

Confronto tra distillazione a membrana e tecniche di separazione tradizionali per la concentrazione di soluzioni contenenti microparticelle solide

4.1 Introduzione

Nel presente capitolo è effettuato un confronto delle prestazioni della distillazione a membrana rispetto alle tecniche convenzionalmente usate per la concentrazione di soluzioni contenenti microparticelle solide, mediante analisi energetiche ed applicazione di indicatori del processo sviluppati nella logica della process intensification.

I risultati dei test sperimentali, ottenuti nel capitolo precedente, hanno mostrato che, per un'eventuale implementazione a livello industriale della distillazione a membrana, la configurazione più adatta alla concentrazione di soluzioni contenenti micro particelle solide fino alla totale essiccazione, potrebbe essere quella piana; quest'ultima permetterebbe, sia il recupero di acqua lato permeato, da riutilizzare nel ciclo produttivo, sia un prodotto concentrato, lato retentato, con residuo secco del 98%.

Per tale motivo, l'apparecchiatura proposta, come già riportato nel capitolo 3, è a "cassettini estraibili" sistemati l'uno sull'altro, collegati ad un unico sistema sotto vuoto ed inseriti in un box termostato.

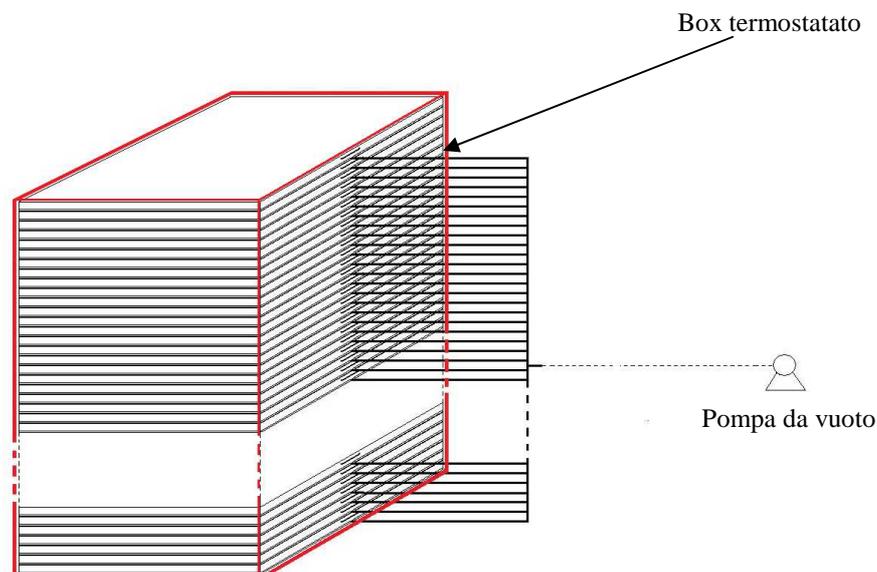


Fig.52. Schema dell'apparecchiatura a "cassettini".

Nel seguito verrà effettuato il dimensionamento di tale apparecchiatura e ne verranno valutati il suo consumo energetico e la sua performance tramite un confronto con un'apparecchiatura tradizionalmente utilizzata per il processo di interesse.

4.2 Definizione degli “indicatori” per la valutazione delle prestazioni della distillazione a membrana nella logica della “process intensification”

La *Process Intensification* è un approccio rivoluzionario per la progettazione di impianti, il loro sviluppo e l'implementazione di nuovi processi.

Il termine *Process Intensification* (PI) è stato coniato alla fine degli anni '70 da Colin Ramshaw con l'obiettivo di sviluppare impianti dotati di filosofie e sistemi di controllo molto innovativi, di piccole dimensioni, di ridotti consumi energetici, più economici, ma soprattutto più sicuri di quelli già esistenti. Applicando i primi rudimenti di PI, Ramshaw et al. ottennero una riduzione delle dimensioni dei loro impianti di un fattore pari a 100 volte, a pari capacità produttiva.

