



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

21

Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection

I REATTORI BIOLOGICI
MBR e MB-MBR
introduzione alla tecnologia

May 20, 2016 - Palermo

Prof. Gaspare Viviani

PRIN

IWA the international water association

DICAM

Università di Palermo
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)

Introduzione

Crescente interesse per l'utilizzo di **nuove tecnologie** per il trattamento delle acque reflue diverse da quelle convenzionali (**CAS: Conventional Activated Sludge**), per:

- interventi di **potenziamento** di impianti esistenti sovraccaricati, per aumento degli AE serviti o sottodimensionamento iniziale;
- interventi di **adeguamento** di impianti esistenti, per il rispetto di standard di qualità più esigenti, introdotti dalle nuove normative (D.lgs. 152/2006);
- interventi di **riuso** delle acque reflue in impianti nuovi o esistenti (rispetto di limiti più restrittivi; D.M. 185/2003);
- realizzazione di **nuovi impianti** in aree di modesta estensione (problemi di inserimento urbanistico dell'impianto, mascheramento impianti, etc.).



Introduzione

Esempi di tecnologie emergenti:

- Processi a membrana (**MBR: Membrane Bio-Reactor**)
- Processi a biomassa adesa a letto mobile (**MBBR: Moving Bed Bio-Reactor**)
- Processi misti (**MB-MBR: Moving Bed Membrane Bio-Reactor**)

Tecnologie di notevole interesse, per la qualità del refluo trattato, il modesto ingombro richiesto, la possibilità di essere utilizzate anche in impianti esistenti.



Introduzione

Necessità di sperimentazione e ricerca:

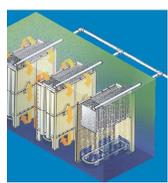
- Criteri di dimensionamento spesso di tipo empirico o basato su approcci validi per impianti convenzionali.
- Numerosi dubbi sull'effetto che alcuni parametri di processo hanno sulle rese di trattamento.
- Problemi tecnologici non del tutto chiari (MBR: problemi di fouling delle membrane, caratterizzazione delle biomasse ed effetto sul meccanismo di filtrazione; MBBR: grado di riempimento, interferenza tra biomasse adese e sospese).

L'interesse per la ricerca è in ogni caso rafforzata dalla diffusione che, specie all'estero, queste tecnologie hanno da diversi anni

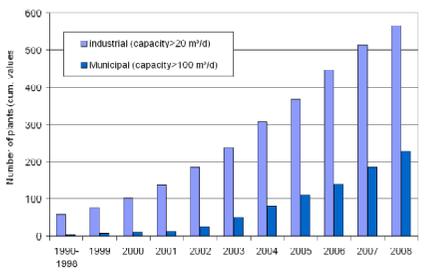


Sviluppo e diffusione degli MBR

Anni '60
Dorr Oliver (trattamento acque di sentina delle navi – conf. membrane esterne)



1989
Yamamoto – Kubota (membrane piane sommerse)



- Installazioni in oltre **200 Paesi** del mondo, principalmente est asiatico (Cina, Korea, Giappone).
- Installazioni MBR in Europa: circa **800 impianti** nel 2009, di cui **¾** per reflui industriali, ma con maggiori potenzialità per i reflui civili

Iniziative scientifiche italiane:



Salerno
(5-6 luglio 2012)



Palermo
(4-5 luglio 2013)



Palermo
(6-7 ottobre 2014)



Salerno
(22-23 ottobre 2015)



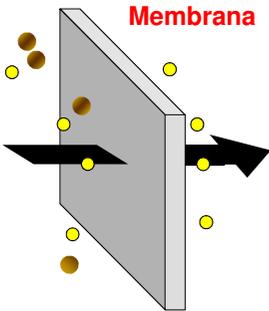
Palermo
(6-7 ottobre 2016)

La filtrazione su membrana

Obiettivo: separazione fisica di solidi sospesi, colloidali o disciolti da un mezzo liquido o gassoso.

