Tecnologie innovative per il trattamento anaerobico dei fanghi di depurazione

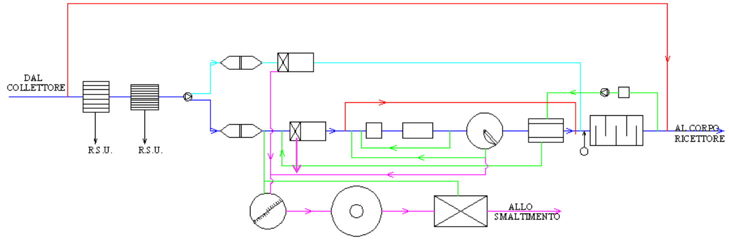
Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection

May 20, 2016 - Palermo

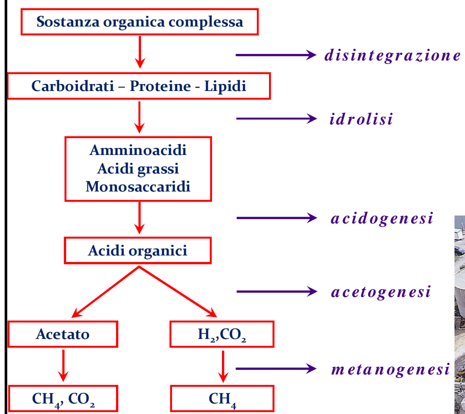
Giovanni Esposito, Università di Cassino e del Lazio Meridionale

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

Ciclo di trattamento classico



Digestione Anaerobica



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

Come ottimizzare il trattamento (anaerobico) dei fanghi?

- Pre-trattamenti dei fanghi
  - ✓ per massimizzare la produzione di biogas
  - ✓ per ridurre la produzione di fango
- Co-digestione con altri substrati
- Uso di bio-reattori innovativi

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

Pre-trattamenti

- Fisici
- Fisico-chimici
- Termici e Termo-chimici
- Biologici
- Combinati

Pre-trattamenti

Table 1
Reviews on different pretreatment methods to enhance AD using various substrates.

Substrate	Pretreatment methods	Important findings	Reference
OFMSW	All pretreatment methods	– Physical pretreatments are widely applied for OFMSW, whereas other methods are not spread at industrial level – Further research on pretreatment should focus more on the modelling as well as mass and energy balance of the pretreatment effect and the whole AD process	[61]
All organic substrates	All pretreatment methods	– The most popular pretreatment methods are thermal and ultrasonic for WWTP sludge, chemical for lignocellulosic substrates, and mechanical for OFMSW – Systematic studies on energy balance and economic feasibility are necessary – Further development of descriptive and predictive variables is required	[39]
Lignocellulosic substrates	Thermal, thermo-chemical, chemical	– Pretreatments could improve the digestibility of lignocellulosic substrates – Pretreatments could result in more efficient process as compared to the conventional process	[73]
Lignocellulosic substrates	Thermal, thermo-chemical, and chemical	– Thermal pretreatments as well as lime and ammonia based chemical methods are more effective in improving the digestibility of lignocellulosic substrates	[34]
Pulp & paper sludge	Thermal, thermo-chemical, chemical	– Pretreatments could result in reduced HRT, increased methane production, and reduced sludge size	[40]
WWTP sludge	Ultrasound, chemical, thermal, and microwave	– Pretreatments result in enhanced biogas production (30–50%) – Comprehensive model for evaluating the economic feasibility was developed	[22]
WWTP sludge	Thermal, thermo-chemical, and chemical	– The effect of pretreatment methods depends on the characteristics of sludge and the intensity of the method – Pretreatments could yield a better digestate with high recoverable nutrients	[3]
WWTP sludge	Thermal and thermo-chemical	– Thermal pretreatment at high temperature (>175 °C) as well as thermo-chemical methods are more effective in improving sludge dewaterability	[60]

Ariunbaatar et al. (2014) Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste, Applied Energy 123 (2014) 143–156

