

Raccolta di esercizi

a.

Un serbatoio (di volume $V = 15 \text{ m}^3$) contiene gas metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, viscosità $\mu = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) inizialmente a pressione $p_o = 20 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ e temperatura $T = 293 \text{ K}$ ed è collegato attraverso un tubo lungo $L = 500 \text{ m}$ di diametro $d = 0.1 \text{ m}$ a un bruciatore che funziona a pressione atmosferica.

1. determinare la portata alimentata al bruciatore quando la valvola del condotto di collegamento viene aperta (ipotizzare tutte le trasformazioni isoterme e $f = 0.003$);
2. determinare il tempo necessario perché la pressione nel serbatoio si dimezzi;
3. determinare la quantità di gas uscita fino a quel momento.

b.

In un impianto per la produzione di biodiesel è necessario rifornire di un fluido “shear sensitive” ($\rho_L = 900 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) un reattore senza utilizzare una pompa. La carica può essere effettuata in un tempo di 3 ore alimentando una portata costante pari a $Q_L = 8 \text{ L/s}$ da un serbatoio B attraverso una tubazione lunga $L_2 = 20 \text{ m}$ e di diametro $D_2 = 0.1 \text{ m}$. Un ingegnere ha progettato il seguente sistema per alimentare il fluido. Nel serbatoio B, molto largo, in cui è stoccato il fluido viene caricato gas in pressione proveniente da un serbatoio A attraverso una condotta lunga $L_1 = 30 \text{ m}$ e di diametro $D_1 = 0.1 \text{ m}$ intercettata da una valvola V_1 . Il serbatoio A è a sua volta alimentato da un compressore in grado di mantenere la pressione costante in A durante la fase di carica del serbatoio B. La portata di fluido scaricata dal serbatoio B (con valvola V_1 chiusa) può essere regolata in continuo attraverso una valvola V_2 in modo da garantire il mantenimento del tasso di carica Q_L desiderato. Ipotizzando tubi lisci e trasformazioni isoterme ($T = 25^\circ \text{C}$) per il gas (aria, $M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$),

1. Calcolare quale dev'essere la pressione minima del gas nel serbatoio B per garantire l'erogazione di Q_L ;
2. Calcolare qual'è la pressione del gas nel serbatoio B all'istante iniziale di apertura della valvola V_2 (volume occupato dal gas pari a 10 m^3);
3. Calcolare a che pressione deve essere mantenuto il serbatoio A dal compressore perchè la portata trasferita da A a B sia costante nel tempo;
4. Calcolare la portata che deve essere erogata dal compressore per mantenere A in pressione nella fase di carica.

c.

Il metanodotto che trasporta metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) dalla Russia verso l'Italia è costituito da una serie di tratti di condotta ($L = 180 \text{ km}$, $D = 1. \text{ m}$) con interposte stazioni di ri-compressione. A Malborghetto, prima stazione di ricompressione entro il confine italiano, vengono misurate pressione e portata a valle della stazione di pompaggio. La portata, misurata a 0°C e 1 atm , è pari a $Q = 300,000 \text{ m}^3/\text{h}$ mentre la pressione è $P_1 = 30 \text{ atm}$.

1. Ipotizzando che la trasformazione che il gas subisce muovendosi lungo la tubazione sia una trasformazione isoterma a $T = 25^\circ \text{C}$ e che il tubo sia liscio (legge di Blasius), calcolare la pressione attesa a fondo linea, prima della stazione di ricompressione di Istrana.
2. A fronte della maggiore richiesta di combustibile dall'Italia, i fornitori Russi dichiarano di aver triplicato la portata di gas instradata verso l'Italia. In queste condizioni, a Istrana si misura una riduzione dell'80% della pressione a fondo linea. Verificare se l'affermazione del fornitore è compatibile con la misura di pressione effettuata e calcolare l'effettiva variazione di portata se diversa da quella dichiarata.
3. Nelle condizioni di normale funzionamento (punto 1) il sistema di controllo dovrebbe essere in grado di rilevare una fuoriuscita di gas monitorando una variazione di pressione nella sezione di valle. Ipotizzando il caso di una perdita attraverso una sezione di area $A = 10 \text{ cm}^2$ a 100 km da Marborghetto, calcolare l'entità della perdita e la variazione di pressione quantificabile a Istrana (ipotizzare trasformazione adiabatica, $\gamma = 1.3$, per il gas che fuoriesce dal tubo).

d.

In un impianto industriale si utilizza un bruciatore alimentato a metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.37 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) per fornire calore all'olio diatermico utilizzato come fluido termovettore per la produzione di vapore. Il circuito chiuso dell'olio diatermico ($\rho_{oil} = 800 \text{ kg/m}^3$, $\mu_{oil} = 0.008 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) è costituito da una pompa e una tubazione ($D = 0.05 \text{ m}$, $L = 500 \text{ m}$) che collega la serpentina di riscaldamento posta all'interno del bruciatore con l'evaporatore e ritorno.

1. Sapendo che la portata di olio che deve circolare nella serpentina è pari a $Q = 2 \text{ l/s}$, calcolare la potenza della pompa da installare sul circuito olio se si sa che le perdite di carico nell'attraversamento della serpentina di riscaldamento e dell'evaporatore sono pari a $\Delta p = 4 \text{ atm}$.
2. Il gas che alimenta il bruciatore è stoccato in un serbatoio ($V = 300 \text{ m}^3$) progettato per una pressione di stoccaggio massima pari a 20 atm . Assumendo che la temperatura del serbatoio sia pari a 20°C , calcolare la massima quantità di metano che può essere stoccato.
3. Dal serbatoio, il gas è alimentato al bruciatore con portata costante pari a $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ attraverso una linea ($d = 1 \text{ cm}$, $L_b = 20 \text{ m}$) su cui è installata una valvola per la regolazione del flusso. Ipotizzando condizioni di trasporto isoterme, calcolare le perdite di carico (in lunghezze equivalenti) che devono essere indotte dalla valvola quando il serbatoio è pieno di gas.
4. Calcolare il valore minimo di pressione nel serbatoio per cui si riesce ad alimentare la portata desiderata e il tempo che trascorre tra due rifornimenti di gas.

e.

In un impianto per la sintesi di resine Urea-Formaldeide si utilizza il calore di reazione per produrre vapore d'acqua ($M = 18 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) surriscaldato ($T = 700 \text{ K}$) a pressione $p = 15 \text{ bar}$. Il vapore viene trasferito dai reattori batch di sintesi della resina (punto A) alle zone di impianto in cui deve essere utilizzato (punto B) attraverso un condotto coibentato ($D = 0.1 \text{ m}$, $L = 500 \text{ m}$).

1. Ipotizzando che tutte le trasformazioni che il gas subisce siano isoterme e che la tubazione AB sia liscia, calcolare la pressione al punto B se la portata in massa trasferita da A a B è pari a $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$;
2. Stabilire se il flusso in B è sonico;
3. Dal punto B il vapore può essere alimentato alternativamente verso due diversi punti di utilizzo, C e D. Sapendo che le condotte verso i punti C e D hanno diametro pari a $D_C = 0.15 \text{ m}$ e $D_D = 0.05 \text{ m}$ e che i tubi sboccano in atmosfera, verificare se il flusso dai condotti è critico;
4. Calcolare la lunghezza dei condotti BC e BD.

f.