Metodo: Passaggio del flusso attraverso la membrana, a seguito dell'applicazione di una forzante:

- pressione
- potenziale elettrico
- temperatura
- gradiente di concentrazione
- combinazione di diverse forzanti





Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection
May 20, 2016 - Palermo

La filtrazione su membrana

Applicazione di una pressione attraverso la membrana:

Alimento
 Q_A, C_A

➔

membrana

➔

Concentrato
 Q_C, C_C

↓

Permeato
 Q_P, C_P

Flusso permeato $J = \frac{Q_P}{A}$

Pressione transmembrana $TMP = R_T \mu J$

A : area filtrante
TMP : pressione di transmembrana [Pa]
 R_T : resistenza alla filtrazione [m^{-1}]
 μ : viscosità del permeato [Pa·s]
J : flusso di permeato [m^3/m^2s]

Modalità di filtrazione

Alimentazione della membrana:

Filtrazione "dead end" vs **Filtrazione "cross flow"**

Vantaggi della filtrazione cross flow:

- minore velocità di intasamento
- idonea per sospensioni concentrate
- autopulizia dovuta all'elevata velocità tangenziale del flusso, con asportazione dei solidi che si depositano sulla membrana

Effetti delle membrane

Membrane per Osmosi Inversa, Nanofiltrazione, Ultrafiltrazione, Microfiltrazione

Taglio molecolare medio (MWCO)

- 10¹⁰ m: Atomi liberi
- 10⁹ m: Piccole particelle organiche monomeri (zuccheri)
- 10⁸ m: Colloidi: Proteina albumina
- 10⁷ m: Virus
- 10⁶ m: Batteri (fino a 40 micron)
- 10⁵ m: Cryptosporidia
- 10⁴ m: Cellule del sangue

Effetti: migliore qualità del permeato (left), riduzione intasamento (right). Aumento di energia motrice richiesta (bottom).

Le membrane utilizzate negli impianti MBR sono quelle di MICROFILTRAZIONE e di ULTRAFILTRAZIONE (porosità 0,04 – 0,4 μ)

Effetti delle membrane

Parametro	MF	UF	NF	RO
BOD	o	X	X	X
Durezza			X	X
Metalli			X	X
Nitrati	o	o	X	X
Inquinanti organici		X	X	X
Composti organici di sintesi			X	X
TDS	o	o	X	X
TSS	X	X	X	X
Batteri	X	X	X	X
Protozoi e uova di elminti	X	X	X	X
Virus			X	X

X efficace
o poco efficace → **Importanza della presenza del reattore biologico !**

Generalità sulle membrane e sul loro utilizzo negli MBR

Impianti MBR per la rimozione del carbonio e di nitrificazione

- configurazione "side stream": per piccoli impianti ad uso industriale
- configurazione "a membrane sommerse": più adoperate; schema con membrana in vasca separata più comodo per manutenzione

con modulo esterno (side stream) vs **con membrane sommerse (SMBR)**

- intercettazione da parte delle membrane delle frazioni carboniose particellata (tutta) e disciolta (parte)
- modesta influenza della membrana sul TKN (in buona parte disciolto)
- processo favorito dai lunghi tempi di residenza cellulare e dalle elevate concentrazioni di biomassa

Generalità sulle membrane e sul loro utilizzo negli MBR

Impianti MBR nitro/denitro

- scarsa **influenza della membrana** sulla deN (composti disciolti)
- possibile **peggioramento** per ricircolo di O₂ coi nitrati (elevata aerazione)
- processo favorito dagli **elevati tempi di residenza cellulari**

Tipologie di membrane

Materiali per membrane:

- polimerici
 - naturali (acetato di cellulosa)
 - sintetici (PP, PET, polisolfoni, poliolefine, etc.)
- ceramici

- Membrane **anisotrope**, costituite dalla sovrapposizione di uno **strato sottile superficiale** (funzione di filtrazione) su **uno più spesso e poroso** (funzione meccanica)
- Assemblaggio delle membrane in **“moduli”** (elevate superfici in volumi piccoli).