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

Pre-trattamenti - confronto

Pretreatment	Mode of Action	Advantages	Disadvantages
Mechanical	Size reduction	No odor, easy implementation, moderate energy consumption	No effect on pathogens
Thermal	- Deflocculation - Disintegration of cell - Higher solubilization	Pathogen removal, easy to implement, better energy balance	Could result in inhibitory by-products
Chemical	- Destruction of macromolecules - Swelling of solids - Higher solubilization	High efficiency, low energy requirement (alkali or acidic)	High chemicals cost, loss of potential methane
Biological	- Increased hydrolysis - Increased stability	Possibility to produce biohythane (2-stage system)	Higher emissions of GHG (composting)
Combination	- Destruction of macromolecules - Higher solubilization	Higher efficiency	Higher cost, higher environmental footprint

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

Pre-trattamenti - confronto

Feedstock \ Pretreatment	Mechanical	Thermal	Chemical	Biological
Sludge	Sonication High pressure Lysing centrifude Focused pulsed technique	Steam explosion Hydrothermal		
Animal by-products	Grinding	Hydrothermal Low temperature	Saponification	
Manure	Grinding Extrusion Maceration Nitrogen extraction (Mechanical–Chemical)			Partial composting
Municipal solid waste	Grinding Maceration Extrusion	Steam explosion		Pre composting
Agricultural residues Energy crops	Grinding Extrusion		Alkali	Enzymes Ensiling Composting Fungi
Algae		Low temperature		

Full-scale application | Pilot-scale application | Promising lab-scale results

"Review of feedstock pretreatment strategies for improved anaerobic digestion: From lab-scale research to full-scale application"
Hélène Carrere et al. 2016 –Bioresource Technology

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

Riduzione dei fanghi

- Migliorare la disidratabilità e/o i sistemi di disidratazione dei fanghi per ridurre l'umidità del fango in uscita dall'impianto
- Ridurre la produzione dei fanghi all'origine

Meccanismi dei processi di riduzione dei fanghi

I **meccanismi** di riduzione dei fanghi negli impianti di depurazione sono molteplici:

- **ossidazione della sostanza organica** → perdita netta come CO_2 e H_2O → riduzione della produzione di fango
- **metabolismo endogeno** (assenza di substrati esterni) e **lisi cellulare** → rilascio del contenuto cellulare → substrato biodegradabile → conseguente crescita di altra biomassa (**crescita criptica**) → riduzione della produzione di fango
- **metabolismo disaccoppiato** → Disaccoppiamento tra catabolismo e anabolismo → priva i batteri dell'energia per la sintesi di nuove cellule → cala il rendimento di crescita della biomassa → riduzione della produzione di fango
- **batteri a basso tasso di crescita** → selezione di batteri con basso tasso di crescita → minore crescita di biomassa
- **predazione di batteri** → I batteri costituiscono nutrimento di protozoi e metazoi → passando da un livello trofico inferiore ad uno superiore, una parte di energia viene persa → minore crescita di biomassa

Tecniche di riduzione dei fanghi

Meccanismi	Tecniche
ossidazione della sostanza organica	ossidazione a umido, ossidazione supercritica, ultrasuoni, cavitazione idrodinamica, trattamento termico, idrolisi chimica e termochimica, ozonolisi, ossidazione con H_2O_2, trattamento elettrochimico, aggiunta di reattore anaerobico side stream
lisi cellulare e crescita criptica	Idrolisi enzimatica, trattamento meccanico di disintegrazione, ultrasuoni, cavitazione idrodinamica, trattamento termico, idrolisi chimica e termochimica, ozonolisi, ossidazione con H_2O_2, trattamento elettrochimico, aggiunta di reattore anaerobico side stream
metabolismo disaccoppiato	Trattamento con agenti chimici disaccoppianti, aggiunta di reattore anaerobico side stream
metabolismo endogeno	Tecnologia membrane biological reactor (MBR), digestione aerobica, digestione anaerobica
batteri a basso tasso di crescita	aggiunta di reattore anaerobico side stream
predazione di batteri	Utilizzo di protozoi e metazoi

Tecniche di riduzione dei fanghi

Le tecniche di riduzione dei fanghi possono essere applicate sia alla linea acque che alla linea fanghi, con due filosofie differenti:

Tecniche integrate nella linea acque

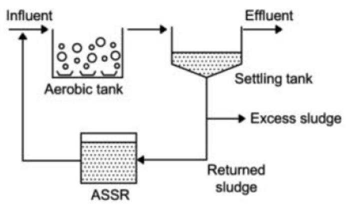
- ☑ riducono la produzione di fango biologico direttamente nella linea acque, piuttosto che realizzare post-trattamenti del fango dopo che esso è già stato prodotto

