

# Trattamento avanzato delle acque reflue tramite elettro-bioreattori a membrane vive incapsulate: applicazione a scala pilota

ILARIA MASULLO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Affiliation not available

## Abstract

La depurazione delle acque reflue rappresenta una delle principali esigenze per la tutela dell'ambiente e della salute dell'uomo. L'attenzione del legislatore, del mondo tecnico e delle imprese è sempre più rivolta alle possibilità di riutilizzare le acque depurate tramite tecnologie sostenibili per l'ambiente e per l'uomo.

I bioreattori a membrane (MBR) rappresentano una soluzione tecnologica del futuro in quanto consentono il raggiungimento di elevati rendimenti depurativi tali da permettere il riutilizzo delle acque trattate. La principale novità di questa tecnologia, consiste nell'uso di uno o più moduli di membrana a ultrafiltrazione o microfiltrazione capaci di separare da un fluido sostanze contenute in forma sospesa o disciolta sotto l'azione di una forza motrice. L'attraversamento della membrana comporta un meccanismo di filtrazione con la produzione di permeato di elevata qualità e un concentrato che si accumula all'interno del reattore stesso, e da cui viene allontanato periodicamente.

Tuttavia, la realizzazione di impianti a scala reale dei bioreattori a membrane è ostacolata da diversi problemi tra cui quello principale riguardante la formazione del fouling ossia lo sporcamento della membrana, principale responsabile degli elevati costi causati dalla necessità di pulire e/o sostituire le membrane.

Negli ultimi anni la ricerca scientifica ha proposto nuove soluzioni, atte a mitigare il fouling di membrana, tra queste l'applicazione di processi elettrochimici, come elettrocoagulazione, elettrosmosi ed elettroforesi, combinati ai bioreattori a membrane (eMBR). Tali meccanismi migliorano la rimozione degli inquinanti e regolano la mobilità e la deposizione di agenti contaminanti sulla superficie della membrana.

Tale soluzione rappresenta un approccio tecnologico promettente con ottime prospettive nella mitigazione del fouling

e nell'incremento delle efficienze di depurazione del sistema.

Solo di recente l'attenzione è stata rivolta verso l'utilizzo di membrane dinamiche autoformanti, in sostituzione delle tradizionali membrane, che consentono una riduzione considerevole in termini di investimento e dei costi operativi associati al processo, un facile controllo del fouling, un alto flusso di permeato, un basso fabbisogno di energia ed un'elevata capacità di trattamento.

La formazione della membrana dinamica avviene per mezzo di sostanze presenti nella miscela liquida che durante la filtrazione si depositano sulla superficie di supporto, costituita da materiali a basso costo, come ad esempio dacron o nylon con elevate porosità, incrementando le capacità depurative del sistema quando la membrana dinamica raggiunge la sua completa formazione. Di contro però l'efficienza del sistema dipende dalle proprietà dei fanghi quali viscosità e idrofobicità e dalla velocità di areazione che causano un aumento dell'incrostazione della membrana e a seconda del materiale di supporto utilizzato si ha che la pulizia potrebbe essere accompagnata da una temporanea perdita di qualità dell'effluente.

L'attività di tirocinio, svolta presso il Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (SEED) dell'Università degli Studi di Salerno e presso l'impianto di depurazione di Battipaglia (Sa) in località Tavernola e gestito dall' Asis Spa., si è concentrata sull'analisi delle efficienze depurative di un elettro bioreattore a membrane a scala pilota operante con reflu reale che utilizza per la fase di filtrazione una membrana dinamica autoformante.

Sono stati analizzati i meccanismi di formazione della membrana dinamica autoformante, le efficienze di rimozione dei contaminanti, l'andamento dei precursori del fouling, l'andamento della pressione di transmembrana nel tempo e la concentrazione dei solidi nella miscela areata, al fine di valutare la fattibilità tecnica ed economica per l'applicazione a scala reale dell'innovativo sistema proposto.

## **I bioreattori a membrana (MBR)**

L'emanazione di normative sempre più restrittive a tutela delle acque spinge verso il continuo miglioramento degli impianti di depurazione con tecnologie avanzate a basso ingombro. La tecnologia MBR (Membrane Bio-Reactor) permette di ottenere effluenti di elevata qualità con notevole risparmio di spazio rispetto ai sistemi tradizionali in quanto la biomassa attiva viene separata

dall'effluente depurato per mezzo di membrane anziché con la sedimentazione, che spesso è il punto debole di un impianto di depurazione a fanghi attivi. <sup>12</sup>

I sistemi MBR sono ottenuti dall'abbinamento di un sistema di trattamento biologico a fanghi attivi con un processo di filtrazione a membrana. Questi impianti di nuova concezione, oltre ad essere più efficienti rispetto ai fanghi attivi classici, offrono la possibilità di riutilizzare l'acqua depurata che presenta un elevato grado di purezza chimica, fisica e batteriologica <sup>3 4</sup>. A differenza dei sistemi convenzionali, in cui i solidi e microrganismi sono rimossi per gravità nei sedimentatori e in parte ricircolati nei bioreattori, i sistemi MBR utilizzano unità di filtrazione a membrana per separare i solidi. E' possibile quindi fare a meno di sedimentatori secondari, in genere molto ingombranti, di unità di filtrazione e di disinfezione terziaria. E' inoltre possibile lavorare con concentrazioni di SST molto elevate (fino a 15-20 kgSST/m<sup>3</sup>) di quelle consentite con i sedimentatori (5-6 kgSST/m<sup>3</sup>), con conseguente riduzione degli ingombri. Il sedimentatore secondario quindi viene sostituito con uno stadio di micro o ultrafiltrazione su membrane <sup>3</sup>. L'attraversamento della membrana comporta un meccanismo di filtrazione attraverso cui viene prodotto un permeato o filtrato ossia l'effluente dall'unità di microfiltrazione che riesce a filtrare attraverso i pori della membrana e un concentrato o retentato ossia quella parte di alimentazione che non passa attraverso le membrane e che si deposita nel reattore, venendone periodicamente estratta come fango di supero <sup>3</sup>.

