



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

21
Università degli Studi di Palermo 1906-2016

I sistemi innovativi a biomassa granulare

Innovative wastewater treatment technologies
for energy saving and environmental protection

May 20, 2016 - Palermo

Michele Torregrossa

PRIN
Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

IWA
the international water association

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

I sistemi innovativi a biomassa granulare

1. Introduzione
2. Il fenomeno della granulazione aerobica
3. Schema di un GSBR
4. Modelli di simulazione
5. Condizioni operative di un reattore GSBR
6. Rendimenti di rimozione
7. Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala

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

DICAM

Introduzione

I trattamenti convenzionali per la depurazione delle acque reflue presentano numerose limitazioni legate principalmente a:

- **notevole richiesta di aree per la realizzazione di tutte le unità di processo;**
- **elevata produzione di fango di supero;**
- **bassa flessibilità in relazione alle elevate fluttuazioni di carico organico.**

Il processo a fanghi attivi e i sistemi convenzionali a biomassa adesa, inoltre, nei casi in cui è richiesta anche la rimozione dei nutrienti, necessitano di più unità con specifica funzione.

Negli ultimi dieci anni si è avuto lo sviluppo di **reattori aerobici a biomassa granulare**, prima in scala da laboratorio, poi negli ultimi cinque anni, anche in piena scala.

La maggior parte degli studi scientifici condotti, e così pure le prime applicazioni, sono stati mirati al trattamento di **reflui industriali** come quelli provenienti da industrie casearie, farmaceutiche, ittico-conserviere, cantine vinicole, di lavorazione del malto, mattatoi, petrochimiche.

Da qualche anno, sono attivi anche alcuni impianti di trattamento di reflui urbani di consistente dimensione (n.8 al gennaio 2015).

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

DICAM

Introduzione

In questi sistemi:

- è possibile operare con elevate concentrazioni di biomassa (**fino a 20 gSS/L**) e alti carichi organici (**fino a 15 kgCOD/m³-giorno**) ottenendo al contempo basse produzioni di fango di supero;
- è necessario **soltanto il 25%** dell'area necessaria per un sistema convenzionale a fanghi attivi;
- si possono **ridurre i consumi energetici del 25-30%**;
- la bassa produzione di fango di supero, le ridotte dimensioni dei reattori e i minori consumi energetici potrebbero **ridurre anche del 50%** i costi di investimento e di gestione dell'impianto.

Per contro, il processo di granulazione e il mantenimento della struttura dei granuli a regime, richiede una notevole attività di controllo e, al momento, sussistono anche forti vincoli legati ai brevetti.

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

DICAM

Introduzione

La tecnologia a fanghi granulari fece i primi passi con la messa a punto dei sistemi UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), operanti in condizioni anaerobiche.

COD_{input}	: 5.000 ÷ 15.000 mg·L ⁻¹
θ_{HRT}	: 4 ÷ 12 ore
$COD_{rimosso}$: 75 ÷ 85 %
OLR	: 4 ÷ 12 kgCOD·m ⁻³ ·d ⁻¹

Presenta i seguenti svantaggi:

- lungo start-up richiesto (2÷4 mesi);
- alta temperatura operativa (35÷50 °C);
- impossibilità di rimuovere N e P;
- necessità di affinamento successivo.

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

Introduzione

La tecnologia a fanghi granulari aerobici è stata sviluppata a partire dagli anni '90 in reattori AUSB (Aerobic Upflow Sludge Blanket) (Mishima e Nakamura, 1990) e, successivamente è stata perfezionata da Morgenroth (1997) e Beun (1999 e 2002) con i reattori GSBR (Granular Sequencing Batch Reactor).

DEFINIZIONE

“1st IWA-Workshop Aerobic Granular Sludge” a Monaco di Baviera (2004):

«I granuli che compongono il fango attivo aerobico granulare devono essere concepiti come aggregati di origine microbica, che non si formano sotto condizioni di ridotto sforzo idrodinamico, e che sedimentano a velocità significativamente più alte dei fiocchi di fango attivo».

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Finora è stata ottenuta in reattori SBR, la cui caratteristica è quella di essere alimentati in maniera discontinua e di operare in fasi sequenziali secondo il seguente ordine:

- alimentazione
- reazione
- sedimentazione
- scarico surnutante
- attesa

Le varie fasi hanno durate differenti a seconda delle necessità operative.

Alimentazione Reazione Sedimentazione Scarico Attesa

Attualmente i pochi impianti realizzati in piena scala sono tutti di tipo SBR. Tuttavia, nella letteratura scientifica del settore, dalla fine del 2014 si cominciano a reperire rapporti di esperienze condotte in condizioni di alimentazione con flusso continuo.