Tipologie di moduli di membrane

Modulo a membrane piane (FS)

Modulo a fibre cave (HF)

Modulo tubolare (MT)

PER CONFIGURAZIONI SIDE-STREAM E SOMMERSE (polimeriche)

PER CONFIGURAZIONI SIDE-STREAM (ceramiche)

Confronto tra impianti convenzionali (CAS: Conventional Activated Sludge) e impianti MBR

Impianto convenzionale (CAS)

Impianto MBR

Caratteristiche di processo degli impianti MBR

- la membrana sostituisce la sedimentazione finale
- intercettazione totale delle frazioni carboniose particellata e parziale di quella disciolta (tra 0,45 μ e la porosità della membrana)
- rimozione della frazione disciolta grazie ai processi biologici nel reattore (rimozione COD disciolto, nitro/denitro)
- concentrazioni elevate di biomassa nel reattore (10-15 g/l), elevate età del fango (fango stabile ?), bassa produzione di fango
- differenti cinetiche di processo all'interno del reattore biologico rispetto a un impianto convenzionale: diversa composizione della biomassa, per i differenti meccanismi di selezione, basati sulla capacità degradativa e non sulle caratteristiche di sedimentabilità.
- progressiva occlusione della membrana: modalità di funzionamento: a portata costante e TMP crescente (preferita) o a portata decrescente e TMP costante;
- necessità di periodici lavaggi (fisici e chimici) della membrana (\rightarrow durabilità nel tempo)

Ruoli del reattore biologico e della membrana nella rimozione degli inquinanti

Elementi di incertezza ed equivoci nel valutare l'effettivo ruolo svolto da reattore biologico e membrana nella rimozione degli inquinanti:

La rimozione avviene grazie al **reattore** e la membrana serve solo per sostituire la sedimentazione finale.



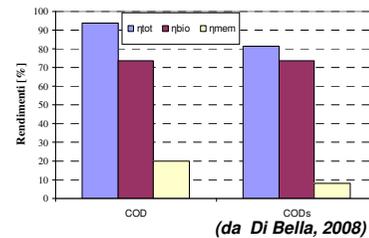
La rimozione avviene grazie alla **membrana** e il reattore biologico serve solo per l'accumulo dei reflui e l'alloggio della membrana

- effettivo **contributo delle membrane** al rendimento globale di rimozione degli inquinanti (differenza tra filtrazione diretta e MBR ?);
- effettivo **contributo del reattore biologico** al rendimento globale di rimozione degli inquinanti (a che serve, visto che c'è la membrana ?)

Ruoli del reattore biologico e della membrana nella rimozione degli inquinanti

Rend. totale rimozione COD:

- rendimento di rimozione complessiva del COD di circa il **90%** (70% dovuto al processo biologico; 20% dovuto alla filtrazione attraverso la membrana).



Rend. totale rimozione COD_{sol}:

- rendimento complessivo inferiore (circa **80 %**); il rendimento di filtrazione è poco meno del 10%, per la presenza nel COD_{sol} di solidi disciolti < alla porosità della membrana (0,04 μ).

Rend. rimozione membrana calcolato sul surnatante del reattore biologico:

- pari al **70%** circa.

Problemi di processo negli impianti MBR

- **Fouling**: intasamento progressivo della membrana
- **Foaming**: produzione di schiume biologiche nel reattore biologico
- **Polarizzazione da concentrazione**: riduzione del flusso attraverso la membrana

Problemi di esercizio delle membrane: fouling

FOULING: è dovuto al deposito di sostanze sospese o disciolte sulla superficie esterna della membrana e all'interno dei pori.

Conseguenza: aumento delle resistenze alla permeazione (TMP) e progressiva occlusione della membrana

(a)+(c) adsorbimento nei pori o sulla superficie della membrana
 (b) occlusione completa dei pori
 (d) deposito superficiale di particelle

Fouling reversibile: totalmente eliminabile con **lavaggio fisico**
Fouling irreversibile: parzialmente eliminabile con **lavaggio chimico**

Problemi di esercizio delle membrane: fouling

Variazione nel tempo della TMP per funzionamento a flusso costante

Problemi di esercizio delle membrane: fouling

Principali fattori che influenzano il fouling

La formazione di **EPS (polimeri extracellulari)** è considerata una delle maggiori cause del fouling !

Problemi di esercizio delle membrane: foaming

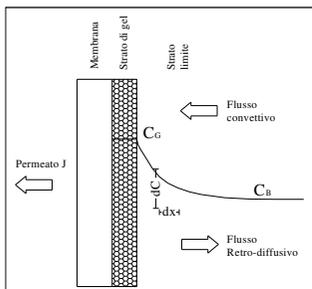
La formazione di **schiume biologiche (foaming)** nei reattori biologici è una disfunzione che mette a rischio la qualità dell'effluente, anche con pericolo di fuoriuscita delle schiume dai reattori.