Gli impianti MBR presentano quindi vantaggi rilevanti in termini sia di elevata qualità dell'effluente depurato, che di ridotti ingombri planimetrici e volumetrici. Tuttavia però, la realizzazione di tali impianti a scala reale è ostacolata da diversi problemi tra cui quello principale riguardante la formazione del fouling ossia lo sporciamento della membrana, principale responsabile degli elevati costi causati dalla necessità di pulire e/o sostituire le membrane. <sup>5</sup>

## **Il fouling di membrana e i suoi precursori :EPS, SMP e TEP**

Con il termine fouling viene definito lo sporcamento della superficie esterna o interna della membrana a causa di depositi che sono adsorbiti o che semplicemente si accumulano su di essa durante la fase di filtrazione <sup>6 3</sup>. Tale termine viene quindi utilizzato per indicare tutti i fenomeni che provocano una riduzione della permeabilità delle membrane e che comporta la necessità di maggiori superfici filtranti, pressioni applicate più elevate, alte velocità di crossflow e frequenti lavaggi (Fig 1.).

Questo fenomeno è dovuto alla deposizione di materiali solubili e particolato che vengono adsorbiti o semplicemente accumulati sulla e nella superficie della membrana durante la filtrazione e porta ad una riduzione della permeabilità della membrana nel tempo e ad un aumento della pressione di transmembrana (TMP) <sup>7</sup> a seconda della modalità operativa. La sporcizia però deve essere distinta dall'ostruzione, che è il riempimento dei canali della membrana con solidi a causa delle cattive condizioni idrodinamiche <sup>8</sup>.

I fattori principali che lo caratterizzano sono la tipologia di membrane, le caratteristiche della biomassa e le modalità operative dell'impianto MBR che vanno distinte in base ai parametri operativi della biomassa e delle membrane stesse. A questi fattori si aggiungono anche l'aerazione e le dimensioni dei moduli <sup>9</sup>.

La biomassa di un reattore MBR è caratterizzata da diverse particelle, dalle frazioni colloidali e disciolte ognuna delle quali potrebbe causare lo sporcamento delle membrane . Tali sostanze prendono il nome di foulants <sup>7</sup>. Tali composti sono definiti Sostanze Polimeriche Extracellulari (EPS) se legate ai fiocchi di fango e Prodotti Microbici Solubili (SMP) se sono presenti liberamente nel surnatante. Si definiscono invece Particelle Esopolimeriche Trasparenti (TEP) quel gruppo di particelle causa della formazione del biofilm in ambiente marino.

Le EPS e gli SMP sono composti di polisaccaridi, proteine, lipidi, acidi nucleici che provengono dalla lisi cellulare, da metaboliti microbici o componenti dei reflui non metabolizzati <sup>10</sup>.

Gli EPS possiedono un'ampia superficie e trasportano numerosi gruppi funzionali, esercitando una grande influenza sulle caratteristiche chimico-fisiche dei fiocchi di fango, come le proprietà di adesione, sedimentazione, flocculazione e disidratazione e, quindi, influiscono in modo significativo sull'incrostazione della membrana negli MBR <sup>9</sup> (Fig 2).

Gli SMP rappresentano solo una piccola parte della sospensione dei fanghi in un dato MBR rispetto ad altri foulants, ma tendono ad aderire preferibilmente alla superficie della membrana, causando gravi incrostazioni <sup>11</sup>. L'accumulo di SMP sulla superficie della membrana forma generalmente uno strato di gel idratato e melma, che generalmente possiede una permeabilità estremamente bassa e un'elevata resistenza alla filtrazione rispetto agli strati di cake <sup>12</sup> (Fig.3).

Le TEP possono essere considerate come una sorta di sostanze polimeriche extracellulari sospese (EPS) che sono presenti sotto forma di particelle discrete <sup>14</sup> e possono attaccarsi o essere facilmente adsorbiti da altre superfici solide, comprese le membrane. È stato riportato che le TEP possono essere colonizzate dai batteri <sup>15</sup> e, di conseguenza, questi batteri possono essere trasportati su superfici solide attraverso l'attaccamento delle TEP a causa della loro elevata viscosità <sup>16</sup>. Questo a sua volta suggerisce un possibile meccanismo attraverso il quale le TEP possono contribuire al biofouling di membrana <sup>16</sup> (Fig.4).

## Bioreattori a membrana dinamica autoformante (SFDMBR)

Negli ultimi anni sono stati compiuti notevoli progressi nel trattamento delle acque reflue tramite la tecnologia MBR con lo scopo di poter riutilizzare le acque trattate. Tuttavia il fouling della membrana rappresenta il principale ostacolo per l'applicazione su larga scala di questa promettente tecnologia. La formazione delle incrostazioni, richiede infatti la pulizia della membrana e la sostituzione delle stesse alla fine della vita utile, facendo incrementare notevolmente sia i costi di gestione che quelli relativi all'acquisto di nuovi moduli. <sup>1819</sup>

Il mondo scientifico ha prestato molta attenzione a questo problema, approfondendo ulteriormente la caratterizzazione di questo fenomeno e le molteplici cause che lo favoriscono per definire avanzate strategie operative che siano in grado di minimizzarne la formazione nel tempo, anche facendo ricorso a materiali innovativi o a soluzioni impiantistiche ibride che riescano a mitigare la formazione del fouling e, al contempo, incrementino le performance depurative del sistema.

In alternativa quindi ai sistemi MBR convenzionali, altra interessante soluzione proposta per ridurre i costi di investimento legati all'acquisto degli onerosi moduli a membrana e alla loro degradazione nel tempo consiste nell'utilizzo di innovative membrane dinamiche auto-formanti (SFDM). Tale tecnologia si basa sulla formazione, mediante complessi meccanismi fisici, chimici e biologici, di una membrana dinamica auto-formante su un materiale di supporto inerte a pori grossolani (10–200 micron) a basso costo<sup>20 21</sup>.

