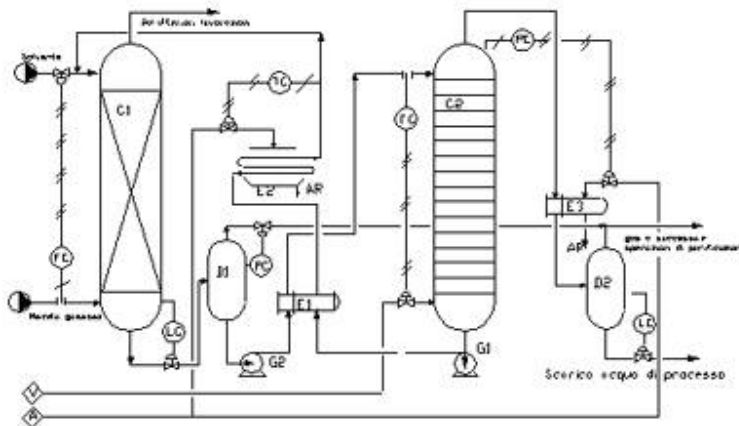


# ITI "G.C.FACCIO" VERCELLI

Dipartimento di Chimica



## TECNOLOGIE CHIMICHE E BIOTECNOLOGIE

Appunti per la classe 5 (ripasso classe 4)

### SCAMBIO TERMICO

## 1 Sistemi materiali e funzioni di stato

Il **calore** è una forma di energia, precisamente è l'energia termica posseduta da un sistema; è associata alle vibrazioni atomiche o molecolari nei solidi, alle vibrazioni ed alle traslazioni nei fluidi (liquidi, gas e vapori). La **temperatura** è invece una variabile di stato (insieme a pressione, volume, ecc.), quindi definisce lo stato di un **sistema** (quantità percettibile di materia, sulla quale si possono effettuare delle misurazioni). La temperatura rappresenta il livello di energia termica di un sistema.

I sistemi in genere si modificano nel tempo, cioè subiscono trasformazioni nelle quali si modificano i valori delle **variabili di stato**, raggruppate opportunamente nelle **funzioni di stato** quali l'entalpia, l'entropia, l'energia libera. Le funzioni di stato sono sempre definite come differenza  $\Delta$  tra il valore della funzione nello stato finale della trasformazione SF e lo stato iniziale SI, mai in valore assoluto.

*Funzioni di stato*

In particolare:

- l'entalpia  $\Delta H$  coincide numericamente con il calore scambiato dal sistema a pressione costante; se il sistema è una reazione chimica, nella quale lo stato iniziale SI sono i reagenti e lo stato finale SF sono i prodotti, si dice che la reazione è esotermica quando si ha liberazione di calore (+Q,  $-\Delta H$ ); al contrario la reazione è endotermica quando si ha assorbimento di calore (-Q,  $+\Delta H$ );
- l'entropia  $\Delta S$  rappresenta il grado di ordine del sistema; una trasformazione disordinante aumenta il disordine e quindi  $\Delta S > 0$  mentre una trasformazione ordinante diminuisce il disordine e quindi  $\Delta S < 0$ ;
- l'energia libera (di Gibbs)  $\Delta G$  è l'energia non vincolata a manifestarsi nel sistema come lavoro meccanico e quindi "libera" di manifestarsi come lavoro elettrico, chimico, ecc. Rappresenta la spontaneità del processo, cioè la sua tendenza ad avvenire nel senso considerato; il processo è spontaneo se  $\Delta G < 0$ , non è spontaneo (cioè tende ad avvenire nel senso opposto) se  $\Delta G > 0$ , è all'equilibrio se  $\Delta G = 0$ . Le trasformazioni **spontanee** sono **irreversibili**; tutte le trasformazioni irreversibili evolvono nel tempo verso una situazione **reversibile**, ovvero raggiungono lo stato di **equilibrio**. L'energia libera è legata alle altre funzioni di stato dalla relazione:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

dalla quale si vede che il segno di  $\Delta G$  dipende dal segno e dal valore delle altre due funzioni di stato.

