

Homework N° 4: apparecchiature per il trasferimento di massa

a.

In un impianto industriale si utilizza una colonna ad assorbimento per lavare vapori contenenti H_2S provenienti da una camera di combustione. L' H_2S viene assorbito da un film liquido che scorre lungo le pareti della colonna. Il coefficiente di trasferimento di massa è dato dalla seguente espressione:

$$\frac{kz}{D} = 0.69 \left(\frac{zv_0}{D} \right)^{0.5} \quad (1)$$

dove z è la posizione lungo la colonna, v_0 è la velocità media del film e D è il coefficiente di diffusione. Si sa che il film di liquido alla parete ha le seguenti caratteristiche: spessore $\delta = 0.07 \text{ cm}$, $v_0 = 3 \text{ cm/s}$ e che il coefficiente di diffusione dell' H_2S in acqua è $D = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Sapendo che il diametro della colonna è pari a $d = 2 \text{ m}$,

1. impostare un bilancio di massa per descrivere il trasferimento dell' H_2S dalla fase gas alla fase liquida;
2. determinare quale deve essere l'altezza della colonna perchè la concentrazione in fase liquida raggiunga un valore $0.1 \cdot C_{sat}$ assumendo che la concentrazione all'interfaccia gas/film rimanga pari a C_{sat} .

b.

Un fiume scorre con velocità $u = 0.5 \text{ m/s}$ e livello $h = 2 \text{ m}$ a valle di una zona inquinata dove la concentrazione di O_2 disciolto è scesa a $C = 2 \text{ mg/l}$ provocando una moria di pesci. Sapendo che lo scambio di O_2 attraverso l'interfaccia avviene con costante di trasferimento data da:

$$k_l = \frac{3.9 \cdot 10^{-2} u^{0.5}}{h^{1.5}} \quad (2)$$

e che la concentrazione di ossigeno in aria a pressione atmosferica a $25^\circ C$ è pari a $C_{sat} = 8 \text{ mg/l}$,

1. impostare un bilancio di massa per descrivere il trasferimento dell' O_2 attraverso la superficie libera della corrente;
2. determinare a che distanza a valle dello scarico industriale la concentrazione di O_2 risale a valori accettabili (6 mg/l) per la fauna ittica.

c.

Per ridurre il tenore di CO_2 di fumi all'uscita di un combustore si utilizza una colonna ad assorbimento in cui il gas è a contatto con un film di liquido. Sapendo che la portata del film per unità di lunghezza è pari a $\Gamma = 0.05 \text{ kg/s m}$, che il coefficiente di trasferimento di

massa misurato dopo una lunghezza $L = 5 \text{ m}$ del film è dato da:

$$k_L = \left(\frac{6D\Gamma}{\pi\rho\delta L} \right)^{0.5} \quad (3)$$

dove $D = 1.96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ è il coefficiente di diffusione della CO_2 nel liquido, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ è la densità del liquido e lo spessore del film è dato dalla legge:

$$\delta = \left(\frac{3\mu\Gamma}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \quad (4)$$

dove $\mu = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, calcolare la concentrazione di CO_2 nel film a distanza L se la concentrazione all'interfaccia è $C_{sat} = 0.0336 \text{ kmol/m}^3$.

d.

In un impianto industriale si utilizza uno scrubber a liquido per lavare vapori contenenti VOC provenienti da un processo di resinatura. I VOC vengono assorbiti da gocce di liquido nebulizzate all'interno di una torre di assorbimento in cui il gas viene fatto fluire dal basso verso l'alto mentre le gocce cadono per gravità. Si sa che la portata di gas da trattare è pari a $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentrazione dei VOC è $C_{sat} = 5 \text{ mg/m}^3$, la sezione della torre di lavaggio è di 5 m^2 , e il coefficiente di diffusione dei VOC in fase liquida è pari a $D = 2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, la viscosità del gas è $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Ipotizzando che il trasferimento tra gas e liquido avvenga secondo la legge:

$$J(z) = D \frac{C_{sat} - C(z)}{D_p/2} \quad (5)$$

con $C(z)$ concentrazione nella goccia alla generica posizione lungo la colonna e D_p diametro della goccia,

1. impostare un bilancio di massa per descrivere il trasferimento dei VOC dalla fase gas alla fase liquida;
2. determinare quali devono essere le dimensioni della goccia perchè la concentrazione in fase liquida raggiunga un valore $0.8 \cdot C$ quando la goccia arriva alla base della torre lunga 5 m .

e.

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.

f.

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%.

g.

In un impianto industriale si preleva acqua da un serbatoio per alimentare la sommità di una colonna di assorbimento a film alta $H = 20 \text{ m}$ e di diametro $D_{col} = 2 \text{ m}$ che deve trattare gas contenente vapori di H_2S .

