



Università degli Studi di
Napoli Federico II



Università degli
Studi di Palermo



Università degli
Studi di Salerno



Corso di Aggiornamento

BioMAc 2013

Bioreattori a Membrane (MBR) per la depurazione delle Acque

Il controllo dei consumi energetici nei sistemi MBR

Giorgio Mannina, Università di Palermo

Palermo, 4-5 Luglio, 2013

Introduzione



Adapted from Verrecht (2009)

Tecnologia compatta

Elevata qualità dell'effluente

Concentrazione elevata di biomassa

Basse concentrazioni di TSS nell'effluente

Ritenzione di patogeni

Degradazione di inquinanti resistenti



Fouling

Elevati consumi energetici

Lavaggi chimici

Sostituzione della membrana

Richiesta di automatismi



Deposito irreversibile: deposito interno alla membrana di molecole e particelle con diametri minori o confrontabili con quello dei pori $d_p \leq d_m$, dovuto prevalentemente al fenomeno di pore blocking

Deposito reversibile: deposito superficiale sulla membrana di macromolecole e particelle con diametro maggiore di quello dei pori $d_p \geq d_m$, dovuto prevalentemente al fenomeno di cake deposition

Variabili operative

$$\text{Flux} = \frac{\text{Permeate flow}}{\text{Membrane surface}} \rightarrow \frac{\text{L/h}}{\text{m}^2} \rightarrow \text{LMH}$$

$$\text{TMP} = \text{Trans membrane pressure} \rightarrow \text{bar}$$

$$\text{Permeability} = \frac{\text{Flux}}{\text{TMP}} \rightarrow \frac{\text{LMH}}{\text{bar}}$$

$$J = \frac{\text{TMP}}{\mu \cdot R_x}$$

Rimozione del fouling

Lavaggi chimici

Lavaggi fisici

Limitazione del fouling

Ottimizzazione delle condizioni operative (**aerazione**, SRT etc...)

Modifiche delle caratteristiche della biomassa (agenti coagulanti o flocculanti, agenti adsorbenti etc...)



L'aerazione riveste un **ruolo chiave** nella mitigazione del fenomeno del fouling e nel computo della **richiesta energetica** globale per la gestione di un impianto MBR

> Portata di aria



Aumento della richiesta energetica per l'aerazione

Aumento dello sforzo di taglio sulla superficie della membrana dovuto alla maggiore turbolenza del fluido

Riduzione della dimensione dei fiocchi e conseguente rilascio di sostanze polimeriche extracellulare (EPS) (Meng et al., 2008)



Gli **studi** presenti in letteratura mostrano ancora una **mancaanza di conoscenza** sul fenomeno del fouling e sulle interazioni esistenti tra i vari fattori che lo influenzano (Drews, 2010)

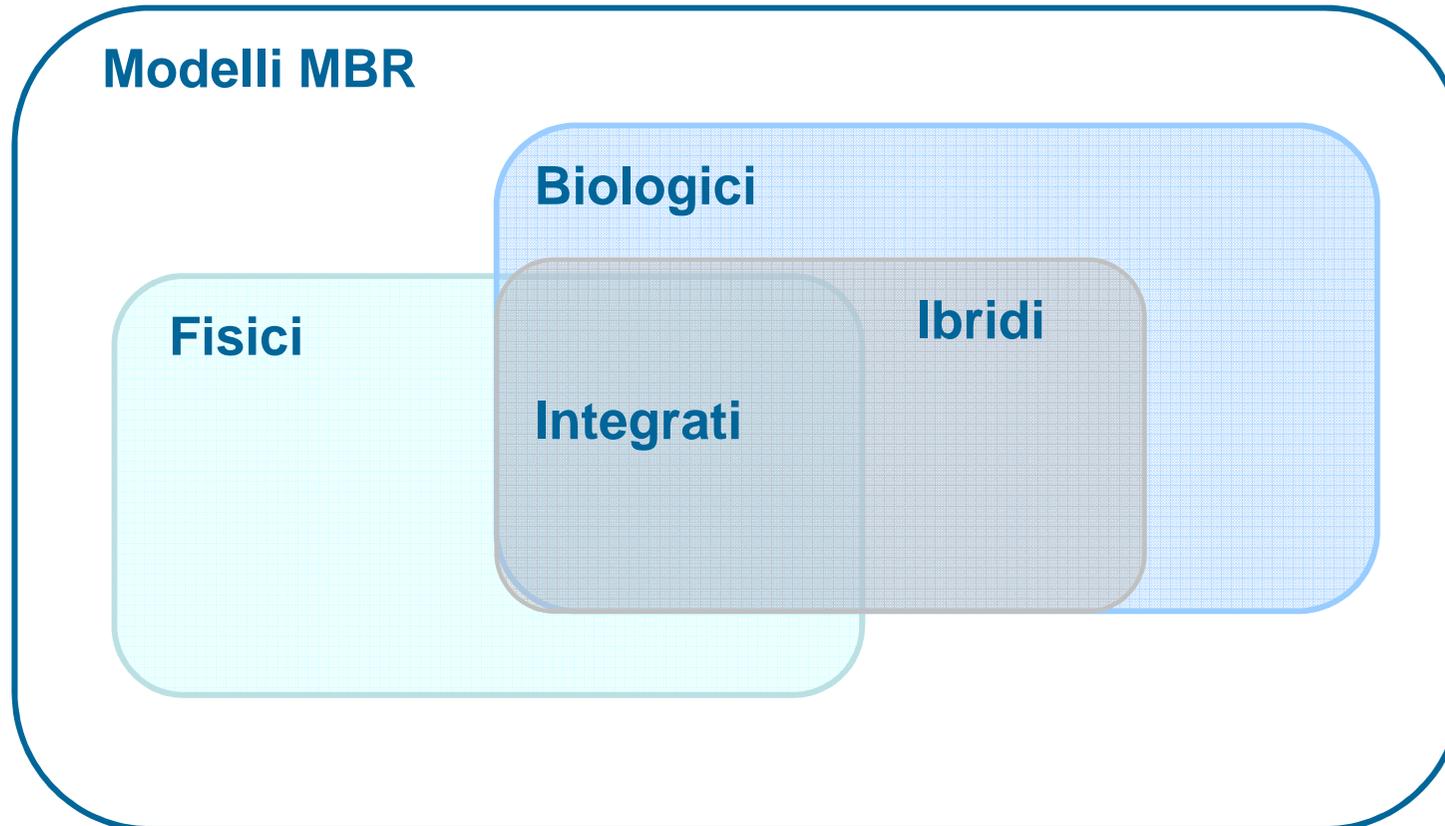


Notevoli difficoltà nell'individuare le **condizioni operative ottimali** al fine di ridurre il fouling e conseguentemente i costi energetici ad esso annessi



...modelli matematici???

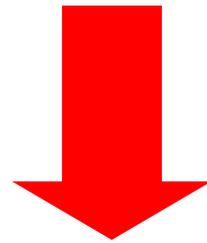




Vantaggi dei modelli integrati

- ✓ Strumento di previsione del fouling
- ✓ Supporto decisionale per la scelta delle condizioni operative ottimale per la riduzione dei costi
- ✓ Upgrading della conoscenza del fenomeno del fouling

Individuazione delle **migliori strategie gestionali** in termini di **portata di aria (qa)**, di **tempi di controlavaggio (Tb)** e di **filtrazione (Tf)** che **garantiscano la sostenibilità dei costi gestionali** e **l'alta qualità del refluo trattato**



Impianto pilota UCT-MBR
+
Modello matematico di simulazione



**Modello integrato
ASM2d-SMP-P**

Modello biologico

Modello fisico



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

La biomassa sospesa è stata modellata sulla base di equazioni differenziali rappresentanti i bilanci di massa dei singoli componenti e le cinetiche di Monod:

Processi Simulati

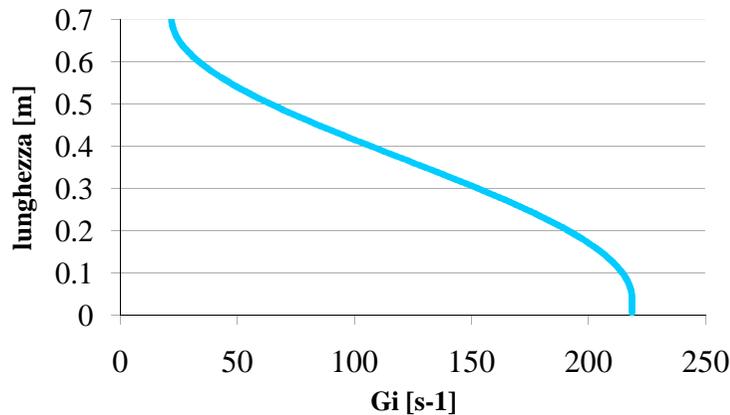
- crescita degli eterotrofi;
- decadimento degli eterotrofi;
- crescita aerobica degli autotrofi;
- decadimento degli autotrofi;
- formazione SMP;
- idrolisi degli SMP;
- degradazione degli SMP.