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Processo con potenzialità molto elevate:

Consente di integrare in unico reattore le rimozioni degli inquinanti (organici, azoto e fosforo) e anche la fase di sedimentazione.

I fenomeni diffusivi che in esso si instaurano costituiscono una valida difesa nei confronti di sostanze tossiche o inibenti.

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Interazioni cellula-cellula che determinano la formazione di densi bio-aggregati:

Fase 1: contatto cellula-cellula;

Fase 2: attrazione dei piccoli aggregati;

Fase3: l'unione di questi aggregati e sviluppo di microstrutture dense e compatte.

Il tempo necessario per la formazione di granuli stabili e maturi varia da 30 a 120 giorni.

I granuli si formano attraverso l'**auto-immobilizzazione** di microrganismi e la conseguente formazione di densi agglomerati che contengono milioni di organismi per grammo di biomassa.

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli:

- superficie esterna quasi sferica;
- dimensioni maggiori rispetto ai fiocchi di fango attivo;
- velocità di sedimentazione molto elevate ($> 60 \text{ m/h}$).

Non sono necessari supporti per la loro formazione!

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli

Macrostruttura di granuli maturi

100 μm

100 μm EHT-15.00 KV 40°-10 μm Photo No. -901 Mag. Detector- SEI

Microstruttura di granuli maturi

1 μm EHT-14.90 KV 40°-10 μm Photo No. -412 Mag. Detector- SEI

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

Caratteristiche fisiche e morfologiche dei granuli: confronto fra fiocchi di fango attivo e fango granulare

Fiocco fango attivo

50 μm

Fango granulare

2 mm

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

Il fenomeno della granulazione aerobica

INOCULO e COLTIVAZIONE DEI GRANULI:

È possibile effettuare lo start-up inoculando con fango attivo prelevato da un impianto di depurazione di tipo convenzionale.

In molti casi si è proceduto riducendo nel tempo la durata del ciclo.

Il tempo di sedimentazione si va via via riducendo: per esempio $7' \rightarrow 5' \rightarrow 3' \rightarrow 2'$

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

DICAM

Il fenomeno della granulazione aerobica

INOCULO e COLTIVAZIONE DEI GRANULI:

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

DICAM

Il fenomeno della granulazione aerobica

NOTE:

Sembra che ci sia una "finestra" relativamente piccola per il successo nella formazione dei granuli.

È un processo molto delicato che necessita di una costante attività di controllo dei parametri che ne indicano l'andamento.

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

DICAM

Il fenomeno della granulazione aerobica

La formazione dei granuli aerobici è influenzata da diversi parametri, quali:

- ❖ **Carico organico volumetrico** ($> 1,2 \text{ KgCOD/m}^3\text{-giorno}$ per accelerare la formazione)
- ❖ **Sforzi di taglio idrodinamici:**
In termini di velocità superficiale del flusso d'aria ascensionale ($> 1,2 \text{ cm/sec}$), alti valori di esso favoriscono la formazione dei granuli, ne migliorano la densità e stimolano la produzione dei polisaccaridi.
- ❖ **Produzione di EPS (Extracellular Polysaccharides Substance)**
I polisaccaridi svolgono il doppio ruolo di adesione – coesione delle cellule microbiche, contribuendo, sia alla formazione dei granuli che al mantenimento della loro stabilità ed integrità.
- ❖ **Idrofobicità della superficie cellulare:**
All'aumentare di essa è favorita l'interazione fra le cellule.
- ❖ **Concentrazione di ossigeno dissolto** ($> 6 \text{ mg/l}$)

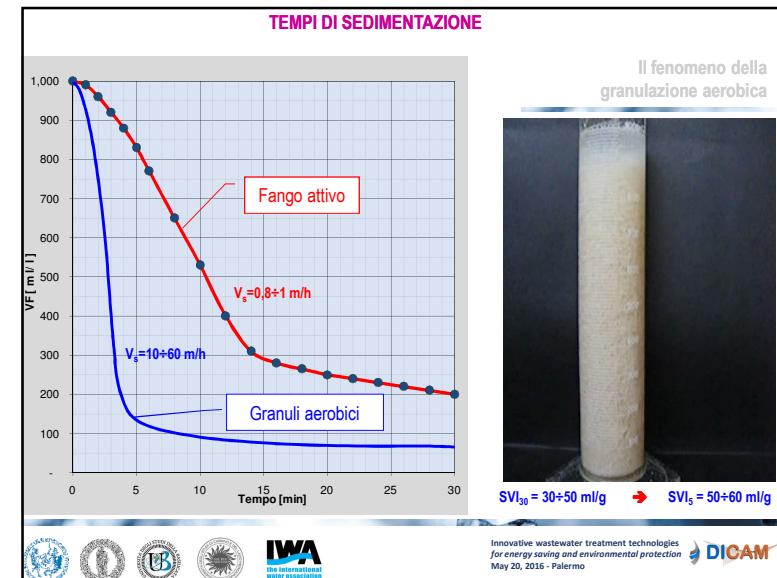
Innovative wastewater treatment technologies
 for energy saving and environmental protection
 May 20, 2016 - Palermo

