

Esercitazione di Meccanica dei fluidi con Fondamenti di Ingegneria Chimica

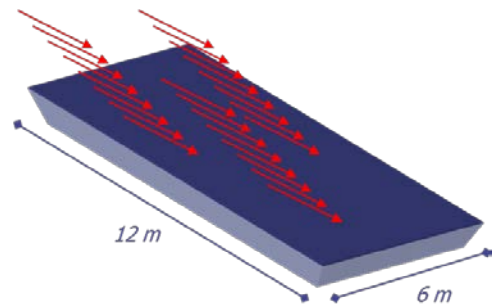
Esercitazione 6 (FIC) - 21 Gennaio 2016

Scambio di materia (II)

Esercizio 1 – Evaporazione di acqua da una piscina

Stimare la perdita giornaliera di acqua da una piscina esposta alla atmosfera.

Temperatura	25 °C
Umidità relativa	50%
Velocità	2 m/s
Densità dell' aria	1.1 kg/m ³
Diffusività dell' acqua in aria	0.26 × 10 ⁻⁴ m ² /s
Viscosità	1.5 × 10 ⁻⁵ kg/(m s)
Densità dell' acqua	1000 kg/m ³
Densità di vap. saturo (25 °C)	0.0226 kg/m ³



Esercizio 2 – Evaporazione di una gocciolina di acqua

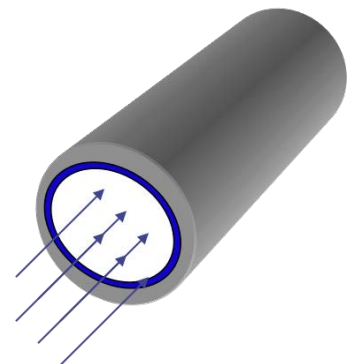
Calcolare il tempo necessario ad evaporare una gocciolina di acqua del diametro di 8 mm. Si assuma la temperatura interna del liquido uniforme e pari alla temperatura di bolla 100 °C. Al temperatura dell'aria circostante è 500 °C mentre il numero di Nusselt in queste condizioni è circa 2.

<i>T</i> gocciola	100 °C	<i>Nu</i>	2
<i>T</i> esterna	500 °C	<i>D</i> Hevap	2.26 10 ⁶ j/kg
Diametro	8 mm	Conducibilità	0.025 W/(mK)

Esercizio 3 – Rimozione di un film d'acqua da una tubazione

Un sottile film di acqua si è formato sulla superficie interna di un tubo di diametro e lunghezza assegnati. Si decide di rimuovere il liquido utilizzando una corrente di aria secca con portata 1 × 10⁻² kg/s transitante all' interno del tubo. Il tubo e l'aria sono a 20 °C. Determinare il coefficiente di scambio materiale. Determinare il flusso massivo e molare dell' acqua sia nel caso di aria secca che nel caso di aria con umidità relativa del 50%.

Diametro	20 mm	Portata dell' aria	1 × 10 ⁻² kg/s
Lunghezza	3 m	Densità dell' aria	1.1 kg/m ³
Densità dell' acqua	1000 kg/m ³		
Densità di vapore saturo (20 °C)	0.022 kg/m ³		
Diffusività acqua in aria	0.26 × 10 ⁻⁴ m ² /s		
Viscosità	1.5 × 10 ⁻⁵ kg/(m s)		



Esercizio 4 – Bonifica di un serbatoio

Le operazioni di bonifica e pulitura di apparecchiature di stoccaggio di idrocarburi possono essere effettuate utilizzando un corrente di azoto N₂ puro. In questo ambito si supponga di avere un idrocarburo

come il decano $C_{10}H_{22}$ depositato come un sottile film sul fondo di un contenitore rettangolare delle dimensioni di 3m per 10m considerato alla stessa temperatura del flusso di azoto. Si trascurino gli effetti dovuti alla presenza delle pareti verticali:

- 1- Determinare il coefficiente di scambio materiale conseguente al passaggio di un flusso di azoto, parallelo alla lunghezza, alla pressione di 1atm e temperatura di 90°C.
- 2- Determinare il flusso massivo e molare conseguente alla rimozione del decano da parte dell'azoto
- 3- Calcolare il tempo necessario alla totale rimozione di un film dello spessore di 1mm.

