



Membrane nel trattamento dell'acqua potabile

Possibilità attuali d'impiego

Molto diffusi per il trattamento delle acque reflue, i processi a membrana per il trattamento delle acque potabili hanno registrato una notevole crescita negli ultimi anni. Compattezza, semplicità di gestione degli impianti e basso impatto ambientale sono i principali vantaggi di questa tecnologia. L'elevato costo, però, ne limita ancora l'uso per la produzione di acqua potabile.

Paolo Berbenni*, Giordano Currò*

*Politecnico di Milano, Diar, Sezione Ambientale

I processi a membrana sono oggi ampiamente utilizzati in numerosi settori (farmaceutico, agroalimentare, chimico, trattamento acque ecc.), in molti dei quali rappresentano una scelta tecnologica ormai consolidata e standardizzata.

L'ampia diffusione di questa tecnologia, testimoniata dal continuo aumento degli investimenti nonché dalla deposizione di migliaia di

brevetti internazionali e da altrettante installazioni industriali in tutto il mondo, è dovuta soprattutto alle forti innovazioni introdotte negli ultimi vent'anni (Figura 1). Nell'ambito del trattamento dell'acqua potabile gli ultimi anni sono stati caratterizzati da una grandissima crescita del mercato delle membrane a livello mondiale, tuttavia il loro utilizzo non è ancora così diffuso come negli altri settori. Il principale fattore limitante è dato

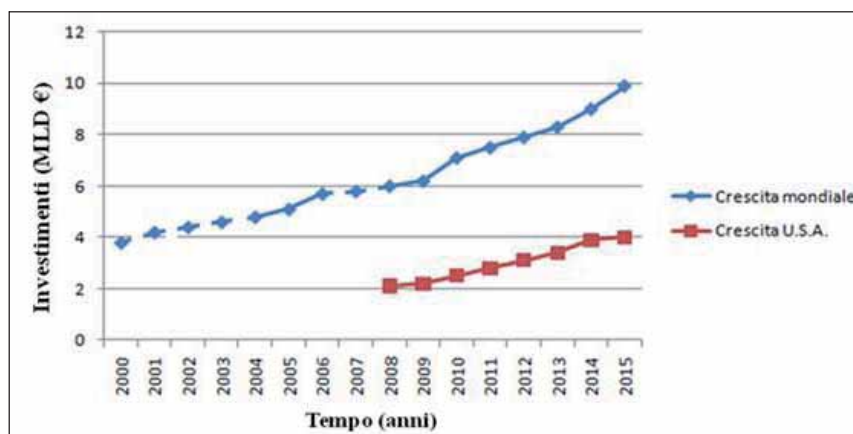


Figura 1 - Il mercato mondiale delle membrane a partire dal 2000 e previsto al 2015.

dall'elevato costo della tecnologia, tale per cui risulta ancora poco conveniente investire grandi capitali per produrre un bene a basso costo come l'acqua potabile.

Materiali

I produttori sono oggi in grado di offrire una vasta scelta in termini di materiali costituenti le membrane. Tali materiali si differenziano per proprietà chimiche e meccaniche, quali per esempio resistenza meccanica, massima pressione ammissibile, tolleranza ad agenti ossidanti, range operativo di pH. Nel corso degli anni sono stati sviluppati molti materiali differenti ma una svolta alla ricerca si è avuta con la creazione di membrane polimeriche, originate dalla sovrapposizione di diversi film sottili di materiali polimerici. I polimeri utilizzati nella fabbricazione delle membrane sono generalmente idrofobi e ciò comporta un'elevata sensibilità circa il loro trattenimento di sostanze organiche promotrici di fouling. Le membrane filtranti di ogni forma e composizione

