



DIGESTIONE ANAEROBICA TERMOFILICA DI MISCELE PREIDROLIZZATE DI RIFIUTI SOLIDI AGRICOLI ED URBANI

Adriana Del Borghi, Mario Zilli, Attilio Converti

Istituto di Ingegneria Chimica e di Processo "G. B. Bonino", Via Opera Pia 15, 16145 Genova

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro si basa su uno studio del processo di digestione anaerobica termofila ($T = 55^{\circ}\text{C}$) di idrolizzati di amido di mais e residui lignocellulosici (simulanti la composizione di residui agricoli) e della frazione organica dei rifiuti solidi urbani precedentemente sottoposta ad idrolisi. In una prima parte della sperimentazione si propone e si verifica, tramite una serie di prove in discontinuo, un modello cinetico in grado di rappresentare il processo. La seconda parte è incentrata sull'analisi delle massime rese in biogas e dei tempi di permanenza proponibili per il processo fed-batch. Utilizzando fanghi dotati di una buona concentrazione di biomassa termofila si è verificata la possibilità di lavorare con tempi di ritenzione prossimi a 12 giorni, mantenendo inalterati i risultati di produzione di biogas rispetto al processo mesofilo. Un'altra caratteristica vantaggiosa del processo è rappresentato dalla elevata conversione dei substrati alimentati, benché essi risultino ricchi, come nel caso della frazione organica dei rifiuti solidi urbani, di composti recalcitranti. I risultati ottenuti consentono quindi di considerare la digestione anaerobica termofila come un metodo concreto di smaltimento dei rifiuti e di recupero energetico.

2. DISCUSSIONE

2.1. Prove discontinue di digestione

Allo scopo di individuare i fenomeni limitanti il processo fed-batch di digestione termofila della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU) (Mata Alvarez J., 1990), di stabilire l'intervallo ottimale del tempo di permanenza e di prevederne le rese in metano e biogas, sono state condotte diverse prove preliminari discontinue, sia in campo mesofilo che termofilo, di substrati simulanti in modo progressivamente sempre più fedele la composizione del rifiuto in questione (idrolizzato di emicellulosa, idrolizzato d'amido e miscele di rifiuti ortofrutticoli con fanghi attivi). Entrambe le microflоре (mesofila e termofila) sono state selezionate attraverso prove di adattamento progressivo dei fanghi anaerobici contenuti in un digestore secondario alimentato con i fanghi prodotti da un impianto di depurazione di acque reflue urbane (Converti A., 1997). Le prove discontinue sono state condotte per ciascun substrato seguendo in funzione del tempo lo sviluppo di biogas e di metano, la percentuale di metano nel biogas, il COD solubile e la concentrazione della biomassa, espressa come solidi sospesi volatili. I risultati ottenuti in termini di millimoli di metano prodotte per volume di reattore sono stati poi utilizzati per condurre uno studio cinetico attraverso un modello del prim'ordine derivato da quello di Monod, che ha consentito di calcolare e confrontare i valori delle costanti cinetiche e delle rese di metanazione per ciascun substrato alle diverse condizioni di temperatura.



2.1.1 Modello cinetico della digestione anaerobica

Le biodegradazioni promosse da cellule viventi seguono la cosiddetta equazione di Monod:

$$\frac{dC_s}{dt} = -r_{\max} \frac{C_s \cdot C_x}{K_s + C_s} \quad (1)$$

ove, nel caso della digestione di materiali difficilmente digeribili per la presenza di sostanze polimeriche, C_s è la concentrazione delle sole sostanze digeribili (g_{COD}/l) (Converti A., 1998), C_x la concentrazione della biomassa (g_{VSS}/l), r_{\max} il valore massimo della velocità specifica di degradazione ($g_{COD}/g_{VSS} \cdot h$) e K_s la costante di saturazione (g_{COD}/l). In processi lenti come la digestione anaerobica la costante di saturazione è in genere tanto elevata da potersi trascurare C_s rispetto a K_s , per cui la (1) si semplifica nell'equazione:

$$\frac{dC_s}{dt} = -k \cdot C_s \cdot C_x \quad (2)$$

ove k può essere intesa come una sorta di costante di velocità e C_x , per via del lungo tempo di duplicazione dei batteri metanigeni, può essere considerata ragionevolmente costante durante una prova discontinua ad elevata C_x^0 . In tal caso la (2) può essere agevolmente integrata e, tramite un bilancio di materia, si può ottenere la produzione di metano:

$$n_{CH_4} = n'_{CH_4} \cdot C_s^0 [1 - \exp(-k C_x t)] \quad (3)$$

ove C_s^0 è la concentrazione iniziale delle sole sostanze rapidamente digeribili e n'_{CH_4} la resa in metano per grammo di substrato consumato ($mmol_{CH_4}/g_{COD}$).