*Operazioni e processi unitari*

Le tecnologie chimiche studiano le operazioni unitarie e i processi unitari. Le **operazioni unitarie** sono processi fisici (trasporto di solidi e liquidi, macinazione, scambio termico, distillazione, estrazione, ecc.), i **processi unitari** sono processi chimici (idrogenazione, alogenazione, nitratura, solfonazione, ecc.). Lo studio delle operazioni unitarie richiede la progettazione dello schema di processo idoneo e il dimensionamento delle apparecchiature tramite bilanci di materia

e di energia (entalpici o termici, ovvero di calore). Lo studio dei processi unitari prevede l'analisi dell'equilibrio chimico per la determinazione delle condizioni migliori per lo spostamento verso i prodotti per massimizzare le rese (termodinamica) e per aumentare la velocità di reazione tramite l'uso di catalizzatori (cinetica).

Pertanto nei bilanci energetici viene utilizzata l'entalpia, mentre nello studio termodinamico dell'equilibrio chimico viene utilizzata l'energia libera per la determinazione della costante di equilibrio.

## 2 Trasferimento del calore

Il trasferimento di calore è molto diffuso in natura e nell'impiantistica chimica e si ha quando sono a contatto due corpi a diversa temperatura; si tratta di una trasformazione fisica di un sistema, descrivibile con le opportune funzioni di stato. Come postulato dalla Termodinamica (principio 0), il calore si trasferisce sempre spontaneamente dal corpo più caldo a quello più freddo: è quindi sempre necessaria una differenza di temperatura (salto termico) tra i due corpi ed è il salto termico a costituire la forza motrice (spingente) della trasformazione. Il trasferimento del calore può avvenire con diversi meccanismi: conduzione, convezione, irraggiamento.

### 2.1 Conduzione

Si ha nei corpi solidi o nei fluidi (gas, vapori, liquidi) stazionari, dove le particelle di materia non si spostano ma possono solo oscillare attorno alla loro posizione di equilibrio. Il calore si propaga mediante urto tra le particelle oscillanti cioè attraverso il trasferimento di energia vibrazionale.

Si hanno vari casi interessanti da studiare:

*Equazione di Fourier*

- Conduzione attraverso una parete piana: il trasferimento di calore è descritto dall'equazione di Fourier:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{S} \quad (2)$$

dove: Q potenza termica (W), K conducibilità termica del materiale (W/m·°C), A superficie di scambio termico (m<sup>2</sup>), ΔT salto termico (°C), S spessore della parete (m).

l'equazione di Fourier può essere scritta nella forma generale di un'equazione di trasferimento:

$$portata = \frac{\text{forza motrice}}{\text{resistenza}} \quad Q = \frac{\Delta T}{\frac{S}{K \cdot A}}$$

E' possibile generalizzare l'equazione di Fourier per n pareti solide a contatto:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum_1^n \frac{S_i}{A \cdot K_i}}$$

- conduzione attraverso una parete cilindrica: è il caso interessante per i tubi presenti all'interno di uno scambiatore di calore. In questo caso l'equazione di Fourier assume la seguente forma:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K}}$$

dove  $r_2$  e  $r_1$  sono i raggi esterno e interno del condotto cilindrico ed  $L$  è la sua lunghezza.

## 2.2 Convezione

È il meccanismo di trasferimento del calore tipico dei fluidi (liquidi, gas e vapori). Mentre nella conduzione le particelle del materiale non si spostano ma oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio, nella convezione si ha un rimescolamento di materia: le particelle si muovono dal punto più caldo al punto più freddo del sistema e quindi trasferiscono il calore grazie a tali movimenti che vengono definiti **moti convettivi**.

*Convezione  
naturale e  
forzata*

Si può avere convezione naturale se i moti convettivi sono provocati da gradienti di densità a loro volta provocati da gradienti termici; le particelle più calde sono meno dense e quindi tendono a salire, mentre le particelle più fredde sono più dense e quindi tendono a scendere. Si ha invece convezione forzata quando al moto convettivo naturale viene sovrapposto un moto convettivo più intenso generato da un agente esterno (agitatore meccanico, differenza di pressione prodotta da una pompa, ecc.). Inoltre si può avere convezione in regime laminare: quando il fluido si muove ordinatamente mediante filetti fluidi, cioè il numero di Reynold ( $Re$ ) è minore o uguale a 2100, mentre se è superiore si ha convezione in regime turbolento.