Una membrana dinamica DM si forma su un materiale di supporto sottostante come una membrana, una rete o un tessuto filtrante, quando la soluzione<sup>2223</sup> e filtrata contiene particelle solide sospese come cellule microbiche e fiocchi<sup>24</sup>. Le particelle organiche e colloidali che normalmente provocano lo sporcamento della membrana vengono intrappolate nello strato di filtrazione della biomassa, prevenendo così l'incrostazione del materiale di supporto<sup>24</sup>. La formazione dello strato di “cake” sulla superficie della membrana, (Fig.5), può determinare proprietà di rigetto del sistema

in quanto lo strato che si deposita agirà come una membrana secondaria prima di quella “reale” e del materiale di supporto <sup>24</sup>.

Le membrane dinamiche possono essere classificate in due gruppi:

- membrane autoformanti (self-forming dynamic membrane SFDM) che sono generate dalle sostanze presenti nella miscela liquida che durante la filtrazione si depositano sulla superficie di supporto <sup>25</sup>;
- membrane pre-rivestite (precoated dynamic membrane PDM) denominate anche membrane FIP (formed in place), che sono generate facendo filtrare sulla superficie di supporto, generalmente un materiale poroso, una soluzione di una o più componenti colloidali specifici; le membrane dinamiche pre-rivestite, a loro volta sono suddivise in due gruppi: membrane additive singole e composite <sup>25</sup>.

SFDM può essere un'opzione alternativa per le membrane MF/UF, perché potrebbe ridurre efficacemente l'inevitabile incrostazione impedendo che i foulants (EPS, SMP, TEP) entrino in contatto con la membrana primaria <sup>25</sup>. Comprendere il fouling e la sua mitigazione è di primaria importanza per l'ottimizzazione e l'implementazione di SFDMBR.

Il fouling in SFDMBR può essere definito come un deposito o accumulo “indesiderato” di particelle dopo la formazione di SFDM, che provocherebbe resistenza alla filtrazione e il deterioramento delle prestazioni <sup>25</sup>. Liang et al, (2012) hanno scoperto che le incrostazioni di SFDM potrebbero essere influenzate dalle proprietà dei fanghi come viscosità apparente, EPS, contenuto di carboidrati nell'EPS e la velocità specifica di assorbimento dell'ossigeno. Quindi il controllo delle proprietà dei fanghi potrebbe aumentare la durata delle operazioni di SFDM senza sporcare la membrana. L'estrazione degli EPS in situ, determina la secrezione degli EPS solubili noti anche come SMP che penetrano nei vuoti interparticellari dello strato di DM determinando una maggiore resistenza e una diminuzione della porosità dello strato stesso (Fig.6).

Inoltre, il contenuto di EPS, in particolare di eEPS ossia di carboidrati, contribuiscono in maniera positiva al fouling di membrana, in quanto le particelle di fango circondate da una grande quantità di EPS e di eEPS sono più inclini ad aderire a SFDM con un conseguente ulteriore aumento della resistenza alla filtrazione. La forza di aderenza di EPS e di eEPS non solo promuove un'ulteriore deposizione dei fanghi ma impedisce anche che le particelle di fango depositate vengono portate via dalla forza di taglio<sup>26</sup>. Inoltre il contenuto crescente di tali sostanze determina un aumento della viscosità dei fanghi che a sua volta indebolisce in una certa misura la turbolenza all'aerazione e quindi viene frenato il trasporto all'indietro della particelle di fango<sup>26</sup>.

## **Applicazione dei processi elettrochimici ai bioreattori a membrana (eMBR)**

Recenti studi hanno dimostrato che l'integrazione di processi elettrochimici in un impianto MBR rappresenta una tecnologia alternativa per il controllo della contaminazione della membrana<sup>27,28,29</sup>. Questo sistema ibrido, denominato elettro-bioreattore a membrana (e-MBR), si basa sull'integrazione di impianti MBR con processi elettrochimici che, instaurandosi a seguito dell'applicazione di un campo elettrico tramite elettrodi posti nel reattore biologico, migliorano sia le prestazioni depurative che il controllo del fouling<sup>29</sup>.

I principali meccanismi elettrochimici che si sviluppano quando è applicato un campo di corrente in un elettro bioreattore a membrana sono l'elettrocoagulazione, l'elettrosmosi, l'elettroforesi.<sup>30,31</sup>

L'elettrocoagulazione e la neutralizzazione della carica delle particelle permettono a queste ultime di unirsi, formando fiocchi di maggiori dimensioni<sup>32</sup> (Fig 7). Questi fiocchi potrebbero essere facilmente rimossi con la filtrazione poichè sono relativamente grandi; inoltre contengono meno acqua

e sono più stabili <sup>32</sup>. Questo processo consente di rimuovere dalle acque reflue diversi contaminanti, come metalli pesanti, solidi sospesi e sostanze organiche, utilizzando corrente elettrica ed elettrodi metallici sacrificali, solitamente, in ferro e alluminio, al posto di costosi reagenti chimici.

L'elettrosmosi è, invece, la rimozione dell'acqua legata dal doppio strato elettrico dei fiocchi microbici (Figura 7), incrementando la disidratabilità dei fanghi e diminuendo la resistenza alla filtrazione della miscela areata <sup>33</sup>. Si verifica quando il liquido sfuso viene spostato verso l'elettrodo caricato in modo opposto, infatti, essendo comunemente caricato positivamente viene attratto verso il catodo e scorre verso la membrana facilitando la filtrazione <sup>34</sup>.