Formazione del deposito superficiale

Il materiale sporcante è distribuito in modo non uniforme sulla superficie della membrana

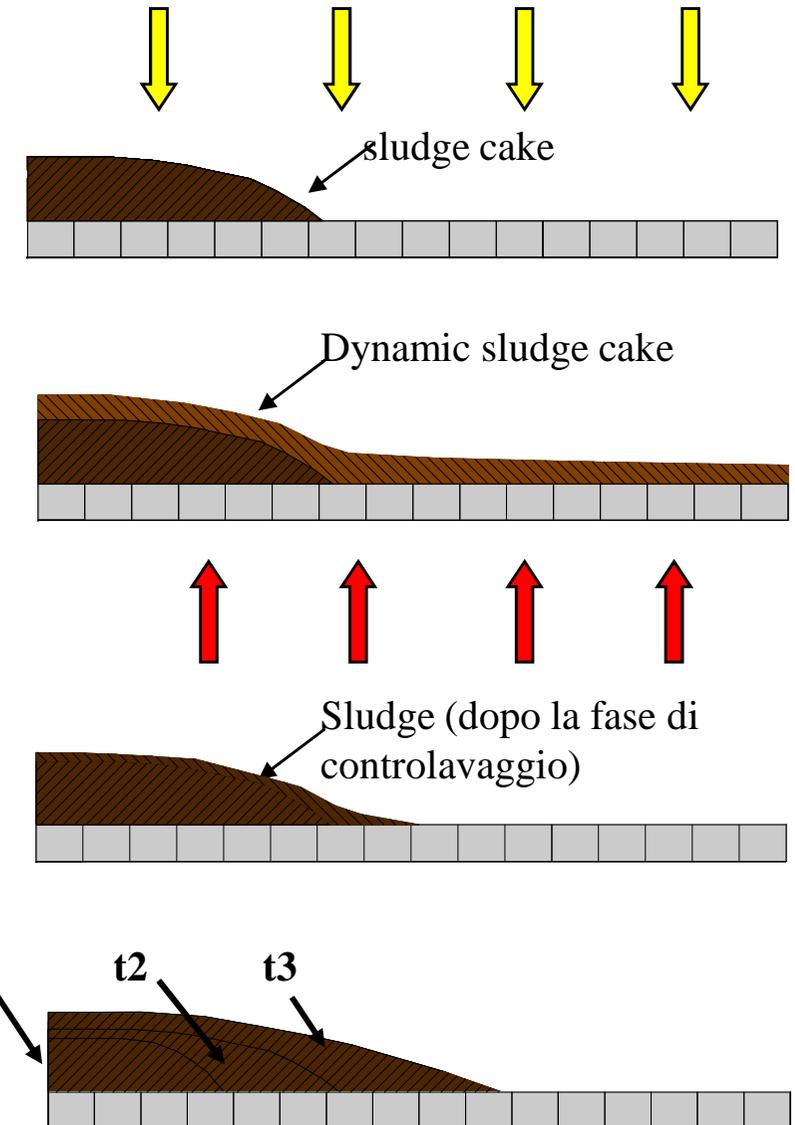


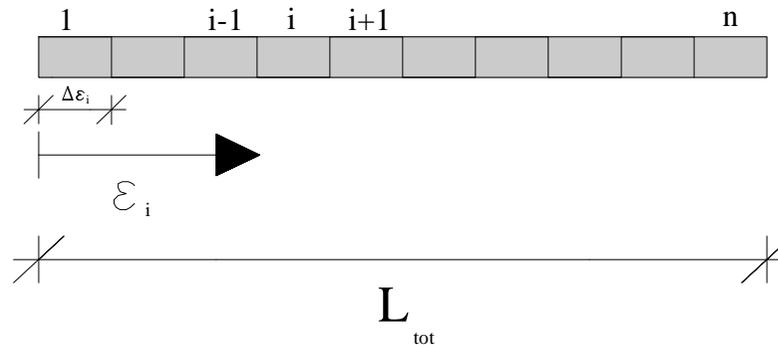
Intensità del sistema di areazione G_i



Sistema di areazione

$$G_i = \begin{cases} \sqrt{\frac{\rho_s \cdot g \cdot q_a}{\mu_s}} ; \varepsilon_i < \varepsilon_a \\ \left[0.1 + 0.45 \cdot \left(1 + \sin \frac{(2\varepsilon_i - \varepsilon_a) \cdot \pi}{2\varepsilon_a} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{\rho_s \cdot g \cdot q_a}{\mu_s}} ; \varepsilon_i \geq \varepsilon_a \end{cases}$$





$$J_i = \frac{J_{tot}}{\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i} = \frac{J_{tot}}{L_{tot}}$$

Flusso locale della generica sezione

$$E_i = \frac{24 \cdot J_i}{24 \cdot J_i + K_i \cdot G_i}$$

Probabilità di adesione dei solidi

$$\left(\frac{dM_{sf}}{dt} \right)_{a,i} = E_i \cdot MLSS \cdot J_i$$

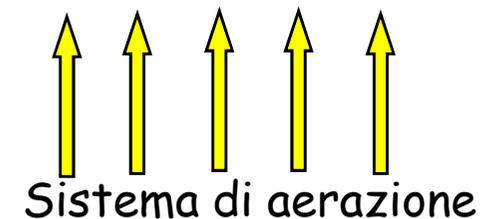
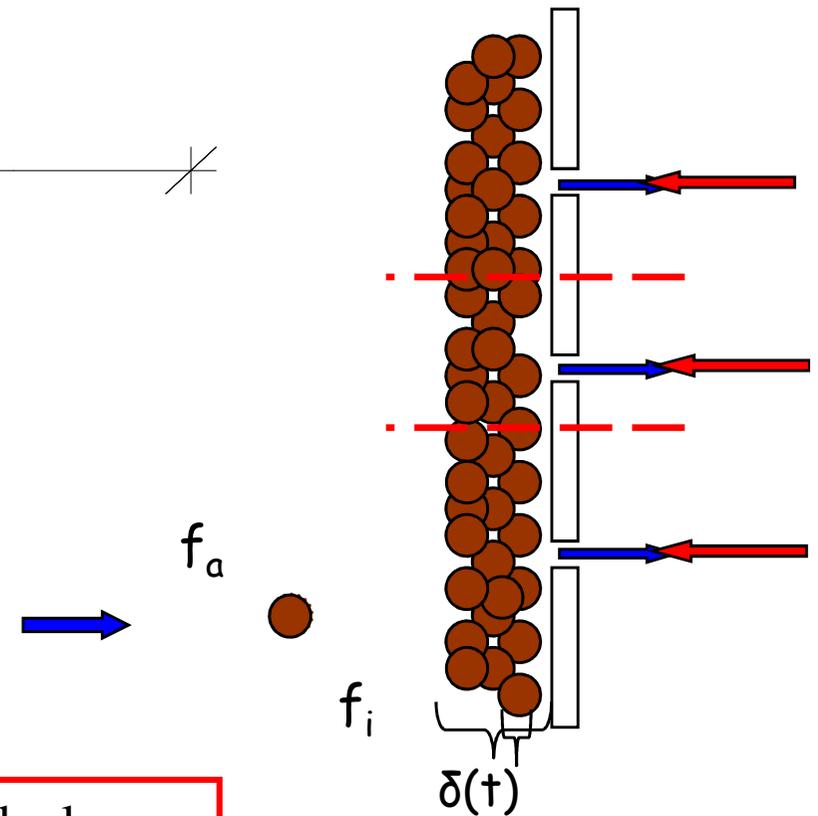
Adesione