Considerando due fluidi in moto turbolento che si scambiano calore attraverso

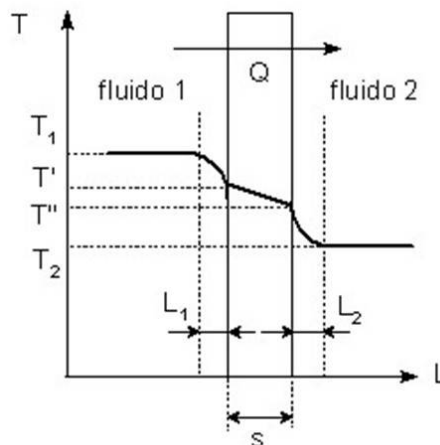


Figura 1: Convezione

una parete solida, riportando il relativo profilo termico, si nota che nei pressi della parete si formano 2 pellicole (o strati laminari) in cui il moto diventa prima

laminare e quindi si arresta del tutto per l'attrito contro la rugosità della parete. Pertanto il calore passa dal fluido caldo al fluido freddo attraverso 3 diverse pareti, due di fluido immobile, una di solido; applicando l'equazione di Fourier a questo sistema si ricava l'equazione complessiva dello scambio termico:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

dove  $Q$  è la potenza termica (W),  $A$  la superficie di scambio termico ( $m^2$ ),  $\Delta T$  il salto termico ( $^{\circ}C$ ) tra i due fluidi ed  $U$  il coefficiente globale di scambio termico. All'interno di  $U$  ( $\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$ ) sono presenti i coefficienti di pellicola relativi agli strati laminari, che possono essere valutati con equazioni dimensionali empiriche specifiche per l'apparecchio utilizzato.

Anche l'equazione (3) può essere scritta come equazione di trasferimento:

$$Q = A \cdot \frac{\Delta T}{\frac{1}{U}}$$

da cui si vede che il termine  $1/U$  rappresenta la resistenza totale al trasferimento di calore, che tiene conto della convezione fluido-parete e viceversa attraverso le pellicole e della conduzione attraverso la parete solida. L'equazione (3) viene di solito utilizzata per calcolare  $A$ , dopo aver determinato  $Q$  tramite i bilanci termici, noto il coefficiente  $U$ .

Il coefficiente  $U$  è poco realistico perché è riferito alla parete pulita; in realtà col tempo nello scambiatore si formano incrostazioni che costituiscono ulteriori resistenze allo scambio di calore; pertanto si definisce il coefficiente totale di scambio termico a pareti incrostate  $U_D$  (dirt = sporco):

$$U_D = \frac{U_C}{1 + U_C \cdot R_D}$$

dove  $U_C$  è il coefficiente a parete pulita,  $U_D$  è il coefficiente a parete incrostate,  $R_D$  è il fattore di sporco, tabellato in funzione dei fluidi che si scambiano calore.

Infine l'equazione utile per il dimensionamento di uno scambiatore è la seguente:

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

## 2.3 Irraggiamento

Qualsiasi corpo a temperatura maggiore dello zero assoluto emette calore sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, dette radiazioni termiche. L'emissione di tali radiazioni termiche è detto irraggiamento, che consiste nell'emissione di energia termica da parte di un corpo in relazione alla sua temperatura. L'irraggiamento diventa importante solo per i corpi sufficientemente caldi: in genere l'emissione cade nel campo spettrale IR ma per i corpi ad elevata temperatura, come ad esempio metalli incandescenti, può arrivare nella zona VS sotto forma di radiazioni rosso-arancio.

L'irraggiamento presenta due peculiarità:

- il calore emesso sotto forma di radiazioni non ha bisogno di un mezzo per propagarsi ma può trasferirsi anche nel vuoto;

*Equazione generale per lo scambio termico*

*Fattore di sporco*

- mentre nella conduzione e nella convezione il flusso di calore (calore trasferito per unità di tempo) dipende da un salto termico (forza spingente o motrice), nell'irraggiamento il flusso termico dipende solo dalla temperatura del corpo che emette.

### Leggi dell'irraggiamento

Per l'irraggiamento vi sono due leggi importanti, entrambe riferite al corpo nero, un emettitore/assorbitore ideale:

- Legge di Stefan-Boltzmann;

$$Q_S = \sigma \cdot T^4$$

dove  $Q_S$  è l'energia totale emessa per unità di tempo e unità di superficie,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann,  $T$  è la temperatura assoluta. Da questa legge si vede che l'energia emessa è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta.

- legge di Wien:

$$T \cdot \lambda_{max} = 2,898 \cdot 10^{-3}$$

dalla quale si evidenzia che all'aumentare della temperatura del corpo nero emettitore diminuisce la lunghezza d'onda corrispondente al massimo della emissione; infatti si passa dalla zona IR dello spettro, a quella VS fino ad arrivare all'UV.

