

Homework N° 3: sistemi di separazione di particolato

a.

Particelle di cenere (densità $\rho_p = 800 \text{ kg/m}^3$, diametro $D_p = 100 \text{ }\mu\text{m}$) devono essere separate da una corrente di gas (portata $Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, densità $\rho = 1.4 \text{ kg/m}^3$, viscosità $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$).

1. Determinare quale dovrebbe essere la lunghezza di una camera a gravità (larghezza massima $L = 2 \text{ m}$) che permette di ottenere il 100 % di separazione (dimensionamento in regime laminare);
2. Determinare quale deve essere la lunghezza della camera se il dimensionamento è fatto in ipotesi di regime turbolento e si vuole garantire una efficienza di separazione pari al 95%.

b.

Si deve realizzare una camera a gravità per separare particolato di carbone di densità 2600 kg/m^3 da un flusso di aria ($\rho = 1.4 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$). La portata del flusso è $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ e le dimensioni della camera sono $W = 2 \text{ m}$, $H = 2 \text{ m}$ e $L = 15 \text{ m}$.

1. Verificare che il flusso nella camera è turbolento.
2. Considerando le equazioni per il dimensionamento in flusso turbolento, determinare il numero di piani di deposizione che consente di separare con almeno 90% di efficienza particelle di diametro $D_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$.
3. Determinare l'efficienza di deposizione per il numero di piani scelti.
4. Determinare l'efficienza di separazione complessiva del separatore se la corrente d'aria trasporta particelle di distribuzione dimensionale data da:

$D_p, [\mu\text{m}]$	1	5	10	15	20
%	5	10	50	20	15

c.

Un impianto industriale preleva acqua di fiume (densità ρ , viscosità μ) per utilizzarla come acqua di raffreddamento. Al punto di presa, particelle di sabbia (diametro D_p e densità ρ_p) risultano sospese nell'acqua e prima dell'ingresso nell'impianto l'acqua viene fatta fluire lungo un tratto di tubo verticale ascendente per separarle dalla corrente. Nell'ipotesi che le particelle di sabbia si muovano in regime di Stokes ($C_D = 24/Re_p$, $Re_p = \rho D_p \|v_p - v\|/\mu$):

1. determinare la massima velocità di salita dell'acqua nel tratto verticale affinché le particelle possano depositarsi;

2. determinare la lunghezza del tratto ascendente affinché si abbia separazione se la velocità dell'acqua è pari all'80% del valore massimo.

d.

Una ditta di consulenza propone l'acquisto di due batterie di 450 cicloni Stairmand di diametro $D_c = 0.25 \text{ m}$ come soluzione ottimale per depurare una portata di aria ($\mu = 2.48 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $MM = 29 \text{ kg/m}^3$) $Q = 165 \text{ m}^3/\text{s}$ a temperatura $T = 450 \text{ K}$ e pressione $p = 1 \text{ atm}$ carica di particelle di diametro $D_p = 10 \text{ }\mu\text{m}$ e densità $\rho_p = 1600 \text{ kg/m}^3$.

1. Utilizzando le formule per il dimensionamento pratico delle batterie di cicloni (p. 351 Process Engineering and design for air pollution control) calcolare l'efficienza di separazione e le perdite di carico per la configurazione proposta.
2. Dimensionare un ciclone Stairmand singolo in grado di realizzare la stessa efficienza di separazione e calcolare le perdite di carico in questo caso.
3. Calcolare il costo associato alle due scelte (multiciclone e ciclone singolo) considerando costi di investimento (p.353) e costi annuali di esercizio (costo della potenza per movimentare il flusso attraverso il sistema di separazione) considerando che si prevede per l'impianto una durata di 10 anni e 8000 h/anno di funzionamento, il rendimento del compressore per l'aria è pari a 0.65 e il costo di esercizio (potenza elettrica) è pari a $C_E = 0.08 \text{ \$/kWh}$.
4. Calcolare quale dovrebbe essere il numero ottimo di cicloni per minimizzare il costo totale dell'impianto (suggerimento: scrivere l'espressione del costo annuo in funzione del numero di cicloni, utilizzare il vincolo sull'efficienza per derivare una relazione tra numero di cicloni e diametro del singolo ciclone, impostare il problema di ottimo per il costo)

e.

Una centrale che produce energia elettrica da bruciatori a carbone deve acquistare un precipitatore elettrostatico per adeguare le emissioni ai limiti di legge. L'analisi di un campione di polveri prelevate dalla corrente da trattare ha permesso di ricavare le seguenti caratteristiche:

Distrib. dimensionale	$D_p [\mu\text{m}]$	% in peso	$q_p [C]$
	0.5	20	$1.6 \cdot 10^{-15}$
	1.0	50	$6.4 \cdot 10^{-15}$
	2.0	20	$25.6 \cdot 10^{-15}$
	5.0	10	$160. \cdot 10^{-15}$
densità $\rho_p [\text{kg/m}^3]$		800	

Ipotizzando che (i) le particelle entrino nel precipitatore già cariche (carica q_p), (ii) la portata del flusso da trattare sia di $4 \text{ m}^3/\text{s}$ (viscosità $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$), (iii) in impianto si dispone di una differenza di potenziale pari a $5 \cdot 10^4 \text{ V}$, (iv) il massimo ingombro ammesso per il precipitatore è $Vol = 16 \text{ m}^3$ e (v) è necessario realizzare un abbattimento del 99% per le particelle da $1 \mu\text{m}$,

1. dimensionare un precipitatore piastra-piastra che permetta di raggiungere l'obiettivo;
2. determinare l'efficienza di abbattimento globale per il campione di polveri.

f.

