

Dust collector (lanjutan)

Centrifugal separator

Pustaka :

Coulson, Particle Technology and Separation Processes, Volume 2, 5th ed.

Coulson, Chem. Engg. Des., Volume 6.

Foust.

Perry.

Materi :

- a. Gaya sentrifugal.
- b. Kecepatan pengendapan dengan gaya sentrifugal.
- c. Desain siklon.

Gaya sentrifugal (ac)

Kecepatan pengendapan partikel dalam gas dapat dipercepat jika gaya sentrifugal lebih besar dari gaya gravitasi.

- ✚ Di dalam siklon, gas diumpankan secara tangensial ke dalam vessel silinder dengan kecepatan sekitar 30 m/s.
- ✚ Padatan menabrak dinding , kemudian bergerak turun terpisah dari arus gas dan terkumpul di bagian dasar vessel.
- ✚ Gas bersih keluar pada bagian atas tengah vessel.

Separator ini sangat efektif jika gas berisi material yang sebagian besar berukuran kurang dari 10 mikron. Siklon paling banyak digunakan sebagai separator.

Karena gerakan memutar gas dalam siklon yang muncul karena pemasukan tangensial dan tidak ada tambahan energi yang dimasukkan maka tidak ada vorteks.

Ada beberapa kajian tentang flow pattern dalam siklon.

Pengaruh dimensi siklon terhadap efisiensinya dipelajari melalui eksperimen oleh Stairmand. Dikatakan bahwa:

1. gas bergerak secara spiral ke bawah sampai mendekati pusat vessel, dan kemudian naik melalui pusat vessel ke bagian atas vessel.
2. kecepatan tangensial gas muncul mendominasi sepanjang vessel (Z), kecuali kondisi gas sangat turbulen. Kondisi turbulen terjadi jika diameter rotasi partikel = 0,4 diameter pipa gas keluar.
3. kecepatan radial bergerak ke dalam.
4. Gaya-gaya yang bekerja pada partikel ada 2. Keduanya arah radial dan berlawanan arah. Gaya sentrifugal cenderung melempar partikel ke dinding. Gaya friksi cenderung membawa padatan terbawa arus gas keluar. Gaya sentrifugal ditingkatkan dengan memperbesar kecepatan tangensial, sedangkan gaya friksi ditingkatkan dengan memperbesar kecepatan radial.
5. gaya-gaya itu fungsi dari diameter rotasi dan diameter partikel. Ukuran partikel yang berbeda cenderung berotasi pada jarak dari pusat yang berbeda.

Separator harus dirancang dengan membuat gaya sentrifugal lebih besar dari gaya friksi. Oleh karena itu, kecepatan tangensial harus tinggi dan kecepatan radial harus sekecil mungkin.

Persamaan gaya sentrifugal :

$$a_c = r \omega^2$$

a_c = percepatan gaya sentrifugal, m/s²,

r = jarak radial dari pusat rotasi, m,

ω = kecepatan sudut, rad/s.

Gaya sentrifugal :

$$F_c = m \cdot a_c = m r \omega^2 \quad (\text{SI unit})$$

$$F_c = m r \omega^2 / g_c \quad (\text{English})$$

Dengan, $g_c = 32,174 \text{ lbf ft}/(\text{lbf s}^2)$

Jika : $\omega = v/r$

v = kecepatan tangensial, m/s

Maka,

$$F_c = m v^2 / r$$

Jika kecepatan rotasi dinyatakan dalam N rpm, maka:

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60}$$

Gaya sentrifugal menjadi:

$$F_c = m r \left(\frac{2 \pi N}{60} \right)^2 = 0,01097 m r N^2$$

Perbandingan gaya gravitasi dengan gaya sentrifugal :

gaya gravitasi = $F_g = m g$

Dengan $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

perbandingan :

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{r \omega^2}{g} = \frac{r}{g} \left(\frac{2 \pi N}{60} \right)^2 = 0,001118 r N^2$$

$$\frac{a_c}{g} = 0,001118 r N^2$$

Untuk Cyclone (Perry, 1997):

$a_c = 5 g$ (cyclone berdiameter besar),

$a_c = 2500 g$ (cyclone berdiameter kecil).

Kecepatan settling sentrifugal : (Foust)

Ditinjau : sebuah partikel bola berdiameter D_p , berotasi pada jari-jari = r , maka gaya sentrifugal seperti perilaku gerak partikel dalam fluida laminar/diam, tetapi gaya gravitasi diganti dengan gaya sentrifugal (lihat perilaku padatan dalam gas).

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho_f) g D_p^2}{18\mu}$$

Substitusi g dengan a_c , maka:

$$v_r = \frac{(\rho_p - \rho_f)(r\omega^2)D_p^2}{18\mu}$$

V_r = radial velocity.