1. Determinare la potenza della pompa che permette di sollevare una portata di progetto del liquido di lavaggio, $Q = 12 \text{ l/s}$, utilizzando una tubazione di diametro $D_{pipe} = 0.1 \text{ m}$.
2. Nel corso del tempo lungo la tubazione è stata osservata la formazione di aggregati calcarei ($D_p = 2 \text{ mm}$, $\rho_p = 1500 \text{ kg/m}^3$) che dovrebbero essere separati dal liquido di lavaggio prima che questo arrivi in colonna di assorbimento. Il responsabile di impianto decide di utilizzare il tratto di tubo verticale come sezione di 'sedimentazione' dell'impianto. Determinare di quanto bisogna ridurre la velocità del liquido di lavaggio nel tubo di sollevamento per evitare il trascinamento del calcare in colonna.
3. Impostare il bilancio di massa per descrivere il trasferimento di H_2S dal gas al liquido di lavaggio, ipotizzando che la concentrazione di gas all'interfaccia del film rimanga pari a C_{sat} e che il coefficiente di trasferimento di massa sia pari a K (costante).

4. Valutare che impatto ha, in termini di massa di H_2S assorbito in fase liquida, far funzionare la colonna ad una portata di liquido di lavaggio ridotta se lo spessore del film è dato da:

$$\delta = \left(\frac{3\mu\Gamma}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \quad (6)$$

e il coefficiente di trasferimento locale di massa è dato da:

$$K(x) = \left(\frac{6D\Gamma}{\pi\rho\delta x} \right)^{0.5} \quad (7)$$

dove Γ è la portata in massa di film per unità di perimetro della colonna, $D = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ è il coefficiente di diffusione dell' H_2S in acqua e x è la posizione lungo la colonna.

h.

Un impianto industriale richiede l'installazione di una colonna ad assorbimento per lavare vapori contenenti VOC provenienti da un processo di resinatura. I VOC vengono assorbiti in fase liquida mentre il gas sale lungo la colonna e il liquido scende su un riempimento strutturato di cui si deve scegliere la dimensione. Il coefficiente di trasferimento di massa è dato dalla seguente espressione:

$$\frac{kd}{D} = 25 \left(\frac{dv_o}{\nu} \right)^{0.45} \cdot \left(\frac{\nu}{D} \right)^{0.5}, \quad (8)$$

dove d è la dimensione caratteristica del riempimento e D è il coefficiente di diffusione, v_o è la velocità superficiale del liquido nella colonna. Si sa che: la portata di gas da trattare è pari a $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentrazione dei VOC in fase gas è $C_{sat} = 10 \text{ mg/m}^3$, la sezione della torre di lavaggio è di 6 m^2 , la colonna è lunga $L = 5 \text{ m}$, il coefficiente di diffusione dei VOC in fase liquida è pari a $D = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e la portata del liquido di lavaggio è pari a $Q = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

1. impostare il bilancio di massa sulla fase liquida per descrivere il trasferimento dei VOC dalla fase gas alla fase liquida;
2. dire quale tra le dimensioni proposte per il riempimento strutturato permette di ottenere alla base della colonna una concentrazione in fase liquida pari a $0.75 \cdot C_{sat}$.

i.

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.

Tipo riempimento	d [mm]	a [m^2/m^3]
Berl Saddles	50	105
	38	150
	25	250
	13	465

TABLE I: Dimensione caratteristica dei riempimenti proposti per la colonna di assorbimento.

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 $K = 1 \cdot 10^{-4} m/s$, calcolare come varia la concentrazione di ammoniaca nel gas mentre le bolle si muovono attraverso il reflu in funzione del diametro delle bolle insufflate.
3. Calcolare la concentrazione del gas in uscita dal reflu se le bolle di aria insufflate hanno diametro pari a $d_b = 1 \text{ mm}$.

j.

I fumi di un impianto che produce pannelli di legno ($Q = 3.5 \text{ Nm}^3/s$, c.n. $0^\circ C$ e 1 atm , $M = 29 \text{ kg}/\text{kmole}$) 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 $k = 7 \cdot 10^{-6} m/s$, che la temperatura dei gas in colonna è pari a $50^\circ C$ e che il riempimento è caratterizzato da una superficie specifica $a = 5000 \text{ m}^2/m^3$, calcolare quanto VOC viene rimosso dal gas se la concentrazione in ingresso è $C_{in} = 10 \mu g/m^3$;
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 ($a' = 10000 \text{ m}^2/m^3$). Verificare

se questa soluzione permetterebbe di adeguare la concentrazione in uscita al nuovo limite di legge ($0.5 \mu g/m^3$).

k.

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 $C_{int} = 5 \text{ mg}/l$) 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 $5 \mu g/l$ (portata di lavaggio pari a $Q = 0.1 \text{ l}/s$, area specifica di trasferimento $a = 100 \text{ m}^2/m^3$). Suggerimento: considerare la portata ricircolante sul segmento di colonna equivalente a una portata non ricircolante su una colonna di lunghezza maggiore.

l.

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

1. Impostare un bilancio di massa sulla bolla di azoto che sale attraverso il reflu 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 ($C_{NH_3,int} = cost$), determinare quale dovrebbe essere il diametro delle bolle per avere nel gas estratto una concentrazione pari a $0.6 C_{NH_3,int}$ (assumere regime di Stokes per la bolla di gas e coefficiente di trasferimento di massa $k = 2 \cdot 10^{-8} m/s$).