$$\left(\frac{dM_{sf}}{dt} \right)_{d,i} = -K_d \cdot M_{sf}$$

Distacco

Spessore del cake layer medio irreversibile

$$M_{sf,i}(t) = M_{sf,i}(t-1) + dt \cdot \left[\underbrace{\left(\frac{dM_{sf}}{dt} \right)_{a,i}}_{\text{adesione}} - \underbrace{\left(\frac{dM_{sf}}{dt} \right)_{d,i}}_{\text{distacco}} \right] \rightarrow \delta(t) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N M_{tot,i}}{\rho_c \cdot n} \right)$$



Effetto della membrana biologica: Teoria del deep-bed

Secondo la teoria del deep-bed il cake si comporta come uno strato filtrante lungo il quale s'instaura un profilo di concentrazione del COD

S_{1-1} : concentrazione del COD_{sol} all'interno del reattore in seguito alla degradazione biologica

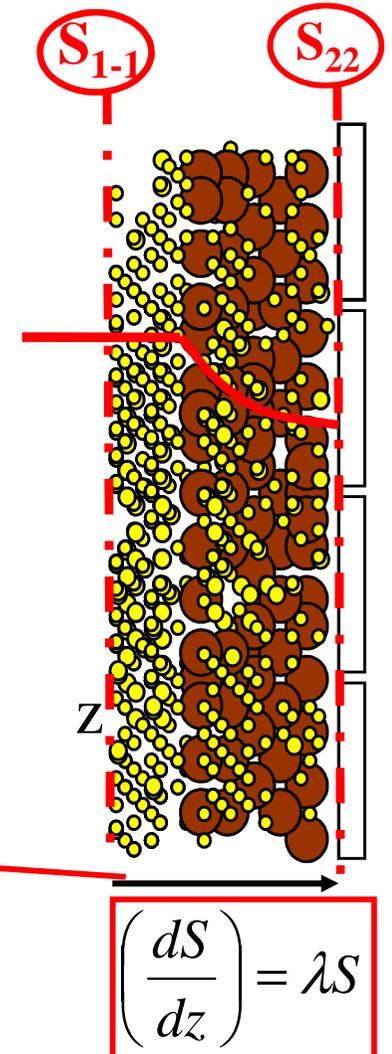
S_{2-2} : concentrazione del COD_{sol} all'interfaccia cake-membrane

$$S_{2-2} = S_{1-1} e^{-\lambda \delta}$$

Effetto della membrana biologica

Dove

λ è il parametro di *screening*, che rappresenta la frazione della componente solubile del COD trattenuta dall'unità di cake (Kuberkar and Davis, 2000)



S_{3-3} : concentrazione del CODsol nel permeato

$$S_{3-3} = fS_{2-2}$$

Effetto della membrana

Dove

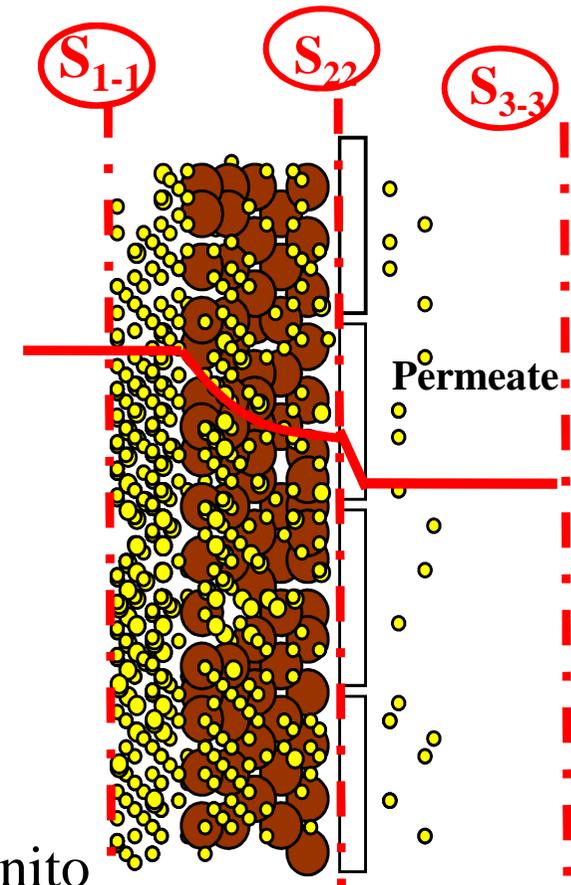
f rappresenta la frazione di COD che attraversa la membrana (Jang et al., 2006)

L'effetto globale della filtrazione (biologica e fisica) è definito dal fattore totale di filtrazione **f***

$$fe^{(-\lambda\delta)} = f^*$$



$$S_{1-1} = f^* S_{3-3}$$



Modello di Resistenze in serie: approccio per sezioni

$$R_{tot,i}(t) = R_m + R_{p,i} + R_{dc,i}(t) + R_{sc,i}(t)$$

$$R_{dc,i}(t) = r_{dc} M_{dc,i}(t) \quad \text{Resistenza del dynamic film}$$

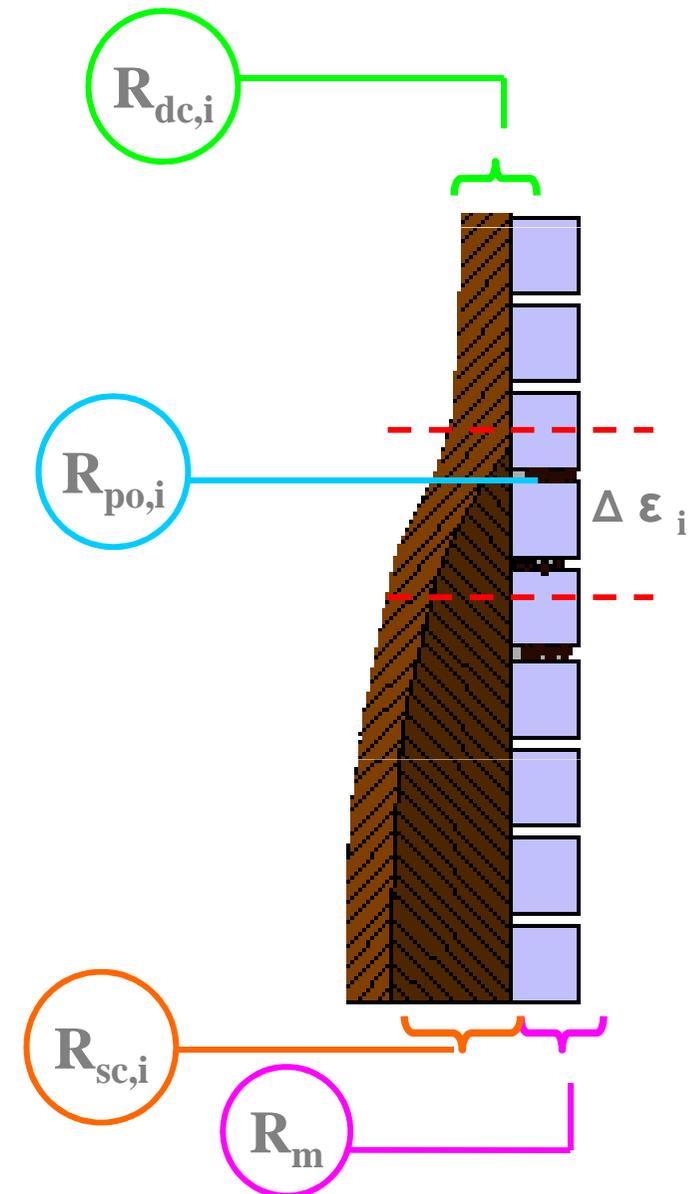
$$r_{dc} = \frac{TMP^p}{\mu_p^2} \left(a + b \cdot \left(1 - \exp \left(-c \cdot \left(\frac{S_{smp}(t)}{C8MLSS} \right) \right) \right)^d \right)$$