In seguito alla manovra imprudente dell'autista, un camion-cisterna ($V = 130 \text{ m}^3$) è rimasto incastrato sotto un viadotto e si è prodotta una fuoriuscita di gas metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$). Sapendo che la pressione del gas nella cisterna è inizialmente pari a $p_0 = 10 \text{ atm}$ e la temperatura della cisterna è $T = 25^\circ\text{C}$:

1. Valutare se l'efflusso è sonico (assumere trasformazione adiabatica, $\gamma = 1.4$);
2. Calcolare la portata in massa che fuoriesce all'istante iniziale se la rottura ha un diametro equivalente $d_e = 1 \text{ cm}$;
3. Calcolare quanto durerebbe l'efflusso sonico;
4. Calcolare quanto gas è uscito quando la pressione della cisterna è scesa a 9 atm ;
5. Il pronto intervento dei pompieri ha permesso di chiudere la falla e di travasare il gas in una diversa cisterna attraverso un condotto (lunghezza $L = 30 \text{ m}$, $d = 3 \text{ cm}$). Calcolare se il flusso verso la seconda cisterna è sonico (assumere trasformazione isoterma a $T = 25^\circ\text{C}$ e $f = 0.003$);
6. Calcolare la portata che attraversa il condotto all'istante iniziale del travaso.

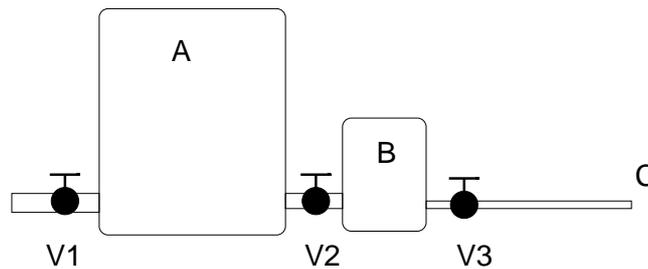
g.

In un impianto si utilizza un condotto di diametro $D = 5 \text{ cm}$ e lunghezza $L = 300 \text{ m}$ per alimentare una portata di ossigeno ($M = 32 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) pari a $w = 0.80 \text{ kg/s}$ da un serbatoio A ad un serbatoio B.

1. Sapendo che il serbatoio B è mantenuto a pressione atmosferica, che il tubo è liscio e che è possibile considerare isoterme ($T = 298 \text{ K}$) tutte le trasformazioni che il gas subisce, stabilire se il flusso è sonico allo sbocco nel serbatoio B.
2. Determinare la pressione del serbatoio A di alimentazione che consente di trasportare la portata di progetto. Utilizzare la legge di Blasius per calcolare il fattore di attrito.
3. Determinare la portata uscente dal serbatoio A nel caso che, per motivi accidentali, si produca un foro di $d = 2 \text{ cm}$. Assumere efflusso adiabatico ($\gamma = 1.4$).

h.

In un impianto si utilizza un sistema di serbatoi come quello mostrato in Figura per alimentare aria compressa al punto di utilizzo C.



I due serbatoi hanno volume pari a $V_A = 20 \text{ m}^3$ e $V_B = 1 \text{ m}^3$, sono inizialmente pieni d'aria ($M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $T = 25^\circ \text{C}$) a pressione atmosferica e tutte le valvole sono chiuse.

All'istante iniziale la valvola V1 (diametro della tubazione $D = 0.1 \text{ m}$) viene aperta e il serbatoio A viene riempito alimentando una portata costante $G = 1.3 \text{ kg/m}^2 \text{s}$. Assumendo che tutte le trasformazioni possano essere considerate isoterme:

1. calcolare il tempo necessario per portare il serbatoio A alla pressione di 20 atm ;
2. In queste condizioni, la valvola V1 viene chiusa e viene aperta la valvola V2 di collegamento tra i serbatoi A e B; sapendo che il condotto che collega A e B ha lunghezza trascurabile, calcolare il flusso specifico G_1 alimentato da A a B nell'istante di apertura della valvola V2;
3. calcolare la pressione a cui si porta il serbatoio B;
4. Dopo la fase di riempimento del serbatoio B, viene chiusa la valvola V2 e parzialmente aperta la valvola V3. In particolare, il grado di apertura della valvola viene continuamente regolato per garantire l'alimentazione costante del minimo flusso critico da B a C. Sapendo che il punto C si trova a pressione atmosferica, che la lunghezza $L_{BC} = 100 \text{ m}$, $D_{BC} = 0.02 \text{ m}$, calcolare la lunghezza equivalente delle perdite che la valvola deve realizzare all'istante di apertura iniziale;
5. calcolare per quanto tempo è possibile mantenere l'erogazione della portata di flusso minimo critico dal serbatoio B a C.

i.

In un impianto per la sintesi di resine Urea-Formaldeide si utilizza il calore di reazione per produrre vapore d'acqua ($M = 18 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) surriscaldato ($T = 700 \text{ K}$) a pressione $p = 15 \text{ bar}$. Il vapore viene trasferito dai reattori batch di sintesi della resina (punto A) alle zone di impianto in cui deve essere utilizzato (punto B) attraverso un condotto coibentato $D = 0.1 \text{ m}$, $L = 500 \text{ m}$.

1. Ipotizzando che tutte le trasformazioni che il gas subisce siano isoterme e che la tubazione AB sia liscia, calcolate la pressione al punto B se la portata in massa trasferita da A a B è pari a $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$;
2. Stabilire se il flusso in B è sonico;
3. Dal punto B il vapore può essere alimentato alternativamente verso due diversi punti di utilizzo, C e D. Sapendo che le condotte verso i punti C e D hanno diametro pari a $D_C = 0.15 \text{ m}$ e $D_D = 0.05 \text{ m}$ e che i tubi sboccano in atmosfera, verificare se il flusso dai condotti è critico;
4. Calcolare la lunghezza dei condotti BC e BD.

j.

In un impianto in cui si utilizza azoto ($M = 28 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.78 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) per la verniciatura di pezzi metallici, è necessario caricare periodicamente il serbatoio del reparto (A) (volume $V_A = 5 \text{ m}^3$) prelevando il gas dal serbatoio di stoccaggio esterno (B) di volume molto più grande e mantenuto a pressione $P_B = 25 \text{ atm}$ (costante). La linea di collegamento tra i due serbatoi è lunga $L = 50 \text{ m}$ e ha diametro $D = 0.05 \text{ m}$.

1. Calcolare la portata di gas trasferita lungo la linea quando la valvola di intercettazione posta tra i due serbatoi viene aperta (pressione iniziale nel serbatoio A pari alla pressione atmosferica); ipotizzare trasformazioni isoterme ($T = 293 \text{ K}$) e coefficiente di attrito $f = 0.003$;

2. Calcolare la massa trasferita da B ad A per caricare il serbatoio A fino ad una pressione $P_A = 15 \text{ atm}$;
3. Se la valvola tra B ed A non viene chiusa, la pressione nel serbatoio A può salire fino ad un massimo di 20 atm prima che si rompa un disco di rottura ($d = 2.5 \text{ cm}$). Calcolare se, in caso di rottura del disco, il flusso di azoto in uscita è sonico.
4. Determinare per quanto tempo dura l'efflusso sonico se viene interrotta l'erogazione di azoto dal serbatoio B.

k.

Una linea per il trasporto di gas metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) è costituita da una serie di tratti di tubazione ($D = 0.4 \text{ m}$, $L = 200 \text{ km}$) intervallati da stazioni di ricompressione/refrigerazione intermedi in cui la pressione del gas viene periodicamente riportata a valori idonei per realizzare il trasporto.

1. Calcolare la pressione di aspirazione del compressore quando la portata di gas che fluisce nel sistema, misurata a pressione atmosferica e $T = 293 \text{ K}$, risulta pari a $Q = 12000 \text{ m}^3/\text{h}$ sapendo che il tubo è liscio, la temperatura del gas in condotta è pari a $T_g = 280 \text{ K}$, la pressione di mandata del compressore è pari a 6 atm e il trasporto può essere considerato isoterma;
2. Calcolare la potenza del compressore se la trasformazione subita dal gas in fase di compressione può essere assimilata ad una adiabatica reversibile ($\gamma = 1.4$);
3. Calcolare la portata in massa che fuoriesce dalla tubazione nel caso che, per cause accidentali, venga prodotto un foro di area pari a 1 cm^2 1 km a valle della stazione di compressione (considerare adiabatico l'efflusso dal punto di rottura).

l.