vengono commercializzate sia come impianti completi a membrana sia come singola unità filtrante, generalmente indicata come modulo. I principali vantaggi della modularità sono la compattezza impiantistica che ne deriva, ottenendo impianti di dimensioni notevolmente inferiori rispetto a quelli tradizionali, e la semplificazione nella gestione dell'impianto stesso. Ci sono quattro principali tipi di moduli: plate-and-frame (piano, rapporto superficie filtrante/volume $100 \div 400 \text{ m}^2/\text{m}^3$), tubolare ($102 \div 103 \text{ m}^2/\text{m}^3$), a spirale ($800 \div 1.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) e a fibre cave ($103 \div 105 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Nel campo delle acque potabili i moduli più utilizzati sono quello a spirale e quello a fibre cave. In particolare, le membrane per osmosi inversa vengono tipicamente prodotte e commercializzate in moduli a spirale, mentre quelle per ultrafiltrazione e microfiltrazione sfruttano la configurazione a fibre cave (Figura 2). Il principale vantaggio dell'utilizzo dei moduli a spirale per l'osmosi inversa sta nella loro resistenza a

elevate pressioni di esercizio, garantita dall'alta densità di assemblaggio. Per quanto riguarda gli aspetti positivi dei moduli a fibre cave, riguardano in primo luogo l'elevato rapporto superficie filtrante/volume; in secondo luogo garantiscono un'ottima flessibilità di utilizzo in quanto è possibile operare sia con flusso dall'esterno verso l'interno ("shell-side") sia viceversa ("bore-side"), permettendo così un frequente controlavaggio per pulire la membrana.

Applicazioni

In linea generale esistono due differenti configurazioni operative: filtrazione "dead-end" e filtrazione "cross-flow". La prima, tecnicamente più semplice, prevede che la soluzione in ingresso fluisca perpendicolarmente alla superficie della membrana. In questo modo il retentato si accumula su di essa formando un film sottile che deve essere periodicamente rimosso per garantire il funzionamento del sistema. La seconda tecnica si basa invece sul passaggio

della soluzione di alimento tangenzialmente alla superficie della membrana. La complessità maggiore rispetto all'altro metodo sta nel conferire la corretta velocità al flusso di alimento affinché le particelle che non attraversano la membrana non si accumulino su di essa ma vengano trasportate dal flusso stesso formando così il concentrato. Il vantaggio rispetto al metodo dead-end sta nel fatto che la filtrazione può avvenire in maniera continuativa, senza dover interrompere il processo per rimuovere il film dalla superficie della membrana. Le tecnologie più usate nel settore della potabilizzazione sono la microfiltrazione (MF), l'ultrafiltrazione (UF) e l'osmosi inversa (OI). Come ogni processo a membrana, è necessario applicare specifici pretrattamenti all'alimento, volti essenzialmente alla rimozione dei solidi



Foto: Logisticon Water Treatment



Figura 2 - Membrane a fibre cave.

precedenza le membrane UF vengono costruite in moduli a fibre cave, preferendo una configurazione di alimento a shell-side. Si può disporre in tal modo di una maggiore superficie filtrante rispetto al flusso di tipo bore-side e anche le operazioni di back-wash risultano essere più semplici ed efficaci. Solitamente i moduli vengono immersi direttamente nella soluzione da trattare, sottoponendo a depressione relativa la parte interna della fibra cava, in modo tale da “aspirare” il permeato. Per l’osmosi inversa l’aspetto forse più interessante, peraltro ormai noto da molti anni, è la possibilità di dissalazione di acque saline e salmastre. I rendimenti di rimozione superano il 90% per la maggior parte degli ioni (sia polivalenti sia monovalenti) e per tutte le altre sostanze da rimuovere, arrivando a rimozioni superiori al 99,9% nel caso dei batteri. I materiali comunemente utilizzati per la produzione di membrane OI sono l’acetato di cellulosa (CA) e la poliammide. Le membrane in poliammide sono particolarmente esposte all’ossidazione da parte del cloro libero, mentre la cellulosa (economicamente più conveniente della poliammide) ha una tolleranza maggiore agli ossidanti, ma è evidente e concreto per quest’ultima il rischio di biofouling (Tabella 1).