$$R_{sc,i}(t) = r_{sc} M_{sc}(t) \quad \text{Resistenza dello stable cake}$$

è stato ipotizzato: $r_{sc} = r_{dc}$

$$R_{p,i} = r_{po} \cdot \sum J_{tot} \cdot t_{filtr} \quad \text{Resistenza del pore fouling}$$

$$R_{tot}(t) = \frac{1}{L_{tot} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{tot,i}}} \rightarrow TMP(t) = \mu_p \cdot J_{tot} \cdot R_{tot}(t)$$



$$P_w = \frac{wRT}{29.7 (0.283) e} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0.283} - 1 \right]$$

Potenza richiesta per l'aerazione (kW)

$$P_{eff} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \frac{TMP Q_{eff}(t)}{3600 \eta} dt$$

Potenza richiesta per l'estrazione del permeato (kW)



Effluent Quality Index (EQI) $kgPUd^{-1}$

$$EQI = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t_0}^{t_1} \left(\beta_{COD} \cdot COD_e(t) + \beta_{NH} \cdot S_{NH_e}(t) + \beta_{NO} \cdot S_{NO_e}(t) + \beta_{PO} \cdot S_{PO_e}(t) \right) \cdot Q_{eff}(t) dt$$

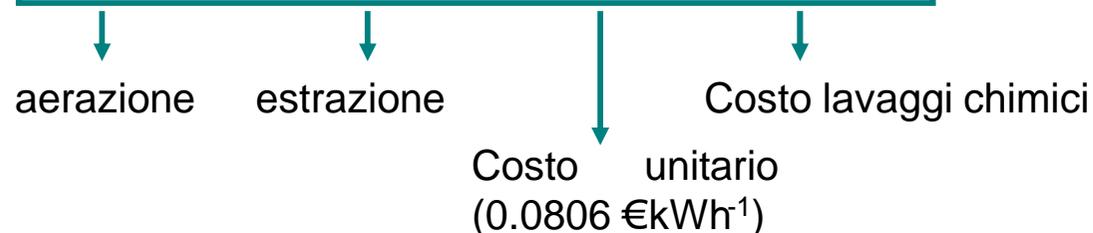
β_{COD} , β_{NH} , β_{NO} e β_{PO} rappresentano rispettivamente i pesi relativi alle concentrazioni effluenti di COD ($COD_e(t)$), ammoniaca ($S_{NH_e}(t)$), nitrati ($S_{NO_e}(t)$) and ortofosfato ($S_{PO_e}(t)$). In questo studio: $\beta_{COD} = 1$, $\beta_{NH} = 20$, $\beta_{NO} = 20$ and $\beta_{PO} = 50$ (Jeppsson et al., 2007; Maere et al., 2011).

Potenza totale: somma delle potenze richieste per l'aerazione e per l'estrazione del permeato

$$P_{tot} = P_w + P_{eff}$$

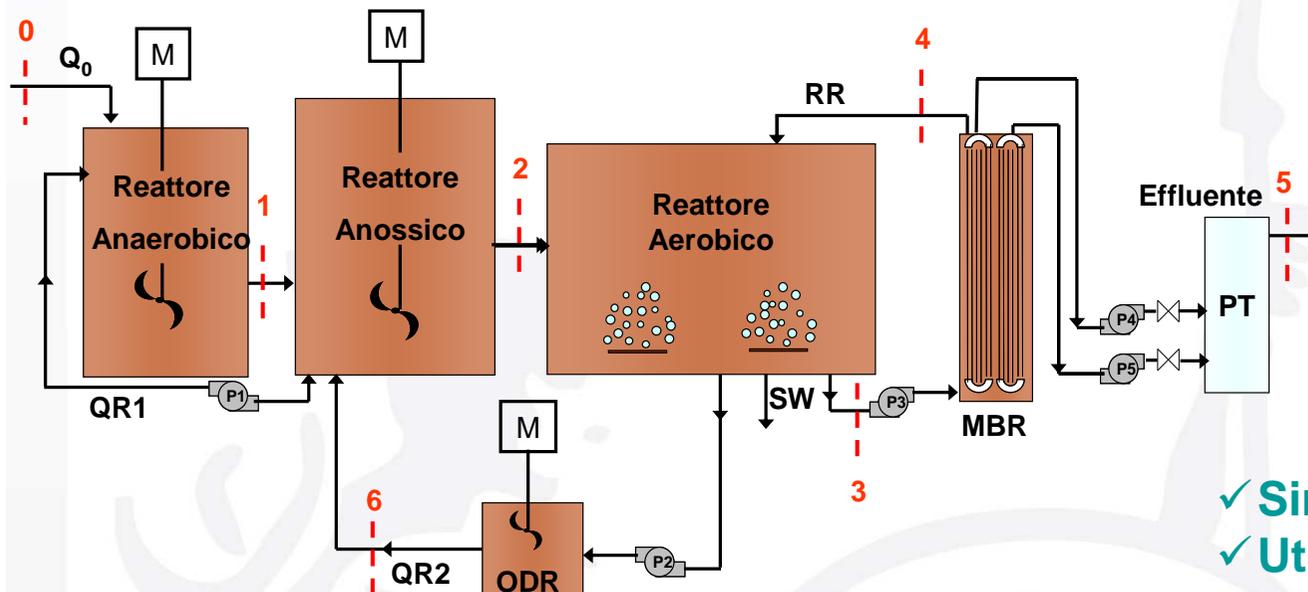
Somma dei costi per m^3 trattato

$$\left(\frac{kWh_{(P_w)}}{m^3} + \frac{kWh_{(P_{eff})}}{m^3} \right) \cdot \frac{\text{€}}{kWh} + \frac{\text{€(lavaggi)}}{m^3}$$



Il modello integrato ASM2d-SMP-P è stato applicato ad un sistema UCT-MBR

- ✓ Portata di alimentazione 40lh^{-1}
- ✓ Membrane Zenon Zeeweed a fibre cave (porosità $0.04\mu\text{m}$)



- ✓ Simulazione dinamica di 165 giorni
- ✓ Utilizzo dei valori calibrati dei parametri cinetici, stechiometrici e fisici (Cosenza et al., 2011; Mannina et al., 2011)

LEGENDA

M	Agitatore	QR1-QR2	Ricircolo di biomassa
PT	Vasca del permeato	RR	Ricircolo di retentato
P1-P2- P3	Pompa di ricircolo di biomassa	SW	Fango di supero
P4- P5	Pompa di estrazione del permeato	⊗	Valvola bidirezionale
ODR	Reattore di riduzione dell'ossigeno	- - -	Punto di campionamento



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Scenario benchmark (1): q_a , T_f e T_b uguali ai valori indicati dal produttore

Scenario 2: variazione di q_a all'interno di un range fissato
(simulazioni Monte Carlo)