V_r = kecepatan radial sama dengan kecepatan alir volumetrik dibagi luas penampang aliran pada jari-jari r .

Dengan,

$$\omega = v_{tan} / r$$

$$v_r = \frac{(\rho_p - \rho_f)(r \frac{v_{tan}^2}{r^2})D_p^2}{18\mu}$$

$$v_r = \frac{(\rho_p - \rho_f)gD_p^2}{18\mu} \frac{v_{tan}^2}{gr}$$

$$v_r = v_t \frac{v_{tan}^2}{g r}$$

V_t = gravitational terminal velocity = free settling velocity.

V_{tan} = kecepatan tangensial berbanding terbalik dengan akar jari-jari, dan hasil eksperimen diperoleh :

$$v_{tan} = v_{tano} \sqrt{\frac{D}{2r}}$$

v_{tano} = nilainya mendekati sama dengan kecepatan gas masuk (v_{in}).

Profil v_r dan v_{tan} di dalam cyclone dideskripsikan dalam Fig. 17-37 (Perry, 7th ed.).

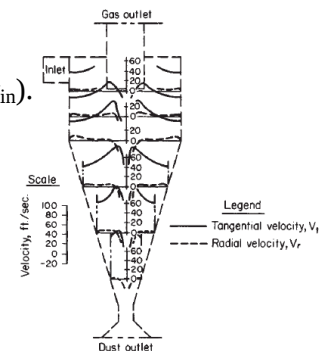


FIG. 17-37 Variation of tangential velocity and radial velocity at different points in a cyclone. [Ter Linden, Inst. Mech. Eng. J., 160, 235 (1949).]

Maka, jika r (jari-jari rotasi) besar, maka v_t besar dan pemisahan padat-gas menjadi lebih mudah (Coulson).

Jika diasumsi sebuah partikel akan dipisahkan sehingga berotasi dengan :

$$d = 0,4 d_o$$

atau

$$r = 0,2 d_o.$$

d_o = diameter gas keluar.

Maka,

$$v_t = \frac{v_r g \cdot 0,2 \cdot d_o}{v \tan^2}$$

Dengan,

V_r = kecepatan radial sama dengan kecepatan alir volumetric dibagi luas penampang aliran pada jari-jari r .

$$v_r = \frac{G}{2 \pi r Z \rho}$$

G =kecepatan alir massa; massa/waktu,

Z = tinggi siklon,

G/ρ = Kecepatan alir volumetric; volume/waktu.

Terminal settling velocity untuk partikel terkecil :

$$v_t = \frac{0,2 G \cdot d_o \cdot g}{\pi \rho Z D \cdot v \tan^2} \quad (A)$$

Jika dinyatakan dalam luas penampang masuk (A_{in}) :

$$v_t = \frac{0,2 A_{in}^2 \cdot d_o \cdot \rho \cdot g}{\pi Z D \cdot G}$$

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho_f) g D_p^2}{18 \mu} \quad (B)$$

Tampak bahwa, untuk G besar akan diperoleh v_t besar, sehingga hanya partikel besar yang bisa terambil.

Oleh karenanya, untuk kapasitas besar, lebih baik menggunakan sejumlah siklon secara parallel.