In genere l'irraggiamento viene trascurato nello scambio termico e nella progettazione delle apparecchiature chimiche perchè queste ultime vengono coibentate, cioè isolate termicamente dall'ambiente.

## 3 Scambio termico

Il trasferimento di calore è utilizzato nello scambio termico, operazione unitaria nella quale viene scambiato calore tra due fluidi, utilizzando degli scambiatori di calore. Il calore scambiato può essere:

### Calore sensibile e calore latente

- **calore sensibile**, senza passaggio di stato:

$$Q = F \cdot C_P \cdot \Delta T$$

dove  $Q$  è il calore scambiato (ceduto o acquistato) nell'unità di tempo (quindi è una potenza termica) da una corrente di fluido di portata  $F$ , calore specifico  $C_P$  e con un salto termico pari a  $\Delta T$ .

- **calore latente**, con passaggio di stato:

$$Q = F \cdot \lambda$$

dove  $Q$  e  $F$  hanno lo stesso significato visto prima e  $\lambda$  è il calore latente relativo al passaggio di stato, in genere evaporazione/condensazione.

*Apparecchi per lo scambio termico*

Tenendo conto che in un impianto produttivo si hanno fluidi di processo (quelli direttamente coinvolti nelle operazioni o processi unitari) e fluidi di servizio (acqua di raffreddamento o vapore di rete), si possono distinguere vari **apparecchi per lo scambio termico**:

1. scambiatori di calore: quando i due fluidi che scambiano calore sono entrambi di processo;
2. refrigeranti: quando un fluido di processo viene raffreddato da un fluido di servizio, generalmente acqua;
3. condensatori: quando un vapore di processo viene condensato da un fluido refrigerante di servizio
4. riscaldatori: quando un fluido di processo viene riscaldato, generalmente da vapor d'acqua;
5. ribollitori: quando un liquido di processo viene vaporizzato da un fluido di servizio, generalmente vapor d'acqua.

A seconda delle loro caratteristiche costruttive, negli scambiatori di calore si può realizzare un diverso tipo di scambio termico:

*Equicorrente e controcorrente*

- **scambio in equicorrente**: i due fluidi percorrono lo scambiatore nello stesso senso; è caratterizzato da un  $\Delta T$  poco uniforme e quindi uno scambio di calore poco uniforme ed inoltre non recupera tutto il calore disponibile;
- **scambio termico in controcorrente**: i due fluidi percorrono lo scambiatore in senso inverso, in questo caso il  $\Delta T$  e quindi lo scambio di calore è più uniforme ed il sistema è più efficiente, potendo recuperare una maggiore quantità di calore.

In entrambi i casi il  $\Delta T$  non rimane costante per cui nei calcoli per il dimensionamento degli scambiatori si definisce la **differenza di temperatura media logaritmica**  $\Delta T_{ml}$ :

$\Delta T_{ml}$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (5)$$

dove i due  $\Delta T$  sono riferiti alle estremità dello scambiatore.

Pertanto l'equazione generale per il dimensionamento di uno scambiatore (4) risulta essere così modificata:

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (6)$$

## 4 Scambiatori a fascio tubiero

Sono i più diffusi negli impianti industriali perché sono compatti, hanno ampie superfici di scambio e quindi elevata potenzialità ed hanno ormai sostituito gli scambiatori a tubi concentrici (hairpin) troppo ingombranti

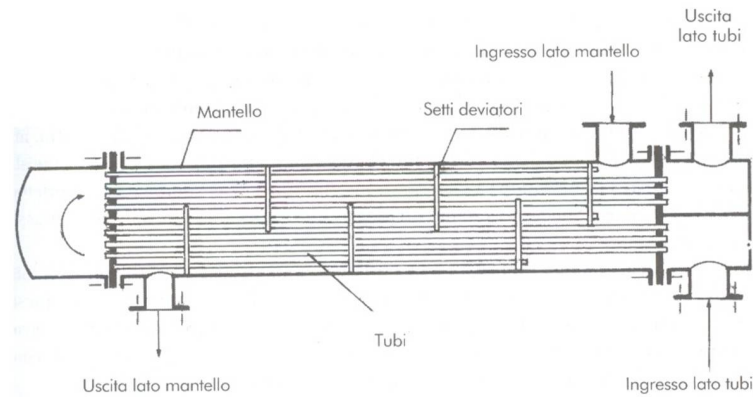


Figura 2: Scambiatore tipo 1:2

Il più semplice scambiatore è costituito da due parti: 2 piastre forate collegate da un fascio di tubi (questo lato di circolazione dei fluidi è detto lato tubi) e da un involucro esterno detto mantello o shell (questo lato di circolazione dei fluidi è detto lato mantello o lato shell). Questo tipo di scambiatore è detto 1:1 (la prima cifra indica il numero di passaggi dal lato mantello, la seconda indica il numero di passaggi dal lato tubi).