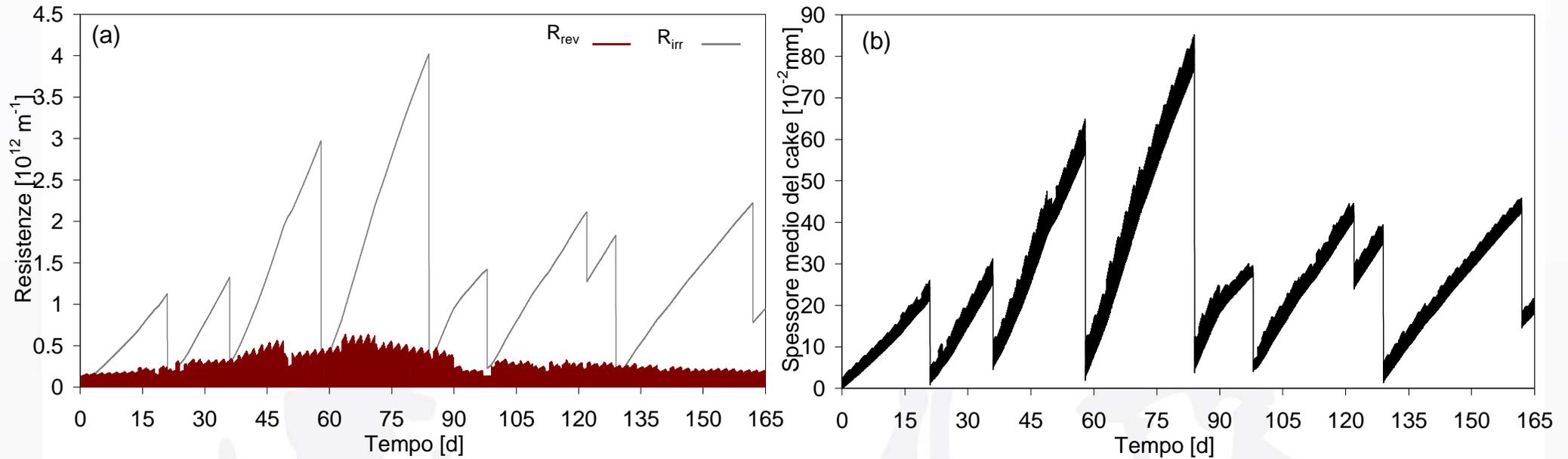
Scenario 3: variazione di T_f e T_b all'interno di un range fissato
(simulazioni Monte Carlo)

Descrizione	Simbolo	Unità	Valore produttore	Range*
Portata specifica di aria	q_a	$L\ m^{-2}\ s^{-1}$	6.67	2-15
Durata filtrazione	T_f	min	9	5-90
Durata controlavaggio	T_b	min	1	0.5-10

* **Distribuzione uniforme**

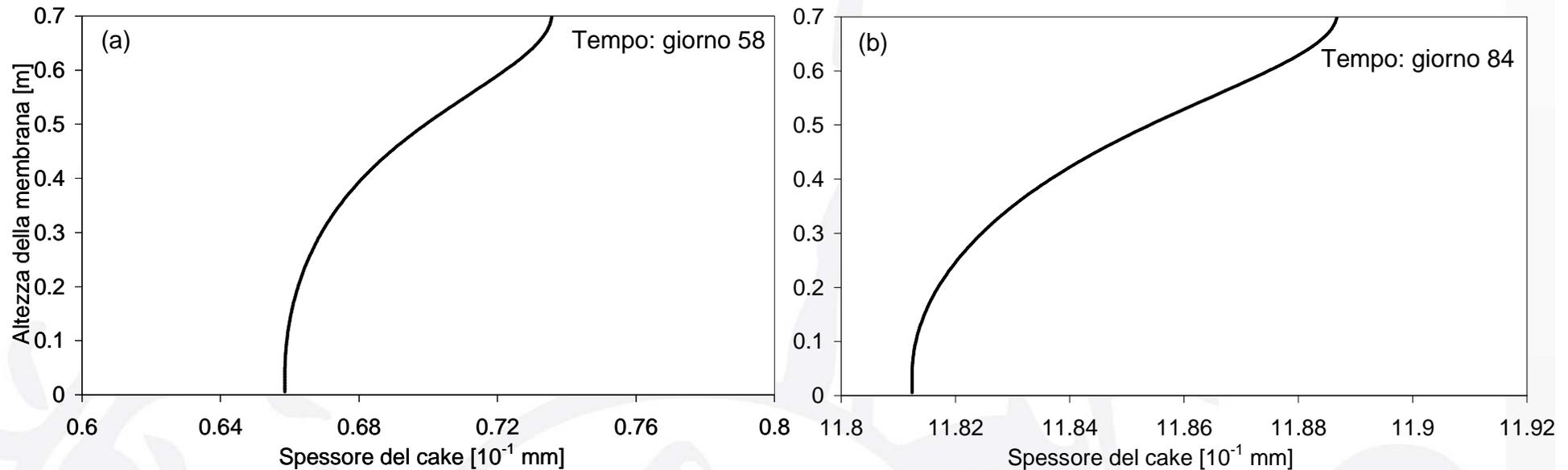


Resistenze e spessore medio del cake



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Spessore del cake lungo la membrana



Giorno 58: primo ciclo subito dopo il lavaggio

Giorno 84: ultimo ciclo prima del lavaggio

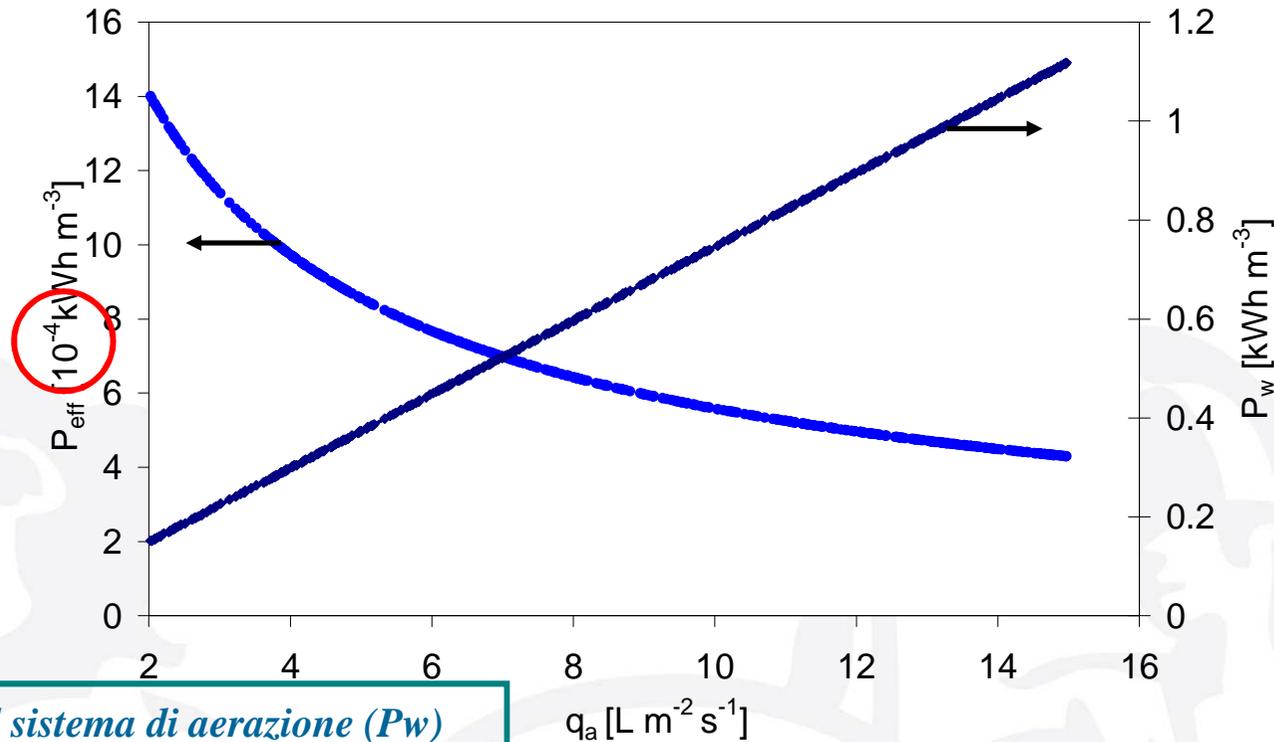
P_w [kWh m ⁻³]	P_{eff} [10 ⁻³ kWh m ⁻³]	EQI [kgPU d ⁻¹]	Costi [€ m ⁻³]
0.5	0.7	307.4	1.2