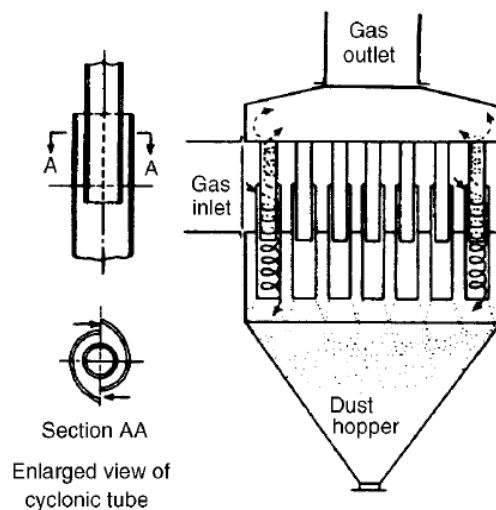


Figure 1.56. Multi-tube cyclone separator

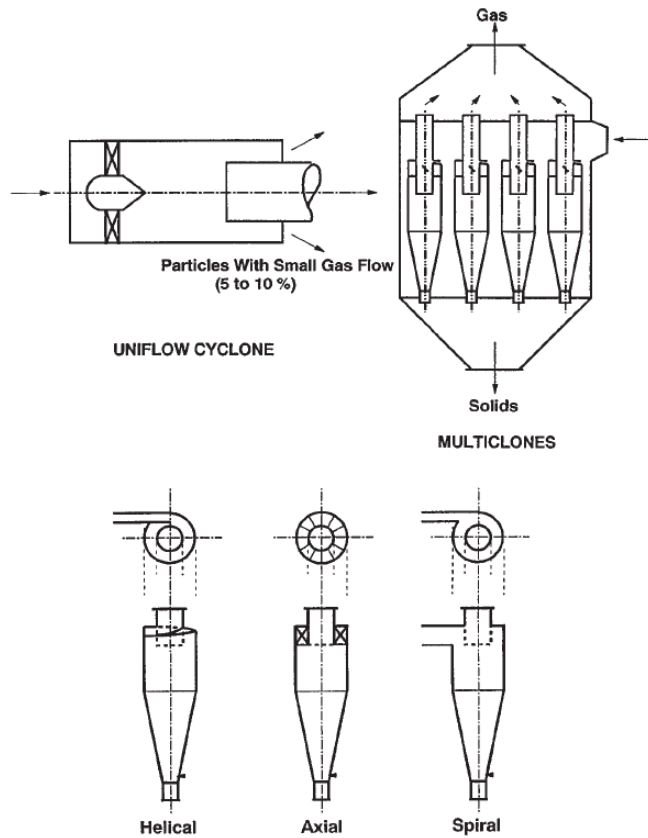


FIG. 17-43 Some commercial cyclone design alternatives. (Courtesy of PSRI, Chicago.)

Hubungan efisiensi siklon dengan ukuran partikel :
 Fig. 1.55 (Coulson , Volume 2, 5th ed.)

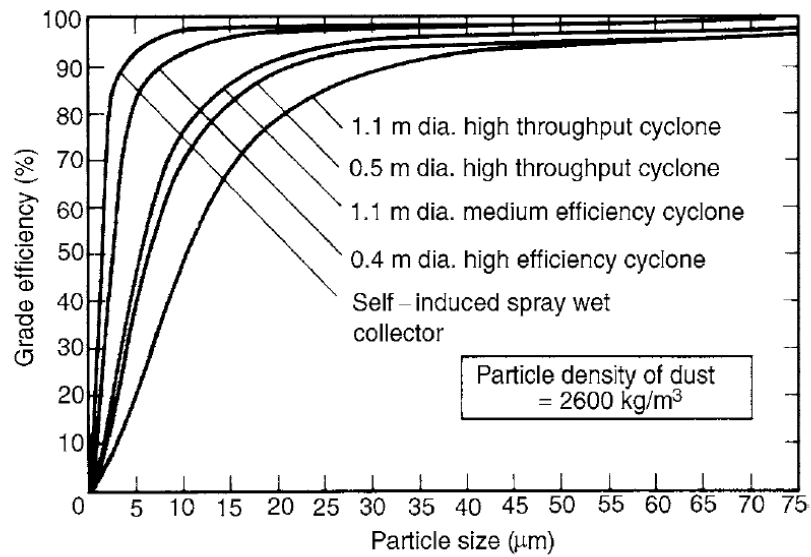


Figure 1.55. Typical grade efficiency curves for cyclones and a self-induced spray wet collector⁽⁵³⁾

Contoh : perhitungan diameter teoritis yang dapat mengendap.

A cyclone separator, 0.3 m in diameter and 1.2 m long, has a circular inlet 75 mm in diameter and an outlet of the same size. If the gas enters at a velocity of 1.5 m/s, at what particle size will the theoretical cut occur?

The viscosity of air is 0.018 mN s/m², the density of air is 1.3 kg/m³ and the density of the particles is 2700 kg/m³.

Penyelesaian:

Using the data provided:

$$\text{cross-sectional area at the gas inlet, } A_i = (\pi/4)(0.075)^2 = 4.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{gas outlet diameter, } d_o = 0.075 \text{ m}$$

$$\text{gas density, } \rho = 1.30 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{height of separator, } Z = 1.2 \text{ m, separator diameter, } d_t = 0.3 \text{ m.}$$

$$\text{Thus: mass flow of gas, } G = (1.5 \times 4.42 \times 10^{-3} \times 1.30) = 8.62 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

The terminal velocity of the smallest particle retained by the separator,

$$u_0 = 0.2 A_i^2 d_o \rho g / (\pi Z d_t G) \quad (\text{equation 1.54})$$

$$\begin{aligned} \text{or: } u_0 &= [0.2 \times (4.42 \times 10^{-3})^2 \times 0.075 \times 1.3 \times 9.81] / [\pi \times 1.2 \times 0.3 \times 8.62 \times 10^{-3}] \\ &= 3.83 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

Use is now made of Stokes' law (Chapter 3) to find the particle diameter, as follows:

$$u_0 = d^2 g (\rho_s - \rho) / 18 \mu \quad (\text{equation 3.24})$$

$$\begin{aligned} \text{or: } d &= [u_0 \times 18 \mu / g (\rho_s - \rho)]^{0.5} \\ &= [(3.83 \times 10^{-4} \times 18 \times 0.018 \times 10^{-3}) / (9.81(2700 - 1.30))]^{0.5} \\ &= 2.17 \times 10^{-6} \text{ m or } \underline{\underline{2.17 \mu\text{m}}} \end{aligned}$$

DESAIN CYCLONE using Stairmand's method.