Il sistema di erogazione di aria compressa installato presso un impianto industriale è formato da un compressore che preleva aria ($M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) dall'ambiente, un serbatoio A ($V_A = 20 \text{ m}^3$) di stoccaggio e un serbatoio B ($V_B = 2 \text{ m}^3$) di distribuzione. I serbatoi A e B sono collegati da una tubazione AB ($L_{AB} = 200 \text{ m}$, $D_A = 3 \text{ cm}$). Una seconda tubazione collega il serbatoio B ($L_{BC} = 20 \text{ m}$, $D_B = 6 \text{ cm}$) con il punto di utilizzo dell'aria compressa C (a p_{atm}). Sapendo che il sistema deve fornire una portata d'aria pari a $\dot{m} = 0.3 \text{ kg/s}$, che il trasporto avviene in condizioni isoterme ($T = 25^\circ\text{C}$) e che le tubazioni sono lisce (utilizzare la legge di Blasius, $f = 0.079 \cdot Re^{-0.25}$ per il calcolo del coefficiente di attrito),

1. Verificare se il flusso dal serbatoio B al punto di erogazione è critico;
2. Calcolare la pressione nel serbatoio B;
3. Calcolare la pressione nel serbatoio A e la portata di aria fornita dal compressore se il sistema funziona a stazionario.

m.

Il sistema di erogazione di aria compressa installato presso un impianto industriale è formato da un compressore che preleva aria ($M = 29 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) dall'ambiente, un serbatoio A ($V_A = 25 \text{ m}^3$) di stoccaggio e un serbatoio B ($V_B = 4 \text{ m}^3$) di distribuzione. I serbatoi A e B sono collegati da una tubazione AB ($L_{AB} = 300 \text{ m}$, $D_A = 4 \text{ cm}$). Una seconda tubazione collega il serbatoio B ($L_{BC} = 30 \text{ m}$, $D_B = 8 \text{ cm}$) con il punto di utilizzo dell'aria compressa C (a p_{atm}). Sapendo che il sistema deve fornire una portata d'aria pari a $\dot{m} = 0.4 \text{ kg/s}$, che il trasporto avviene in condizioni isoterme ($T = 25^\circ\text{C}$) e che le tubazioni sono lisce (utilizzare la legge di Blasius, $f = 0.079 \cdot Re^{-0.25}$ per il calcolo del coefficiente di attrito),

1. Verificare se il flusso dal serbatoio B al punto di erogazione è critico;
2. Calcolare la pressione nel serbatoio B;
3. Calcolare la pressione nel serbatoio A e la portata di aria fornita dal compressore se il sistema funziona a stazionario.

n.

Un compressore volumetrico a vite è utilizzato per riempire periodicamente d'aria compressa ($M = 29 \text{ kg/kmole}$) un serbatoio A di volume $V_A = 2 \text{ m}^3$ per gli utilizzi di impianto. Durante il periodo di carica, aria ambiente ($T = 20^\circ\text{C}$) viene aspirata dal compressore, compressa, raffreddata fino a $T_A = 60^\circ\text{C}$ e alimentata al serbatoio. La portata d'aria elaborata dal compressore è $\dot{m} = 0.04 \text{ kg/s}$; la pressione nel serbatoio varia dalla pressione atmosferica ($P_{A,0} = 1 \text{ atm}$) ad un valore massimo di 8 atm .

1. Calcolare il tempo necessario per caricare il serbatoio;
2. Ipotizzando che, in fase di compressione, il gas subisca una trasformazione idealmente rappresentata da una compressione adiabatica reversibile ($p/\rho^\gamma = \text{cost}$, $\gamma = 1.4$) seguita da un raffreddamento a pressione costante, calcolare la potenza massima che deve avere il compressore per poter caricare il serbatoio (diametro dei condotti di aspirazione e mandata $d = 3 \text{ cm}$);
3. Il serbatoio è collegato attraverso una valvola V_2 ad una linea per l'utilizzo dell'aria compressa ($L_2 = 50 \text{ m}$, $d_2 = 2 \text{ cm}$). Assumendo flusso isoterma lungo la linea e $f = 0.003$, verificare se il flusso è critico/non critico e calcolare la portata d'aria compressa trasferita dal serbatoio all'apertura della valvola V_2 .
4. In caso di necessità, è possibile svuotare rapidamente il serbatoio attraverso un ugello ($L_1 = 0.2 \text{ m}$, $d_1 = 1. \text{ cm}$) aprendo la valvola V_1 . Assumendo flusso isoterma attraverso l'ugello e $f = 0.003$, verificare il tipo di flusso (critico/non critico) e calcolare la portata d'aria compressa che esce all'apertura della valvola V_1 .

o.

In una acciaieria, il sistema che alimenta metano ($M = 16 \text{ kg/kmole}$, $\mu = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) ad una lancia di fusione del rottame è costituito da un serbatoio principale A ($V_A = 60 \text{ m}^3$) posto all'esterno dello stabilimento, e un serbatoio secondario B ($V_B = 10 \text{ m}^3$) di alimentazione della lancia. I serbatoi sono collegati da una linea A-B ($L_{AB} = 300 \text{ m}$, $D = 5 \text{ cm}$) intercettata da una valvola V_1 e inizialmente si trovano a pressione $P_A = 30 \text{ atm}$ e $P_B = 1 \text{ atm}$. Il trasferimento di metano da serbatoio B alla lancia ($L = 30 \text{ m}$, $d = 2.5 \text{ cm}$) è regolato da una seconda valvola V_2 . Ipotizzando tutte le trasformazioni isoterme ($T = 25^\circ\text{C}$) e tubi lisci ($f = 0.003$)

1. Calcolare la portata in massa trasmessa inizialmente tra serbatoio A e serbatoio B all'apertura della valvola V_1 (valvola V_2 chiusa);
2. Calcolare la pressione a cui si portano i due serbatoi quando, a valvola V_2 chiusa, cessa il flusso da A a B;
3. Calcolare quale dev'essere la perdita di carico, in lunghezze di tubo equivalente, fornita dalla valvola V_2 se, per garantire la completa combustione del metano, la portata trasferita dal serbatoio B alla lancia non deve superare $\dot{m} = 0.15 \text{ kg/s}$;
4. Nelle fasi successive di funzionamento della lancia il grado di apertura della valvola viene continuamente regolato da un servomeccanismo per garantire una costante erogazione del metano (\dot{m}). Determinare il valore limite di pressione del serbatoio B che consente di far funzionare la lancia e dopo quanto tempo deve essere ricaricato il serbatoio.

p.

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 ($Q = 3 \text{ l/s}$). 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 ($\rho_{oil} = 800 \text{ kg/m}^3$) 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.

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

q.

Un serbatoio a temperatura $T = 20^\circ C$ e pressione iniziale $p_0 = 10 \text{ atm}$ contiene metano ($MM = 16 \text{ kg/kmole}$). Il volume del serbatoio è pari a 10 m^3 . Il serbatoio è dotato di una valvola di sfiato V_1 ($d = 2 \text{ cm}$) ed è collegato attraverso una valvola V_2 a un tubo ($L = 250 \text{ m}$, $D = 2.5 \text{ cm}$) che scarica in atmosfera. All'istante iniziale la valvola V_1 è aperta e la valvola V_2 è chiusa. Ipotizzando che tutte le trasformazioni subite dal gas siano isoterme, si chiede di:

1. stabilire se il flusso di metano in uscita dalla valvola V_1 è critico (assumere $f = 0.003$);
2. dopo 40. s la valvola V_1 viene chiusa e viene aperta la valvola V_2 . Calcolare la massa di gas uscita dalla serbatoio fino a quel momento;
3. calcolare la portata di gas uscente dalla valvola V_2 .

r.

