadinya rembesan partikel pada filter
 - ✓ Konsentrasi partikel pada kolektor ($\sim 50 \text{ g/m}^3$) dapat memicu terjadinya kebakaran atau bahaya ledakan jika terdapat percikan api secara tidak sengaja
 - ✓ Relatif memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi (penggantian kantong penyaring, dll)
 - ✓ Kain saring:
 - Dapat terbakar jika digunakan untuk mengkoleksi debu yang mudah teroksidasi
 - Umur kain saring dapat menjadi pendek akibat temperatur tinggi dan adanya partikulat atau gas yang bersifat alkali
 - ✓ Materi higroskopis, kondensasi uap, atau komponen adhesif dapat mengakibatkan penyumbatan pada *fabric filter* sehingga diperlukan aditif tertentu
 - ✓ Personel yang melakukan penggantian kantong penyaring harus terlindungi sistem pernafasannya



4. *Fabric Filter (FF)*

e) **Desain**

- Faktor penentu perencanaan:
 - Karakteristik partikulat
 - Porositas *dust cake*
 - Konsentrasi dalam aliran udara
 - Jenis filter dan merknya
 - Jenis mekanisme pembersihan

- Pola aliran udara dalam kolektor
- Suhu dan kelembaban aliran udara
- *Air to cloth ratio*

$$A/C \text{ Ratio} \left(\frac{\text{ft}}{\text{min}} \right) = \frac{\text{Actual Gas Flow Rate} \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right)}{\text{Fabric Surface Area} (\text{ft}^2)}$$

Metode Pembersihan Baghouse	Air to Cloth Ratio	
Shaking	1 – 3 (cm ³ /detik)/cm ²	2 – 6 (ft ³ /min)/ft ²
Reverse Air	0.5 – 2.0 (cm ³ /detik)/cm ²	1 - 4 (ft ³ /min)/ft ²
Pulse Jet	2.5 – 7.5 (cm ³ /detik)/cm ²	5 - 15 (ft ³ /min)/ft ²

Catatan : Air to cloth ratio kadang-kadang dinyatakan dengan nilai 2:1 selain ditulis dengan nilai 2.0 (cm³/detik)/cm².



5. *Wet Scrubbers*

a) Gambaran umum

- **Konsep: menambahkan kadar air pada partikulat sehingga akan terpisah dari aliran udara emisi**
- Makin tinggi energi, makin tinggi tingkat penyisihan
- Efisiensi lebih tinggi dari settling chamber dan cyclone, setara dengan fabric filter dan EP
- **Prinsip Penyisihan**
 - *Impingement*: memperbesar ukuran partikulat dengan menumbukkan spray air pada jalur edar partikulat
 - Difusi: adanya gradien konsentrasi antara spray air dan partikulat menyebabkan difusi yang menghasilkan deposisi basah
 - Kondensasi: butir spray air terkondensasi pada permukaan partikulat
 - Menambah tingkat kelembaban dan gaya elektrostatis antar partikel



5. *Wet Scrubbers*

b) Deskripsi alat

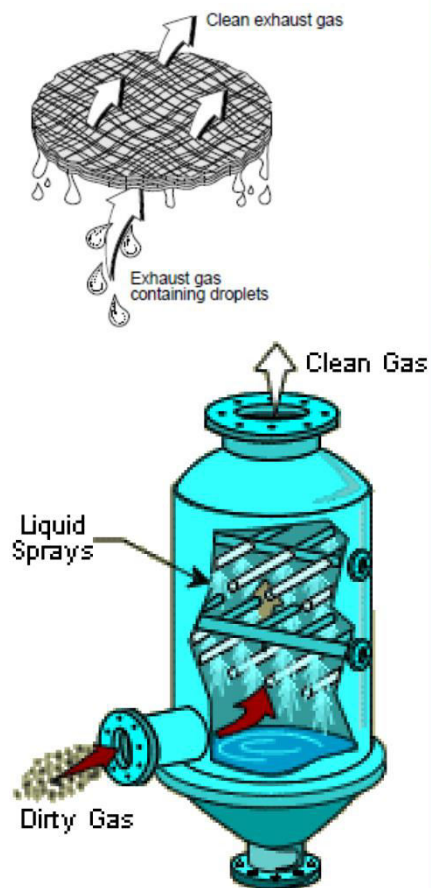
Beberapa jenis wet scrubber:

- *Spray scrubber*:
 - ✓ Bekerja pada tekanan rendah, 1,25-4 mm kolom air
 - ✓ Debit aliran cukup besar
 - ✓ Faktor desain utama, kecepatan aliran 0,3-1 m/dtk
 - ✓ Outlet dipasang *mist eliminator* untuk menyisihkan aerosol
- *Venturi scrubber*: system pengoperasian seperti spray scrubber, namun bekerja pada tekanan yang sangat tinggi