Reff.: Coulson and Richardson, 1983, "Chemical Engineering, Volume 6".(ebook)

Menurut Stairmand (1951) ada 2 tipe cyclone:

1. High efficiency cyclone; Fig. 10.44 a.
2. High gas rate cyclone; Fig. 10.44 b.

Berdasarkan data percobaan, diperoleh kurva standar siklon (hubungan efisiensi dengan ukuran padatan), seperti Fig. 45 a (High efficiency cyclone) dan Fig 45 b (High gas rate cyclone).

$$\text{efisiensi} = \frac{\text{massa produk yang terkumpul}}{\text{massa padatan dalam umpan}}$$

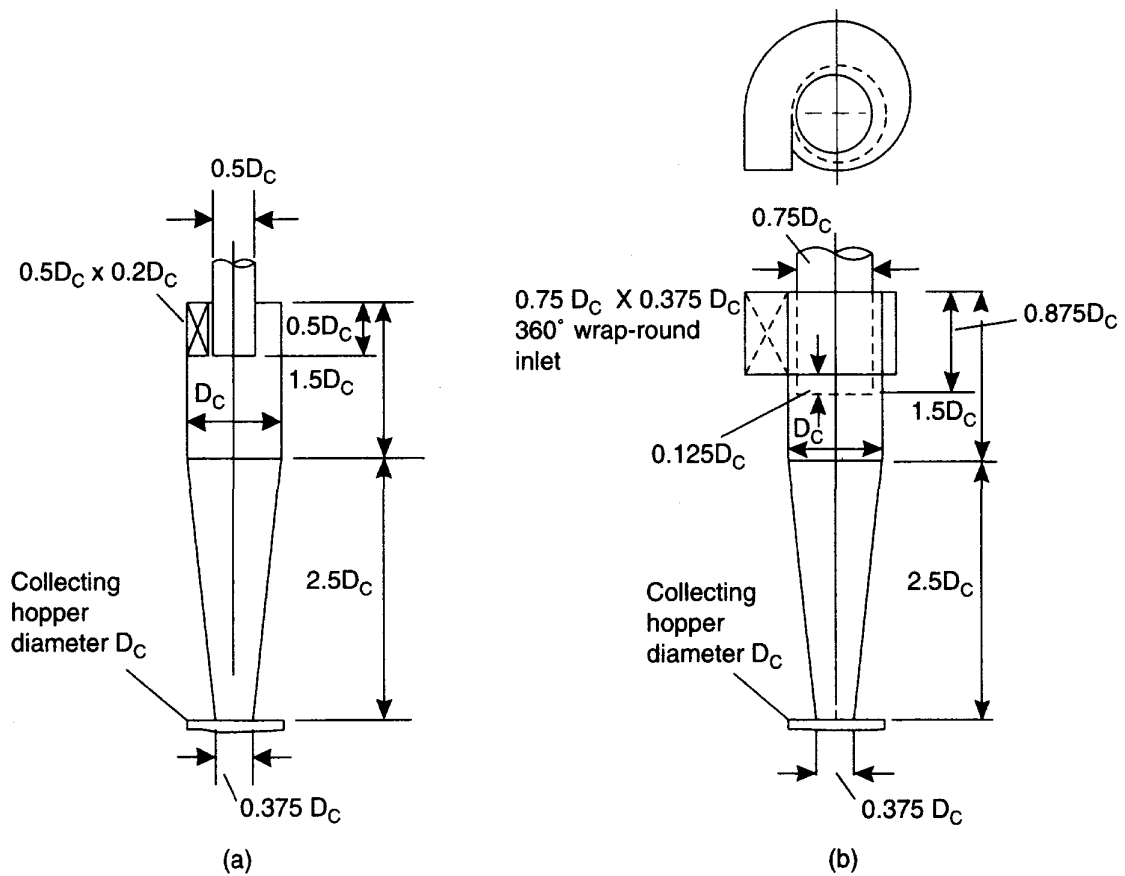


Figure 10.44. Standard cyclone dimension (a) High efficiency cyclone (b) High gas rate cyclone