In una centrale per la combustione di biomasse si utilizza un precipitatore piastra-piastra per separare le polveri sottili generate in fase di combustione. Il precipitatore ha dimensioni $H = 2 \text{ m}$, $W = 0.8 \text{ m}$ e $L = 4 \text{ m}$ ed è costituito da 5 piastre alternate, 2 ad alto potenziale e 3 collegate a terra. Il precipitatore tratta una portata d'aria pari a $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\mu = 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$).

1. Sapendo che l'efficienza di separazione desiderata per particelle di diametro $D_p = 5 \mu\text{m}$ è pari a $\eta = 95\%$, e che la densità di carica superficiale delle particelle è $\sigma = 7.64 \cdot 10^{-7} \text{ C/m}^2$, calcolate la differenza di potenziale da applicare alle piastre del precipitatore elettrostatico;
2. Calcolare l'efficienza di raccolta globale se la distribuzione dimensionale delle polveri presenti nel flusso da trattare è quella riportata in Tabella;

$D_p, [\mu\text{m}]$	%
1.	5
2.5	30
5.0	20
10.0	45

3. L'autorità di controllo ha chiesto di apportare modifiche all'apparecchiatura per migliorarne l'efficienza di abbattimento. Il consulente ha proposto due alternative che non comportano costi eccessivi perché prevedono solo l'acquisto di una ulteriore superficie di raccolta ($L \times H$):
 - alternativa A: ridisposizione delle piastre per realizzare un sistema di raccolta a tre piastre ($W = 0.4 \text{ m}$) di lunghezza doppia ($L = 8 \text{ m}$) alimentate alla tensione già disponibile in impianto;
 - alternativa B: ridisposizione delle piastre per realizzare un sistema di raccolta a sei piastre ($W = 0.8 \text{ m}$) mantenendo l'ingombro invariato ($L = 4 \text{ m}$) e la stessa tensione di alimentazione;

Stabilire quali delle due soluzioni è la più efficace per migliorare l'abbattimento di particelle da $5 \mu\text{m}$.

s.

Nei laboratori di una ditta che produce stufe a legna si sta studiando un sistema di separazione delle polveri che possa aiutare a ridurre le emissioni di particolato. Il sistema è costituito da un ciclone Lapple, che funziona da pre-separatore per le particelle di dimensione maggiore, e un precipitatore elettrostatico posti in serie. Sapendo che la portata dei fumi da trattare (aria, $MM = 29 \text{ kg/kmole}$, viscosità $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) è $\dot{m} = 0.010 \text{ kg/s}$, che la temperatura dei fumi è $T = 150^\circ C$, la pressione è atmosferica e che le caratteristiche delle ceneri sono: densità $\rho_p = 300 \text{ kg/m}^3$, e distribuzione dimensionale come da Tabella,

1. utilizzando le formule per il dimensionamento pratico dei cicloni, calcolare l'efficienza di abbattimento globale del pre-separatore ciclonico se il diametro del ciclone è $D_c = 20 \text{ cm}$;
2. determinare la differenza di potenziale che deve essere applicata agli elettrodi di un precipitatore elettrostatico tubolare ($D = 15 \text{ cm}$, $L = 50 \text{ cm}$) per abbattere al 99% particelle di diametro pari a $D_p = 1 \mu\text{m}$ (assumere per la carica acquistata dalle particelle i valori in Tabella e campo elettrico pari a $E = \Delta V/R$);
3. calcolare l'efficienza di abbattimento globale delle due apparecchiature in serie.

$D_p, [\mu m]$	%	$q_p, [C]$
0.1	5	$2.4 \cdot 10^{-18} C$
1.0	30	$2.4 \cdot 10^{-18} C$
5.0	20	$2.4 \cdot 10^{-18} C$
10.0	45	$2.4 \cdot 10^{-18} C$

t.

In un laboratorio dsi dispone di un compressore a vite che viene utilizzato per prelevare aria atmosferica e caricarla in un serbatoio di $V = 1 m^3$. Al serbatoio è collegata una linea di distribuzione di aria compressa ($\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$) costituita da un tubo lungo $L = 40 m$ e di diametro $d = 2 cm$. Ipotizzando che tutte le trasformazioni che il gas subisce siano isoterme ($T = 25^\circ C$) e che il fattore di attrito sia pari a $f = 0.003$, calcolare:

1. quanta aria è presente all'interno del serbatoio se, a partire da condizioni iniziali di pressione dell'aria pari a $p_0 = 1 atm$ nel serbatoio e linea di aria compressa chiusa, il compressore carica il serbatoio con una portata pari a $\dot{m} = 0.12 kg/s$ finché la pressione raggiunge il valore di $8 atm$;
2. calcolare in quanto tempo si carica il serbatoio;
3. quando il serbatoio è carico, il compressore si spegne e viene aperta l'erogazione dell'aria compressa: calcolare qual'è la massima portata di aria compressa erogabile dal sistema, \dot{m}_{max} .
4. Determinare a quale valore di pressione nel serbatoio si deve riattivare il compressore per evitare che la portata di aria compressa erogata scenda al di sotto di $0.7 \cdot \dot{m}_{max}$.
5. calcolare la pressione a cui si porta il serbatoio a regime se il compressore rimane sempre in funzione.

u.

In una centrale per la combustione di biomasse si utilizza un ciclone per separare le polveri sottili generate in fase di combustione. La portata dei fumi da trattare ($M = 29 kg/kmole$, $\mu = 2 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$) è pari a $Q = 4250 Nm^3/h$. La temperatura dei fumi è $T = 200^\circ C$ e la densità delle polveri è $\rho_p = 800 kg/m^3$.

1. Calcolare la portata volumetrica dei fumi;
2. Dimensionare il ciclone (Swift) in modo da garantire il 90% di efficienza di separazione per particelle di diametro $D_p = 10 \mu m$ (assumere $m = 0.55$);
3. Calcolare perdite di carico e potenza necessaria per alimentare il flusso attraverso il ciclone.
4. Calcolare l'efficienza di raccolta globale se la distribuzione dimensionale delle polveri presenti nel flusso da trattare è quella riportata in Tabella;

$D_p, [\mu m]$	%
2.5	15
5.0	20
10.0	50
15.0	15

v.

In un reattore a letto fluido per la sintesi di polimeri si utilizzano sferette di catalizzatore ($D_p = 100 \mu m$, $\rho_p = 300 kg/m^3$) per promuovere la reazione di sintesi in fase gassosa. Le sferette devono essere mantenute in sospensione nel flusso dei reagenti all'interno del reattore di sintesi. Ipotizzando che le sferette si muovano in regime di Stokes,

1. calcolare a che velocità deve essere mantenuto il flusso di gas ($\rho_g = 1.4 kg/m^3$, $\mu_g = 1.8 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$) per mantenere il catalizzatore in sospensione stabile nel reattore (sezione di flusso pari a $1 m^2$);
2. Quando il catalizzatore si esaurisce deve essere estratto dal reattore e recuperato per essere rigenerato. In questa fase, si raddoppia la portata del gas in modo che le particelle di catalizzatore vengano convogliate verso un ciclone Swift dove vengono separate. Dimensionare il separatore in modo che il 98% del catalizzatore possa essere recuperato;
3. calcolare le perdite di carico attraverso il ciclone.

w.

In un impianto per il trattamento di fanghi si deve dimensionare una vasca di sedimentazione per trattare una portata $Q = 100 \text{ l/s}$ di acqua in cui sono sospese sabbie di diametro equivalente $D_p = 30 \mu\text{m}$ e densità $\rho_p = 1200 \text{ kg/m}^3$. Lo spazio in pianta disponibile nel layout di impianto per l'installazione del sedimentatore prevede un'area massima pari a $A_{max} = 20 \text{ m}^2$. La richiesta del gestore dell'impianto è che l'efficienza di separazione sia almeno pari al 95%.