DICAM

Il fenomeno della granulazione aerobica

- ❖ **HRT (Tempo di Ritenzione Idraulica)**
HRT compresi tra 2-12 ore provocano un aumento della produzione di EPS e dell'idrofobicità che migliorano le caratteristiche di sedimentabilità.
- ❖ **Pressione di selezione idraulica (3-5 m/h)** che dipende dai tempi di sedimentazione.
- ❖ **Fase di abbondanza e di inedia**
La prima è la fase in cui il substrato è a disposizione dei batteri prima di essere consumato. Non appena il substrato viene consumato inizia il periodo di inedia. Durante l'inedia aumenta l'idrofobicità a favore dell'auto-aggregazione e vengono degradati gli EPS in eccesso.


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



ALTERNAZIA DI FASI

Il fenomeno della granulazione aerobica

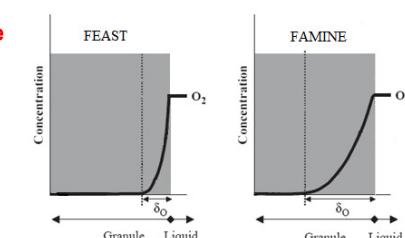
Nei sistemi SBR la rimozione della sostanza organica avviene in due distinte fasi:

FEAST  **Accumulo di riserve**
(periodo di abbondanza)

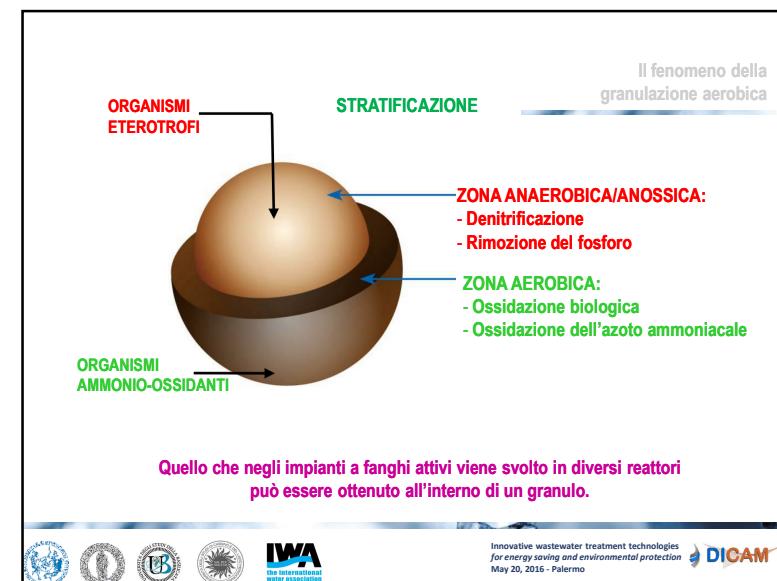
FAMINE  **Crescita cellulare**
(periodo di inedia)