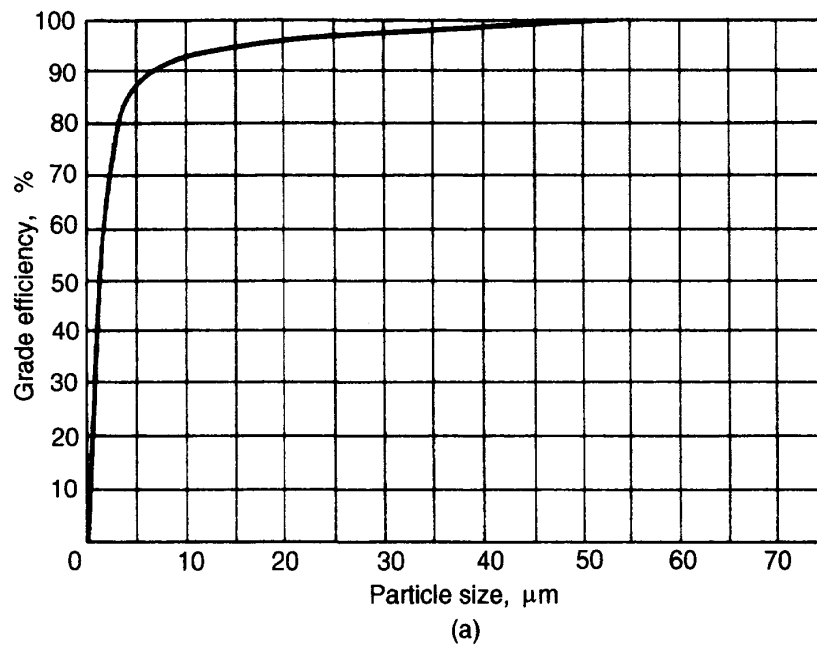


Figure 10.45. Performance curves, standard conditions (a) High efficiency cyclone

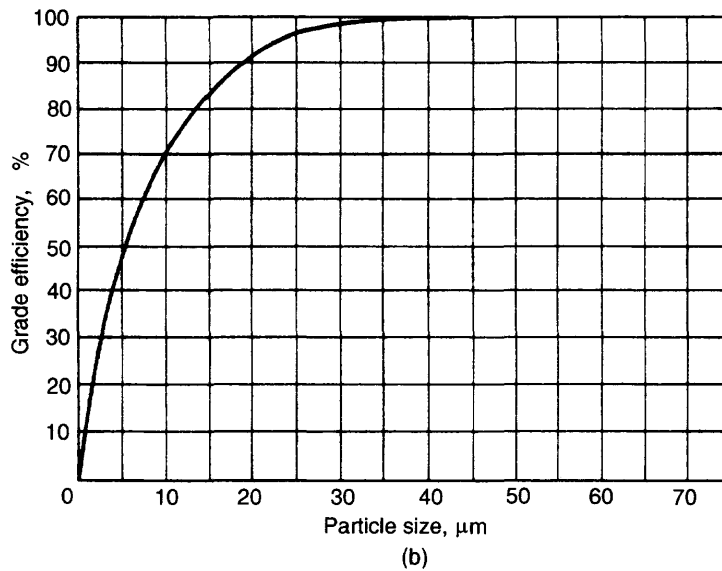


Figure 10.45 (continued). Performance curves, standard conditions (b) High gas rate cyclone

Kurva di atas digunakan untuk memprediksi ukuran siklon yang berukuran berbeda dengan siklon standar.

Hubungan variable perancangan dengan standar:

$$d_2 = d_1 \left[\left(\frac{D_{c2}}{D_{c1}} \right)^3 \times \frac{Q_1}{Q_2} \times \frac{\Delta\rho_1}{\Delta\rho_2} \times \frac{\mu_2}{\mu_1} \right]^{1/2}$$

where d_1 = mean diameter of particle separated at the standard conditions, at the chosen separating efficiency, Figures 10.45a or 10.45b,

d_2 = mean diameter of the particle separated in the proposed design, at the same separating efficiency,

D_{c1} = diameter of the standard cyclone = 8 inches (203 mm),

D_{c2} = diameter of proposed cyclone, mm,

Q_1 = standard flow rate:

for high efficiency design = 223 m³/h,

for high throughput design = 669 m³/h,

Q_2 = proposed flow rate, m³/h,

$\Delta\rho_1$ = solid-fluid density difference in standard conditions = 2000 kg/m³,

$\Delta\rho_2$ = density difference, proposed design,

μ_1 = test fluid viscosity (air at 1 atm, 20°C)

= 0.018 mN s/m²,

μ_2 = viscosity, proposed fluid.

Kisaran kecepatan inlet : 9 - 27 m/s.

Kecepatan inlet optimum = 15 m/s.

Dalam perancangan, diambil efisiensi perancangan sama dengan efisiensi standar, seperti digambarkan dalam Fig. 10.46.