Tecniche integrate nella linea fanghi

- ☑ riducono la massa di fango dopo che questo è già stato prodotto nella linea acque

FOCUS TRATTAMENTO BIOLOGICO INTEGRATO NELLA LINEA ACQUE

Trattamento con reattore anaerobico *side-stream (ASSR)* a temperatura ambiente



ASSR: *consente la simultaneità di processi di ossidazione della sostanza organica, lisi cellulare, crescita criptica, rilascio EPS, selezione di batteri con bassi tassi di crescita coinvolti nella rimozione di azoto e fosforo.*

- fango sottoposto ad un'alternanza di condizioni aerobiche/anossiche in linea acque e anaerobiche mediante l'inserimento del reattore side-stream
- nell'ASSR è necessario garantire assenza di substrato esogeno
- nell'ASSR occorre garantire bassi valori di ORP (cond. strettamente anaerobiche)
- si ottengono elevate riduzioni di produzione di fango (fino a 60%) ma ad oggi differenti meccanismi e parametri operativi sono stati proposti.

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

Trattamento con reattore anaerobico side-stream (ASSR): review

1. processo *Oxic-Settling-Anaerobic* (OSA) - Chudoba et al. (1992)
2. Processo Biminex
3. Processo A+OSA
4. processo *Cannibal*®. Patent US 7569147 B2
5. UMASS. Patent US 2012/0152812 A1
6. Processo UTN (University of Trento) Patent n. 102016000035388

Ferrentino et al., A review of anaerobic side-stream reactor for excess sludge reduction: Configurations, mechanisms, and efficiency
Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2016

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

Processo *Oxic-Settling-Anaerobic* (OSA) (lab scale experiments)

IR= 10-100%

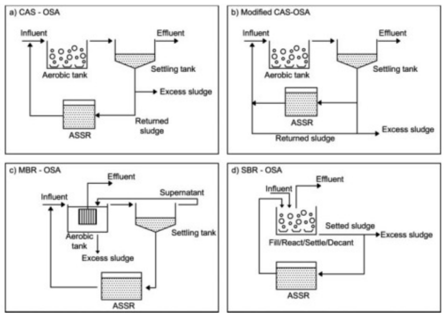
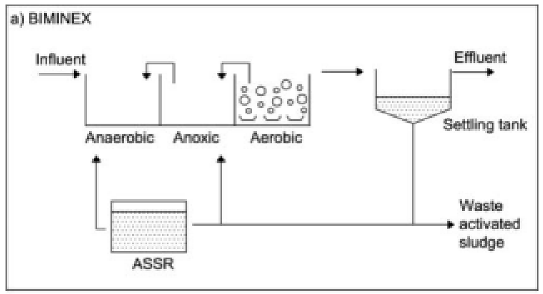


Figure 1. Schematic diagrams of (a) CAS-OSA system, (b) modified CAS-OSA system, (c) MBR-OSA system, and (d) SBR-OSA system.

Chudoba et al. (1992), Torregrossa et al., (2012); Wang et al., (2008); Ye et al., (2008), (Novak et al., 2007), Chon et al., (2011); Kim et al., (2012); Sun et al., (2010), Datta et al., (2009); Goel and Noguera, (2006).

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

Processo *Bimex* (lab scale experiments)

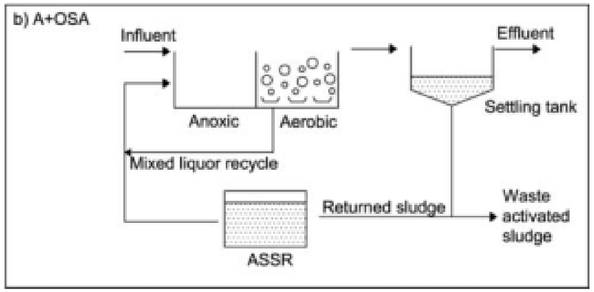


Coma et al. (2013)

SRT_{ASSR}=0.2 d
IR~ 70%

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

Processo *A + OSA* (lab scale experiments)



SRT_{ASSR}=0.25 d
IR elevato

Zhou et al. (2015).