<i>Larghezza</i>	<i>3 m</i>	<i>Diffusività $C_{10}H_{22}-N_2$</i>	<i>$0.0841 \times 10^{-4} m^2/s$</i>
<i>Lunghezza</i>	<i>10 m</i>	<i>Densità di vap. saturo (90°C)</i>	<i>$0.2657 kg/m^3$</i>
<i>Pressione</i>	<i>1atm</i>	<i>Densità idrocarburo</i>	<i>$900 kg/m^3$</i>
<i>Temperatura</i>	<i>90°C</i>	<i>Viscosità</i>	<i>$2.0 \times 10^{-5} kg/(m s)$</i>
<i>Velocità azoto</i>	<i>10 m/s</i>		

Esercizio 5 – Diffusione di CO2 tra due serbatoi

Un serbatoio contiene il 15% molare di CO2 in aria ed è collegato con un secondo serbatoio contenente solo aria. La tubazione di collegamento è lunga 30 cm e di diametro pari a 5 cm. Entrambi i serbatoi si trovano a 1 atm e a 298 K. Il volume di ciascun serbatoio è molto elevato rispetto al volume di gas contenuto nella tubazione di collegamento, così che le variazioni di concentrazione possano essere trascurate per lungo tempo. Il coefficiente di diffusione materiale della CO2 in aria a 25°C e 1 atm è pari a $0.164 \cdot 10^{-4} m^2/s$. Si valuti il valore iniziale del flusso massivo di CO2.

Esercizio 6 – Condotta di elio

La pressione di una tubazione che trasporta elio ad una portata massiva di 2 kg/s è mantenuta al valore di 1 atm grazie ad un sottile (diametro interno 5 mm) tubicino di lunghezza pari a 15 m attraverso cui l'elio può diffondere nell'aria esterna. Assumendo che sia l'aria che l'elio si trovino alla temperatura di 25°C, si determinino:

1. la portata massiva di elio persa nell'aria esterna;
2. la frazione massiva di aria che si registra nella tubazione principale a valle dell'attacco del tubo di sfogo.

Si assuma la diffusività dell'elio in aria pari a $7.20 \cdot 10^{-5} m^2/s$.

Esercizio 7 – Diffusione dell'idrogeno attraverso un serbatoio sferico

Dell'idrogeno in pressione è contenuto all'interno di un serbatoio sferico di diametro esterno pari a 4.8 m alla temperatura di 358K. Il serbatoio è realizzato in nickel e ha uno spessore di 6 cm. La concentrazione di idrogeno sulla superficie interna del serbatoio è pari a 0.087 kmol/m³. La concentrazione di idrogeno all'esterno può essere assunta pari a zero. Si assuma una diffusività dell'idrogeno attraverso il nickel pari a $1.2 \cdot 10^{-12} m^2/s$.

- a. Si determini il flusso massivo di idrogeno attraverso la parete del serbatoio.
- b. Tenendo conto del fatto che la frazione molare di idrogeno nell'aria è intorno a 0.5 ppm, si discuta se l'ipotesi fatta al punto precedente di ritenere trascurabile tale valore sia ragionevole o no, quantificando l'errore commesso sul flusso massivo.