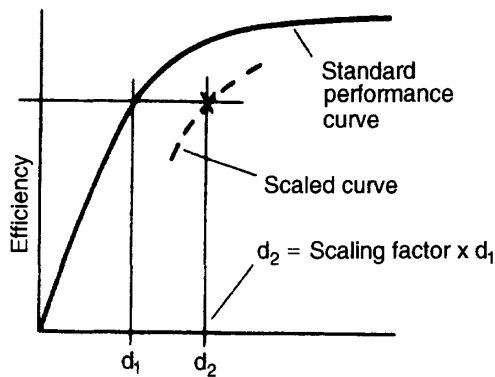


Figure 10.46. Scaled performance curve

Step-step perancangan siklon:

1. Tentukan jenis siklon; high eff. or high gas rate cyclone?
2. Tentukan distribusi ukuran padatan yang akan diproses.
3. Tentukan % efisiensi (= % recovery).
4. Tentukan jumlah siklon paralel.
5. Tentukan D_c untuk $v = 15$ m/s. Bandingkan D_c perancangan dengan D_c standar. Jika D_c perancangan terlalu besar maka kembali ke step 4.
6. Hitung scaling factor dan menyusun scaled curve.
7. Hitung % efisiensi. Jika tidak sesuai dengan yang diinginkan, kembali ke step 3.
8. Gambarkan siklon dan dimensinya.

Menyusun scaled curve:

Asumsi Stairmand : $\eta_{d1} = \eta_{d2}$, seperti fig. 10.46.

d1	d2=d1x scaling factor	η_{d1}
data	Hasil perhitungan	Baca fig 10-46

Selanjutnya membuat scaled curve dengan titik-titik (d_2, η_{d1}).

Menghitung efisiensi total :

$$\text{efisiensi} = \frac{\text{massa terkumpul}}{\text{massa dalam umpan}} = \frac{\sum P \cdot X_{Pi}}{\sum F \cdot X_{Fi}}$$

$$\text{efisiensi total} = \eta_T = \frac{\sum P \cdot X_{Pi}}{F}$$

$$\text{efisiensi single particle size} = \eta_i = \frac{P \cdot X_{Pi}}{F \cdot X_{Fi}}$$

X_{Fi}	d_i	$H_i = f(d_i, \text{scaled curve})$	$P \cdot X_{Pi} = \eta_i \cdot F \cdot X_{Fi}$
data	data	Baca grafik scaled curve	dihitung

$$\sum P \cdot X_{Pi}$$

DESAIN SIKLON :
PERRY'S METHOD (Perry. 7th ed.)

a. Cyclone separator proportion : fig. 17-36 Perry.

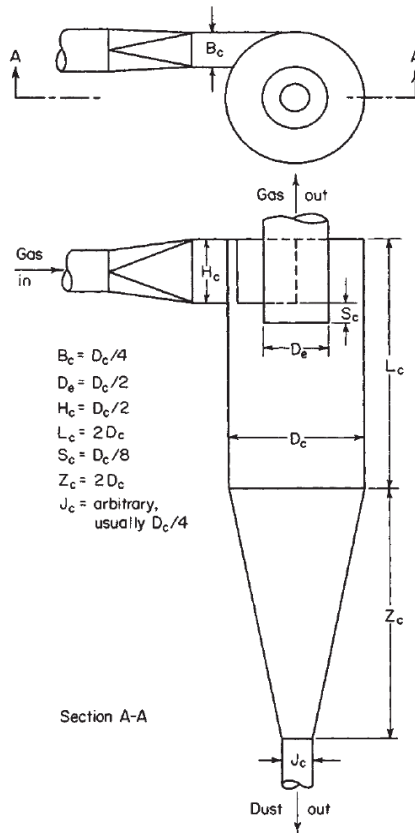


FIG. 17-36 Cyclone-separator proportions.

b. Diameter partikel minimum teoritis yang dapat terendapkan dalam cyclone:

$$D_{p, th} = \sqrt{\frac{9 \mu B_c}{\pi N_s V_{in} (\rho_p - \rho_f)}}$$

dengan,

$D_{p, th}$ = diameter partikel minimum teoritis yang dapat terendapkan, m

V_{in} = kecepatan gas masuk, m/s; (range : $8 - 30 \frac{m}{s}$; biasanya diambil $15 \frac{m}{s}$)

N_s = jumlah putaran gas dalam cyclone.

korelasi V_{in} dengan N_s ; fig.17 – 38.

B_c = lebar inlet; lihat figure17 – 36.