Principali problemi della tecnologia a membrana

La tecnologia a membrana, come ogni altra tecnologia, presenta alcuni problemi cui è necessario fare riferimento per una corretta analisi

inferiore a quello dei pori) e il motore del processo è la differenza di pressione idrostatica tra monte e valle della membrana. La pressione di esercizio sufficiente per far avvenire il processo in maniera corretta è decisamente bassa, inferiore ai 2 bar. Un processo di questo tipo è orientato soprattutto alla rimozione di particelle colloidali di grandi dimensioni (comprese nell’intervallo $0,1 \div 1 \mu\text{m}$) e di molti microorganismi tra cui i batteri (E. Coli diametro $\sim 0,5 \mu\text{m}$; Legionella $0,3 \div 0,9 \mu\text{m}$) e le spore (Giardia $5 \div 15 \mu\text{m}$; Cryptosporidium $4 \div 6 \mu\text{m}$), mentre può essere trattenuta solo una piccola parte di virus per via delle loro ridotte dimensioni, generalmente inferiori a quelle dei pori. Per la loro fabbricazione i polimeri più utilizzati sono: polivinilidene fluoruro (Pvdf),

polisulfone, poliacrilonitrile (PAN), copolimeri di poliacrilonitrile-policloruro di vinile, politetrafluoroetilene e miscele di nitrato di cellulosa-acetato di cellulosa. La tecnologia ad ultrafiltrazione garantisce un cut-off maggiore rispetto alla microfiltrazione, infatti in questo caso il diametro dei pori è compreso tra 1 e 100 nm. All’interno di un impianto per la potabilizzazione dell’acqua le membrane UF (come anche quelle MF) possono essere utilizzate per sostituire specifiche fasi, come per esempio la chiarificazione, piuttosto che supportare la disinfezione finale permettendo un minor consumo di reagenti chimici, o ancora, fungere da pretrattamenti per un successivo processo di OI poiché è necessario eliminare tutti gli agenti intasanti per queste unità di filtrazione spinta, come per esempio i colloidali. Le pressioni di esercizio sono inferiori ai 10 bar. Anche l’UF, come la MF, rimuove sia la carica batterica sia le sostanze colloidali e i virus. Vengono costruite ormai esclusivamente con materiali sintetici, in particolare: polivinilidene fluoruro (molto utilizzato), polisulfone, poliacrilonitrile, copolimeri di poliacrilonitrile-policloruro di vinile, polietere sulfone (PES). Come già accennato in

sospesi grossolani (filtrazione convenzionale, chiarificazione) piuttosto che delle sostanze organiche (ossidazione, adsorbimento). Le membrane MF sono solitamente caratterizzate da una struttura microporosa simmetrica con pori di dimensioni variabili in un range $0,05 \div 10 \mu\text{m}$. La separazione è di tipo puramente fisico (permeano solo le molecole con diametro

Tabella 1 - I processi a membrana più comuni con le relative caratteristiche e finalità.

Tipo di processo	Molecular Weight Cut-Off (Mwco)	Forza motrice	Rimozione
Microfiltrazione	0,05-10 mm (>50.000 Da)	P < 2 bar	SS (Solidi Sospesi), batteri
Ultrafiltrazione	1-100 nm (2.000-8.000 Da)	P < 10 bar	Colloidi, batteri, virus, spore, SS, macromolecole solubili (proteine)
Osmosi Inversa	0,1-1 nm (anche <100 Da)	P= 25-100 bar	Durezza totale 93-97 % Batteri >99 % Specie ioniche 92-98 %
Elettrodialisi		Differenza di potenziale elettrico	Specie ioniche 60-85 %

e gestione di impianto. I problemi di maggiore rilevanza sono lo smaltimento del concentrato e il fenomeno denominato "fouling".