Esercizio 8 – Diffusione di elio attraverso un serbatoio sferico e cilindrico

Si immagini di avere un serbatoio sferico di diametro interno pari a 1.2 m in cui sia contenuto dell'elio alla temperatura di 320 K. Il serbatoio è realizzato in acciaio e lo spessore della parete è pari a 5 cm. Il serbatoio è poi rivestito esternamente da uno strato di isolante di spessore pari a 0.8 cm. La concentrazione di elio sulla superficie interna del serbatoio è pari a 0.080 kmol/m³. La frazione molare di elio in aria è pari a circa 5.24 ppm. Le diffusività dell'elio attraverso l'acciaio e l'isolante vengano assunte rispettivamente pari a $0.7 \cdot 10^{-12} m^2/s$ e $346 \cdot 10^{-12} m^2/s$.

- a. Si determini il flusso massivo di elio verso l'esterno che si realizza attraverso la parete del serbatoio.
- b. Quale sarebbe invece il flusso massivo se il serbatoio avesse una forma cilindrica ($H=2D$) e lo stesso volume (interno) di quello sferico? Si assumano gli stessi spessori per l'acciaio e l'isolante.

Esercitazione di Meccanica dei fluidi con Fondamenti di Ingegneria Chimica

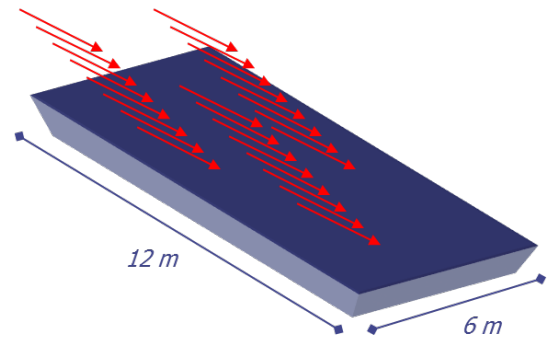
Esercitazione 12 – 23 Gennaio 2014

Scambio di materia (II)

Esercizio 1 – Evaporazione di acqua da una piscina

Stimare la perdita giornaliera di acqua da una piscina esposta alla atmosfera.

Temperatura	25°C
Umidità relativa	50%
Velocità	2 m/s
Densità dell' aria	1.1 kg/m ³
Diffusività dell' acqua in aria	0.26×10 ⁻⁴ m ² /s
Viscosità	1.5×10 ⁻⁵ kg/(ms)
Densità dell' acqua	1000 kg/m ³
Densità di vap. saturo (25°C)	0.0226 kg/m ³



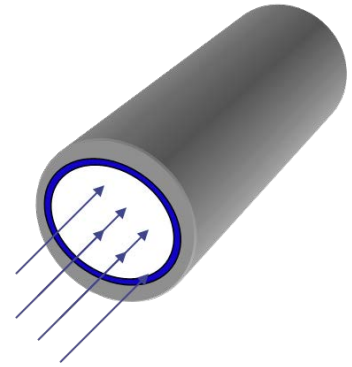
Esercizio 2 – Evaporazione di una gocciolina di acqua

Calcolare il tempo necessario ad evaporare una goccia di acqua del diametro di 8 mm. Si assuma la temperatura interna del liquido uniforme e pari alla temperatura di bolla 100°C. Al temperatura dell'aria circostante è 500°C mentre il numero di Nusselt in queste condizioni è circa 2.

<i>T goccia</i>	100	°C
<i>T esterna</i>	500	°C
<i>Diametro</i>	8	mm
<i>Conducibilità</i>	0.025	W/(mK)
<i>Nu</i>	2	
<i>DHevap</i>	2.26	10 ⁶ j/kg

Esercizio 3 – Rimozione di un film d'acqua da una tubazione

Un sottile film di acqua si è formato sulla superficie interna di un tubo di diametro e lunghezza assegnati. Si decide di rimuovere il liquido utilizzando una corrente di aria secca con portata $1 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ transitante all'interno del tubo. Il tubo e l'aria sono a 20°C . Determinare il coefficiente di scambio materiale. Determinare il flusso massivo e molare dell'acqua sia nel caso di aria secca che nel caso di aria con umidità relativa del 50%.