Processo *Cannibal* (*engineering application)*

estrazione di una parte dei fanghi di ricircolo (circa il 10% della portata di ricircolo);

vagliatura a circa 250 µm;

vasca intermedia;

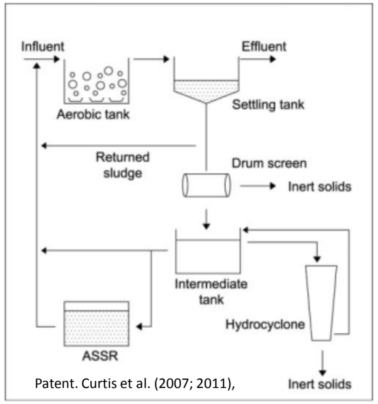
trattamento di una quota del fango in idrocicloni per la separazione di solidi inerti (sabbie);

invio di una quota di fanghi nuovamente verso lo stadio a fanghi attivi;

invio della parte rimanente di fanghi (3-5% Qr) in un reattore anaerobico detto di interscambio;

ritorno del fango trattato anaerobicamente allo stadio a fanghi attivi.

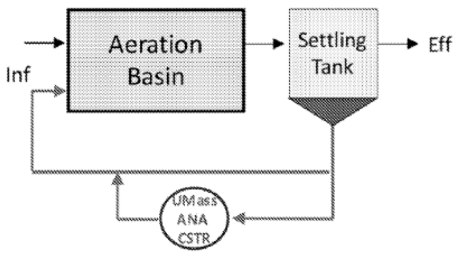
SRT_{ASSR}=10 d
IR= 10%



Patent. Curtis et al. (2007; 2011),

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

Processo *U-Mass (engineering application)*



SRT_{ASSR}=1-2 d
IR= 10%

Patent US 2012/0152812 A1

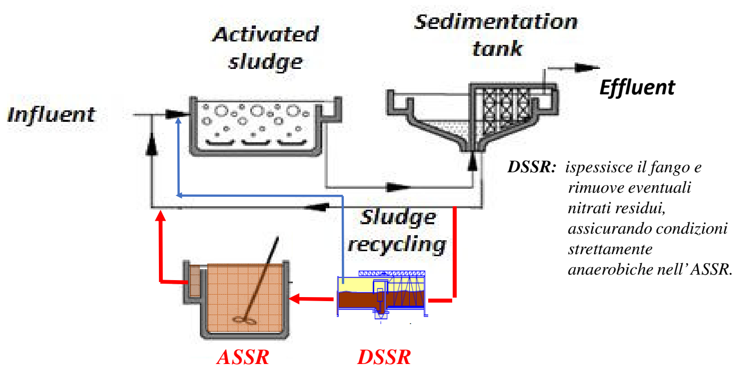
Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection May 20, 2016 - Palermo
DICAM

Fattori limitanti

- Presenza di nitrati nel reattore ASSR
- Basso interscambio
- HRT di 7-10 giorni non necessario e controproducente

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

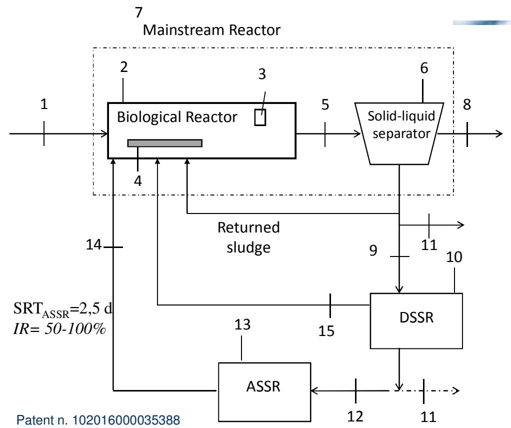
PROCESSO UTN (Engineering application)



DSSR: *ispessisce il fango e rimuove eventuali nitrati residui, assicurando condizioni strettamente anaerobiche nell'ASSR.*

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

PROCESSO UTN (Patent Pending)



SRT_{ASSR}=2,5 d
IR= 50-100%

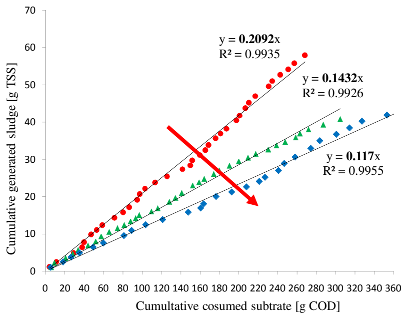
1- Influent conduit
2- alternating anoxic/aerobic phases reactor
3- Controller
4- Aeration system
5- Conduit
6-Solid liquid separator
7-Mainstream reactor
8-Effluent conduit
9- Sewage sludge conduit
10-Denitrifying side-stream reactor (DSSR)
11- Excess sludge conduit
12-Conduit
13-Anaerobic Side-Stream Reactor (ASSR)
14-Conduit
15-Conduit