In **impianti convenzionali** la formazione di schiuma è dovuta allo sviluppo di **batteri foam-forming** (p.e. *Nocardia*, *Microthrix parvicella*), che sintetizzano o producono composti idrofobici.

In **impianti MBR** la presenza di schiume biologiche è stata osservata in presenza di elevate concentrazioni di **EPS**, anche in assenza di batteri "foam former".

Gli **EPS** quindi sarebbero quindi identificabili come causa sia dei fenomeni di **fouling** che di quelli di **foaming**.

Problemi di esercizio delle membrane: polarizzazione da concentrazione



- **Causa:** progressivo accumulo di soluto nell'interfaccia membrana-liquido, con formazione di un *gel layer* in cui la concentrazione del soluto C_G è $>$ di quella nella massa liquida C_B
- **Effetti:** generazione di un fenomeno retrodiffusivo, che contrasta il trasporto convettivo attraverso la membrana
- **Effetto finale:** riduzione del flusso attraverso la membrana

Dimensionamento degli impianti MBR

- **volume** del reattore biologico (uso di algoritmi analoghi ai CAS, diverse costanti cinetiche);
- **superficie** totale della membrana (fissare 80% "flusso critico" 15-30 $l/m^2/ora$);
- **numero** di moduli di membrane (dipende dalla tipologia di membrana scelta);
- sistema di **aerazione** (a bolle grosse + bolle fini);
- **frequenze cicli** di alimentazione e lavaggio fisico (alimentazione 8-15 min + lavaggio 1-2 min – *relaxation*);
- **pompe per TMP** (Δp da -0,5 bar (membrana sommersa) a +1-5 bar (side-stream));
- **circuito di ricircolo** biomassa da membrana a reattore biologico;
- **compressori aria, fanghi di supero**, etc.

Calcolo della superficie delle membrane

Si fissa il **flusso massimo di permeato** ($l/m^2/ora$), che dipende dalla tipologia di membrana e della configurazione del sistema.

Esso va scelto:

- **non troppo basso** (\rightarrow elevate superfici complessive delle membrane e quindi elevati costi di impianto per i moduli di membrane);
- **non troppo alto** (\rightarrow elevato sporramento delle membrane ed eccessiva frequenza di pulizia della membrana stessa).

Calcolo della superficie delle membrane

Il "**flusso critico**" J_{CR} è definito come quel valore del flusso al di sotto del quale non si sviluppano fenomeni di sporramento, con conseguenti diminuzioni del flusso o aumento di TMP nel tempo, a seconda delle modalità operative.

In realtà anche per valori di flusso inferiori a J_{CR} , la presenza della sospensione determina una graduale diminuzione nel tempo del flusso di permeato (o l'aumento delle TMP).

Più corretto parlare di "**flusso sostenibile**", definito come quel valore ottimale di flusso di permeato da estrarre, al fine di minimizzare gli interventi di pulizia chimica e così prolungare la durata della membrana.

- ❖ Il valore di J_{cr} è solitamente indicato dalle case produttrici dei moduli di membrane ed assume valori di circa 20-50 $l/m^2/ora$.
- ❖ Per sicurezza, il **flusso di progetto** J_p per il dimensionamento delle membrane può essere posto pari all'80% di J_{cr} .

Calcolo della superficie delle membrane

La **superficie totale della membrana A** può essere facilmente ricavato come rapporto tra la portata massima alimentata e il valore di J_p così scelto:

$$A = \frac{Q_{max}}{J_p}$$

Dal valore di A, in funzione della tipologia e del modello di membrana adottato, si valuterà il numero di **moduli** necessario per l'impianto.

Problema: quale valore scegliere come Q_{max} e come contenere il rapporto Q_{max}/Q_{med} ?



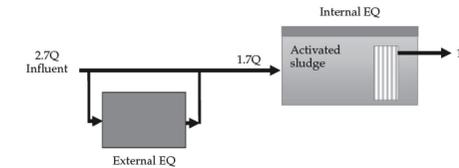
necessità di limitare gli **incrementi di portata in tempo secco e di pioggia** rispetto al valor medio di tempo secco, al fine di limitare la superficie delle membrane e/o il loro eventuale sovraccarico.