Inizialmente sviluppata per l'industria chimica di base, la metodologia PI è stata ben presto estesa ad altri settori come gomma-plastica, farmaceutico e alimentare. Negli anni '80, poi, il termine PI venne associato, grazie anche allo sviluppo delle tecnologie informatiche, a tutta l'ingegneria chimica con un senso ampio di sviluppo di processo. Nacquero così piccoli gruppi (spesso spin-off originati da contesti universitari) in grado di svolgere analisi capillare di processo, e apparvero sullo scenario mondiale gruppi di eccellenza specializzati nell'offrire *ad hoc* “*Process solution*”, nel rispetto dell'ambiente e per la produzione di prodotti aventi attributi migliorativi e con ridotti costi di produzione [1,2].

Complessivamente, con PI si intende lo sviluppo di concetti completamente nuovi per processi di produzione ed apparecchiature, in parallelo allo sviluppo di processo. L'innovazione è prodotta basandosi sul miglioramento delle conoscenze e dell'interpretazione della fenomenologia tradizionale, sia dello stato stazionario, sia di quello non stazionario ed è richiesta una forte interdisciplinarietà (chimica e catalisi, fisica applicata, ingegneria meccanica, scienza dei materiali, elettronica, etc.).

Il lavoro da svolgere diventa così di elevata competenza e valore aggiunto, ed i risultati vengono ottenuti dopo aver analizzato le caratteristiche fondamentali del processo accoppiando gli step controllanti con l'appropriata operazione, macchina e regime operativo [1,2].

Al fine di paragonare le performance del processo di distillazione a membrana proposto in questo lavoro di tesi, con quelle delle operazioni di separazione tradizionali, nella logica della process intensification, si riportano di seguito le definizioni di specifici *indicatori* che sono stati utilizzati per il confronto [3].

In primo indicatore (PS) confronta il rapporto tra la produttività (P) e la dimensione delle unità a membrana rispetto alle operazioni tradizionali. Gli impianti futuri dovrebbero essere caratterizzati da un'alta produttività e da piccole dimensioni; di conseguenza, quando l'indicatore PS è maggiore di 1, le operazioni a membrana sono da preferirsi, mentre per valori di PS inferiori a 1, dovrebbero essere scelte le operazioni tradizionali.

$$\mathbf{PS} = \frac{\text{Produttività/Dimensioni (membrane)}}{\text{P/dimensioni (tradizionale)}} \quad (8)$$

Gli impianti delle future generazioni dovrebbero essere, anche, il più possibile flessibili. Pertanto, dovrebbero essere in grado di far fronte ai cambiamenti di condizioni operative (variazioni di pressione, di temperatura, composizione dell'alimentazione) che potrebbero verificarsi durante il funzionamento dell'impianto nel corso del tempo, in modo da ridurre i costi associati ai cambi o modifiche delle apparecchiature esistenti. L'indicatore di flessibilità (flessibilità) confronta le operazioni a membrana e quelle tradizionali in termini di variazioni con cui l'impianto esistente è ancora in grado di lavorare, senza dover ricorrere a nessun tipo di intervento.

$$\mathbf{Flessibilità} = \frac{\text{Variazioni}_{\text{possibili}} \text{ (membrane)}}{\text{Variazioni}_{\text{possibili}} \text{ (tradizionale)}} \quad (9)$$

Una tipica proprietà delle operazioni a membrana è la modularità. Per un più immediato scale-up degli impianti è, in genere, preferibile avere elevati valori di modularità.