L'elettroforesi (Figura 7) invece è il movimento delle particelle cariche verso l'elettrodo caricato di segno opposto su cui si depositano. Anche esso è ritenuto un meccanismo elettrocinetico responsabile della riduzione del fouling di membrana. La superficie dei fiocchi della miscela areata è infatti caricata negativamente, quindi è possibile controllare il movimento delle particelle di fango attivo applicando un campo elettrico esterno <sup>35</sup>.

Quindi tali meccanismi aiutano a degradare gli inquinanti e nello stesso tempo a controllare la mobilità e la deposizione di foulants sulla superficie della membrana <sup>36</sup>.

## **Combinazione dei processi elettrochimici ai bioreattori a membrana dinamica autoformante (e-ESFDMBR): Applicazione a scala pilota.**

Le potenzialità dell'integrazione dei processi di natura fisica, biologica, chimica ed elettrochimica e di una membrana dinamica autoformante incapsulata all'interno di un bioreattore a membrana a scala pilota, sperimentate presso l'impianto di depurazione delle acque reflue sito in località

Tavernola, nel comune di Battipaglia (Sa), hanno rappresentato una promettente tecnologia per il trattamento e il riutilizzo delle acque reflue.

L'attività di tirocinio svolta, si è concentrata sull'analisi delle efficienze depurative di un elettro bioreattore a membrana a scala pilota operante con refluo reale che utilizza per la fase di filtrazione un'innovativa membrana dinamica autoformante incapsulata, recentemente brevettata dal gruppo di ricerca del laboratorio SEED dell'Università degli Studi di Salerno.

Obiettivo dell'attività sperimentale è stato quello di procedere all'analisi dei meccanismi di formazione della membrana dinamica autoformante, studiare le efficienze di rimozione dei contaminanti, l'andamento dei precursori del fouling, l'andamento della pressione di transmembrana nel tempo e la concentrazione dei solidi nella miscela areata, al fine di valutare la fattibilità tecnica per l'applicazione a scala reale dell'innovativo sistema proposto.

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando una configurazione sperimentale a scala pilota (Fig.8) realizzata nell'ambito delle attività di ricerca di un dottorando (Dottorati Innovativi con Caratterizzazione Industriale approvati dal Ministero nell'ambito delle azioni PON ricerca e innovazione 2014-2020) caratterizzata da un volume di lavoro di 100 L, una portata influente di 32,4 ml/minuto, una portata di permeato di 54 ml/minuto e una portata di controlavaggio di 162 ml/minuto. Il refluo utilizzato è stato un refluo reale che ha seguito i trattamenti preliminari grigliatura, roto-stacciatura, dissabbiatura per poi essere trattato all'interno dell'impianto pilota ed essere poi smaltito in uscita nuovamente al dissabbiatore.

L'impianto ha funzionato in continuo con una portata effluente di permeato pari a 30 LMH; il cui funzionamento ha previsto l'uso di tre pompe dosatrici rispettivamente di influente, effluente e controlavaggio. La pompa dell'effluente una volta avviata per mezzo di un timer, ha lavorato con cicli di 9 minuti ON di filtrazione attraverso la membrana e 1 minuti OFF durante il quale ha lavorato la pompa del controlavaggio al fine di garantirne la pulizia della stessa. L'attivazione invece della

pompa dell'influente è stata regolata da un galleggiante presente all'interno del reattore in funzione del suo livello, ossia quando esso diminuiva automaticamente la pompa si attivava. Al reattore è stato applicato inoltre un gradiente di tensione esterno, ed è stato applicato agli elettrodi attraverso l'alimentazione DC con cicli di 5 minuti ON e 20 minuti OFF. La densità di corrente calcolata come il prodotto dell'intensità di corrente pari a  $0,9 \text{ mA/cm}^2$  e l'area cilindrica dell'elettrodo pari a  $7505,54 \text{ cm}^2$  era pari a  $6.75 \text{ A}$ .

Ai fini del monitoraggio dell'impianto sono stati prelevati 3 campioni rispettivamente di influente, effluente e miscela areata. Su tali campioni, giornalmente, sono state eseguite le misurazioni di parametri quali il pH, la temperatura e l'ossigeno disciolto (OD) attraverso appositi strumenti, quali, sonde HI 9147 Dissolved Oxygen Meter per quanto riguarda l'ossigeno disciolto (OD) sia in percentuale che in mg/l, mentre HI 99121 pH/Temperature Meter per il pH e la temperatura in °C.

L'attività sperimentale condotta, ha previsto lo svolgimento di analisi eseguite presso il Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (SEED). Tali analisi sono state condotte sui 3 campioni, rispettivamente di influente, effluente e miscela aerata, prelevati presso l'impianto di depurazione, con cadenza di due giorni a settimana e hanno riguardato i seguenti parametri Torbidità, Solidi Sospesi Totali (SST), Solidi Sospesi Volatili (SSV), COD, Azoto Ammoniacale ( $\text{NH}_4$ ) e UV254.

I risultati delle analisi svolte, hanno riportato un'efficienza di rimozione dei contaminanti convenzionali quali, COD,  $\text{NH}_4$  e UV254 rispettivamente pari a  $97 \pm 4,45 \%$ ,  $98 \pm 1,59 \%$  e  $73 \pm 16,82 \%$ . Ciò è dovuto al fatto che quando il campo DC era in modalità ON, l'anodo e il catodo sono stati rispettivamente esposti a condizioni di ossidazione e riduzione che hanno generato, in situ, coagulanti capaci di assorbire i composti disciolti e queste elevate efficienze di rimozione ottenute, sono inoltre, una conferma della formazione di DM, in quanto questo dimostra che il DM formato era in grado di trattenere sia i solidi sia i microrganismi a crescita lenta come batteri nitrificati.

In questo lavoro, la formazione di DM è stata anche confermata da un'elevata rimozione della

torbidità. Infatti, già dal primo giorno di avvio dell'attività sperimentale, la torbidità presentava valori inferiori a 5 NTU, che è il valore di riferimento per la formazione della membrana presente in letteratura, per poi scendere al di sotto dell'unità dopo il quinto giorno di attivazione dell'impianto.