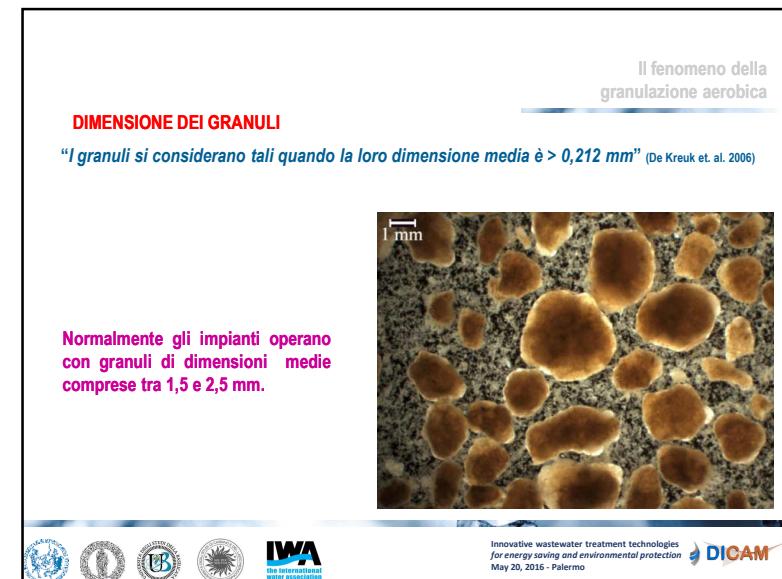
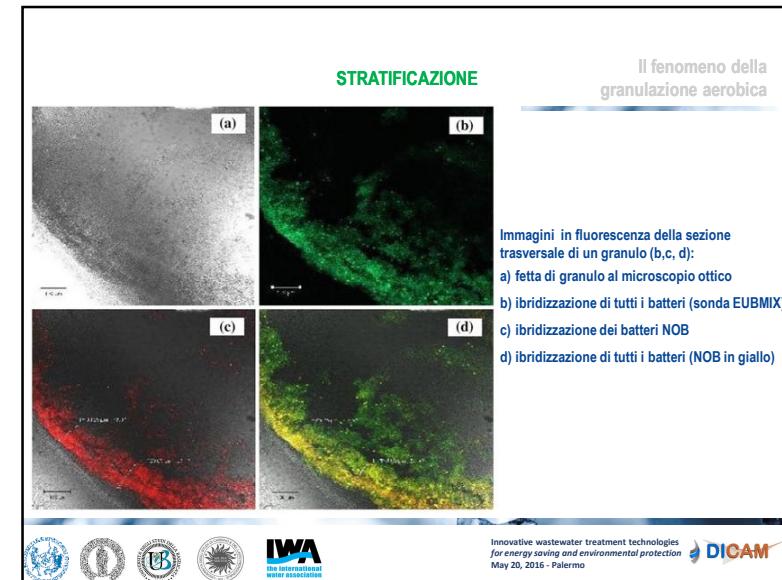
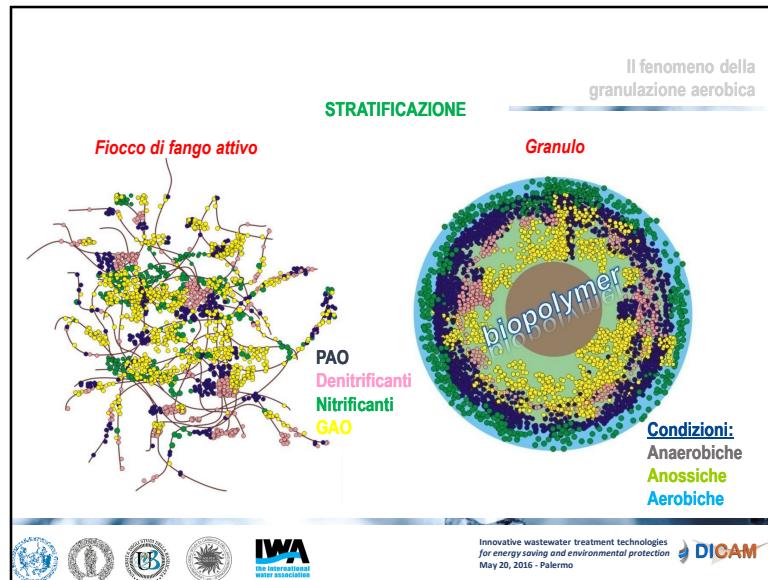
Il primo coincide con la fase immediatamente successiva all'alimentazione, in cui il substrato è disponibile. Non appena tutto il substrato viene consumato, inizia il periodo dell'inedia. Tale periodo assume un ruolo importante nella granulazione.

La **differente profondità di penetrazione dell'ossigeno** nelle due fasi determina la **stratificazione** della struttura del granulo.




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





Il fenomeno della granulazione aerobica

DIMENSIONE DEI GRANULI E TASSO DI GRANULAZIONE

Per valutare lo sviluppo del diametro sono stati messi a punto modelli matematici di previsione:

Es.: $D(t) = \frac{D_{\max}}{1 + e^{-k(t-t_0)}}$ (Su & Yu, 2005)

dove:

- $D(t)$ è il diametro medio al giorno t [mm]
- D_{\max} è l'asintoto della curva [mm]
- k è il tasso di sviluppo specifico del diametro [d^{-1}]
- $(t-t_0)$ è l'intervallo di tempo considerato [d]

L'evoluzione nella formazione dell'insieme dei granuli può essere seguito tramite il "tasso di granulazione", definito come la percentuale di granuli con diametro maggiore di un valore soglia, fissato da Hongbo Liu et al. (2012) in 600 μm e da De Kreuk et al. (2007) in 400 μm .