Patent n. 102016000035388

12

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

PROCESSO UTN (Potenzialità)



The Y_{obs} of the CAS reference system was found to be ***0.36 g TSS/ g COD***. (WEST® simulation)

$$Y_{obs} = \frac{\text{Cumulative sludge generated}}{\text{Cumulative consumed substrate}}$$

IR = interchange ratio

$$= \frac{\text{kg of daily biomass sent to the ASSR}}{\text{kg biomass in the mainstream reactor}}$$

$$SRT_{ASSR} = HRT_{ASSR} = \frac{V_{ASSR}}{Q_{sludge}}$$

Phase	IR	SRT_{ASSR}	Sludge reduction
I	27%	10 d	42%
II	50%	5 d	61%
III	100%	2.5 d	66%

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

Co-digestione anaerobica: vantaggi

- **Ottimizzazione del rapporto C/N (20/1 – 30/1, Hawkes 1980);**
- **Ottimizzazione del pH e del contenuto di umidità;**
- **Incremento del contenuto di sostanza biodegradabile;**
- **Aumento di ceppi microbici coinvolti nel processo;**
- **Diluizione di composti tossici eventualmente presenti nei co-substrati;**
- **Incremento della produzione di biogas;**
- **Integrazione tra trattamento rifiuti e trattamento acque;**
- **Possibilità di sfruttamento di impianti esistenti.**

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

Co-digestione anaerobica: svantaggi

- Necessità di pre-trattamenti
- **Adeguamento dei sistemi di miscelazione dei digestori**
- **Necessità di trattare la frazione liquida prodotta dalla disidratazione del digestato**
- **Necessità di igienizzazione e limitazioni all'utilizzo del digestato in agricoltura**

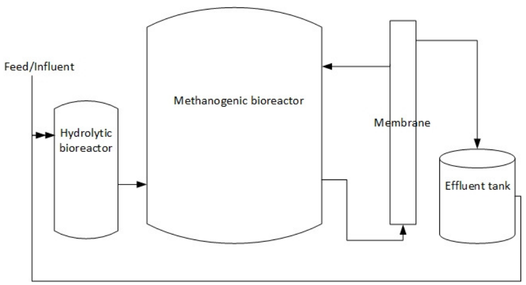
Co-digestione anaerobica: pre-trattamenti

Pre-treatment methods	Substrate	Biogas yield variation *,1 (%)	Reference
Mechanical comminution*,2	mix of apples, carrots and potatoes	(+24)	Palmowski et al. 1999
	Meat	(+22)	Palmowski et al. 1999
	sunflower seeds	(+17)	Palmowski et al. 1999
	hay	(+15)	Palmowski et al. 1999
	Leaves	(+10)	Palmowski et al. 1999
Solid-liquid separation	solid fraction of pig manure-liquid fraction of pig manure	(+145)	Møller et al. 2004
Bacterial hydrolysis and alkaline addition at high temperature	sewage sludge and OFMSW	(+140)	Del Borghi et al. 1999
Ensilage	willow	(+22)*,3	Wang 2009
	Mischantus	(+1.13)*,3	Wang 2009
	mix of timothy, red clover and meadow desue grass.	(+17)	Pakarinen et al. 2008
Alkaline pre-treatment	mix of sugar beet tops, grass, hay straw	(+17)*,4	Lehtomäki et al. 2004
	summer and winter switchgrass	(+32)	Frigon et al. 2008
	10%SFW and 90%WAS	(+63)	Heo et al. 2003
	30%SFW and 70%WAS	(+59)	Heo et al. 2003
	50%SFW and 50%WAS	(+16)	Heo et al. 2003
	70%SFW and 30%WAS	(+1.9)	Heo et al. 2003
	sewage sludge and OFMSW	(+31)*,5	Hamzawi et al. 1998b
Thermal pre-treatment	sewage sludge and OFMSW	(+6)	Hamzawi et al. 1998b
	slaughterhouse waste	(+268)	Edström et al. 2003
	dairy manure and bio-wastes	(+14)-(+18)	Paavola et al. 2006
Thermal-chemical pre-treatment	sewage sludge and OFMSW	(-5)	Hamzawi et al. 1998b
Hydrothermal pre-treatment	manure	(+14)	Qiao et al. 2011
	fruit and vegetable waste	(+16)	Qiao et al. 2011
	municipal sewage sludge	(+65)	Qiao et al. 2011
Wet explosion	wheat straw and swine manure	(-12)	Wang 2009
Utrasonic pre-treatment	WAS and OFMSW	(+124)-(+296)	Simonetti et al. 2010
Wet oxidation	mix of source-sorted food waste, yard waste and digested bio-wastes	(+35)-(+70)	Lissens et al. 2004a
	miscanthus*,6	(-20)-(-39)	Wang 2009
	corn stalker	(-18)-(-36)	Wang 2009
	wheat straw	(-6)-(-11)	Wang 2009
	willow	(+80)	Wang 2009