La potenza di estrazione (P_w) in impianti reali varia tra 0.23 e 0.45 kWh m⁻³

In accordo a quanto riscontrato da Maere et al. (2011) i maggiori valori di P_w ottenuti sono dovuti alle modalità di gestione dell'aerazione che a differenza degli impianti reali viene considerata continua

La potenza del sistema di aerazione (P_{eff}) è funzione del valore di TMP massimo raggiunto che nel caso specifico è di 17kPa

Variazione di q_a : 2-15 L m⁻² s⁻¹



La potenza del sistema di aerazione (P_w) cresce linearmente con q_a

La potenza di estrazione del permeato (P_{eff}) decresce al crescere di q_a

< spessore medio

< TMP

Ruolo degli SMP

< R_t

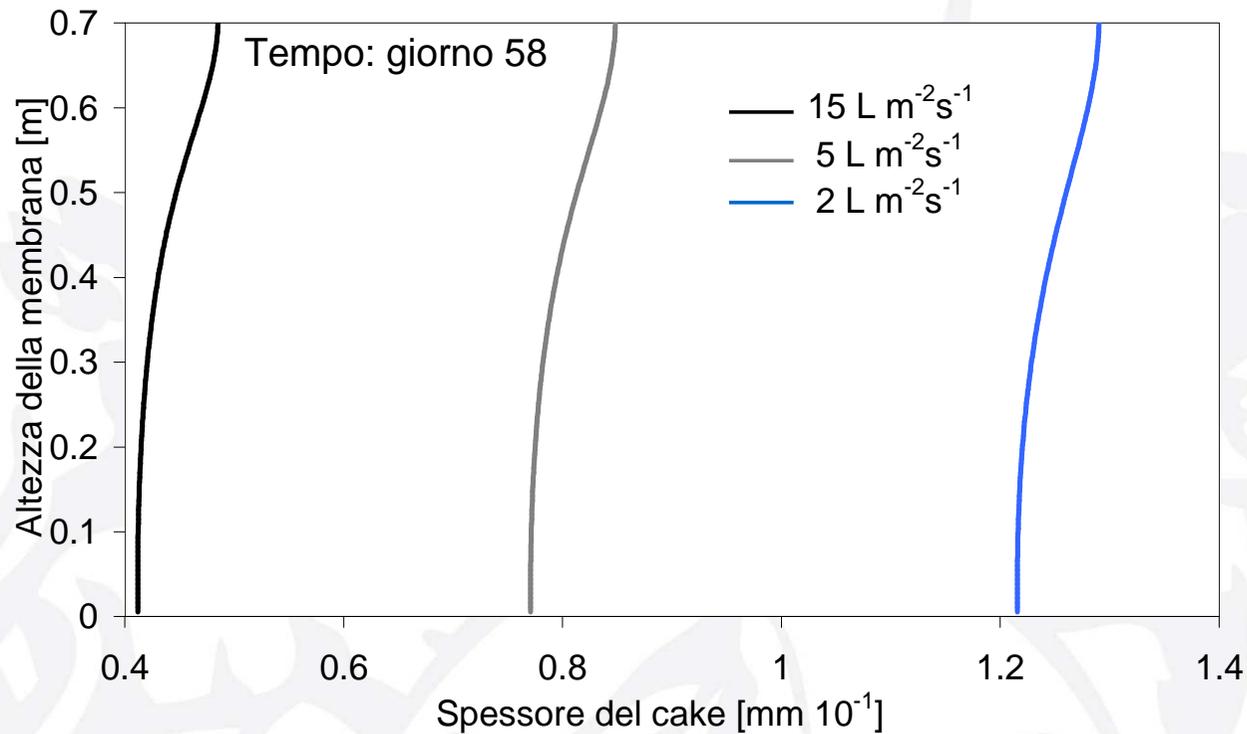
P_{eff}



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Variazione di q_a : 2-15 L m⁻² s⁻¹

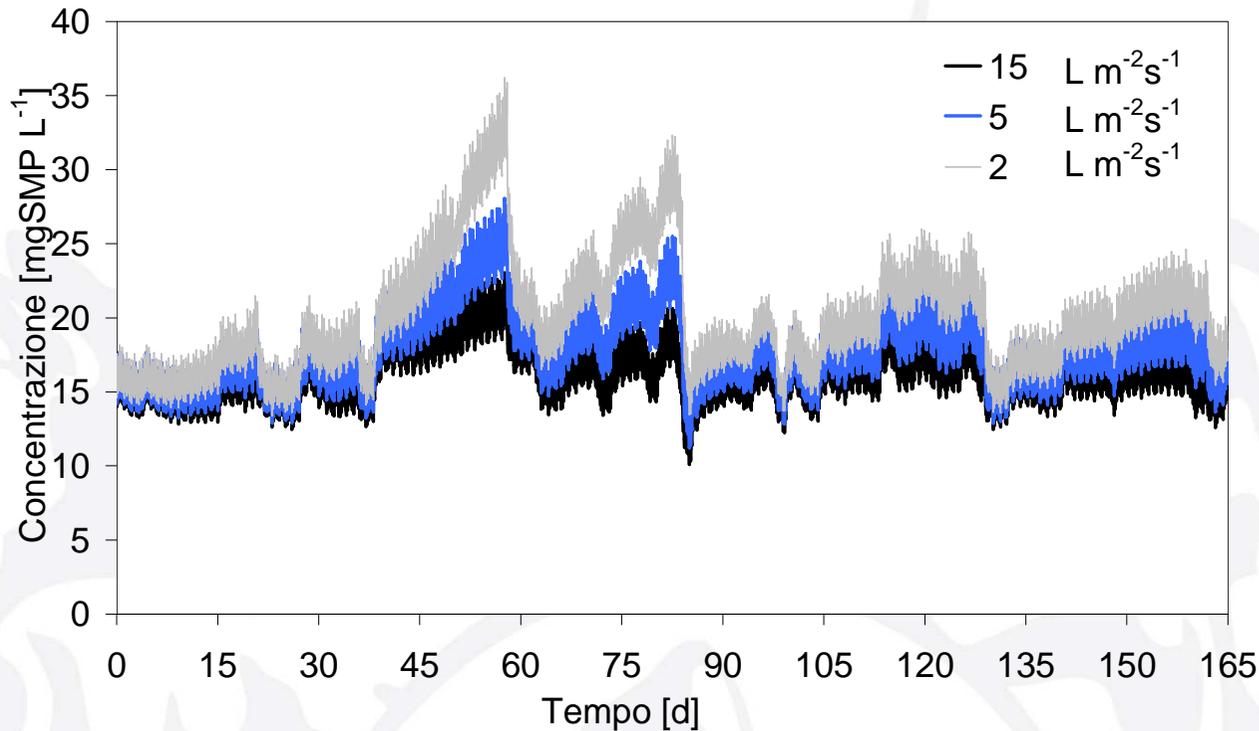
< *spessore medio*



Riduzione di circa il 70% dello spessore del cake lungo la membrana variando da 2 a 15 L m⁻² s⁻¹