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

Schema di un impianto GSBR

Reattori a colonna "up-flow" con elevato rapporto H/D (6÷8, fino a 20)

Rapporto di scambio volumetrico, W :

$$W = \frac{V_w}{V_t}, \text{ dove:}$$

$$V_w = \pi \frac{D^2}{4} \cdot H_s, \text{ volume scaricato ad ogni ciclo}$$

$$V_t = \pi \frac{D^2}{4} \cdot H, \text{ volume operativo del reattore}$$

e allora si avrà che:

$$HRT = \frac{V_t}{Q} = \frac{V_t}{V_w \cdot T^{-1}} = \frac{T}{W}, \text{ con } T \text{ durata del ciclo}$$

$W = 50\div70\%$

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

Schema di un impianto GSBR

Tramite il tempo di sedimentazione t_s è possibile selezionare quali particelle ritenere all'interno del reattore e quali dilavare.

$v \leq H_s/t_s$ dilavate

$v > H_s/t_s$ ritenute

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

Schema di un impianto GSBR

SBAR (Sequencing Batch Airlift Reactor)

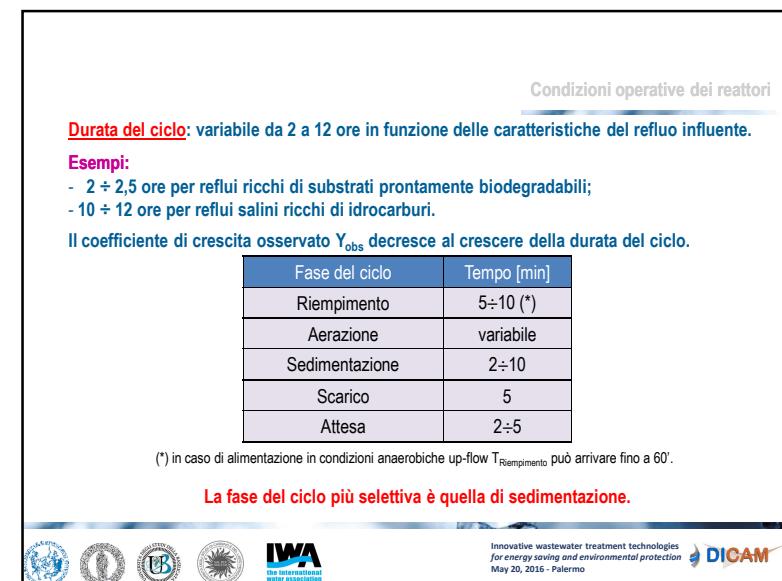
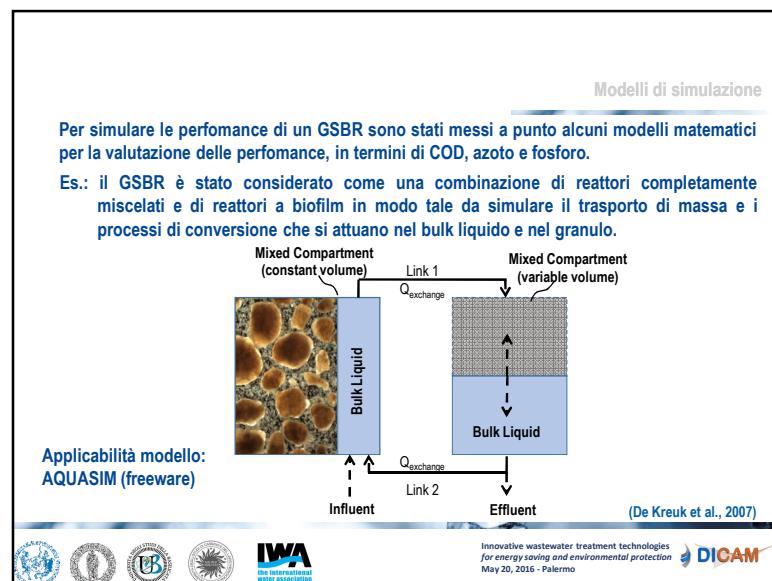
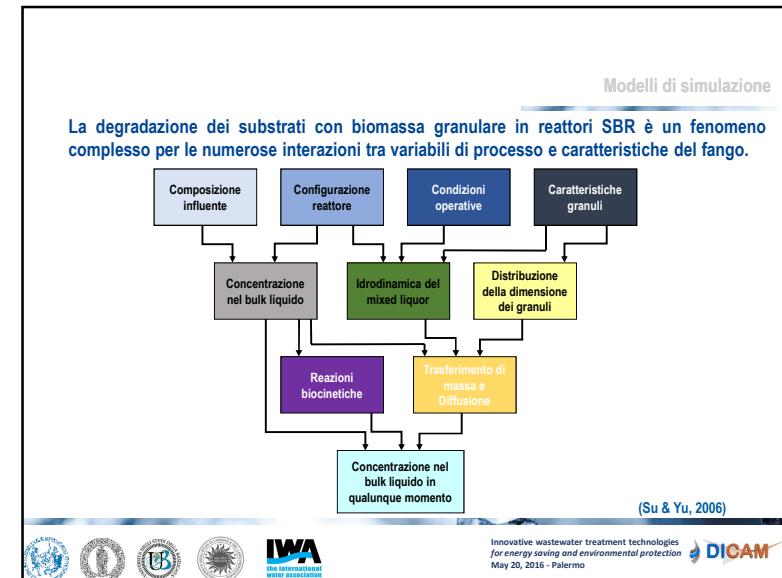
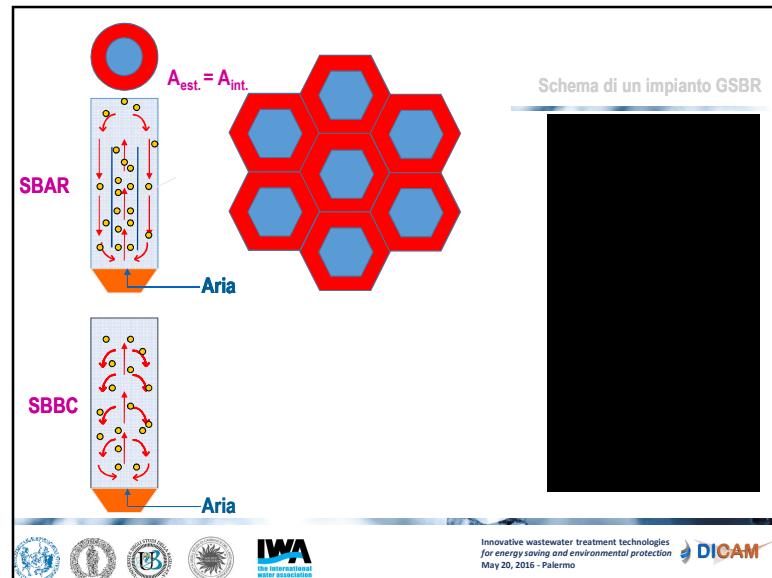
- ❖ Presenza di un "riser"
- ❖ Maggiore intensità degli sforzi di taglio nelle zone di inversione del flusso