Diametro	20 mm
Lunghezza	3 m
Portata dell'aria	$1 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$
Densità dell'aria	1.1 kg/m^3
Densità dell'acqua	1000 kg/m^3
Densità di vapore saturo (20°C)	0.022 kg/m^3
Diffusività materiale dell'acqua in aria	$0.26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosità	$1.5 \times 10^{-5} \text{ kg/(m s)}$

Risoluzione. Per determinare il coefficiente di scambio materiale si deve verificare il tipo di regime fluido dinamico del sistema all'interno del tubo.

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} = 42462 \quad \text{Sc} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = 0.5244$$
$$\rho v = \frac{G}{A}$$

Si può quindi stimare il numero di Nusselt materiale:

$$\text{Nu}_m = \text{Sh} = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Sc}^{\frac{1}{3}} = 93.478$$

Ottenendo il coefficiente di scambio h:

$$h_m = \frac{\text{Nu}_m D_{AB}}{D} = 0.1215 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Applicando la legge di Fick è possibile stimare il flusso massivo complessivo di acqua dalle pareti all'aria, dove ϕ indica la umidità relativa:

$$J = h_m \cdot \rho_{\text{sat}} \cdot (1 - \phi) = 1.33 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Mentre nel caso di aria completamente secca:

$$J = h_m \cdot \rho_{\text{sat}} \cdot (1 - \phi) = 2.67 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Il flusso molare è facilmente calcolabile come ad esempio nel primo caso:

$$N = \frac{J}{PM_{\text{H}_2\text{O}}} = 7.42 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Esercizio 4 – Bonifica di un serbatoio

Le operazioni di bonifica e pulitura di apparecchiature di stoccaggio di idrocarburi possono essere effettuate utilizzando un corrente di azoto N_2 puro. In questo ambito si supponga di avere un idrocarburo come il decano $C_{10}H_{22}$ depositato come un sottile film sul fondo di un contenitore rettangolare delle dimensioni di 3m per 10m considerato alla stessa temperatura del flusso di azoto. Si trascurino gli effetti dovuti alla presenza delle pareti verticali:

- 1- Determinare il coefficiente di scambio materiale conseguente al passaggio di un flusso di azoto, parallelo alla lunghezza, alla pressione di 1atm e temperatura di 90°C.
- 2- Determinare il flusso massivo e molare conseguente alla rimozione del decano da parte dell'azoto
- 3- Calcolare il tempo necessario alla totale rimozione di un film dello spessore di 1mm.

Larghezza	3 m
Lunghezza	10 m
Pressione	1atm
Temperatura	90°C
Velocità azoto	10 m/s
Diffusività $C_{10}H_{22}-N_2$	$0.0841 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosità	$2.0 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m s})$
Densità idrocarburo	$900 \text{ kg}/\text{m}^3$
Densità di vap. saturo (90°C)	$0.2657 \text{ kg}/\text{m}^3$

E' necessario calcolare la densità della corrente di azoto che investe la lastra.

$$PV = nRT$$

$$\rho = \frac{P}{RT} \cdot PM_{N_2} = 0.94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Per determinare il coefficiente di scambio materiale si deve verificare il tipo di regime fluido dinamico del sistema all'interno del tubo.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = 4.7 \times 10^6$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = 2.529$$

Si può quindi stimare il numero di Nusselt materiale.

$$Nu_m = Sh = \left(0.037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} - 871 \right) \cdot Sc^{\frac{1}{3}} = 9783.05$$

Ottenendo il coefficiente di scambio h

$$h_m = \frac{Nu_m D_{AB}}{L} = 8.22 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Applicando la legge di Fick è possibile stimare il flusso massivo complessivo.

$$J = h_m \cdot \rho_{sat} \cdot A = 6.55 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

che in termini molari diventa: $N = 4.612 \times 10^{-2} \frac{mol}{s}$

L'esercizio si risolve considerando un bilancio di materia complessivo su tutto il film di liquido.