1. Verificare se è possibile soddisfare le esigenze di separazione con i vincoli imposti;
2. L'ingegnere di processo suggerisce che premiscelando i fanghi da trattare con un additivo flocculante, è possibile aggregare le particelle da sedimentare in fiocchi di diametro equivalente maggiore di $30 \mu\text{m}$. Calcolare quale diametro dovrebbero avere i fiocchi per poter essere efficacemente separati in impianto.
3. Discutere quali altri accorgimenti si potrebbero adottare per ottenere la separazione delle sabbie da $30 \mu\text{m}$ nel rispetto dei vincoli di impianto.

x.

In un impianto per la depurazione di acque industriali è installata una vasca di sedimentazione progettata per separare materiale solido e residui oleosi dall'acqua di processo. La superficie occupata dalla vasca ($W \cdot L$) è pari a 20 m^2 e la vasca è profonda $H = 0.5 \text{ m}$. La portata che deve essere trattata ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$) contiene sabbie ($D_p = 100 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2000 \text{ kg/m}^3$) e goccioline d'olio ($D_g = 120 \mu\text{m}$, $\rho_g = 500 \text{ kg/m}^3$).

1. Discutere se sia importante o meno sapere quali siano le dimensioni W e L della vasca;
2. Valutare l'efficienza di separazione per le sabbie e per l'olio (assumere moto in regime di Stokes per particelle e gocce);
3. A seguito dell'ampliamento dell'impianto industriale, la portata da trattare risulta duplicata con un conseguente peggioramento delle efficienze di abbattimento. Calcolare il nuovo valore di efficienza di separazione per le sabbie e per l'olio;
4. Il progettista dell'impianto propone di installare un coalescer a pacchi lamellari all'interno della porzione terminale della vasca (10% dell'area di base). Calcolare quale deve essere la distanza tra i piani del pacco lamellare per ottenere una separazione di gocce d'olio pari a quella realizzata in impianto prima dell'ampliamento.

y.

In una centrale per la combustione di biomasse si utilizza un precipitatore piastra-piastra per separare le polveri sottili generate in fase di combustione. Il precipitatore ha dimensioni $H = 2 \text{ m}$, $W = 0.8 \text{ m}$ e $L = 4 \text{ m}$ ed è costituito da 5 piastre alternate, 2 ad alto potenziale e 3 collegate a terra. Il precipitatore tratta una portata d'aria pari a $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\mu = 2.1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$).

1. Sapendo che l'efficienza di separazione desiderata per particelle di diametro $D_p = 5 \mu\text{m}$ è pari a $\eta = 95\%$, e che la densità di carica superficiale delle particelle è $\sigma = 7.64 \cdot 10^{-7} \text{ C/m}^2$, calcolate la differenza di potenziale da applicare alle piastre del precipitatore elettrostatico;
2. Calcolare l'efficienza di raccolta globale se la distribuzione dimensionale delle polveri presenti nel flusso da trattare è quella riportata in Tabella;

$D_p, [\mu\text{m}]$	%
1.	5
2.5	30
5.0	20
10.0	45

3. L'autorità di controllo ha chiesto di apportare modifiche all'apparecchiatura per migliorarne l'efficienza di abbattimento. Il consulente ha proposto due alternative che non comportano costi eccessivi perché prevedono solo l'acquisto di una ulteriore superficie di raccolta ($L \times H$):
 - alternativa A: ridisposizione delle piastre per realizzare un sistema di raccolta a tre piastre ($W = 0.4 \text{ m}$) di lunghezza doppia ($L = 8 \text{ m}$) alimentate alla tensione già disponibile in impianto;
 - alternativa B: ridisposizione delle piastre per realizzare un sistema di raccolta a sei piastre ($W = 0.8 \text{ m}$) mantenendo l'ingombro invariato ($L = 4 \text{ m}$) e la stessa tensione di alimentazione;

Stabilire quali delle due soluzioni è la più efficace per migliorare l'abbattimento di particelle da $5 \mu\text{m}$.

z.

Per trattare le acque di prima pioggia provenienti da un piazzale adibito a parcheggio si utilizza una vasca interrata lunga $L = 6\text{ m}$, alta $H = 2\text{ m}$ e larga $W = 2\text{ m}$.

1. Sapendo che la densità tipica degli olii eventualmente trascinati dall'acqua di prima pioggia ($\rho = 1000\text{ kg/m}^3$, $\mu = 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$) è pari a $\rho_o = 800\text{ kg/m}^3$ e che la vasca viene alimentata con una portata al massimo pari a $Q = 3\text{ l/s}$, calcolare l'efficienza con cui possono essere separate gocce d'olio di dimensione caratteristica pari a $100\text{ }\mu\text{m}$;
2. A seguito di lavori di ristrutturazione dell'impianto, viene modificato il condotto di alimentazione dell'acqua all'impianto, con restringimento del diametro del tubo di alimentazione dell'acqua da trattare, conseguente aumento dello sforzo di taglio agente sulla fase dispersa e frammentazione delle gocce in gocce di diametro ridotto a $D_p = 20\text{ }\mu\text{m}$. Calcolare il rendimento di separazione dell'olio in queste condizioni.
3. Per recuperare le prestazioni di progetto dell'apparecchiatura ($\eta \geq 98\%$) il progettista propone di installare un coalescer a pacchi lamellari all'interno della vasca ($L' = 0.5\text{ m}$). Calcolare quale deve essere la distanza tra i piani del pacco lamellare per ottenere la separazione desiderata ($\eta = 98\%$ per gocce da $20\text{ }\mu\text{m}$).
4. Calcolare l'aumento delle perdite di carico dovuto all'installazione del pacco lamellare.

aa.

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 $\rho_p = 300\text{ kg/m}^3$, diametro $D_p = 100\text{ }\mu\text{m}$, e che le caratteristiche del gas sono: portata di gas, $\dot{m} = 150000\text{ kg/h}$, densità $\rho = 0.9\text{ kg/m}^3$, 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 $100\text{ }\mu\text{m}$ 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:

$D_p\text{ }[\mu\text{m}]$	1	5	10	50	100	150
%	5	10	20	30	20	15

bb.

I fumi di combustione di un bruciatore industriale (portata $Q = 2\text{ m}^3/\text{s}$, $MM = 29\text{ kg/kmole}$, $P = 1\text{ atm}$, $T = 100^\circ\text{C}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$) contengono particelle di cenere ($\rho_p = 500\text{ kg/m}^3$). 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 $D_p = 100\text{ }\mu\text{m}$. 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.

cc.

I fumi di combustione di un bruciatore industriale (portata $Q = 3\text{ m}^3/\text{s}$, $MM = 29\text{ kg/kmole}$, $P = 1\text{ atm}$, $T = 100^\circ\text{C}$, $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$) contengono particelle di cenere ($\rho_p = 600\text{ kg/m}^3$). 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 $D_p = 80\text{ }\mu\text{m}$. Per la realizzazione dell'impianto di abbattimento sono stati presentati due progetti: il primo prevede la realizzazione di una camera a gravità ($L = 6\text{ m}$, $H = 3\text{ m}$, $W = 3\text{ m}$) e un ciclone Swift; il secondo prevede l'installazione di una batteria di 40 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 $m=0.57$);
4. Discutere quale scelta progettuale potrebbe essere più conveniente.

dd.