μ = viskositas gas, $\frac{kg}{m.s}$

ρ_p = densitas padatan, $\frac{kg}{m^3}$

ρ_f = densitas gas, $\frac{kg}{m^3}$

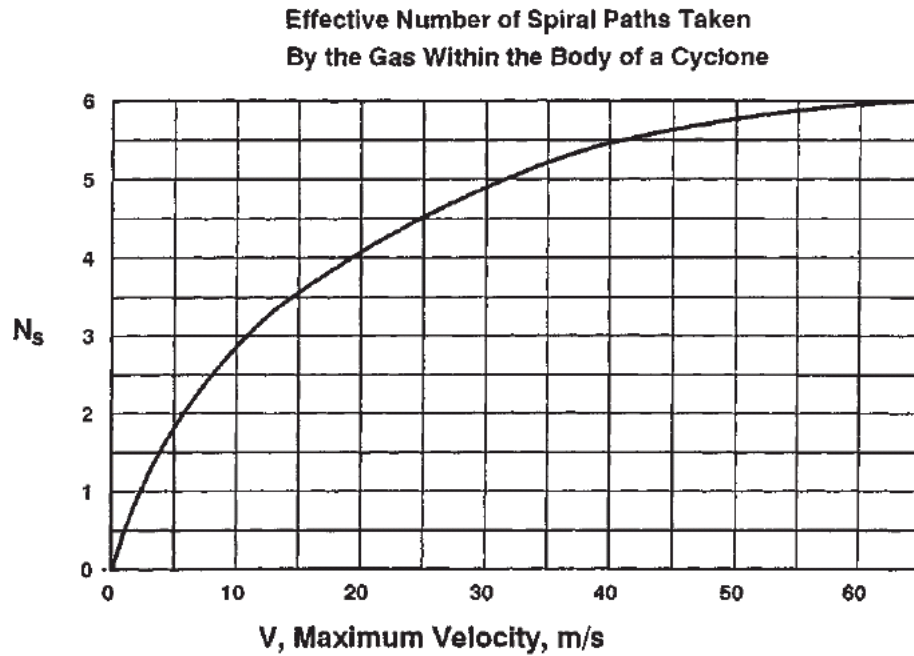


FIG. 17-38 N_s versus velocity—where the larger of either the inlet or outlet velocity is used.

Untuk mengetahui distribusi ukuran (d_{pi} vs x_i) yang terkumpul menggunakan korelasi $\left(\frac{d_{pi}}{D_{p,th}} \right)$ vs efisiensi, seperti fig. 17-39.

Korelasi mengambil asumsi partikel dengan ukuran $d_{pi}=D_{p,th}$ memiliki efisiensi 50%.

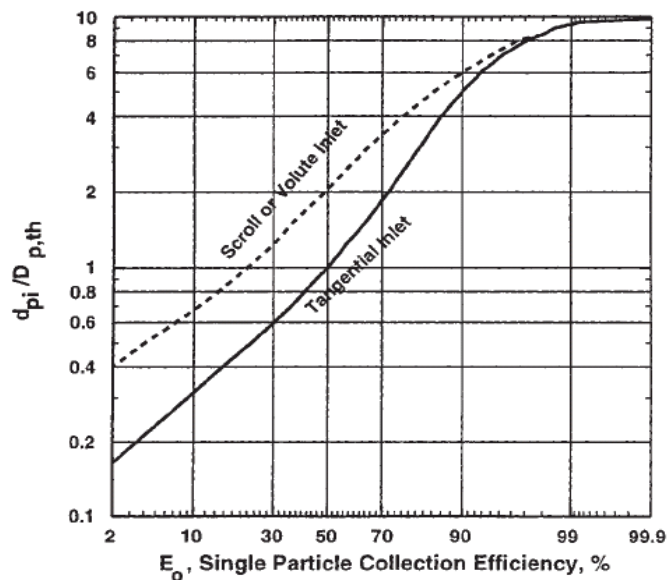


FIG. 17-39 Single particle collection efficiency curve. (Courtesy of PSRI, Chicago.)

Step-step: cyclone design using perry's method:

1. tentukan distribusi ukuran padatan yang akan diproses.
2. tentukan % efisiensi yang diinginkan,
3. tentukan jumlah siklon parallel,
4. Hitung D_c untuk $V_{in}=15$ m/s,
5. Hitung $D_{p,th}$,
6. Hitung efisiensi, jika tidak sesuai dengan yang diinginkan kembali ke step 3.
7. Gambarkan siklon dan dimensinya

Menghitung efisiensi :

a. η single particle size : $\eta_i = \frac{P \cdot X_{pi}}{F \cdot X_{fi}}$

d_{pi}	X_{fi}	$\frac{d_{pi}}{D_{p,th}}$	$\eta_i = E_o$	$P \cdot X_{pi} = \eta_i \cdot F \cdot X_{fi}$
				$\sum P \cdot X_{pi}$
Data umpan	dihitung	baca grafik Fig. 17-39	dihitung	

b. η_{total}

$$\eta_{total} = \frac{\sum P \cdot X_{pi}}{F}$$

Exercise 1.

Design a cyclone to recover solids from a process gas stream. The anticipated particle size distribution in the inlet gas is given below. The density of the particles is 2500 kg/m^3 , and the gas is essentially nitrogen at 150°C . The stream volumetric flow-rate is $4000 \text{ m}^3/\text{h}$, and the operation is at atmospheric pressure. An 80 per cent recovery of the solids is required.