Dimensionare un sistema di separazione a due stadi (ciclone Swift + ESP) per separare polveri ($\rho_p = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$) di distribuzione dimensionale data da:

Distrib. dimensionale	D_p [μm]	Peso [mg]
	0.5	25
	1	125
	5	100
	10	75
	20	30
	50	5

da una portata di aria ($Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$, $T = 298 \text{ K}$, $p = 1 \text{ atm}$).

1. Dimensionare il ciclone Swift utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, sapendo che la potenza disponibile in impianto per movimentare il flusso di aria è pari a 15 kW .
2. Calcolare l'efficienza complessiva del ciclone.
3. Dimensionare un precipitatore elettrostatico piastra piastra ($L = 5W$, $H = W$) in modo da avere il 99.9 % di abbattimento complessivo per particelle da $1 \mu\text{m}$ sapendo che la tensione disponibile in impianto è pari a $V = 2 \cdot 10^5 \text{ V}$ assumendo che le particelle acquisiscano una carica per unità di superficie pari a $q = 9.5 \cdot 10^{-5} \text{ C}/\text{m}^2$.
4. Calcolare l'efficienza complessiva dell'ESP.

g.

Per separare particelle di legno da una corrente di gas si utilizza un separatore ciclonico tipo Stairmand. Sapendo che le caratteristiche delle particelle sono: densità $\rho_p = 300 \text{ kg}/\text{m}^3$, diametro $D_p = 100 \mu\text{m}$, e che le caratteristiche del gas sono: portata di gas, $\dot{m} = 150000 \text{ kg}/\text{h}$, densità $\rho = 0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$, viscosità $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, temperatura $T = 20^\circ\text{C}$,

1. utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, determinare il diametro del ciclone in modo che le particelle da $100 \mu\text{m}$ vengano separate con efficienza del 99% (assumere $m = 0.75$);

2. calcolare la potenza del compressore che serve per alimentare la corrente di gas al ciclone;
3. calcolare l'efficienza di separazione globale se le polveri alimentate al ciclone hanno la seguente distribuzione dimensionale:

D_p [μm]	1	5	10	50	100	150
%	5	10	20	30	20	15

h.

Si deve dimensionare un sistema per separare la frazione di polveri fini e ultrafini (PM_{10} , $PM_{2.5}$, $\rho_p = 800 \text{ kg}/\text{m}^3$) da una portata d'aria ($\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) proveniente dal sistema di campionamento collegato ad un bruciatore a biomassa. Il progettista propone di utilizzare un sistema formato da due cicloni di tipo Lapple in serie, opportunamente dimensionati per separare al 50% particelle di diametro maggiore o uguale ai diametri di interesse.

1. Utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, dimensionare il primo e il secondo ciclone del sistema di separazione (assumere $m = 0.38$);
2. In che ordine devono essere installati i due cicloni sulla linea di test per poter separare i campioni di polveri secondo le taglie dimensionali desiderate?
3. Calcolare la perdita di carico complessiva del sistema di separazione.

i.

Una ditta che progetta sistemi per il trattamento di acque provenienti da piazzali industriali deve realizzare un sistema in grado di trattenere le particelle di sabbia e le gocce d'olio trasportate dalle acque meteoriche nel sistema di trattamento ($Q = 3 \text{ l}/\text{s}$). Il sistema di trattamento è costituito da vasche lunghe $L = 3 \text{ m}$, larghe $W = 1 \text{ m}$ e profonde $H = 1.5 \text{ m}$.

1. Determinare quante vasche si devono installare in parallelo per riuscire a separare con efficienza pari al 90% gocce di olio ($\rho_{oil} = 800 \text{ kg}/\text{m}^3$) di diametro $100 \mu\text{m}$;
2. Determinare l'efficienza di separazione del sistema se la distribuzione dimensionale delle sabbie e delle gocce in ingresso è quella riportata in Tabella.

j.

I fumi di combustione di un bruciatore industriale (portata $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, $MM = 29 \text{ kg}/\text{kmole}$, $P = 1 \text{ atm}$, $T = 100^\circ\text{C}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) contengono particelle di cenere ($\rho_p = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$). L'autorizzazione per il funzionamento dell'impianto prevede che venga installato un sistema di abbattimento in grado di abbattere al 98% l'emissione di particelle di diametro pari a $D_p = 100 \mu\text{m}$.