L'indicatore di modularità (M) tiene conto dei cambiamenti delle dimensioni dell'impianto a causa delle variazioni di produttività. Nella formula per il calcolo della modularità si fa uso dell'indice di modularità (MI), definito come rapporto tra le due produttività (la precedente e la nuova).

$$\mathbf{MI} \text{ (Indice di modularità)} = \frac{\text{Produttività}_2}{\text{Produttività}_1} \quad (10)$$

$$\mathbf{M} \text{ (modularità)} = \frac{|\text{Area}_2/\text{Area}_1 \text{ (membrane)-MI}|}{|\text{Volume}_2/\text{Volume}_1 \text{ (tradizionale)-MI}|} \quad (11)$$

Il sistema a membrana ha un'alta modularità se l'indicatore di modularità è inferiore a 1; valori di modularità più alti di 1 favoriscono i sistemi tradizionali

Un indicatore che è possibile definire in maniera specifica, per il processo di distillazione a membrana, è l'intensità di energia, che tiene conto dei consumi energetici coinvolti nel processo.

$$\text{Intensità di energia} = \frac{\text{Consumi energetici/Produttività (membrane)}}{\text{Consumi energetici/Produttività (tradizionale)}} \quad (12)$$

4.3 Dimensioni e consumi energetici dell'apparecchiatura a “cassettini estraibili”

I calcoli necessari al dimensionamento ed alla valutazione dei consumi energetici dell'apparecchiatura a cassettoni proposta sono riportati, in dettaglio, nelle appendici 1,2,3,4,5. Al fine di trattare, fino al totale essiccamento, una soluzione con concentrazione iniziale del 40% (riferita al solido in essa contenuto), di portata pari a 75 kg/h, sono necessari 240 cassettoni, ciascuno di dimensione (63x63x3) cm.

I cassettoni possono essere sistemati su quattro colonne di sessanta cassettoni ciascuna (figura 53); il sistema per la realizzazione del vuoto è fisso ed è previsto su un unico lato del sistema, quello posteriore, mentre i cassettoni si estraggono dal lato anteriore.

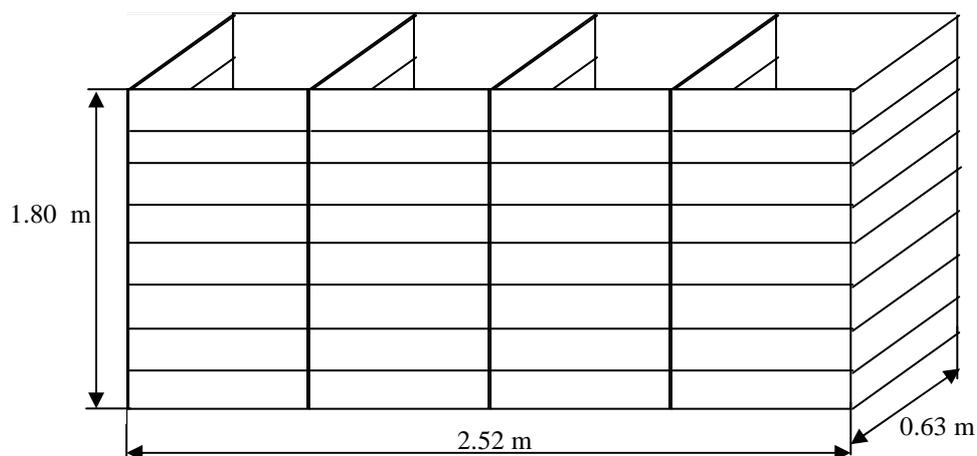


Fig.53. Schema dell'apparecchiatura a “cassettini” con ingombro totale.

L'ingombro totale di tale apparecchiatura è di (2.52 x 0.63 x 1.80) m con un'area di membrana totale di 95.3 m².

I consumi energetici dell'apparecchiatura sono legati alla presenza di:

- box termostato (necessario per la conduzione del processo ad una temperatura fissata);
- pompa alto vuoto;
- sistema necessario al raffreddamento della corrente di distillato.

Nella tabella successiva si riportano i consumi energetici relativi alle apparecchiature appena elencate.