Variazione di q_a : 2-15 L m⁻² s⁻¹

Ruolo degli SMP



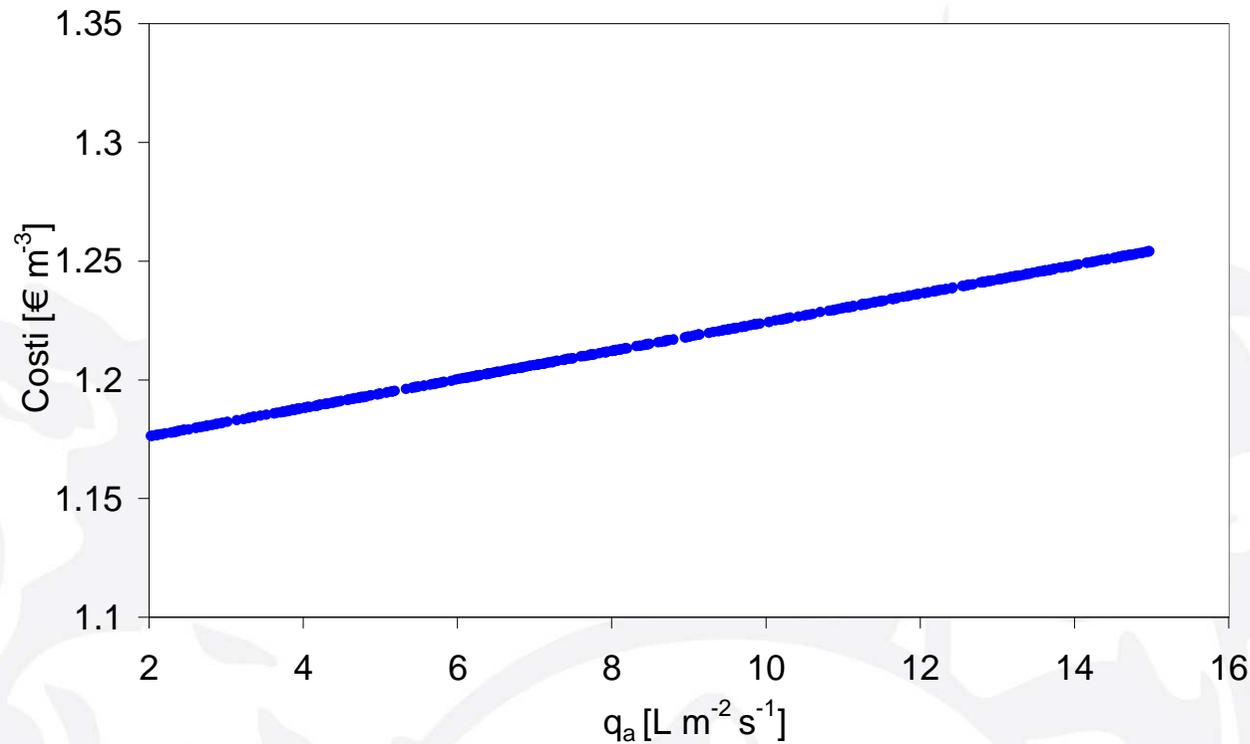
All'aumentare di q_a diminuisce la concentrazione di SMP all'interno del reattore MBR perché una maggiore frazione sfugge per via della filtrazione. La riduzione di SMP comporta una sostanziale diminuzione della R_t



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Variazione di q_a : 2-15 $L m^{-2} s^{-1}$

COSTI

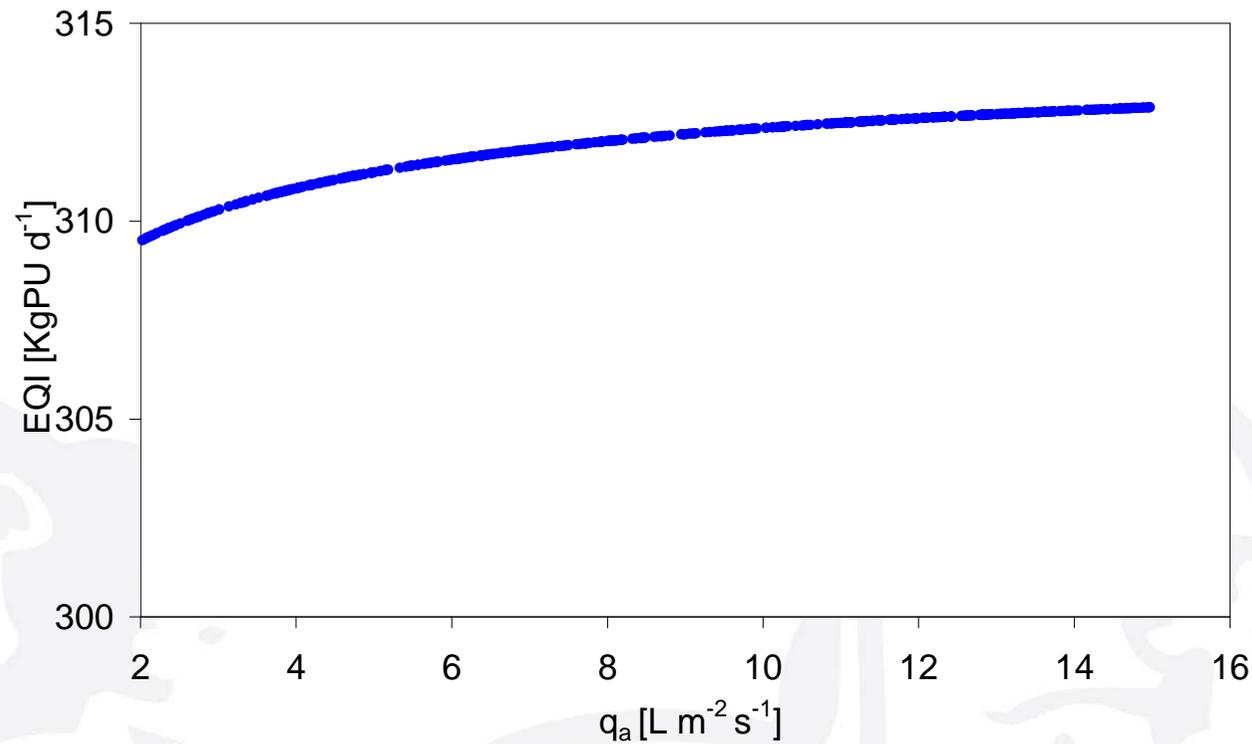


Crescita lineare dei costi totali con q_a fino ad un massimo di 1.26 $€ m^{-3}$

90% dei costi totali attribuibile alla richiesta energetica per l'aerazione



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Variazione di q_a : 2-15 $L m^{-2} s^{-1}$ *EQI*

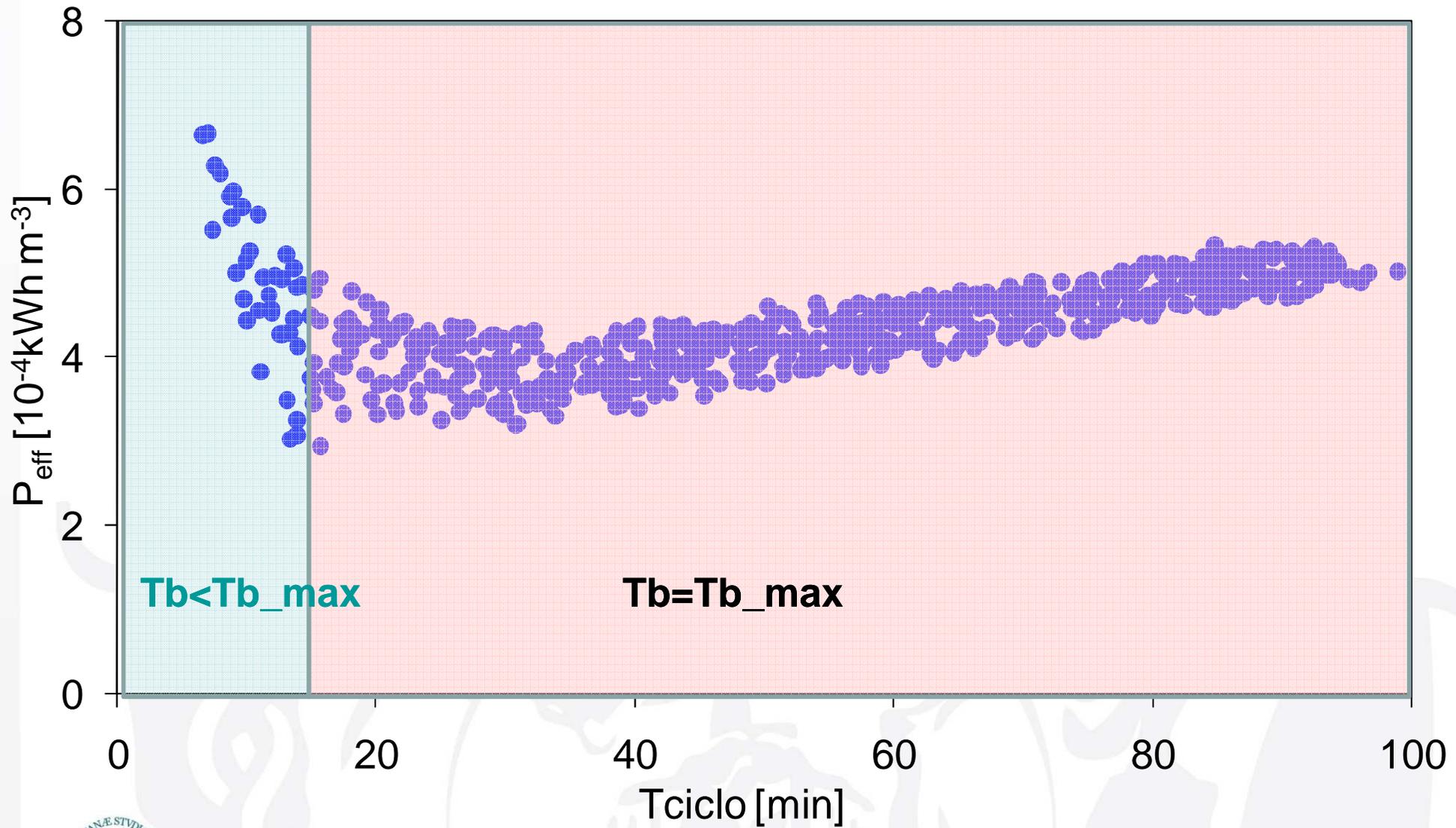
**LA CONDIZIONE OTTIMALE IN TERMINI DI COSTI, EQI E POTENZE
RICHIESTE SI HA PER UN VALORE DI $q_a=2Lm^{-2}s^{-1}$**