La combinazione dei processi elettrochimici con la membrana dinamica autoformante incapsulata ha consentito, inoltre, di migliorare anche un altro problema legato ai bioreattori a membrana, ossia la formazione del fouling di membrana, evidenziando un andamento della pressione di trasmembrana (TMP) nel tempo pressoché costante. Tale parametro, infatti, è strettamente correlato alla formazione del fouling. A seguito del processo di elettrocoagulazione, l'aumento del diametro delle particelle ha permesso di ridurre l'incrostazione della membrana (Shen et al, 2015) in quanto, tali fiocchi essendo relativamente grandi, contengono acqua meno legata e di conseguenza sono più stabili, per cui possono essere facilmente rimossi dalla filtrazione. È stato così osservato un tasso di sporcamento della membrana pari a 0,0167 [KPa/h].

Poiché, il fouling di membrana è direttamente correlato ai suoi precursori quali EPS, SMP e TEP, essi sono stati analizzati durante l'attività sperimentale per capire la loro influenza sull'incrostazione della membrana, ottenendo una concentrazione presente all'interno della miscela aerata rispettivamente di 3,45 +/- 1,99 mg/g di biomassa, 2,78 +/- 1,78 mg/g di biomassa e 7,18 +/- 2,77 mg/g di biomassa per EPS, SMP e TEP.

I risultati ottenuti sono riconducibili al fatto che gli idrossidi di alluminio a carica positiva formati sul lato dell'anodo a causa dell'ossidazione elettrolitica di quest'ultimo hanno destabilizzato e neutralizzato l'EPS con carica negativa, i colloidi caricati e i soluti nella sospensione (Le Chech et al, 2006), per cui questi idrossidi precipitano in particelle sospese adsorbite, colloidi e sostanze organiche solubili portando ad una sostanziale riduzione dei precursori (EPS, SMP; TEP) legati al fouling di membrana e, quindi, delle incrostazioni della membrana. Infatti, l'elettrolisi dell'acqua e l'ossidazione sulla superficie dell'anodo potrebbero aver generato radicali idrossilici (Wang et al, 2004), ossia specie che forniscono un alto potenziale di ossidazione, in grado di mineralizzare po-

lisaccaridi e proteine anche in forma legata, rendendo EPS, SMP e TEP prodotti più biodegradabili che sono stati poi biologicamente degradati.

## Conclusioni

I bioreattori a membrana (MBR) sono riconosciuti in tutto il mondo come una tecnologia promettente per il trattamento e il riutilizzo delle acque reflue grazie ai loro vantaggi rispetto ai trattamenti convenzionali, in quanto garantiscono elevati rendimenti di rimozione a fronte di ridotte superfici di ingombro, una qualità dell'effluente più elevata e più stabile come conseguenza della filtrazione a membrana, una minor produzione dei fanghi (Melin et al, 2006). Inoltre il refluo depurato viene considerato una risorsa riutilizzabile. La principale novità di questa tecnologia consiste nell'uso di uno o più moduli di membrana a ultrafiltrazione o microfiltrazione. Le membrane sono mezzi porosi capaci di separare selettivamente da un fluido sostanze contenute in forma sospesa o disciolta sotto l'azione di una forza motrice; l'attraversamento della membrana comporta un meccanismo di filtrazione con la produzione di permeato di elevata qualità e un concentrato che si accumula all'interno del reattore stesso da cui può essere allontanato periodicamente. Nonostante questi vantaggi, il mantenimento della permeabilità e la prevenzione del fouling di membrana sono i principali problemi di funzionamento degli MBR.

Il fouling di membrana è lo sporcamento della membrana a causa di depositi che si accumulano su di essa durante la filtrazione e i fattori che lo influenzano sono la tipologia di membrana, le caratteristiche della biomassa e le modalità operative dell'impianto MBR. <sup>37</sup>

I metodi tradizionali per la mitigazione del fouling, come la pulizia fisica e chimica, aumentano la domanda di energia e i costi operativi, oltre a ridurre la durata della membrana. Per ridurre il fouling di membrana e compensare a questo consumo di energia, la ricerca scientifica ha proposto diversi tentativi di correlare la riduzione della permeabilità delle membrane con la concentrazione

di biomassa nel reattore, la dimensione dei fiocchi, e più recentemente con la concentrazione di sostanze polimeriche extracellulari (EPS) o prodotti microbici solubili (SMP).

Pertanto, negli ultimi anni è emersa una quantità significativa di strategie avanzate, tra queste, l'integrazione di processi elettrochimici come elettrocoagulazione, elettrosmosi ed elettroforesi, nei bioreattori a membrana che rappresenta un approccio tecnologico alternativo per il controllo del fouling di membrana e il miglioramento dell'efficienza del trattamento. L'impianto viene così definito con l'acronimo di eMBR. L'azione del campo elettrico consente l'ossidazione dell'anodo in alluminio che genera in situ idrossidi insolubili e coagulanti che aumentano le dimensioni dei fiocchi di fango, si crea così un flusso di miscela aerata che viene spinto verso la membrana generando un fenomeno di attrazione tra le particelle cariche negativamente e l'anodo, allontanandole così dalla membrana stessa.