Schemi per il controllo della variazione della portata

VARIAZIONI DI PORTATA FRA TEMPO SECCO E DI PIOGGIA

Soluzioni impiantistiche possibili:

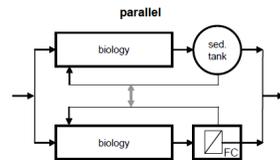
- a) reattore biologico con **livello variabile** (funzione di compenso);
- b) **vasca di equalizzazione** in derivazione, a cui sono avviate a mezzo di uno scaricatore di piena le portate in eccesso rispetto a quella massima ammessa; volume accumulato avviato all'impianto in corrispondenza delle portate inferiori a quella media;



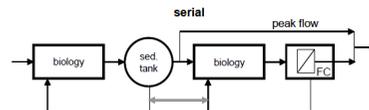
Schemi per il controllo della variazione della portata

c) impianto "ibrido": accoppiamento in serie o parallelo di una linea MBR, alimentata con portata costante, e una CAS o chimico-fisica, a cui sono avviate le portate in eccesso; qualità del refluo trattato media pesata dei due flussi in uscita da MBR e convenzionale.

collegamento in parallelo:



collegamento in serie:



Impianti MBBR

Caratteristiche di funzionamento:

- la biomassa si sviluppa sulla superficie esterna di un supporto mantenuto in sospensione nel reattore biologico (piccoli elementi prismatici di materiale plastico)
- Presenza di biomassa adesa e sospesa, con aumento della velocità complessiva di rimozione del substrato (maggiori rendimenti, riduzione del volume del reattore biologico)
- Applicazioni per reattori biologici in condizioni aerobiche, anossiche o anaerobiche (rimozione BOD, N, P)

Impianti MBBR

Configurazioni impiantistiche

- ❖ Processi **MBBR "puri"**
 - senza ricircolo cellulare
 - sviluppo della biomassa esclusivamente sui supporti
 - assenza di ricircolo cellulare
- ❖ Processi **MBBR "ibridi"**
 - con ricircolo cellulare
 - biomassa sia sospesa che adesa
 - elevata concentrazione di b. sospesa

MBBR ibridi ideati per **up-grading di impianti a F.A.** (aumento carico organico, aumento età del fango, fango più sedimentabile, impianto compatto)

Impianti MBBR

Esempi di mezzi di supporto per impianti MBBR

FLOCOR

KALDNES

LINPOR

NATRIX

Caratteristiche:

- tasso di riempimento (V_s/V_{tot}) circa 30%
- elevata superficie specifica
- riempimento in materia plastica
- Φ medio 10-50 mm

Impianti MBBR

Colonizzazione dei mezzi di supporto

Supporto KALDNES tipo K1

Schemi misti: impianti MB-MBR

SCHEMI MISTI A BIOMASSA ADESA E SOSPESA (MB-MBR: Moving Bed Membrane BioReactor)

Introduzione del reattore biologico di corpi di riempimento sintetici, in modo da agevolare la formazione di biomassa adesa, come gli impianti MBBR (Moving Bed BioReactors).

Vantaggi:

- maggiore biomassa nel reattore → **minori volumi**
- minori concentrazioni di biomassa sospesa a parità di biomassa totale → **minore fouling**

Alcuni schemi in variante per gli MBR

SCHEMI CON FUNZIONAMENTO IN DISCONTINUO (SBR-MBR)

Alternanza di fasi di aerazione e fasi anaerobiche/anossiche, con rimozione simultanea di azoto e fosforo.
 Riempimento in fase anaerobica/anossica; estrazione permeato in fase aerobica.

SBR **MBR**

Alcuni schemi in variante per gli MBR

MBR ANAEROBICI (ANMBR)

Idonei per il trattamento di reflui ad **elevato carico organico**.
 L'effetto barriera della membrana favorisce l'accumulo della **biomassa**, riduce i **tempi di digestione** e migliora la **qualità dell'effluente**.

Soluzioni adoperate:

- side stream (preferita)
- a membrana sommersa in insufflazione di biogas.

a) side stream
 b) a membrana sommersa
 c) a membrana sommersa in comparto separato






Grazie per l'attenzione ...

Prof. Gaspare Viviani

Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection

May 20, 2016 - Palermo