Esposito et al.
Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 2012

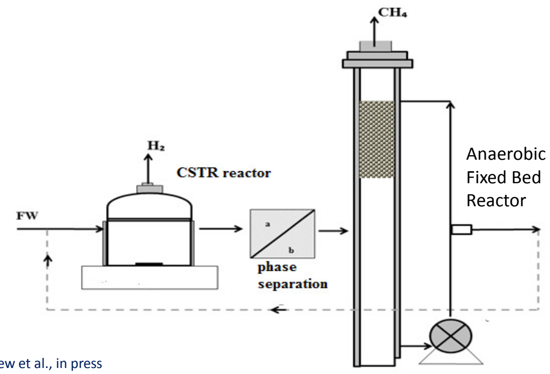
Innovative wastewater treatment technologies
for energy saving and environmental protection
May 20, 2016 - Palermo
DICAM

Bioreattori innovativi: Two stage with AnMBR



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

Two stage: CSTR + Biofilm reactor



Yashenew et al., in press

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

Two stage reactor: experimental design

- First stage fermentation: 1.6 L, 55±2°C

Phase	I	II	III
HRT (day)	6	5	3.7
OLR (gVS/L.day)	2.0	2.5	3.4
Flow rate (ml/day)	266.7	320	433.3

- Second stage : AFBR

  Temperature : 1.3L, 37±2°C

Phase	I	II	III	IV	V	VI	VII
HRT (day)	20	15	10	8	5	3	1.5
OLR gCOD/L.day	0.1	0.4	1.01	1.26	1.8	3.6	6.0
Duration (days)	25	39	33	8	31	34	18

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

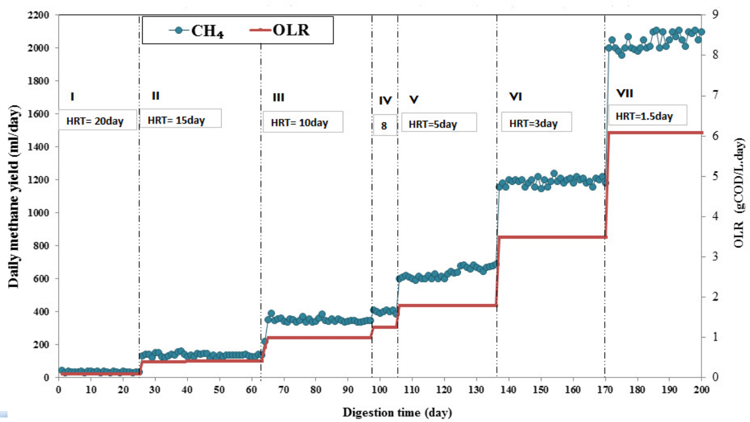
Innovative wastewater treatment technologies *for energy saving and environmental protection*

May 20, 2016 - Palermo

the international water association

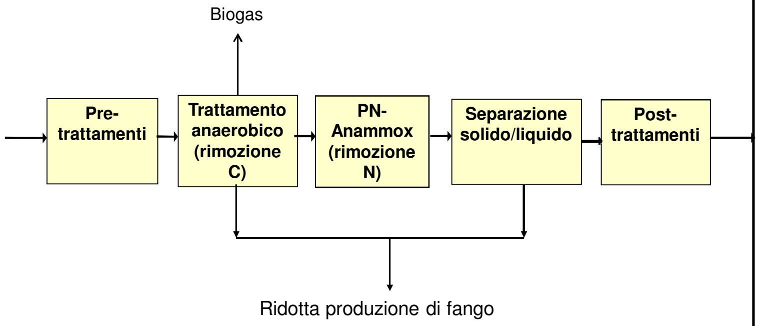
DICAM
Università di Palermo
Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)