Sono state ideate anche tecnologie di trattamento delle acque reflue basate sullo sviluppo della biomassa non flocculata, tra cui il bioreattore a membrana dinamica auto-formante (Self-Forming Dynamic Membrane BioReactor, SFDMBR). L'innovazione apportata da questa tecnologia consiste nella sostituzione dei costosi moduli a membrana con una membrana dinamica auto-formante (SFDM). Le membrane dinamiche autoformanti sono generate dalle sostanze presenti nella miscela liquida che durante la filtrazione si depositano sulla superficie di supporto e la formazione della DM è un processo complesso che coinvolge diversi meccanismi fisico-chimici e microbiologici, come deposito di particelle, blocco dei pori e formazione di uno strato biologico, noto come strato di "cake".<sup>38</sup>

La tecnologia SFDMBR comporta numerosi vantaggi rispetto ai bioreattori a membrana convenzionali, tra cui: ridotti costi di investimento; migliore controllo del fouling; elevato flusso permeato, elevate capacità di trattamento nella fase stabile. La sostituzione dei costosi moduli a membrana con materiali a pori grossolani a basso costo rende gli impianti SFDMBR più convenienti dal punto di vista economico rispetto agli MBR.<sup>394041</sup>

L'obiettivo principale di tale studio è stato quello di testare la combinazione di processi elettrochimici agli MBR tramite l'utilizzo di un innovativo modulo di membrana. Si tratta di un modulo di membrana dinamica autoformante incapsulata brevettata dal gruppo di ricerca del Laboratorio SEED dell'Università degli Studi di Salerno, al fine di valutare come tale promettente tecnologia influisce sul controllo del fouling e sul miglioramento delle performance al fine di ottenere una maggiore rimozione dei contaminanti e abbattere i costi derivanti dalle membrane grazie all'economicità dei materiali di supporto utilizzati dal gruppo di ricerca rispetto alle classiche membrane.

Concludendo, sulla base dei risultati ottenuti, è possibile affermare che il sistema e-ESFDMBR, sviluppato, dal gruppo di ricerca del Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (SEED) dell'Università degli Studi di Salerno, possiede un ottimo potenziale per superare i limiti di prestazione di un sistema MBR convenzionale in quanto la combinazione dei processi elettrochimici con un modulo di membrana dinamica autoformante incapsulata favorisce la riduzione del fouling di membrana e al contempo garantisce maggiore capacità di rimozione dei contaminanti per cui da qui nasce la possibilità di verificare l'applicabilità tecnica ed economica di tale innovazione in impianti a scala reale <sup>4243</sup> .

## References

1. Water, wastewater and soil treatment by advanced oxidation processes (AOPs).
2. ElNaker, N. A., Elektorowicz, M., Naddeo, V., Hasan, S. W. & Yousef, A. F. Assessment of Microbial Community Structure and Function in Serially Passaged Wastewater Electro-Bioreactor Sludge: An Approach to Enhance Sludge Settleability. *Scientific Reports* **8**, (2018).
3. Bioreattori a membrane per la depurazione delle acque reflue. *Edizione Aster, Collana editoriale*

*in Ingegneria Ambientale* (2012).

4. Naddeo, V., Landi, M., Scannapieco, D. & Belgiorno, V. Sonochemical degradation of twenty-three emerging contaminants in urban wastewater. *Desalination and Water Treatment* **51**, 6601–6608 (2013).

5. Corpuz, M. V. A. *et al.*. Wastewater treatment and fouling control in an electro algae-activated sludge membrane bioreactor. *Science of The Total Environment* **786**, 147475 (2021).

6. Naddeo, V. & Taherzadeh, M. J. Biomass valorization and bioenergy in the blue circular economy. *Biomass and Bioenergy* **149**, 106069 (2021).

7. Drews, A. Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation contradictions, cause and cures. *Journal of Membrane Science* **363**, 1–28 (2010).

8. Judd, S. *The MBR Book, principal and applications of membrane bioreactor for water and wastewater treatment*. (Elsevier, 2011).

9. Lin, H. *et al.*. A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics roles in membrane fouling and control strategies. *Journal of Membrane Science* **460**, 110–125 (2014).

10. Drews, A., Lee, C.-H. & Kraume, M. Membrane fouling - a review on the role of EPS. *Desalination* **200**, 186–188 (2006).

11. Yao, M., Ladewig, B. & Zhang, K. Identification of the change of soluble microbial products on membrane fouling in membrane bioreactor (MBR). *Desalination* **278**, 126–131 (2011).

12. Chen, J.-P., Yang, C.-Z., Zhou, J.-H. & Wang, X.-Y. Study of the influence of the electric field on membrane flux of a new type of membrane bioreactor. *Chemical Engineering Journal* **128**, 177–180 (2007).

13. Teng, J. *et al.*. Effects of molecular weight distribution of soluble microbial products (SMPs) on

- membrane fouling in a membrane bioreactor (MBR): Novel mechanistic insights. *Chemosphere* **248**, 126013 (2020).
14. Berman, T. Biofouling: TEP – a major challenge for water filtration. *Filtration & Separation* **47**, 20–22 (2010).
15. Passow, U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments. *Progress in Oceanography* **55**, 287–333 (2002).
16. Meng, S., Rzechowicz, M., Winters, H., Fane, A. G. & Liu, Y. Transparent exopolymer particles (TEP) and their potential effect on membrane biofouling. *Applied Microbiology and Biotechnology* **97**, 5705–5710 (2013).
17. Meng, S. *et al.*. The role of transparent exopolymer particles (TEP) in membrane fouling: A critical review. *Water Research* **181**, 115930 (2020).
18. Lado, J. J. *et al.*. Performance analysis of a capacitive deionization stack for brackish water desalination. *Desalination* **501**, 114912 (2021).
19. Pervez, M. N. *et al.*. A critical review on nanomaterials membrane bioreactor (NMs-MBR) for wastewater treatment. *npj Clean Water* **3**, (2020).
20. Borea, L. *et al.*. Wastewater treatment by membrane ultrafiltration enhanced with ultrasound: Effect of membrane flux and ultrasonic frequency. *Ultrasonics* **83**, 42–47 (2018).
21. Naddeo, V. *et al.*. Removal of contaminants of emerging concern from real wastewater by an innovative hybrid membrane process – UltraSound Adsorption and Membrane ultrafiltration (USAMe®). *Ultrasonics Sonochemistry* **68**, 105237 (2020).
22. Ibrahim, Y., Abdulkarem, E., Naddeo, V., Banat, F. & Hasan, S. W. Synthesis of super hydrophilic cellulose-alpha zirconium phosphate ion exchange membrane via surface coating for the removal of heavy metals from wastewater. *Science of The Total Environment* **690**, 167–180 (2019).