2.1.2 Discussione dei risultati

Operando in modo da poter ritenere trascurabile il contributo alla produzione di metano dovuto al materiale contenuto nel reattore e conoscendo i valori di C_s^0 e C_x per ciascuna di esse, sono stati determinati, attraverso un comune programma di minimizzazione degli errori (TC curve per Windows), i rispettivi valori di k e n'_{CH_4} .

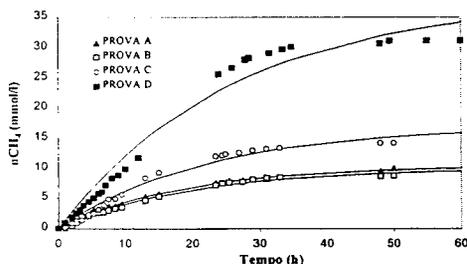
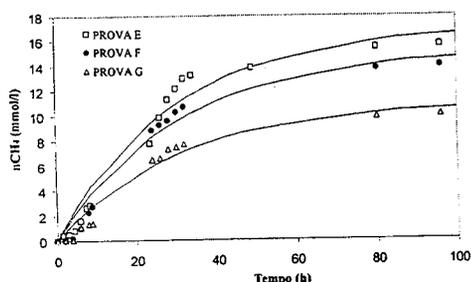
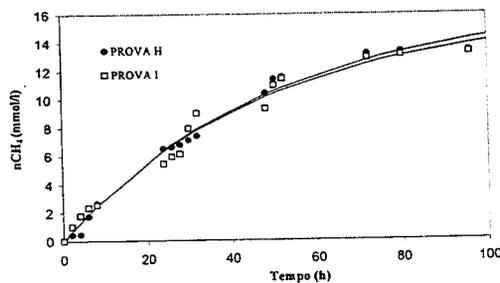


Figura 1- Produzione oraria di CH_4 per l'idrolizzato di emicellulosa

Nelle Figure 1, 2, 3 possono confrontarsi gli andamenti teorici e quelli sperimentali della produzione oraria di metano per gli idrolizzati di emicellulosa e di amido e per la miscela di FORSU e fanghi.

Un attento esame dei valori di Tabella 1 mostra come l'idrolizzato di emicellulosa sia, in condizioni termofile, il substrato più rapidamente digeribile (prove C e D) mentre la miscela di FORSU e fanghi (prove H e I) quello più recalcitrante (valori medi di k pari rispettivamente a $8,40 \cdot 10^{-3} \cdot h/g_{VSS}$ e a $4,10 \cdot 10^{-3} \cdot h/g_{VSS}$) per la presenza di materiale ligninico e polimerico non idrolizzato nella FORSU.

Figura 2 - Produzione oraria di CH₄ per l'idrolizzato di amidoFigura 3 - Produzione oraria di CH₄ per la miscela di FORSU e fanghi

SUBSTRATO	Idrolizzato di emicellulosa				Idrolizzato di amido			FORSU+fanghi	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
T (°C)	37	37	55	55	55	55	55	55	55
C _s ° (g _{cod} /l)	1,4	2,8	1,4	2,8	1,4	2,0	3,0	1,5	5,0
C _x (g _{vss} /l)	5,1	5,0	5,2	4,8	5,0	4,9	5,0	5,0	5,1
k 10 ³ (l·h/g _{vss})	10,45	10,10	8,79	8,02	6,76	6,76	6,60	4,06	4,14
Y (%)	48,1	23,0	77,8	86,8	78,3	48,5	23,3	69,3	20,4
% CH ₄	46	43	53	60	50	35	30	61	46
r ²	0,997	0,990	0,978	0,972	0,963	0,966	0,957	0,990	0,978

Tabella 1 - Valori dei parametri cinetici e di processo calcolati per le prove discontinue di digestione

Le prove A e B da un lato e C e D dall'altro evidenziano come il passaggio dalle condizioni mesofile a quelle termofile comporti da un lato una diminuzione di circa il 20% della velocità di biometanazione, quale probabile risultato del metabolismo tipicamente lento degli archebatteri termofili, e dall'altro un incremento della resa Y (rapporto tra resa sperimentale - n'_{CH₄} - e teorica di trasformazione in metano - 15,6 mmol_{CH₄}/g_{cod} - del glucosio) superiore al 60%, certamente da correlarsi ad una più spinta idrolisi dei materiali polimerici a più elevata temperatura. La resa di biometanazione difficilmente supera l'80%: anche i substrati pressoché completamente idrolizzati contengono infatti sostanze recalcitranti quali sottoprodotti tossici dell'idrolisi. Il passaggio dalle condizioni mesofile a quelle termofile pare altresì responsabile di un incremento non inferiore al 15% della percentuale di metano nel biogas, dovuto con ogni probabilità ad una attività metanigena idrogenotrofica (produzione di metano a partire da CO₂ e H₂, caratteristica di un gran numero di archebatteri termofili del tipo metabolico di *Methanobacterium thermoautotrophicum*) particolarmente sostenuta. Si può inoltre concludere che il modello del primo ordine derivato da quello di Monod può essere impiegato con risultati più che soddisfacenti per descrivere l'andamento temporale della produzione di metano anche a partire da materiali recalcitranti, a patto che venga considerata nel bilancio materiale per il carbonio la sola frazione di sostanze organiche realmente digeribili in tempi ragionevoli.