Second stage – Biofilm reactor: methane production



AFBR biofilm

Trattamento anaerobico nella linea acque



High rate anaerobic reactors

Sono tutti basati sul principio della massimizzazione del *SRT* e si differenziano, a seconda di come la biomassa viene mantenuta nel reattore, nelle seguenti categorie:

- Ricircolo degli aggregati microbici contenuti nell'effluente del reattore biologico, e.g. *anaerobic contact (AC) process;*
- Formazione di aggregati microbici ad elevata sedimentabilità, e.g. *upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor* e *expanded granular sludge bed (EGSB) reactor*;
- Formazione di colture biologiche adese su supporto fisso, e.g. *upflow anaerobic filter (UAF)* e *dounflow anaerobic filter (DAF)*;
- Utilizzazione di materiali ad alta densità in sospensione nel reattore biologico per il supporto di colture biologiche adese, e.g. *anaerobic fluidized bed reactor (AFBR)*;
- Formazione di colture biologiche adese su supporto fisso e di aggregati microbici sospesi ad elevata sedimentabilità, e.g. *Hybrid*;
- Uso di membrane per la separazione solido-liquido (AnMBR).

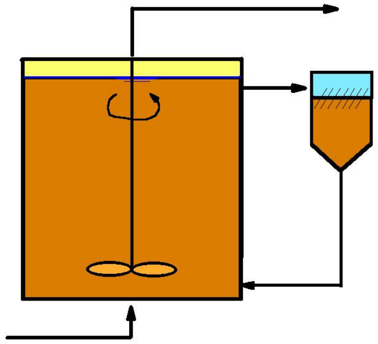
Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection May 20, 2016 - Palermo

High rate anaerobic reactors

Sistema	Caratteristiche dell'aggregato microbico	Ricircolo effluente	Materiale supporto	*OLR* tipici (kgCOD $m^{-3}d^{-1}$)
AC	fiocchi	no	no	0.25-4
UASB	granuli	no	no	10-30
EGSB	granuli	si	no	10-40
UAF	pellicola	no	si	1-40
DAF	pellicola	no	si	1-40
AFBR	pellicola	si	si	1-100
Hybrid	pellicola/granuli	si/no	si	10-40
ASBR	fiocchi	no	no	1-10

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

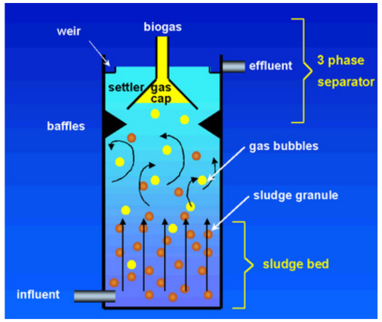
Sistema AC



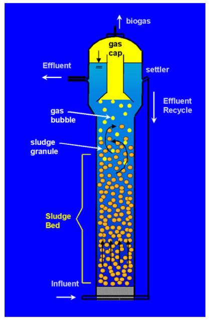
Innovative wastewater treatment technologies for energy saving and environmental protection May 20, 2016 - Palermo

Reattori UASB e EGSB

Up-flow Anaerobic Sludge Bed



Expanded Granular Sludge Bed

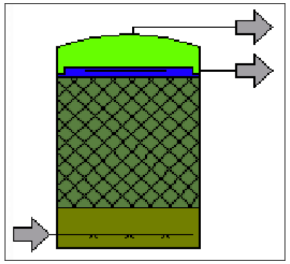


Innovative wastewater treatment technologies
for energy saving and environmental protection
May 20, 2016 - Palermo

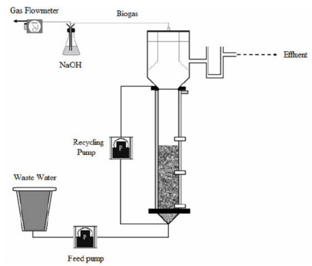
DICAM

AF e AFBR

Anaerobic filter



Anaerobic Fludized Bed Reactor



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

DICAM