Un sistema per la separazione di olii è formato da un separatore a gravità seguito da un filtro a coalescenza. Sapendo che le dimensioni del separatore sono: larghezza $W = 1\text{ m}$, altezza $H = 1\text{ m}$ e lunghezza $L = 4\text{ m}$ e che la portata da trattare è $Q = 5\text{ l/s}$,

1. determinare quale deve essere l'efficienza di separazione del filtro a coalescenza se il sistema deve separare gocce di olio ($\rho_{oil} = 800\text{ kg/m}^3$) di diametro $D_p = 150\text{ }\mu\text{m}$ con efficienza $\eta_{tot}(150\text{ }\mu\text{m})$ almeno pari al 99.9%.
2. Il progettista propone anche una configurazione alternativa di impianto in cui il separatore a gravità, di lunghezza ridotta a $L' = 2\text{ m}$, è seguito da un coalescer a pacco lamellare di lunghezza $L_p = 10\text{ cm}$. L'acqua e le gocce d'olio attraversano i vani del pacco lamellare, distanti δ e leggermente inclinati verso l'alto; le gocce d'olio si accumulano sulla superficie dei vani, coalescono formando gocce più grosse e risalgono velocemente in superficie. Determinare quale deve essere il passo δ del pacco lamellare per poter garantire la stessa efficienza di separazione totale.
3. Calcolare l'efficienza di separazione della seconda configurazione di disoleatore se la distribuzione dimensionale delle gocce in ingresso è quella riportata in tabella.

$D_o, [\mu\text{m}]$	$m_o, [\text{mg}]$
50	0.50
100	1.0
200	0.20

ee.

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 $20\text{ }\mu\text{m}$, 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.

ff.

I fumi dello stesso impianto contengono, oltre al particolato, composti organici volatili (formaldeide) derivanti dalle colle usate per la produzione dei pannelli e devono essere lavati prima di essere espulsi in atmosfera. Per questo i fumi sono alimentati al fondo di una colonna a riempimento strutturato in cui viene alimentata acqua dall'alto.

1. Impostare un bilancio di massa sulla fase gas per descrivere il processo di trasferimento dei VOC dalla fase gas alla fase liquida;
2. Sapendo che la colonna è alta $H = 30\text{ m}$ e ha diametro $D = 3\text{ m}$, che la portata di liquido utilizzata per il lavaggio è abbastanza elevata da poter considerare trascurabile la concentrazione di VOC in fase liquida, che il coefficiente di trasferimento di massa è pari a $k = 7 \cdot 10^{-6}\text{ m/s}$ e che il riempimento è caratterizzato da una superficie specifica $a = 5000\text{ m}^2/\text{m}^3$, calcolare quanto VOC viene rimosso dal gas se la concentrazione in ingresso è $C_{in} = 10\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;

3. Nuove normative prevedono limiti sempre più stringenti per la concentrazione di VOC nell'effluente gassoso. Il consulente propone di revampare la colonna di assorbimento esistente sostituendo il materiale di riempimento con un riempimento di seconda generazione ($a' = 10000 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Verificare se questa soluzione permetterebbe di adeguare la concentrazione in uscita al nuovo limite di legge ($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

gg.

Nella vasca di un impianto per il trattamento superficiale dei metalli si utilizza una soluzione al 30% di NaOH per satinare chimicamente la superficie del metallo conferendole un aspetto opaco. In questa fase, micro particelle di metallo, staccate dalla soluzione del bagno, vengono portate in soluzione. Per esigenze di processo la soluzione di soda viene mantenuta in circolo continuo. Tuttavia, è opportuno evitare che le particelle metalliche presenti in soluzione possano essere trascinate a fine vasca, dove andrebbero a ostruire la pompa per il ricircolo del liquido.

1. Sapendo che la dimensione tipica delle particelle di metallo in soluzione è $D = 10 \mu\text{m}$, che la densità del metallo è $\rho_p = 1500 \text{ kg}/\text{m}^3$, quella della soluzione di soda è $\rho = 1100 \text{ kg}/\text{m}^3$ e la viscosità è $\mu = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ e le dimensioni della vasca sono $L = 7 \text{ m}$, $W = 1 \text{ m}$ e $H = 1.6 \text{ m}$, calcolare qual'è la portata massima del liquido circolante che, garantendo una deposizione delle particelle $\eta \geq 90\%$, permette di non compromettere il funzionamento della pompa; Un consulente sostiene che con l'aggiunta di un particolare additivo è possibile incrementare la sedimentabilità delle polveri metalliche. In una prova di laboratorio si è osservato che le polveri risultano depositate in $1/3$ della lunghezza della vasca. Calcolare il diametro medio dell'aggregato di polveri che si genera in presenza dell'additivo.

hh.

In un depuratore di reflui civili si vuole recuperare in fase gassosa parte dell'ammoniaca presente in fase disciolta nel refluo liquido facendo gorgogliare bolle di azoto di piccolo diametro attraverso il liquido (strippaggio di NH_3 con N_2). Il refluo ($\rho_L = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) è posto in un serbatoio riempito fino a un livello pari a 3 m, dal fondo del quale viene gorgogliato l'azoto ($\rho_G = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C_{\text{NH}_3}(0) = 0$). L'azoto viene estratto dal volume soprastante il refluo attraverso un ventilatore.

1. Impostare un bilancio di massa sulla bolla di azoto che sale attraverso il refluo per descrivere il trasferimento di ammoniaca dalla fase liquida alla fase gas;
2. Ipotizzando che la variazione di concentrazione di NH_3 nel liquido sia trascurabile ($C_{\text{NH}_3, \text{int}} = \text{cost}$), determinare quale dovrebbe essere il diametro delle bolle per avere nel gas estratto una concentrazione pari a $0.5 C_{\text{NH}_3, \text{int}}$ (assumere regime di Stokes per la bolla di gas e coefficiente di trasferimento di massa $k = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}/\text{s}$).

ii.

In un depuratore di reflui civili si vuole recuperare in fase gassosa parte dell'ammoniaca presente in fase disciolta nel refluo liquido facendo gorgogliare bolle di azoto di piccolo diametro attraverso il liquido (strippaggio di NH_3 con N_2). Il refluo ($\rho_L = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) è posto in un serbatoio riempito fino a un livello pari a 2.5 m, dal fondo del quale viene gorgogliato l'azoto ($\rho_G = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C_{\text{NH}_3}(0) = 0$). L'azoto viene estratto dal volume soprastante il refluo attraverso un ventilatore.

1. Impostare un bilancio di massa sulla bolla di azoto che sale attraverso il refluo per descrivere il trasferimento di ammoniaca dalla fase liquida alla fase gas;
2. Ipotizzando che la variazione di concentrazione di NH_3 nel liquido sia trascurabile ($C_{\text{NH}_3, \text{int}} = \text{cost}$), determinare quale dovrebbe essere il diametro delle bolle per avere nel gas estratto una concentrazione pari a $0.6 C_{\text{NH}_3, \text{int}}$ (assumere regime di Stokes per la bolla di gas e coefficiente di trasferimento di massa $k = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}/\text{s}$).

jj.

Presso un laboratorio di analisi si realizzano test di cessione per valutare la possibile tossicità di materiali solidi (sabbie) da utilizzare come inerte all'interno di parte cementizie. Il materiale polverizzato viene introdotto e compattato all'interno di una colonna di test ($D = 10 \text{ cm}$, $H = 50 \text{ cm}$) e irrorato dall'alto con acqua distillata che viene estratta dal fondo della colonna e ricircolata alla sommità del sistema per 24 ore. La concentrazione di composti eventualmente estratti dal solido sono misurati nell'eluato alla fine del periodo di test.

1. Impostare un bilancio di massa sulla fase liquida per descrivere il processo di trasferimento di massa dei composti tossici dalla fase solida (concentrazione all'interfaccia con il liquido pari a $C_{\text{int}} = 5 \text{ mg}/\text{l}$) alla fase liquida;

2. Valutare il tasso di cessione (costante di trasferimento di massa, k) per una specie la cui concentrazione nell'eluato a fine periodo risulta pari a $5 \mu\text{g/l}$ (portata di lavaggio pari a $Q = 0.1 \text{ l/s}$, area specifica di trasferimento $a = 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Suggerimento: considerare la portata ricircolante sul segmento di colonna equivalente a una portata non ricircolante su una colonna di lunghezza maggiore.

kk.