23. Prado, M. *et al.*. Removal of emerging contaminant and fouling control in membrane bioreactors by combined ozonation and sonolysis. *International Biodeterioration & Biodegradation* **119**, 577–586 (2017).
24. Mahat, S. B., Omar, R., Idris, A., Kamal, S. M. M. & Idris, A. I. M. Dynamic membrane applications in anaerobic and aerobic digestion for industrial wastewater: A mini review. *Food and Bioprocess Processing* **112**, 150–168 (2018).
25. Liu, H., Yang, C., Pu, W. & Zhang, J. Formation mechanism and structure of dynamic membrane in the dynamic membrane bioreactor. *Chemical Engineering Journal* **148**, 290–295 (2009).
26. Liang, S., Qu, L., Meng, F., Han, X. & Zhang, J. Effect of sludge properties on the filtration characteristics of self-forming dynamic membranes (SFDMs) in aerobic bioreactors: Formation time filtration resistance, and fouling propensity. *Journal of Membrane Science* **436**, 186–194 (2013).
27. Giwa, A. & Hasan, S. W. Theoretical investigation of the influence of operating conditions on the treatment performance of an electrically-induced membrane bioreactor. *Journal of Water Process Engineering* **6**, 72–82 (2015).
28. Zhang, J. *et al.*. Low-voltage electric field applied into MBR for fouling suppression: Performance and mechanisms. *Chemical Engineering Journal* **273**, 223–230 (2015).
29. Ensano, B. M. B. *et al.*. Combination of Electrochemical Processes with Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment and Fouling Control: A Review. *Frontiers in Environmental Science* **4**, (2016).
30. Abdallah, H. *et al.*. Amino-functionalized mesoporous nano-silica/polyvinylidene fluoride composite as efficient ultrafiltration membrane. *DESALINATION AND WATER TREATMENT* **205**, 63–75 (2020).

31. Ibrahim, Y., Naddeo, V., Banat, F. & Hasan, S. W. Preparation of novel polyvinylidene fluoride (PVDF)-Tin(IV) oxide (SnO<sub>2</sub>) ion exchange mixed matrix membranes for the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology* **250**, 117250 (2020).
32. Kobya, M. & Demirbas, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering* **8**, 64–74 (2015).
33. Ibeid, S., Elektorowicz, M. & Oleszkiewicz, J. A. Modification of activated sludge properties caused by application of continuous and intermittent current. *Water Research* **47**, 903–910 (2013).
34. Asif, M. B., Maqbool, T. & Zhang, Z. Electrochemical membrane bioreactors: State-of-the-art and future prospects. *Science of The Total Environment* **741**, 140233 (2020).
35. Akamatsu, K., Lu, W., Sugawara, T. & Nakao, S.-ichi. Development of a novel fouling suppression system in membrane bioreactors using an intermittent electric field. *Water Research* **44**, 825–830 (2010).
36. Bani-Melhem, K. & Elektorowicz, M. Development of a Novel Submerged Membrane Electro-Bioreactor (SMEBR): Performance for Fouling Reduction. *Environmental Science & Technology* **44**, 3298–3304 (2010).
37. Naddeo, V. & Korshin, G. Water energy and waste: The great European deal for the environment. *Science of The Total Environment* **764**, 142911 (2021).
38. Jallouli, S. *et al.*. Efficient and sustainable treatment of tannery wastewater by a sequential electrocoagulation-UV photolytic process. *Journal of Water Process Engineering* **38**, 101642 (2020).
39. Ali, A. A. A., Naddeo, V., Hasan, S. W. & Yousef, A. F. Correlation between bacterial community structure and performance efficiency of a full-scale wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101472 (2020).

40. Fraiese, A. *et al.*. Ultrasonic processes for the advanced remediation of contaminated sediments. *Ultrasonics Sonochemistry* **67**, 105171 (2020).
41. Naddeo, V. Development of environmental biotechnology and control of emerging biological contaminants: the grand challenge for a sustainable future. *Water Environment Research* **92**, 1246–1248 (2020).
42. Abdulkarem, E., Ibrahim, Y., Naddeo, V., Banat, F. & Hasan, S. W. Development of Polyethersulfone/-Zirconium phosphate (PES/-ZrP) flat-sheet nanocomposite ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Research and Design* **161**, 206–217 (2020).
43. Fortunato, L., Ranieri, L., Naddeo, V. & Leiknes, T. O. Fouling control in a gravity-driven membrane (GDM) bioreactor treating primary wastewater by using relaxation and/or air scouring. *Journal of Membrane Science* **610**, 118261 (2020).

## Figure Captions

Figure 1. Fouling di membrana <sup>3</sup>

Figure 2. Rappresentazione della struttura degli EPS (a), della struttura cellulare (b) e della struttura dei fiocchi di fango <sup>9</sup>

Figure 3. Meccanismi di interazione tra SMP e membrana: (a) fango particolato-membrana, (b)SMP-membrana incontaminata, (c) strato di gel-strato di fango <sup>13</sup>

Figure 4. Possibile formazione e interruzione dei TEP nel sistema a membrana <sup>17</sup>

Figure 5. Formazione dello strato di “cake” dinamico <sup>24</sup>.

Figure 6. Schema della formazione del DM con estrazione di EPS <sup>24</sup>

Figure 7. Processi elettrochimici che si verificano in e-MBR<sup>29</sup>.