$$\rho_{C_{10}} \frac{dV_l}{dt} = -h_m \cdot A \cdot \rho_{sat}$$

$$t = 412.21s \cong 7 \text{ min}$$

Esercizio 5 – Diffusione di CO2 tra due serbatoi

Un serbatoio contiene il 15% molare di CO2 in aria ed è collegato con un secondo serbatoio contenente solo aria. La tubazione di collegamento è lunga 30 cm e di diametro pari a 5 cm. Entrambi i serbatoi si trovano a 1 atm e a 298 K. Il volume di ciascun serbatoio è molto elevato rispetto al volume di gas contenuto nella tubazione di collegamento, così che le variazioni di concentrazione possano essere trascurate per lungo tempo. Il coefficiente di diffusione materiale della CO2 in aria a 25°C e 1 atm è pari a $0.164 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Si valuti il valore iniziale del flusso massivo di CO2.

Soluzione

a. Soluzione all'istante iniziale

La concentrazione della CO2 può essere valutata attraverso l'equazione di stato dei gas perfetti:

$$C_{CO_2} = \frac{P X_{CO_2}}{RT} = \frac{1 \cdot 101325 \cdot 0.15}{8314 \cdot 298} = 0.006135 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$$

Il flusso diffusivo è dato dalla legge di Fick:

$$J_{CO_2} = \Gamma \frac{C_{CO_2}}{L} = 0.164 \cdot 10^{-4} \frac{0.006135}{0.30} = 3.35 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

In termini massivi:

$$j_{CO_2} = J_{CO_2} PM_{CO_2} = 3.35 \cdot 10^{-7} \cdot 44 = 1.47 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$$

Portate molari e massive:

$$\dot{n}_{CO_2} = J_{CO_2} A = 3.35 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 3.35 \cdot 10^{-7} \cdot 0.001963 = 6.58 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = j_{CO_2} A = 3.35 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = 2.89 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

b. Dinamica di evoluzione della concentrazione di CO2 nei due serbatoi

Bilanci di conservazione della CO2 nei due serbatoi in termini molari. Il pedice 1 fa riferimento al serbatoio contenente solo aria; il pedice 2 al serbatoio contenente inizialmente il 15% di CO2:

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = \dot{n} = \Gamma \frac{C_2 - C_1}{L} A \\ \frac{dn_2}{dt} = -\dot{n} = -\Gamma \frac{C_2 - C_1}{L} A \end{cases}$$

Il volume dei due serbatoi rimane costante nel tempo, per cui è possibile scrivere:

$$\begin{cases} V \frac{dC_1}{dt} = \frac{\Gamma A}{L} (C_2 - C_1) \\ V \frac{dC_2}{dt} = -\frac{\Gamma A}{L} (C_2 - C_1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = \frac{\Gamma A}{VL}(C_2 - C_1) = \gamma(C_2 - C_1) \\ \frac{dC_2}{dt} = -\frac{\Gamma A}{VL}(C_2 - C_1) = -\gamma(C_2 - C_1) \end{cases}$$

Le concentrazioni di CO2 nei due serbatoi sono ovviamente legate dalla seguente relazione:

$$\frac{dC_1}{dt} = -\frac{dC_2}{dt}$$

Dalla sua integrazione si riesce a scrivere la concentrazione C1 in funzione della C2:

$$C_1 - C_1^0 = -C_2 + C_2^0$$

$$C_1 = C_2^0 - C_2$$

Possiamo quindi concentrarci sul solo bilancio per il serbatoio 2:

$$\begin{cases} \frac{dC_2}{dt} = -\gamma(C_2 - C_2^0 + C_2) = -2\gamma C_2 + \gamma C_2^0 \\ C_2(t=0) = C_2^0 \end{cases}$$