Tab.28. Consumi energetici delle apparecchiature necessarie alla realizzazione dell'unità a cassette

| Apparecchiatura | Consumo [kw] |
|---------------------------|---------------------|
| Box termostato [2] | 90 |
| Pompa alto vuoto | 20 |
| Raffreddamento distillato | 30 |

I dati in tabella mostrano che è possibile portare a completa essiccazione 75 kg/h di soluzione al 40% in peso con un consumo energetico totale di **140 Kw**.

4.4 Apparecchiatura tradizionale di confronto: evaporatore sotto vuoto a pompa di calore

L'apparecchiatura di distillazione a membrana proposta è stata messa a confronto con un evaporatore sotto vuoto a pompa di calore, tradizionalmente utilizzato per concentrare, tramite somministrazione di energia, una soluzione da cui recuperare acqua, da riutilizzare, e concentrato.

L'evaporazione è stata usata dall'uomo fino dall'apparizione dell'*homo sapiens*. Anche prima della scoperta del fuoco, la separazione per concentrazione di un solvente (acqua) da una soluzione (salamoia) era riconosciuta come metodo, incontrollabile ai tempi, di produzione di un composto di valore, il sale comune. La scoperta del fuoco, come prima sorgente termica controllata, ha portato ad una esplosione dei processi termici, tra cui l'evaporazione, e l'esempio più notevole è la concentrazione dei brodi alimentari, prima impossibile. In tempi storici, la produzione di sale comune per evaporazione solare è divenuta un'industria, e più

tardi l'evento si è ripetuto con la produzione dello zucchero mediante cristallizzazione evaporativa. Quest'ultima è stata probabilmente la prima applicazione dell'evaporazione in quanto operazione unitaria. Gli evaporatori moderni nascono nel XIX secolo, quando diviene accessibile una sorgente di calore tuttora ritenuta la più pratica possibile, il vapore d'acqua. Nascono così i due modelli fondamentali di evaporatore, il *kettle* o a tubi immersi e il *calandria* o a tubi verticali corti, in sigla *STV* dall'inglese *Short Tube Vertical*. In ambedue i modelli l'ebollizione ha luogo a contatto dei tubi, entro cui (tipo *kettle*) o all'esterno dei quali (tipo *calandria*) condensa vapore d'acqua; pertanto si ottiene un moto fortemente turbolento, con ottimo scambio termico ma veloce sporcamento nei tubi. Per ovviare a questi problemi, nel secolo XX sono stati introdotti nuovi modelli di evaporatore, soprattutto introducendo il concetto di circolazione esterna, come nei tipi *LTV*, dall'inglese *Long Tube Vertical*, ossia *tubi verticali lunghi*, di cui vi sono varie forme, a circolazione naturale o forzata mediante pompa [3].

Nella figura successiva è mostrato lo schema di un concentratore a pompa di calore che è stato preso in considerazione per effettuare il confronto con l'apparecchiatura a "cassettini" proposta.

1. Compressore Freon.
2. Ebollizione.
3. Sottoraffreddatore.
4. Condensazione.
5. Eiettore.
6. Pompa vuoto.
7. Serbatoio distillato.
8. Pompa concentrato.