SBBC (Sequencing Batch Bubble Column)

- ❖ Assenza del "riser"
- ❖ Minore intensità degli sforzi di taglio più omogeneamente distribuiti

La formazione dei granuli è più rapida negli SBAR.
I granuli risultano leggermente più piccoli ma sono strutturalmente più resistenti.

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



Condizioni operative dei reattori

Intensità dell'aerazione: per velocità di flusso ascensionale dell'aria immessa comprese tra $2,4$ a $3,2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ i granuli possono mantenere una struttura robusta e stabile.
 Tra $0,8$ e $1,6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ i granuli si deteriorano in strutture ampie, irregolari e filamentose.
 La concentrazione di O.D. va mantenuta, comunque $> 2 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$

Caratteristiche del substrato e carico organico volumetrico applicato:
 I granuli aerobici sono stati coltivati con un'ampia varietà di reflui.
 Generalmente, la granulazione aerobica è indipendente dal tipo di substrato.
 Tuttavia dalla composizione del reffluo dipendono la morfologia e la microstruttura dei granuli.
 Es.: - reflui caseari inducono un morfologia con escrescenze filamentose;
 - reflui ricchi di glucosio mostrano una struttura filamentosa;
 - reflui ricchi di acetato non mostrano morfologia filamentosa e i granuli sono molto compatti.

La dimensione dei granuli varia in funzione del OLR applicato:
 per valori di OLR che passa da 3 a $9 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{giorno}^{-1}$, i granuli incrementano la loro dimensione media da $1,6$ a $1,9 \text{ mm}$.
 All'aumentare di OLR, i granuli diventano meno stabili.

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

Condizioni operative dei reattori

Carichi applicati:
 Applicazioni più frequenti: carichi medio-alti.
 "....è possibile ottenere la granulazione con bassi carichi?" (refluvi urbani)
 Le esperienze fatte portano a concludere che anche per bassi carichi è possibile ottenere un buon livello di granulazione e ottime efficienze di rimozione di C e N.