Presso una azienda zootecnica si utilizza un trattamento di strippaggio per trattare reflui di origine agroalimentare ricchi in composti azotati: all'interno di un serbatoio stagno di $D = 2 \text{ m}$ alto $H = 2 \text{ m}$, il refluo chiarificato ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) ricco di ammoniaca entra in contatto con bolle d'aria calda ($\rho_b = 1.2 \text{ kg/m}^3$) gorgogliate dal fondo del serbatoio attraverso opportuni ugelli, promuovendo il trasferimento di ammoniaca dalla fase liquida al gas, con conseguente riduzione del tenore di ammoniaca del refluo.

1. Impostare il bilancio di massa per descrivere il trasferimento di NH_3 dal liquido al gas assumendo che la concentrazione di NH_3 all'interfaccia liquido/gas non vari in modo significativo all'interno del serbatoio ($C_{int} = 4 \text{ mg/m}^3$);
2. Assumendo che il coefficiente di trasferimento di massa attraverso l'interfaccia liquido gas sia pari a $K = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, calcolare come varia la concentrazione di ammoniaca nel gas mentre le bolle si muovono attraverso il refluo in funzione del diametro delle bolle insufflate.
3. Calcolare la concentrazione del gas in uscita dal refluo se le bolle di aria insufflate hanno diametro pari a $d_b = 1 \text{ mm}$.

ll.

Per ridurre l'emissione di odori generati nel processo di trattamento di acque reflue, nel depuratore X si utilizza un ossigenatore a colonna ($D = 0.5 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$). Il liquido da ossigenare viene alimentato dall'alto della colonna ($Q = 3 \text{ l/s}$) mentre l'ossigeno viene gorgogliato dal basso in bolle di piccolo diametro. L'ossigeno contenuto nelle bolle passa parzialmente in soluzione mentre queste risalgono lungo la colonna.

1. Impostare il bilancio di massa sull'apparecchiatura per descrivere il trasferimento di O_2 dal gas al liquido da ossigenare, considerando che la concentrazione di gas nelle bolle rimanga pari a C_{sat} . Si assuma che il coefficiente di trasferimento di massa sia pari a $K = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ e che la superficie di interfaccia per unità di volume sia $a = 40 \text{ m}^2/\text{m}^3$.
2. Calcolare il grado di ossigenazione realizzato;
3. Considerando che a dipende dalla portata di ossigeno gorgogliata e dalle dimensioni delle bolle, discutere quali dovrebbero essere le condizioni di iniezione delle bolle per massimizzare il trasferimento di ossigeno.

mm.

Nel depuratore X si utilizza un biofiltro ($L = 15 \text{ m}$, $W = 20 \text{ m}$, $H = 1 \text{ m}$) per abbattere la concentrazione di composti odoriferi a base di zolfo: i gas da trattare vengono alimentati attraverso la sezione inferiore del biofiltro e i composti vengono assorbiti e completamente degradati ($C_{liq} = 0$) nel film liquido aderente al riempimento che alimenta la biomassa. Sapendo che l'area di interfaccia per unità di volume di riempimento è pari ad $a = 50 \text{ m}^2/\text{m}^3$, la portata di gas da trattare è $\dot{m} = 2.4 \text{ kg/s}$ la densità del gas è 1.2 kg/m^3 e il coefficiente di trasferimento di massa tra la fase gas e la fase liquida è pari a $K = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/h}$:

1. Impostare il bilancio di massa sull'apparecchiatura per descrivere il trasferimento di composti a base di zolfo dal gas al liquido e calcolare l'efficienza di abbattimento del biofiltro;
2. Valutare quale dovrebbe essere la superficie del biofiltro per arrivare ad una efficienza di abbattimento pari al 90%.

nm.

Presso un laboratorio chimico si effettuano test di eluizione per valutare il grado di inquinamento di materiale roccioso estratto da cava prima che questo possa essere utilizzato come materiale di riempimento. L'apparecchiatura di test è costituita da una colonna ($D = 0.2 \text{ m}$, $L = 1 \text{ m}$) che viene caricata con il materiale roccioso frantumato ($a_{int} = 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Acqua distillata ($Q = 1 \text{ l/s}$) viene alimentata dall'alto della colonna per solubilizzare dalla fase solida e assorbire in fase liquida i composti inquinanti eventualmente presenti.

1. Impostare l'equazione di conservazione che controlla il trasferimento di massa dal solido al liquido;

2. Sapendo che la concentrazione in fase liquida di un inquinante risulta pari a $C(L) = 300 \mu\text{g/l}$, valutare quale deve essere il contenuto di inquinante in fase solida se il coefficiente di trasferimento di massa è $k = 10^{-6} \text{m/s}$.
3. Discutere come si potrebbe agire per modificare le condizioni di test per poter rilevare anche inquinanti presenti solo in micro concentrazioni nel solido.

oo.

Per abbattere le emissioni di H_2S di una centrale termica alimentata a carbone in Bulgaria è stato costruito un impianto di abbattimento che utilizza uno scrubber a liquido per il lavaggio dei fumi prima che vengano espulsi in atmosfera. Goccioline di acqua di diametro intorno ai $200 \mu\text{m}$ vengono nebulizzate nello scrubber ($H = 5 \text{ m}$, $W = 5 \text{ m}$ e $L = 10 \text{ m}$) attraversato dai gas ($Q = 300,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) che si trovano a pressione atmosferica e temperatura di $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Le gocce di acqua contengono gipsum che è in grado di legare l' H_2S assorbito in fase liquida ($C_{int} = 0$).

1. Impostare l'equazione che descrive il trasferimento di massa tra il gas e le gocce d'acqua (coefficiente di trasferimento di massa $K = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{m/s}$, area di interfaccia specifica $a = 10^4 \text{m}^2/\text{m}^3$);
2. calcolare l'efficienza di abbattimento realizzata dallo scrubber per l' H_2S ;
3. per soddisfare le sempre più stringenti norme sulle emissioni, è richiesto di aumentare l'efficienza di abbattimento dell'impianto. Il consulente ha proposto di ridurre il diametro delle gocce di lavaggio iniettate per realizzare una maggiore area di scambio; calcolare quanto deve valere a per arrivare ad una efficienza di abbattimento pari al 95%;
4. la riduzione del diametro delle gocce aumenta il trascinamento di liquido dallo scrubber verso la ciminiera (altezza 50 m , $D = 4 \text{ m}$); si decide di installare uno spinner, separatore centrifugo a vani fissi in grado di conferire al flusso una componente rotatoria mentre questo risale lungo la ciminiera. Assumendo che la componente rotatoria del flusso generi una accelerazione radiale costante per le gocce d'acqua, calcolare quale deve essere la sua intensità per riuscire a raccogliere il 90% delle gocce (diametro $100 \mu\text{m}$, $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$) prima che vengano espulse in atmosfera.

pp.

Il conferimento in discarica di residui di manufatti di legno trattato con composti a base di metalli pesanti (rame, arsenico e cromo) può produrre notevole impatto ambientale. Per limitare l'impatto ambientale, una ditta di smaltimento rifiuti ha messo a punto un sistema di trattamento economico per l'estrazione dei metalli pesanti dal legno. Il legno viene frantumato in pezzi (chip) di dimensione opportuna e stivato in un reattore (sezione $S = 2 \text{ m}^2$, altezza $H = 5 \text{ m}$). Dalla sommità del reattore il legno cippato (area superficiale specifica paria a $a(d) = 4/d$, con d dimensione caratteristica del cippato) viene bagnato con una soluzione di acido solforico che viene alimentata dall'alto ($Q_L = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$). Dalla base del reattore viene estratta la soluzione arricchita in metalli pesanti.