Sabbia		Olio	
$\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$		$\rho_o = 800 \text{ kg/m}^3$	
D_p	m_p	D_o	m_o
$[\mu\text{m}]$	$[\text{mg}]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{mg}]$
50	325	50	0.50
100	450	100	1.0
150	225	200	0.20

Per la realizzazione dell'impianto di abbattimento sono stati presentati due progetti: il primo prevede la realizzazione di una camera a gravità ($L = 5 \text{ m}$, $H = 2 \text{ m}$, $W = 2 \text{ m}$) e un ciclone Swift; il secondo prevede l'installazione di una batteria di 20 cicloni Swift.

1. Determinare l'efficienza di abbattimento della camera a gravità e quella del ciclone singolo (progetto 1);
2. Utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, determinare la dimensione del ciclone singolo e le perdite di carico per il progetto 1 (assumere $m=0.7$);
3. Utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, determinare la dimensione dei cicloni della batteria e le perdite di carico per il progetto 2 (assumere $m=0.59$);
4. Discutere quale scelta progettuale potrebbe essere più conveniente.

k.

In uno stabilimento che produce pannelli di legno si utilizza una caldaia alimentata con polverino di legno derivante dagli scarti di lavorazione per produrre il vapore necessario per il processo. È necessario abbattere l'elevato tenore di polveri nei fumi ($Q = 3.5 \text{ Nm}^3/\text{s}$, c.n. 0°C e 1 atm , $M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) uscenti dalla caldaia a temperatura $T = 100^\circ\text{C}$ e concentrazione $C_1 = 200 \text{ mg/Nm}^3$ fino a $C_2 = 10 \text{ mg/Nm}^2$ prima che gli stessi vengano emessi dalla ciminiera dell'impianto realizzando un opportuno sistema di abbattimento per il particolato. Poiché dalle analisi risulta che il diametro medio delle particelle è di $20 \mu\text{m}$, il progettista propone di utilizzare un sistema formato da un precipitatore elettrostatico piastra-piastra e un filtro a tessuto, in serie. Sapendo che la ΔV disponibile in impianto è 60 kV , che la carica acquisita dalle particelle è $q = 5 \cdot 10^{-15} \text{ C}$

1. Calcolare l'efficienza di abbattimento dell'ESP se le sue dimensioni sono $W = 2 \text{ m}$, $H = 2 \text{ m}$ e $L = 5 \text{ m}$ e sono presenti 5 piastre (2 ad alta tensione e 3 collegate a terra);
2. Calcolare quale deve essere l'efficienza di abbattimento del filtro a tessuto per soddisfare i requisiti di abbattimento globale richiesti.

l.

Si deve dimensionare un filtro per abbattere la concentrazione di polveri in uscita da un combustore a biomassa di bassa potenza ($Q = 5 \text{ Nm}^3/\text{s}$, c.n. 0°C e 1 atm , $M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$). La concentrazione di polveri misurata a valle della camera di combustione è pari a 500 mg/Nm^3 mentre il limite di emissione per la taglia dell'impianto è fissato a 30 mg/Nm^3 . Sapendo che la temperatura dei gas all'uscita del combustore è pari a 300°C ,

1. identificare il materiale più opportuno per il filtro, la velocità di filtrazione e l'area filtrante totale (sistema di pulizia del filtro a flusso d'aria inverso – reverse air);
2. calcolare ogni quanto tempo bisogna pulire i filtri se la resistenza del filtro pulito è $S_e = 22 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}$ e la resistenza dello strato di polveri è $K_2 = 1.10 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ e il massimo valore di perdita di carico economicamente sostenibile per il sistema è $p_{max} = 3 \text{ kPa}$;
3. dall'analisi dimensionale delle polveri emesse dal combustore risulta che il 60% in massa ha diametro $\geq 25 \mu\text{m}$. L'ingegnere di impianto vuole valutare di quanto si potrebbe aumentare l'intervallo di pulitura del filtro installando un pre-separatore ciclonico per eliminare la frazione di polveri di diametro $\geq 25 \mu\text{m}$. Dimensionare un ciclone/batteria di cicloni per abbattere queste polveri al 95% e calcolare il nuovo intervallo per la pulizia dei filtri.

m.

Calcolare le perdite di carico lungo una tubazione orizzontale utilizzata per il trasporto pneumatico di particelle di carbone.

Caratteristiche del gas di trasporto			
Massa molecolare	MM	28.9	$[\text{kg/kmol}]$
Pressione	p	$1.0 \cdot 10^5$	$[\text{Pa}]$
Temperatura	T	288	$[\text{K}]$
Viscosità	μ	$1.80 \cdot 10^{-5}$	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
Densità	ρ	1.21	$[\text{kg/m}^3]$
Caratteristiche del particolato			
Densità	ρ_p	1400	$[\text{kg/m}^3]$
Diametro	D_p	$2.90 \cdot 10^{-4}$	$[\text{m}]$
Caratteristiche del condotto			
Lunghezza	L	1.5	$[\text{m}]$
Diametro	D	$2.30 \cdot 10^{-2}$	$[\text{m}]$
Area	A	$4.15 \cdot 10^{-4}$	$[\text{m}^2]$
Portate			
Fluido	W_g	0.03	$[\text{kg/s}]$
Particella	W_s	0.58	$[\text{kg/s}]$