

IMPIANTI CHIMICI, AA 2010/2011  
Homework n.5: trasferimento di massa

1

---

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  $C_{sat}$ .

2

---

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 ( $6 \text{ mg/l}$ ) per la fauna ittica.

3

---

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  $C_{sat} = 0.0336 \text{ kmol/m}^3$ .

4

---

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  $5 \text{ m}^2$ , 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.

## 5

---

Si deve progettare un sistema di assorbimento a uno stadio di equilibrio per assorbire in fase liquida l'acetone presente in una corrente di gas. La relazione di equilibrio per la concentrazione di acetone in fase liquida e gassosa è data da  $y_e = 1.9 \cdot x_e$ . Sapendo che le specifiche di progetto sono:

- quantità di gas da lavare (aria + acetone): 100 moli di miscela/ora;
- la concentrazione di acetone in ingresso: 30% (moli acetone/moli miscela);

determinare quante moli di liquido devono essere impiegate per ottenere il grado di assorbimento dell'acetone richiesto.

## 6

---

Una corrente di gas contenente acetone e aria deve essere trattata in una apparecchiatura a uno stadio di equilibrio in modo che l'acetone possa essere assorbito in fase liquida. La corrente di gas in ingresso è 1% molare in acetone e ha portata pari a 30 kmoli/h. La portata dell'acqua di lavaggio (pura) è pari a 90 kmoli/h. Il processo avviene a temperatura e pressione costanti e la relazione di equilibrio per l'acetone nel sistema gas/liquido è  $y_e = 2.53 \cdot x_e$ . Assumendo che aria e acqua siano immiscibili e che le portate molari entranti e uscenti dallo stadio siano costanti,

1. determinare il fattore di assorbimento per lo stadio di equilibrio;
2. determinare la concentrazione di acetone nelle correnti all'uscita.

## 7

---

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.

## 8

---

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 odorogeni 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  $1.2 \text{ kg/m}^3$  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%.

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 trascinarsi 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 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  $\Gamma$  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.

## 10

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  $6 \text{ m}^2$ , 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  $0.75 \cdot C_{sat}$ .

Tipo riempimento	Dimensione caratteristica [mm]	Area per unità di volume [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]
Berl Saddles	50	105
	38	150
	25	250
	13	465

Tabella 1: Dimensione caratteristica dei riempimenti proposti per la colonna di assorbimento.