Trattamento del concentrato

I sistemi a membrana, in particolare quelli OI, producono un retentato da due a sei volte più concentrato rispetto all'alimento, in funzione della qualità dell'acqua grezza e del fattore di recupero. Per quanto riguarda il pH, il concentrato ha un valore generalmente elevato per la presenza di carbonati. Si sono individuate le seguenti possibili opzioni di smaltimento o riuso del concentrato:

- scarico in acque superficiali;
 - scarico in un impianto di trattamento di acque reflue;
 - immissione in profondità (300÷2.400 m);
 - stagni di evaporazione (per volumi ridotti);
 - scarico sul terreno (pericolo inquinamento falda);
 - altri metodi (riutilizzo come acqua di raffreddamento, per fontane pubbliche, per acque antincendio ecc.);
- Allo stato attuale i sistemi utilizzati sono lo scarico a mare per gli impianti di dissalazione e il recapito in fognatura, facendo particolare attenzione all'eventuale presenza di sostanze tossiche per la biomassa batterica presente nell'impianto di trattamento acque reflue.

Il fouling

Con il termine "fouling" si intende un imbrattamento generalmente irreversibile della membrana che può essere di varia natura, mentre il termine "foulant" ne indica gli agenti responsabili. In linea

generale tale fenomeno ha come diretta conseguenza una diminuzione del flusso di permeato dovuta all'aumento della resistenza alla filtrazione, che avviene rapidamente nei primi minuti di funzionamento e poi più lentamente. La natura ed il livello dello sporco sono fortemente influenzati dalle caratteristiche chimico-fisiche della membrana e dei soluti, nonché dalle interazioni soluto-soluto e soluto-membrana. Le sostanze responsabili del fouling sono essenzialmente: materiale particolato e colloidale (fouling colloidale), agenti di origine organica e biologica quali microrganismi e sottoprodotti del metabolismo batterico (biofouling), precipitati di sali scarsamente solubili come carbonato e solfato di calcio, idrossidi metallici (come gli idrossidi di Fe, Mn e Al) che portano alle incrostazioni (scaling), nonché sostanze organiche quali acidi umici e fulvici, proteine e polisaccaridi (fouling organico).

La pulizia della membrana permette di rimuovere il materiale accumulatosi sulla sua superficie e nel corpo, così da restaurare il flusso di processo iniziale. È noto che è meglio effettuare la pulizia di frequente, in modo da prevenire ogni possibile prematuro danneggiamento irreversibile da fouling.

I metodi di pulizia più utilizzati sono: controlavaggio semplice (BW "backwash"), con aggiunta di aria (AEB "air-enhanced backwash") o con aggiunta di agenti chimici (CEB "chemical-enhanced backwash") e pulizia completa (CIP "cleaning in-place"). Il controlavaggio consiste



Foto: Tianjin Tiangao

nell'inversione periodica del flusso transmembrana ed il permeato viene pompato verso il canale di alimento; in questo modo vengono eliminati gli agenti sporcanti fino a quel momento depositatisi, per poi estrarli dal sistema prima di riprendere il normale flusso di esercizio. Le pressioni di controlavaggio sono maggiori (1÷10 bar) rispetto alla pressione di esercizio e la pulizia viene effettuata per alcuni secondi al raggiungimento di un limite prestabilito di differenza di pressione transmembrana. I controlavaggi con aggiunta di aria o di agenti chimici sono impiegati qualora il controlavaggio semplice non sia sufficiente. La pulizia completa delle membrane viene invece effettuata utilizzando soluzioni detergenti di varia natura. In conclusione, sulla base degli elementi presi in considerazione, i processi

a membrana risultano molto interessanti per il trattamento delle acque destinate al consumo umano, sia superficiali sia sotterranee. I vantaggi sono legati alla compattezza ed alla semplicità di gestione degli impianti (modularità) nonché al minor impatto ambientale che ne deriva.

BIBLIOGRAFIA

- K.V. Peinemann, S. Pereira Nunes, "Membranes for water treatment - volume 4", Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2010.
- M. Pizzichini et al., "Le tecnologie separative mediante membrana", ENEA, 2009.
- R.W. Baker, "Membrane technology and applications", Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2004.