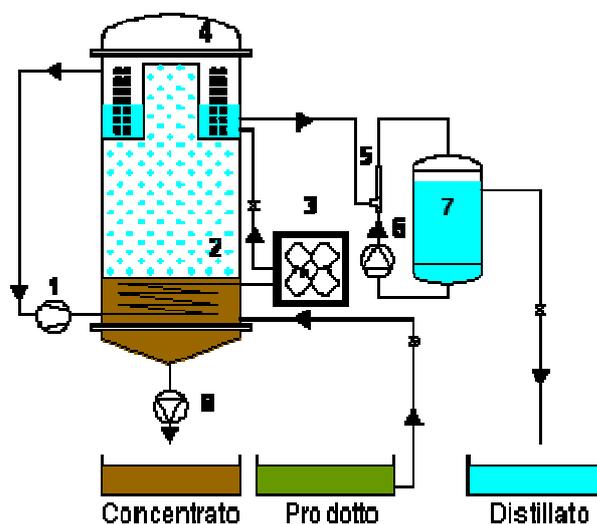


Fig.54. Schema di funzionamento di un concentratore

L'abbinamento del sottovuoto e della pompa di calore, avviene all'interno di un reattore dove sono alloggiati due scambiatori di calore, destinati uno a riscaldare il liquido da trattare (camera di ebollizione) e l'altro a condensare l'evaporato prodotto (camera di condensazione).

Il reattore viene mantenuto sottovuoto da una pompa ad anello liquido che nella prima fase aspira aria presente nel medesimo e successivamente aspira il condensato prodotto. Il circuito frigorifero denominato a pompa di calore consiste in un compressore che sposta nel serpentino di ebollizione il gas tecnico idoneo. In questa fase il cambio di stato del gas avviene cedendo calore al liquido da trattare iniziando la fase di ebollizione. All'uscita del serpentino il freon necessita di sottoraffreddamento, questo avviene tramite uno scambiatore che garantisce un bilancio termico adeguato. Successivamente mediante il passaggio del freon da una valvola di espansione, il gas passa nella serpentina di condensazione, condensando per effetto della sua evaporazione il vapore prodotto dall'ebollizione.

In un evaporatore o concentratore vengono immessi reflui liquidi e dal processo di evaporazione esce acqua pulita demineralizzata riutilizzabile in misura variabile dall'80 al 95% del refluo immesso, mentre dal processo di concentrazione si ottiene, rispettivamente, un 20-5% di refluo molto concentrato in cui sono raccolti tutti i prodotti inquinanti. Gli evaporatori o concentratori che funzionano sottovuoto ottimizzano il rendimento della energia impiegata (ebollizione da 20 a 35°C).

Molteplici sono i settori di applicazione di questa apparecchiatura e riguardano: trattamenti galvanici; recupero metalli come cromo, nichel, rame, dai lavaggi; concentrazione bagni esausti (sgrassature, decappaggi); concentrazione eluati di rigenerazione di impianti a resine; concentrazione di emulsioni oleose, di reflui di lavorazione e lavaggi reattori, dei mosti, etc.

In riferimento al modello HEV 75 (scheda tecnica riportata in appendice 4), il consumo energetico totale per un evaporatore di dimensioni (250x100x220) cm, con capacità di 75 Kg/h, è di 171 Kw [3].

4.5 Calcolo degli indicatori

Nella tabella successiva si riportano i valori degli indicatori ottenuti dal confronto tra l'unità di distillazione a membrana e l'evaporatore sotto vuoto a pompa di calore.

Tab.29. Valori degli indicatori

| Indicatore | valore |
|----------------------|---------------|
| PS | >1 |
| Flessibilità | >1 |
| M | <1 |
| Intensità di energia | <1 |

I risultati ottenuti mostrano che l'apparecchiatura di distillazione a membrana risulta avere maggiore produttività con ingombri ridotti, è più flessibile e di conseguenza riesce meglio a far fronte ai cambiamenti di condizioni operative (in questo caso particolare ci si riferisce solo a cambiamenti di temperatura), è più modulare ed è energeticamente favorita.

Riferimenti bibliografici

1. www.bbcricerche.com
2. Becht S., Franke R., Geißelmann A., Hahn H., An industrial view of process intensification, *Chemical Engineering and Processing* 48 (2009) 329–332.
3. Criscuoli A. Drioli E, New metrics for evaluating the performance of membrane operations in the logic of process intensification, *Ind. Eng. Chem. Res.* 46 (2007) 2268-2271.
4. www.nabertherm.com
5. www.concentratori.com