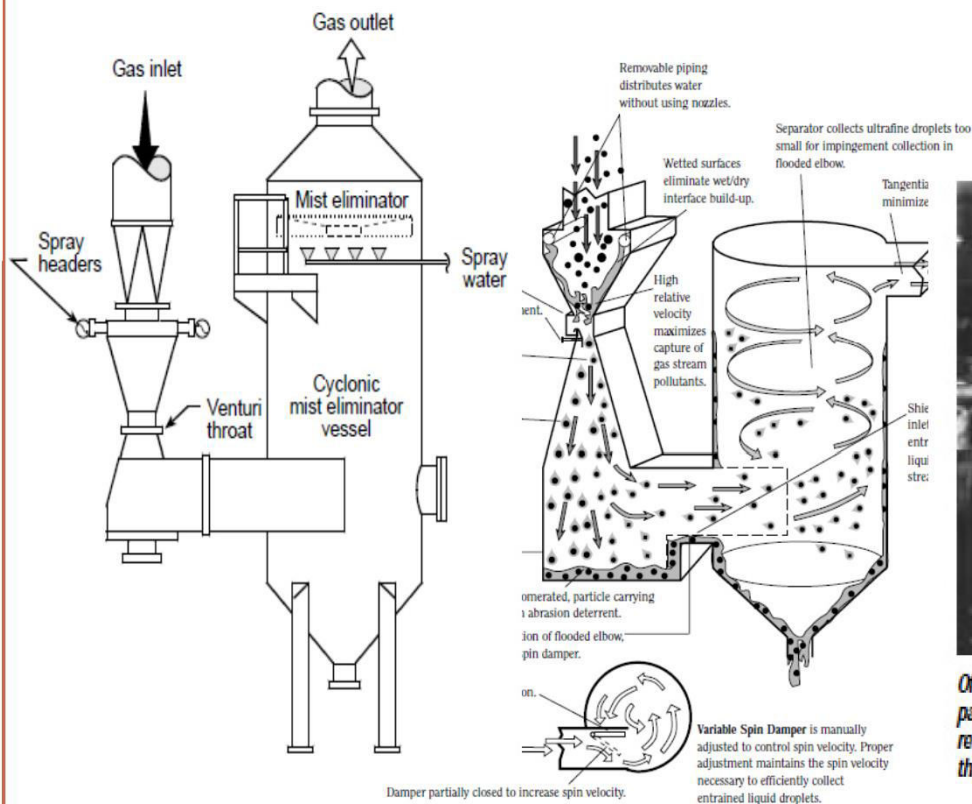


5. Wet Scrubbers

Spray Scrubber



Ventury Wet Scrubber



Often a hot gas stream has a valuable particulate to be recovered. Silver is recovered from film incineration using this Venturi scrubber.



5. *Wet Scrubbers*

c) **Kelebihan & kekurangan**

Kelebihan:

- Netralisasi partikel korosif dan yang mudah terbakar
- Dapat menurunkan emisi yang suhunya tinggi serta memungkinkan untuk menggabungkan dengan penyisihan gas
- Kebutuhan lahan relatif tidak luas

Kekurangan:

- Menimbulkan masalah pencemaran air
- Produk dikumpulkan dalam kondisi basah
- Masalah korosi lebih sering timbul daripada menggunakan sistem kering
- Kehilangan tekanan dan energi yang dibutuhkan tinggi
- Kebutuhan biaya pemeliharaan relatif tinggi



Pemilihan Alat Pengendali Partikulat

Konsentrasi $> 230 \mu\text{g}/\text{m}^3$, perlu unit pengendali pendahuluan

■ Cyclone

- Partikulat yang akan disisihkan berukuran kasar
- Konsentrasi relatif tinggi ($> 35 \mu\text{m}/\text{m}^3$)
- Tidak terlalu diperlukan efisiensi penyisihan yang tinggi

■ Wet Scrubber

- Partikel halus harus disisihkan dengan efisiensi yang relatif tinggi
- Partikulat dan gas yang disisihkan bersifat mudah terbakar
- Digunakan untuk menyisihkan partikulat dan gas sekaligus

■ Fabric Filter

- Dibutuhkan efisiensi penyisihan yang sangat tinggi
- Partikel yang bernilai dikumpulkan dalam kondisi kering
- Gas selalu berada di atas *dew point*
- Volume cukup rendah
- Temperatur relatif rendah

■ Electrostatic Precipitator

- Efisiensi yang sangat tinggi diperlukan untuk menyisihkan partikel halus
- Volume gas yang harus ditangani sangat besar
- Partikel yang disisihkan perlu *direcovery*



Pemilihan Alat Pengendali Partikulat

Prinsip Dasar	Nama Alat	Ukuran Partikel Yang Efektif Dapat Disisihkan	Temperatur Operasi	Kehilangan Tekanan (Δp)	Persen Penyisihan	Biaya	
		μm	$^{\circ}\text{C}$	mmH_2O		Investasi	Pemeliharaan
Gravitasi	Settling Chamber	80-120	<-400	10-15	86-99	Murah	Murah
Sentrifugal	Cyclone	10-15	<-400	50-150	90-99	Sedang	Sedang
Elektrostatik	Electrostatic Precipitator	1-5	<-400	10-20	98-99	Mahal	Sedang
Filtrasi	Fabric Filter	1-5	<-500 (bergantung material filter)	100-200	90-99	Sedang	Sedang
Difusi	Wet Scrubber	<5	Tidak terbatas	300-900	80-95	Sedang	Mahal