Per aumentare l'efficienza si aumentano i passaggi dai due lati mediante una serie opportuna di deviatori di flusso, come ad esempio nel comune scambiatore di tipo 1:2, mostrato nella figura (2). Con questi scambiatori è possibile compattare in un piccolo spazio una grande superficie di scambio termico, corrispondente alla superficie laterale dei tubi del fascio tubiero; il fluido che circola dal lato tubi occupa tutta la sezione interna dei tubi.

I tubi collegati alle piastre poste alle estremità passano attraverso una serie di diaframmi; il tipo di diaframma più semplice è una piastra forata con lo stesso diametro interno dello shell e tagliata a  $\frac{3}{4}$  del diametro: nei fori sono inseriti i tubi del fascio tubiero mentre dalla apertura passa il fluido lato mantello. Utilizzando varie geometrie si può variare il percorso di tale fluido. Lo scopo è in ogni caso quello di rendere massima la turbolenza dal lato mantello, in modo da aumentare il coefficiente di pellicola  $h_e$  e quindi migliorare lo scambio termico. Infatti il fluido lato mantello arriva perpendicolarmente al fascio tubiero e ciò riduce lo spessore delle pellicole, riducendo la resistenza al trasferimento di calore, aumentando di conseguenza  $h$  e quindi  $U$ .

## 5 Fluidi di scambio termico

Negli impianti industriali è molto diffusa la necessità di scambiare calore tra fluidi di vario genere. I fluidi utilizzati per lo scambio termico (fluidi di servizio) sono detti fluidi diatermici e possono servire sia per il riscaldamento che per il raffreddamento. Le caratteristiche di un fluido diatermico sono le seguenti:

1. deve immagazzinare elevate quantità di energia termica, preferibilmente sotto forma di calore latente, per ridurre la massa di fluido in circolazione;



2. non deve subire degradazione termica;
3. non deve essere tossico o esplosivo;
4. non deve essere costoso.

Per quanto riguarda il riscaldamento il più diffuso fluido diatermico è il vapore d'acqua. Viene prodotto mediante apposite caldaie, partendo da acqua demineralizzata e distribuito sotto forma di vapore saturo secco (senza gocce di acqua liquida trascinate) a bassa pressione (3-5 ata, cioè atmosfere assolute misurate a partire dal vuoto) in tutto l'impianto. Quando condensa libera una elevata quantità di calore in quanto possiede un elevato calore latente di condensazione (a 1 ata circa 540 kcal/kg). Il vapore d'acqua permette di riscaldare da 100°C a circa 150°C (vapore a 5 ata). Per temperature superiori si utilizzano altri fluidi di riscaldamento: fino a circa 250°C si usano oli minerali a base naftenica, fino a circa 400°C si usano i liquidi Dowtherm, varie miscele di difenile e ossido di difenile, fino a circa 600°C si usano miscela di sali fusi come nitrati di sodio e potassio.

Per il raffreddamento in genere si usa acqua industriale prodotta dagli impianti di demineralizzazione, la stessa che alimenta le caldaie di produzione del vapore

## 6 Formulario

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{S} \quad \text{equazione di Fourier per una parete piana, pag. 3}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum_1^n \frac{S_i}{A \cdot K_i}} \quad \text{equazione di Fourier per n pareti piane, pag. 3}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K}} \quad \text{equazione di Fourier per una parete cilindrica, pag. 4}$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{equazione generale dello scambio termico, pag. 5}$$

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{equazione per lo scambio termico a parete incrostata, pag. 5}$$

$$Q_S = \sigma \cdot T^4 \quad \text{legge di Stefan-Boltzmann, pag. 6}$$

$$T \cdot \lambda_{max} = 2,898 \cdot 10^{-3} \quad \text{legge di Wien, pag. 6}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad \text{differenza di temperatura logaritmica media, pag. 7}$$

$$Q = U_D \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{equazione per il dimensionamento di uno scambiatore, pag. 7}$$