1. Impostare un bilancio di massa sulla soluzione di lavaggio per descrivere il trasferimento di metalli pesanti dalla fase solida (chip di legno) alla fase liquida;
2. Ipotizzando che la variazione di concentrazione di metalli pesanti all'interfaccia solido-liquido rimanga pari a C_{int} e che il cippato abbia dimensione caratteristica $d = 8 \text{ mm}$, calcolare il valore del coefficiente di trasferimento di massa se la concentrazione di metalli pesanti nel liquido in uscita è pari a $0.90 C_{int}$.
3. Calcolare quale sarebbe la concentrazione di metalli pesanti nel liquido in uscita se la dimensione dei chips fosse ridotta a $d = 2 \text{ mm}$.

qq.

Per abbattere le emissioni di un composto odorigeno da una corrente di processo ($Q = 18000 \text{ m}^3/\text{h}$, $C = 20000 \text{ O}_u/\text{m}^3$) si utilizza un filtro a carboni attivi. Il flusso viene alimentato al filtro (una schiuma porosa, supportata da carboni attivi) contenuto in un parallelepipedo di dimensioni $W=3 \text{ m}$, $H=3 \text{ m}$ e lungo $L = 5 \text{ m}$ dove il composto odorigeno viene adsorbito sulla superficie del filtro ($k = 10^{-4} \text{m/s}$) e degradato. Sapendo che in uscita dal filtro si vuole ottenere una concentrazione di composto odorigeno pari a $C_{out} = 200 \text{ O}_u/\text{m}^3$,

1. calcolare l'efficienza di abbattimento del filtro;
2. impostare il bilancio di massa sulla fase gas e calcolare quale dev'essere l'area specifica del filtro a carboni attivi per realizzare l'abbattimento desiderato;

3. Sapendo che la sovrappressione disponibile per trattare la corrente è al più pari a $5 Pa$, e le perdite di carico per attraversamento del filtro a carboni attivi sono date da $\Delta p = \mu K_H L V$ dove V è la velocità superficiale di attraversamento del filtro e $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ è la viscosità dell'aria, si chiede di determinare quale tipo di supporto a carboni attivi sia più conveniente tra quelli proposti dal fornitore:

	a [m^3/m^3]	K_H	Costo/ m^3
S1	5200	10^9	1500
S2	10400	$1.8 \cdot 10^5$	2300

rr.

Per alimentare un reattore da laboratorio si utilizza una colonna a riempimento contenente un reagente solido (A) che deve essere disciolto in fase liquida. Il liquido (portata $Q = 0.5 l/s$), inizialmente a concentrazione nulla in A, deve arricchirsi fino a raggiungere $C = 0.7C_{sat}$ prima dell'ingresso nel reattore perchè il processo sia economicamente vantaggioso.

1. Impostare l'equazione di conservazione che controlla il trasferimento di massa dal solido al liquido;
2. Sapendo che $a_{int} = 10^4 m^2/m^3$ e che il coefficiente di trasferimento di massa è $k = 10^{-6} m/s$, calcolare quanto deve essere lunga la colonna se $D_c = 0.2 m$;
3. Valutare come si potrebbe modificare il progetto della colonna per minimizzarne l'ingombro.

ss.

Presso un laboratorio chimico si effettuano test di eluizione per valutare il grado di inquinamento di materiale roccioso estratto da cava prima che questo possa essere utilizzato come materiale di riempimento. L'apparecchiatura di test è costituita da una colonna ($D = 0.2 m$, $L = 1 m$) che viene caricata con il materiale roccioso frantumato ($a_{int} = 10^4 m^2/m^3$). Acqua distillata ($Q = 1 l/s$) viene alimentata dall'alto della colonna per solubilizzare dalla fase solida e assorbire in fase liquida i composti inquinanti eventualmente presenti.

1. Impostare l'equazione di conservazione che controlla il trasferimento di massa dal solido al liquido;
2. Sapendo che la concentrazione in fase liquida di un inquinante risulta pari a $C(L) = 300 \mu g/l$, valutare quale deve essere il contenuto di inquinante in fase solida se il coefficiente di trasferimento di massa è $k = 10^{-6} m/s$.
3. Discutere come si potrebbe agire per modificare le condizioni di test per poter rilevare anche inquinanti presenti solo in micro concentrazioni nel solido.

tt.

Per ridurre il tenore di umidità di polveri alimentari si utilizza un essiccatore, costituito da un tubo in cui aria calda e secca trasporta in fase sospesa le particelle da essiccare.

1. Note la portata di aria di trasporto, Q , le caratteristiche delle particelle (diametro, D_p , densità, ρ_p , tenore di umidità della particella, $X_{p,0}$, [kg acqua/kg solido]), impostare l'equazione di conservazione che consente di descrivere come cambia il tenore di umidità per la fase sospesa (assumere che sia nota la velocità di trasferimento di massa dalla particella alla fase gas, e che il trasferimento non modifichi il tenore di umidità del gas, X_g);
2. Determinare come varia X_p lungo l'apparecchiatura.
3. Discutere su quali parametri (caratteristiche dell'apparecchiatura, parametri di processo) si potrebbe agire per poter ridurre al massimo il tenore di umidità residua nelle particelle in uscita dall'essiccatore.

uu.

In un impianto di ossidazione anodica si utilizza uno scrubber per lavare i vapori contenenti H_2SO_4 aspirati nella zona che si affaccia sulle vasche di processo. I gas vengono convogliati alla base della colonna di lavaggio, dove risalgono incontrando in contro-corrente le goccioline di liquido (acqua e soda) che scendono per gravità. La presenza della soda fa sì che l'acido venga neutralizzato una volta assorbito in fase liquida.

1. Impostare il bilancio di massa sulla fase gas per descrivere il trasferimento di H_2SO_4 dalla fase gas alla fase liquida (gocce disperse di diametro $d_p = 100 \mu m$ e frazione volumetrica $\epsilon = 0.3$ nel volume di controllo); Sapendo che il coefficiente di trasferimento di massa può essere espresso come $K = k_0/d_p$, con $k_0 = 3.6 \cdot 10^{-10}$ e K espresso in m/s , determinare quanto dev'essere lunga la colonna per abbattere al 95% l'acido se la portata del gas è $Q_G = 10,000 m^3/h$ e il diametro della colonna è $4 m$.
2. Per ridurre l'ingombro dell'apparecchiatura si può scegliere se (i) aumentare la portata d'acqua da atomizzare (raddoppiando la frazione volumetrica di acqua in colonna), o (ii) atomizzare più finemente la stessa quantità di liquido. Discutere pro e contro delle due alternative.

vv.

In un impianto industriale si utilizza una colonna ad assorbimento per lavare vapori contenenti H_2SO_4 provenienti da un processo di ossidazione anodica. L' H_2SO_4 viene assorbita da acqua additivata con soda ($NaOH$) che scorre lungo il riempimento strutturato. La soda reagisce con l' H_2SO_4 formando Na_2SO_4 che precipita in soluzione. Si sa che la portata di gas da trattare è pari a $Q = 7 \text{ m}^3/s$, la concentrazione di H_2SO_4 all'ingresso in colonna è $C_0 = 500 \text{ mg/m}^3$, la sezione della torre di lavaggio è di 5 m^2 . Il coefficiente di trasferimento di massa, misurato sperimentalmente, è pari a $k = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

1. impostare un bilancio di massa sulla fase gas per descrivere il trasferimento dell' H_2SO_4 dalla fase gas alla fase liquida;
2. Sapendo che la porosità del letto impaccato è pari a 0.60, che l'altezza del letto impaccato è pari a 2.5 m, e che la dimensione caratteristica del riempimento è $d = 1 \text{ cm}$, calcolare a quale concentrazione si riesce a portare il gas in uscita dallo scrubber;
3. l'ARPA ha imposto alla ditta un limite di concentrazione per l'emissione a camino di H_2SO_4 pari a 5 mg/m^3 . Calcolare quale dovrebbe essere l'efficienza di abbattimento dello scrubber per rispettare le specifiche;
4. Come si potrebbe modificare la configurazione della torre per raggiungere l'obiettivo di abbattimento desiderato?