Particle size (μm)	50	40	30	20	10	5	2
Percentage by weight less than	90	75	65	55	30	10	4

At the condition the density of gas is 0.81 Kg/m^3 and the viscosity is $0.023 \text{ cp(mN s/m}^2\text{)}$.

Exercise 2.

A mill operating in closed circuit with a 100 mesh screen gives the screen analyses below. The ratio of the oversize to the undersize (product) stream is 1.2 when 200 tons of limestone are handled per day. The overall energy effectiveness of ball mill is 10%. Air stream at 30°C and 3.0 atm pressure was blown for carrying mill product to a higher place. The dust in the gas was collected using cyclone separator. The cyclone loading (concentration of solid in gas inlet) is 2.5 kg solid/ m³ gas. Viscosity of air at the condition is 0.021 cp. Density limestone is 2500 Kg/m³. 1 cp = 10⁻³ Kg/m/s. Find:

- the total energy used of ball mill,
- the screen effectiveness,
- design the cyclone, if particle collected is at least 80%.

mesh	Mill feed, % weight	Oversize from screen, %	Undersize from screen,%
-4 + 6	1.0	0	0
-6 + 8	1.2	0	0
-8 + 10	2.3	0	0
-10 + 14	3.5	0	0
-14 + 20	7.1	0	0
-20 + 28	15.4	0	0
-28 + 35	18.5	13.67	0
-35 + 48	17.2	32.09	0
-48 + 65	15.6	27.12	0
-65 + 100	10.4	20.70	2.32
-100 + 150	6.5	4.35	21.12
-150 + 200	1.3	2.07	15.54
-200	0	0	61.02
	100	100	100

Pengaruh konsentrasi solid di gas umpan terhadap efisiensi siklon.

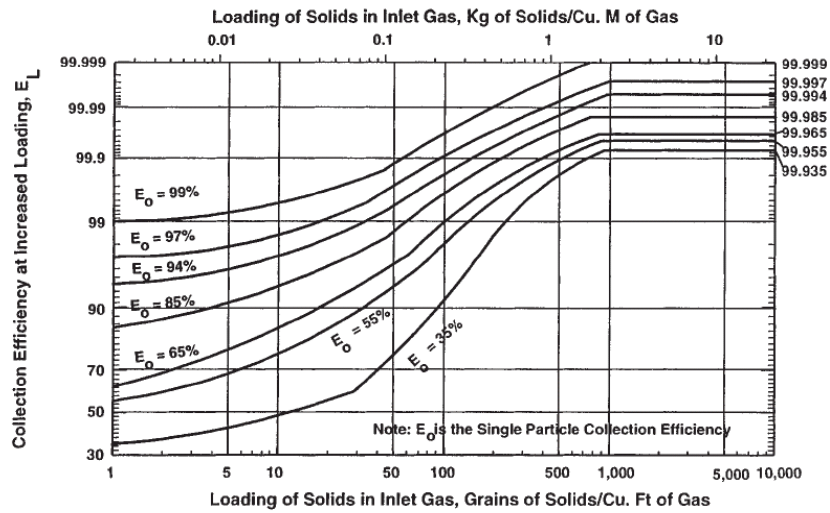


FIG. 17-40 Effect of inlet loading on collection efficiency for Geldart Group A and Group C particles. (Courtesy of PSRI, Chicago.)

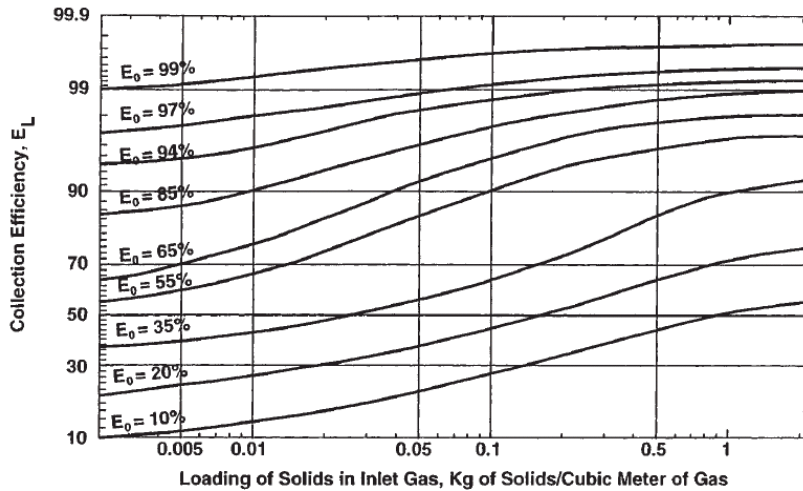


FIG. 17-41 Effect of inlet loading on collection efficiency (Geldart Group B and Group D) particles. (Courtesy of PSRI, Chicago.)