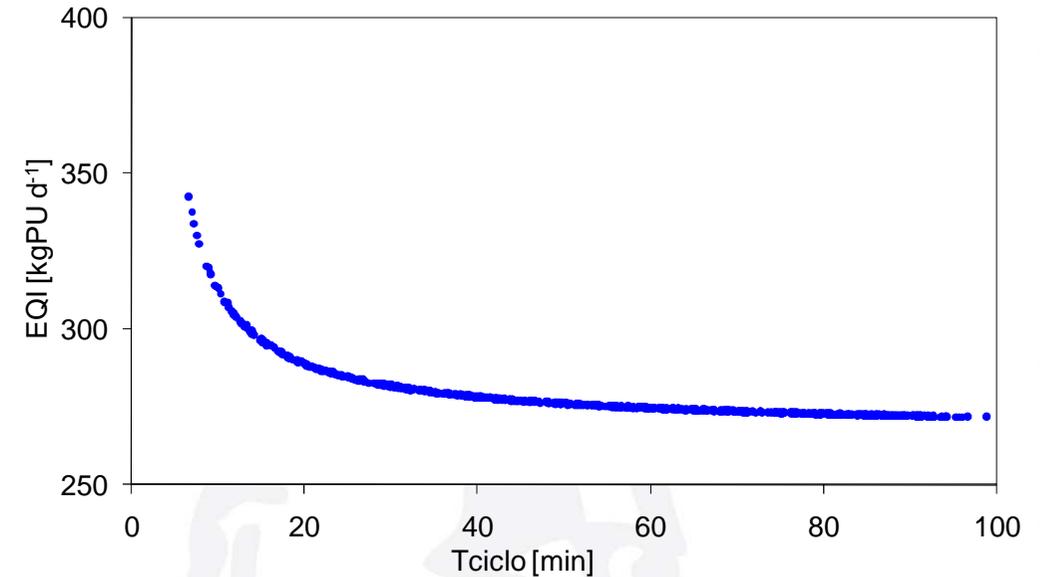
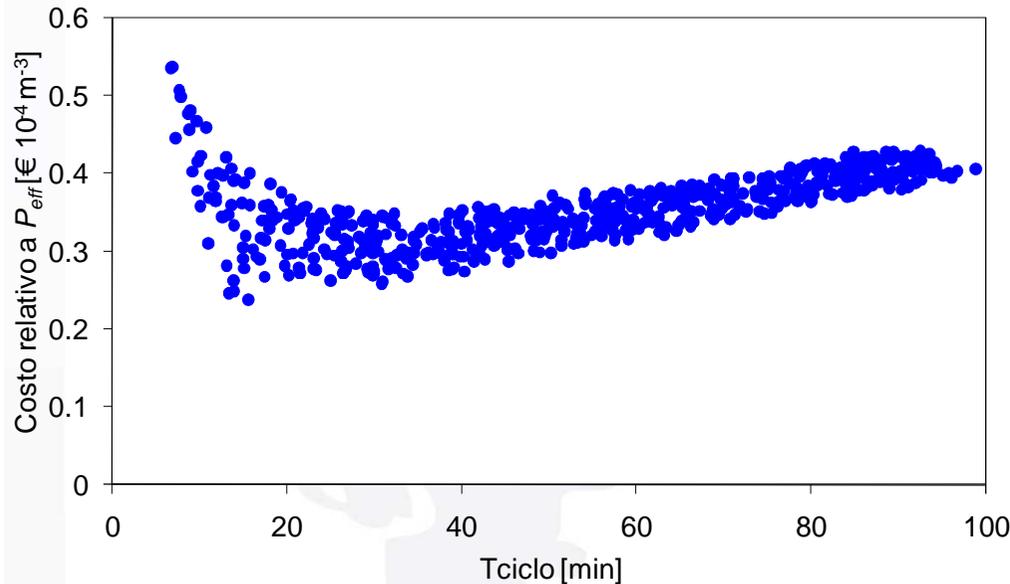
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO

Variazione di T_b e T_f

$T_{ciclo} = T_b + T_f$



Variazione di T_b e T_f



- Le variazioni dei costi totali risultano trascurabili perché q_a (peso maggiore) è costante
- Riduzione dell'EQI all'aumentare del tempo di ciclo per effetto del ridotto contributo depurativo legato alla presenza del cake
- Maggiore variazione dell'EQI rispetto allo scenario 2 per effetto della maggiore influenza di T_b e T_f sullo spessore del cake

**LA CONDIZIONE OTTIMALE IN TERMINI DI COSTI, EQI E POTENZE
RICHIESTE SI HA PER UN VALORE DI $T_b=5\text{min}$ e $T_f=15\text{min}$**

- ❑ L'accoppiamento di studi sperimentali e modellistici si è rilevato un'ottima pratica per una migliore comprensione dei fenomeni fisici/chimici/biologici che hanno luogo in un impianto UCT-MBR.
- ❑ Il modello integrato UCT-MBR ha consentito di individuare le migliori variabili operative che consentono nel contempo di minimizzare i costi e le concentrazioni allo scarico.
- ❑ Il fenomeno del fouling gioca un ruolo chiave nella minimizzazione dei costi;
- ❑ Tempi di ciclo di 15 minuti hanno fornito le condizioni migliori per la minimizzazione della potenza di estrazione.
- ❑ In termini di EQI valori di tempo di ciclo di 15-20 min forniscono un buon compromesso con riferimento al fouling.
- ❑ In termini di portata d'aria valori di q_a pari a $2 \text{ l/m}^2/\text{h}$ consentono di minimizzare sia i costi che l'EQI. La riduzione del fouling incrementando la portata d'aria non compensa la riduzione della potenza (potenza aerazione >>> potenza estrazione).

**Grazie per
l'attenzione**



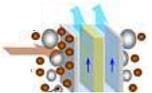
Giorgio Mannina

*Dipartimento di Ingegneria
Aerospaziale, dei Materiali*

UNIVERSITÀ DI PALERMO

giorgio.mannina@unipa.it

Civile, Ambientale,



BioMAc 2013

Grazie per l'attenzione!!

giorgio.mannina@unipa.it