Il carico organico (OLR) applicabile va da $0,4$ a $15 \text{ kgCOD} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{giorno}^{-1}$.

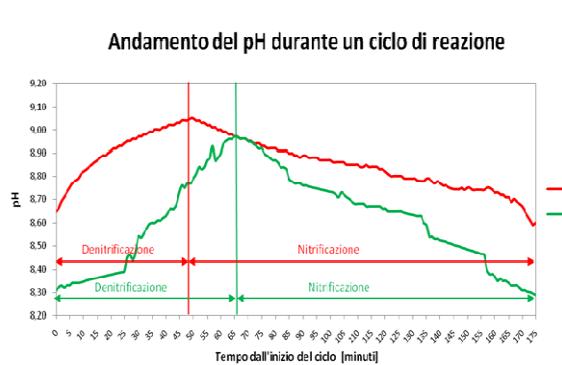
Temperatura: non ci sono particolari restrizioni operative. Tuttavia i tempi di maturazione dei granuli sono più brevi a temperature elevate, quindi si preferisce effettuare lo start-up degli impianti in periodo estivo.

pH:
 - a pH bassi si ha sviluppo di funghi filamentosi.
 - a pH > 8 di velocizza la formazione dei granuli → **regolazione pH nel reattore = strategia di coltivazione.**

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

Condizioni operative dei reattori

Andamento del pH durante un ciclo di reazione



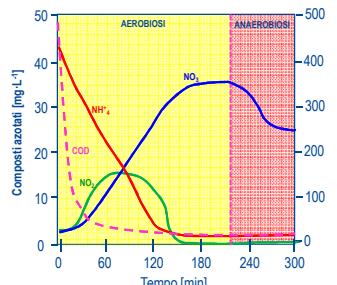
Innovative wastewater treatment technologies
for energy saving and environmental protection
May 20, 2016 - Palermo 

Rendimenti di rimozione

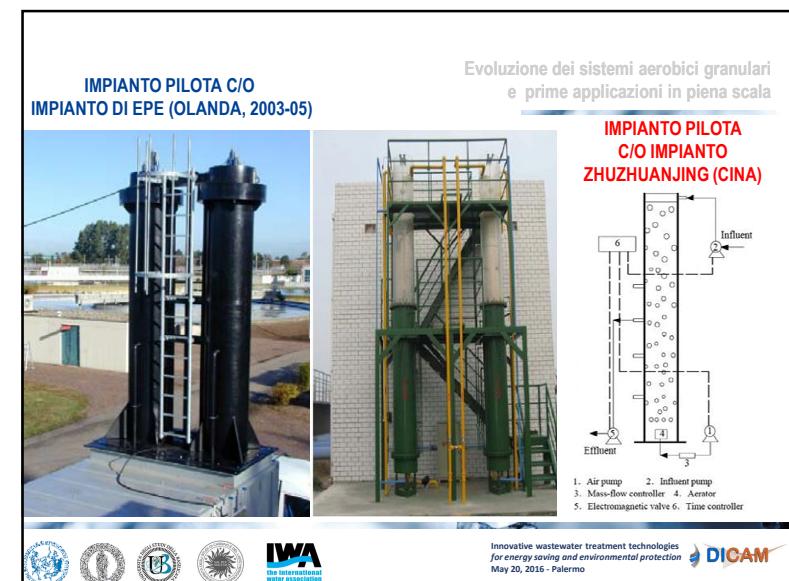
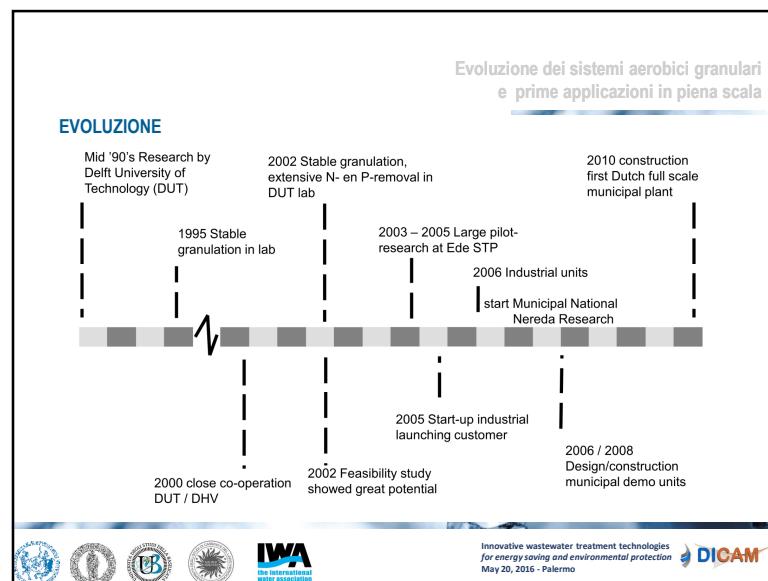
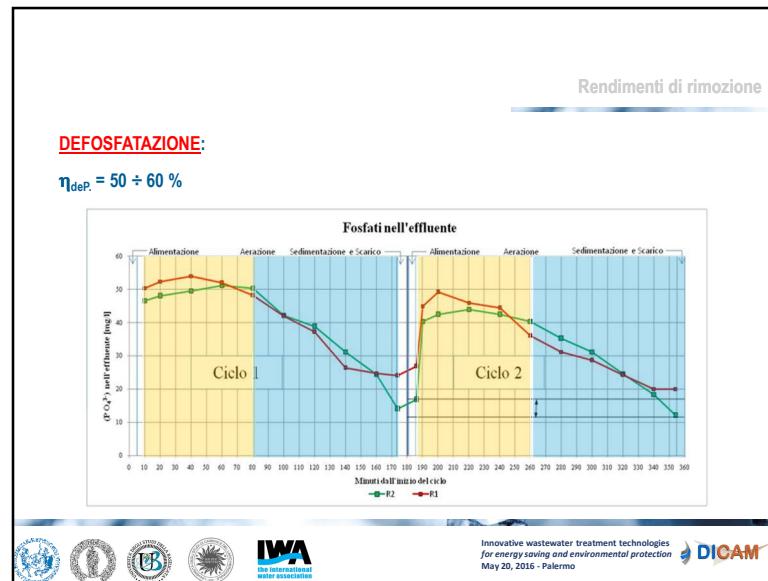
RIMOZIONE DEL SUBSTRATO ORGANICO:
 - con applicazione di carichi medio-alti ($4 \div 15 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{giorno}$) : $\eta_{\text{COD}} = 94 \div 96 \%$
 - con applicazione di carichi bassi ($0,6 \div 1 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{giorno}$) : $\eta_{\text{COD}} = 85 \div 95 \%$
 - con reflui salini ($25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) + idrocarburi ($1,3 \div 1,8 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{giorno}$) : $\eta_{\text{COD}} = 85 \div 90 \%$