Figure 8. Impianto a scala pilota (e-ESFDMBR)

# Figures



Figure 1: Fouling di membrana <sup>3</sup>

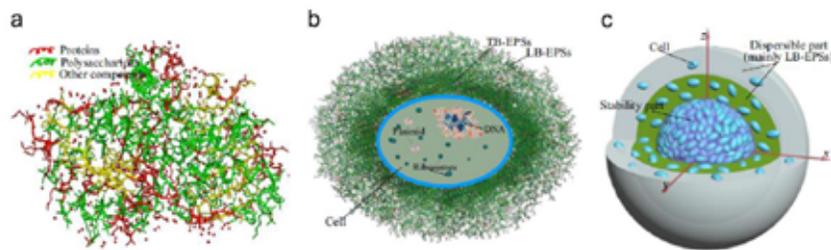


Figure 2: Rappresentazione della struttura degli EPS (a), della struttura cellulare (b) e della struttura dei fiocchi di fango <sup>9</sup>

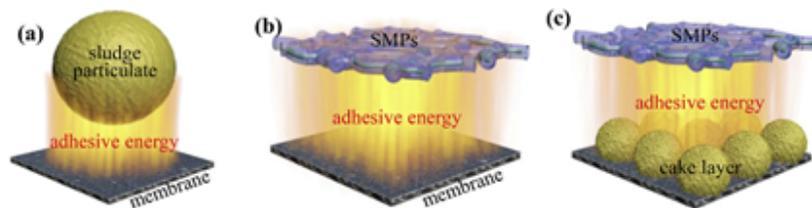


Figure 3: Meccanismi di interazione tra SMP e membrana: (a) fango particolato-membrana, (b)SMP-membrana incontaminata, (c) strato di gel-strato di fango <sup>13</sup>

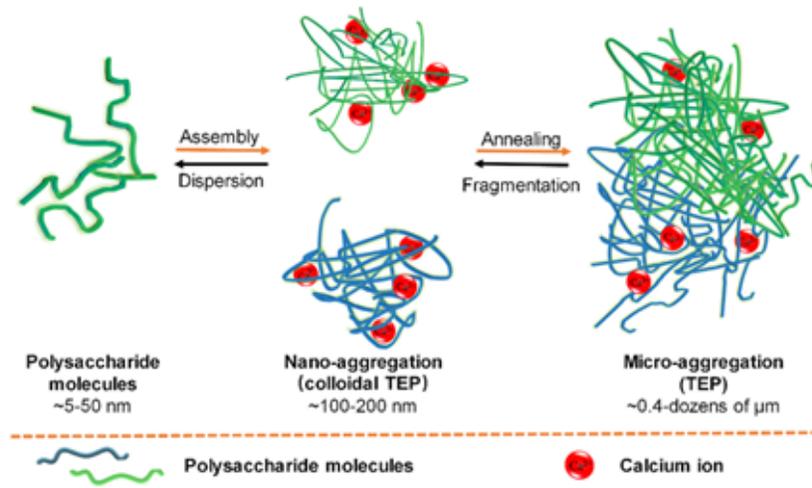


Figure 4: Possibile formazione e interruzione dei TEP nel sistema a membrana <sup>17</sup>

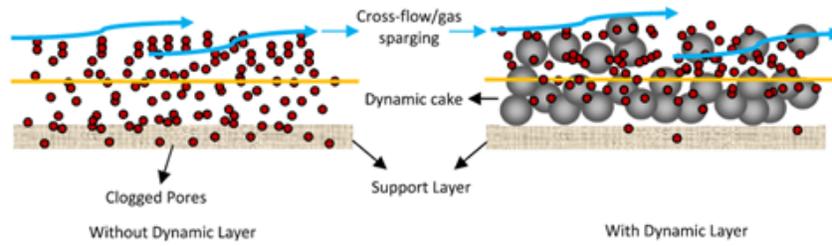


Figure 5: Formazione dello strato di “cake” dinamico <sup>24</sup>.

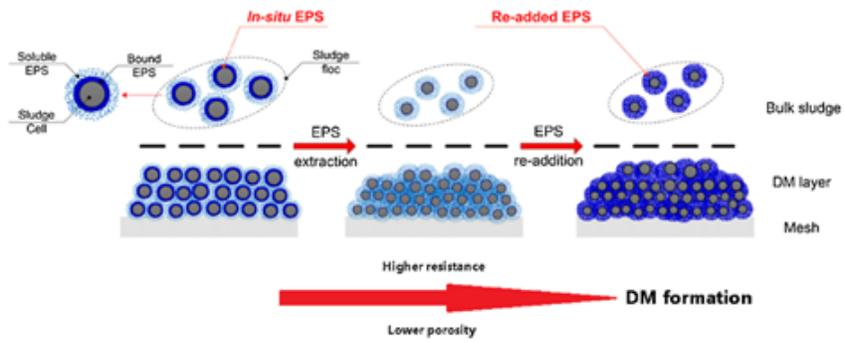


Figure 6: Schema della formazione del DM con estrazione di EPS <sup>24</sup>

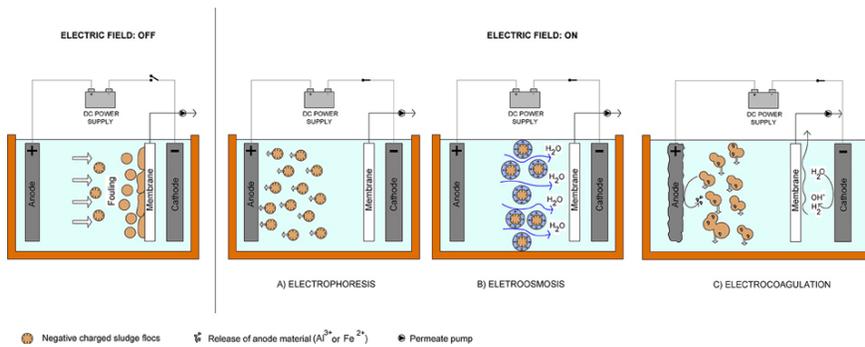


Figure 7: Processi elettrochimici che si verificano in e-MBR <sup>29</sup>.



Figure 8: Impianto a scala pilota (e-ESFDMBR)