

L'attività di ricerca, effettuata in questo lavoro di tesi, ha riguardato le **applicazioni della distillazione a membrana a processi di interesse industriale**.

Lo studio ha trattato la valutazione e l'ottimizzazione delle richieste energetiche del processo di distillazione a membrana tramite test su moduli opportunamente progettati e realizzati in laboratorio (moduli piani a flusso longitudinale, trasversale e cross flow) e su moduli commerciali (Gambro, Liquicel, Microdyn) progettati per scopi diversi dalla distillazione a membrana, ma equipaggiati con membrane microporose idrofobiche e, dunque, in grado di essere utilizzati per test di distillazione. A tal proposito, sono state effettuate sia prove di distillazione a membrana a contatto diretto (DCMD) che prove di distillazione a membrana sotto vuoto (VMD) al variare delle configurazioni dei moduli e delle condizioni operative di temperatura e portata della corrente di alimentazione, e pressione lato distillato; l'obiettivo è stato quello di ottenere alti flussi di distillato con moderati consumi energetici associati. In letteratura non esistono, infatti, lavori sui consumi energetici del processo e questo tipo di analisi risulta essere fondamentale per valutare una possibile implementazione industriale della distillazione a membrana.

Le prestazioni dei moduli sono state confrontate in termini di flusso trans-membrana, consumi energetici ed efficienza di evaporazione.

I test hanno mostrato che: il processo ottimale (in termini di alti flussi di distillato con moderati consumi energetici) è la VMD; il flusso di distillato aumenta con la temperatura e la portata dell'alimentazione e la pressione lato distillato; i moduli a flusso longitudinale e trasversale si comportano similmente, ma quello a flusso trasversale porta ad un flusso di distillato leggermente inferiore a quello ottenuto con il modulo a flusso longitudinale, operando nelle stesse condizioni; i risultati migliori si ottengono con il modulo cross flow (valore più alto di flusso di distillato pari a  $56.2 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$  a  $Q_f=235 \text{ L/h}$ ,  $T_f=59.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_d=10 \text{ mbar}$ ).

I risultati dei test effettuati sui moduli commerciali hanno messo in evidenza che nessuno dei moduli esaminati è in grado di fornire valori di flusso accettabili (almeno dell'ordine dei  $10 \text{ kg/hm}^2$ ); tale risultato dipende dal fatto che i suddetti moduli non nascono per la MD e, perciò, non presentano le caratteristiche necessarie per la conduzione efficiente del processo. Sezioni di passaggio per il fluido troppo piccole limitano il valore delle portate da utilizzare (portate elevate comportano un aumento della pressione operativa con conseguente rischio di

“inondamento” dei pori); impaccamenti delle fibre non uniformi non garantiscono il contatto tra l’intera area di membrana ed il fluido da trattare e possono creare “zone stagnanti” di fluido, con conseguente riduzione dell’efficienza del processo. Pertanto, la progettazione di moduli “ad hoc” per la conduzione di prove di distillazione a membrana, come quanto effettuato nel corso della ricerca svolta, risulta essere fondamentale per l’applicazione del processo a livello industriale.

L’individuazione delle condizioni ottimali del processo, in termini di flussi e consumi energetici, ha costituito, poi, la base per lo studio di nuove applicazioni della distillazione a membrana, quale il trattamento di soluzioni acquose contenenti microparticelle solide. L’obiettivo è stato quello di ottenere elevati valori di residuo secco, unitamente al recupero di acqua pulita lato permeato, investigando differenti configurazioni di membrana (piana o a fibre), moduli in cui alloggiare la membrana e condizioni operative di temperatura e di quantitativo di soluzione da trattare.

I test sono stati eseguiti su sei diverse configurazioni opportunamente progettate e realizzate in laboratorio. Le soluzioni trattate hanno diversa concentrazione, 10% e 40% e contengono microparticelle solide le cui dimensioni sono dell’ordine dei 7-10  $\mu\text{m}$ ; le membrane, sia piane che a fibre, sono commerciali in polipropilene con dimensione dei pori pari a 0.2  $\mu\text{m}$ ; la temperatura operativa non ha mai superato i 50°C per la soluzione al 10% ed i 30°C per quella al 40% per evitare cambiamenti strutturali all’interno della soluzione, così come indicato dalla ditta produttrice.

I dati sperimentali hanno mostrato che la VMD può essere efficacemente applicata al processo in oggetto consentendo sia il recupero di acqua pulita, lato permeato, che può essere riutilizzata, sia il completo essiccamento del solido lato retentato. La configurazione costituita da un modulo piano commerciale con diametro interno pari a 8,5 cm (configurazione 6) posto in un box termostato e senza agitazione, è quella che risulta essere più adatta all’implementazione a livello industriale: con un’area di membrana pari a 56.7  $\text{cm}^2$ , in un tempo di due ore, permette di ottenere un prodotto concentrato con residuo secco del 98%, possiede facilità di asportazione del solido e non necessita di aria per far avvenire l’asciugatura completa della soluzione.

Sulla base dei risultati ottenuti in laboratorio si è pensato, pertanto, di proporre un’apparecchiatura a “cassette estraibili” per un’eventuale implementazione del processo a livello industriale; ogni “cassetto” contiene una membrana piana e tutti sono collegati ad un unico sistema che realizza il vuoto e posizionati in un box termostato. I calcoli effettuati

hanno mostrato che è possibile essiccare una portata di 75 kg/h e con 240 cassette (4 colonne da 60 cassette di dimensioni 252x63x180 cm).

Il lavoro di tesi si è concluso con l'analisi energetica dell'apparecchiatura di VMD proposta a livello industriale e con il calcolo degli indicatori necessari a valutarne le prestazioni nella logica della strategia della Process Intensification.

Il confronto con un evaporatore a pompa di calore sotto vuoto ha messo in evidenza che: l'operazione a membrana è caratterizzata da alta produttività e ridotte dimensioni ( $PS > 1$ ); è più flessibile dell'unità tradizionale e, di conseguenza, riesce meglio a far fronte ai cambiamenti delle condizioni operative legati alla temperatura ( $Flessibilità > 1$ ); ha un'alta modularità ( $< 1$ ) ed è energeticamente favorita (intensità di energia  $< 1$ ).

Il processo di distillazione a membrana sotto vuoto risulta, pertanto, un'interessante alternativa alle unità tradizionalmente impiegate per l'applicazione studiata.