NITRIFICAZIONE:
 $\eta_{\text{nitr.}} = 85 \div 90 \%$
 con granuli di dimensioni < si incrementa la nitrificazione anche per la maggiore superficie specifica.

DENITRIFICAZIONE:
 $\eta_{\text{nitr.}} = 70 \div 80 \%$
 con granuli di dimensioni > si incrementa la denitrificazione.



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



Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala

EPE (Olanda): 59.000 A.E. – 1.500 m³/h



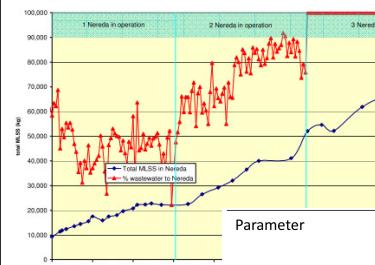
Consumi energetici accertati ad oggi: 22,2 kWh/A.E. x anno
media: 0,35 kWh/kgCOD rimosso
contro una media di consumo degli impianti olandesi di 33,4 kWh/ A.E. x anno



IWA the international water association

EPE (The Netherlands): 59.000 A.E. – 1.500 m³/h

Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala



Parameter	Influent (mg/l)	Effluent (Average) (mg/l)
COD	879	27
BOD	333	< 2.0
NKj	77	1.4
NH4-N	54	0.1
N-total		< 4.0
P-total	9.3	0.3
Suspended Solids	341	< 5.0

IWA the international water association

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

DICAM

Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala

GARMERWOLDE (Olanda): 40.000 A.E. portata max nera 4.200 m³/h



IWA the international water association

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

DICAM

Evoluzione dei sistemi aerobici granulari e prime applicazioni in piena scala

GANSBAAI (Sud Africa): portata 4.000 m³/giorno



IWA the international water association

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

DICAM

Evoluzione dei sistemi aerobici granulari
e prime applicazioni in piena scala

Scarichi industriali:



Industria casearia Vika
(Olanda)

Attualmente sono in corso di attivazione impianti di trattamento a servizio di industrie farmaceutiche in Slovenia e Ungheria.



Impianto in UK (Imtech)

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

DICAM

The International Water Association

Grazie per l'attenzione



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

DICAM

The International Water Association