2.2 Prove fed-batch

La realizzazione delle prove in semi-continuo ha consentito lo studio dell'andamento del biogas, anziché su una scala di tempo dell'ordine delle ore e su una durata globale di 2 o 3 giorni (prove discontinue), per una campagna di durata variabile tra 10 e 20 giorni, alimentando all'inizio di ogni giornata una prefissata quantità di nutriente.

Nella Figura 4 sono riportate le produzioni di metano, a regime, per diversi valori di carico organico (FCV) durante le prove fed-batch di digestione termofila dei citati substrati.

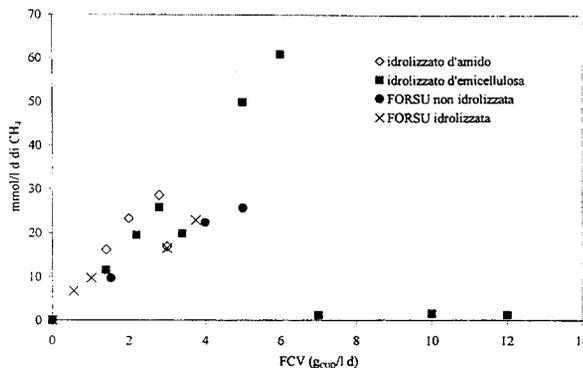


Figura 4 – Risultati delle prove fed-batch di digestione anaerobica a diversi valori del FCV

Buoni risultati hanno fornito i substrati costituiti da FORSU e fanghi sia tal quali che idrolizzati. Per questi ultimi si è potuta notare una migliore facilità di ambientamento della popolazione batterica ad un substrato già in parte decomposto: lo stato pseudo-stazionario è stato infatti raggiunto dopo soli 9 giorni (Del Borghi A., 1998).

3. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto si è basato su una sperimentazione riguardante la digestione anaerobica di substrati di diversa natura, partendo dalle condizioni mesofile per passare poi ad esaminare le condizioni di passaggio, ed infine valutare le stesse tipologie di trattamento in condizioni termofile. Quello che si è tentato di dimostrare studiando la digestione termofila dei substrati esaminati è, innanzitutto, la affidabilità di questo tipo di processo anche nei confronti di condizioni più severe e più aderenti alla realtà quotidiana di un impianto di trattamento dei rifiuti. Da questo punto di vista, i risultati ottenuti non hanno deluso le aspettative sia in termini di produzione di biogas che di rapidità nel raggiungere lo stato pseudo-stazionario. Se osserviamo le prove nella loro globalità possiamo affermare che, utilizzando un processo termofilo, si è in grado di smaltire carichi organici fino anche a $5 \text{ g}_{\text{COD}}/\text{d}$, con produzioni di biogas intorno ad 1,5 litri per ogni litro di reattore e percentuali di metano nella miscela vicine al 60%. Affianchiamo a questi indiscutibili vantaggi quello di poter lavorare con tempi di permanenza più brevi almeno del 25 %, se non talvolta quasi del 35%, e il quadro che si delinea è quello di un processo che, tecnicamente, ha solo migliorato il processo mesofilo.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Mata Alvarez J. et al. (1990) The performances of Digester Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes Differently Sorted. *Biological Wastes* **33**, 181-199.
2. Converti A. et al (1997) Co-digestion of Municipal Solid Sewage Sludges and Pre-hydrolyzed Woody Agricultural Wastes. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* **69**, 231-239.
3. Converti A. et al. (1998) Kinetic study on methane fermentation of pre-hydrolyzed lignocellulosics. *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, in press.
4. Del Borghi A. et al, Simultaneous disposal of the organic fraction of municipal solid wastes and wastewater treatment sludges by hydrolysis and thermophilic digestion. 11th World Clean Air & Environment Congress, Durban, 13-18 Sept. 1998.

Quello a base emicellulosica ha evidenziato una capacità da parte dei batteri di smaltire carichi intorno a $6 \text{ g}_{\text{COD}}/\text{d}$ a causa di una tendenza ad orientare l'equilibrio del reattore verso un pH leggermente alcalino. L'idrolizzato di mais ha una tendenza contraria e dopo un $\text{FCV}=2,8 \text{ g}_{\text{COD}}/\text{d}$ si verifica l'acidogenesi.