L'equazione differenziale sopra riportata puo' essere facilmente integrata grazie alla separazione delle variabili:

$$\frac{dC_2}{C_2 - \frac{C_2^0}{2}} = -2\gamma dt$$

$$\ln \left[C_2 - \frac{C_2^0}{2} \right]_0^t = -2\gamma t$$

$$\ln \frac{C_2 - \frac{C_2^0}{2}}{\frac{C_2^0}{2}} = -2\gamma t$$

$$C_2 - \frac{C_2^0}{2} = \frac{C_2^0}{2} e^{-2\gamma t}$$

$$C_2 = \frac{C_2^0}{2} (1 + e^{-2\gamma t})$$

Quest'ultima relazione consente di descrivere l'andamento nel tempo della concentrazione di CO2 nel serbatoio 2 (e di conseguenza anche nel serbatoio 1):

$$C_2(t) = \frac{C_2^0}{2} \left(1 + e^{-2\frac{\Gamma A}{VL}t} \right)$$

Esercizio 6 – Condotta di elio

La pressione di una tubazione che trasporta elio ad una portata massiva di 2 kg/s è mantenuta al valore di 1 atm grazie ad un sottile (diametro interno 5 mm) tubicino di lunghezza pari a 15 m attraverso cui l'elio può diffondere nell'aria esterna. Assumendo che sia l'aria che l'elio si trovino alla temperatura di 25°C, si determinino:

1. la portata massiva di elio persa nell'aria esterna;
2. la frazione massiva di aria che si registra nella tubazione principale a valle del punto di attacco del tubo di sfogo.

Si assuma la diffusività dell'elio in aria pari a $7.20 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

Soluzione parziale

$$\dot{m}_{He} = 1.54 \cdot 10^{-11} \frac{kg}{s}$$

$$\omega_{air} = 5.6 \cdot 10^{-11}$$

Esercizio 7 – Diffusione dell'idrogeno attraverso un serbatoio sferico

Dell'idrogeno in pressione è contenuto all'interno di un serbatoio sferico di diametro esterno pari a 4.8 m alla temperatura di 358K. Il serbatoio è realizzato in nickel e ha uno spessore di 6 cm. La concentrazione di idrogeno sulla superficie interna del serbatoio è pari a 0.087 kmol/m³. La concentrazione di idrogeno all'esterno può essere assunta pari a zero. Si assuma una diffusività dell'idrogeno attraverso il nickel pari a $1.2 \cdot 10^{-12}$ m²/s.

- a. Si determini il flusso massivo di idrogeno attraverso la parete del serbatoio.
- b. Tenendo conto del fatto che la frazione molare di idrogeno nell'aria è intorno a 0.5 ppm, si discuta se l'ipotesi fatta al punto precedente di ritenere trascurabile tale valore sia ragionevole o no, quantificando l'errore commesso sul flusso massivo.

Esercizio 8 – Diffusione di elio attraverso un serbatoio sferico e cilindrico

Si immagini di avere un serbatoio sferico di diametro interno pari a 1.2 m in cui sia contenuto dell'elio alla temperatura di 320 K. Il serbatoio è realizzato in acciaio e lo spessore della parete è pari a 5 cm. Il serbatoio è poi rivestito esternamente da uno strato di isolante di spessore pari a 0.8 cm. La concentrazione di elio sulla superficie interna del serbatoio è pari a 0.080 kmol/m^3 . La frazione molare di elio in aria è pari a circa 5.24 ppm. Le diffusività dell'elio attraverso l'acciaio e l'isolante vengano assunte rispettivamente pari a $0.7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e $346 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

- a. Si determini il flusso massivo di elio verso l'esterno che si realizza attraverso la parete del serbatoio.
- b. Quale sarebbe invece il flusso massivo se il serbatoio avesse una forma cilindrica ($H=2D$) e lo stesso volume (interno) di quello sferico? Si assumano gli stessi spessori per l'acciaio e l'isolante.