

DIGESTIONE ANAEROBICA IN CONDIZIONI TERMOFILE DI FORSU TRATTATA MECCANICAMENTE: PRODUZIONE E CARATTERIZZAZIONE DEL BIOGAS

F. Fantozzi¹, S. Massoli¹, V. Pistolesi¹, C. Buratti¹

¹Centro di Ricerca sulle Biomasse, Università di Perugia, Italia
Via G. Duranti – Strada S. Lucia Canetola s.n.c, 06125 Perugia

e-mail: fanto@unipg.it, massoli@crbnet.it, pistolesi@crbnet.it, cburatti@unipg.it

SOMMARIO

La conversione energetica dei rifiuti solidi urbani rappresenta una valida alternativa allo smaltimento in discarica e uno dei processi più promettenti è costituito dalla digestione anaerobica della frazione organica (FORSU).

Presso i Laboratori del Centro di Ricerca sulle Biomasse dell'Università di Perugia è stata effettuata una campagna sperimentale volta a determinare la produttività di biogas da digestione anaerobica della FORSU, attraverso un digestore da laboratorio di tipo batch interamente progettato e realizzato presso il CRB. I campioni di FORSU sono stati raccolti presso un impianto di compostaggio nel centro Italia; la FORSU, derivante da raccolta differenziata, è stata pre-trattata meccanicamente attraverso una macchina spremitrice che la separa in due frazioni:

- FORSU Slurry, la frazione liquida ottenuta dalla spremitura;
- FORSU Waste, la frazione residua, costituita da materiali inerti quali plastica o legno.

Diverse prove sperimentali sono state effettuate sulla FORSU Slurry: determinazione delle proprietà chimico-fisiche, al fine di caratterizzare il substrato; prove ABP e prove di digestione anaerobica nell'impianto sperimentale di tipo batch, al fine di determinare la produttività di biogas e la percentuale di metano. E' stata anche investigata l'influenza dell'inoculo e del controllo del pH.

I risultati hanno mostrato che per avere produzioni significative di biogas e di metano, la FORSU Slurry necessita di diluizione e di inoculo; fondamentale risulta inoltre il controllo del pH nella fase iniziale, onde evitare l'acidificazione del substrato che inibisce la fase metanigena del processo.

INTRODUZIONE

La tecnologia più indicata per il recupero energetico della frazione organica del rifiuto è la digestione anaerobica. I principali parametri che permettono di dimensionare, valutare e gestire il processo di digestione anaerobica possono essere suddivisi in due categorie: parametri chimici e parametri fisici. I parametri chimici indispensabili per valutare una biomassa e formulare una reazione equilibrata e produttiva sono: il contenuto di solidi totali (TS), il contenuto di solidi totali volatili (TVS), il contenuto di Carbonio e Azoto e il loro rapporto (C/N). I solidi totali rappresentano la somma della frazione organica e di quella inerte del substrato, e quindi indicano la quantità di materia solida presente nel campione. I solidi volatili rappresentano la frazione organica dei solidi totali e pertanto indicano il contenuto di sostanza organica potenzialmente trasformabile in biogas. Questo è un gas interessante dal punto di vista energetico, composto principalmente da anidride carbonica e metano (PCI = 50.000 kJ/kg), con l'idrocarburo in percentuale variabile fino al 70% vol e con potere calorifico variabile di conseguenza. Il contenuto di Azoto è fondamentale per il corretto svolgimento dei processi biologici; in particolare, un rapporto ottimale tra Carbonio e Azoto indicato in Letteratura, per la digestione anaerobica, è inferiore a 30 (Wilkie et al., 1986, Kayhanian e Rich, 1995). Un contenuto di Azoto insufficiente rispetto al carbonio (C/N>30) rallenta il tasso di crescita microbica e tutte le reazioni di trasformazione del substrato in biogas. Per

quanto riguarda i parametri fisici del processo, di particolare importanza risultano essere il pH e la temperatura. Il pH fornisce un'indicazione della stabilità del mezzo di reazione. Particolari fasi della digestione, vale a dire l'acidogenesi e l'acetogenesi, sono favorite a pH acidi, dell'ordine di 5-5,5, mentre l'intervallo entro il quale dovrebbe essere compreso il pH per consentire la successiva fase di metanogenesi e l'attività dei batteri metanigeni è generalmente indicato tra 6,8 e 8,2, con valori ottimali tra 7 e 7,5. A valori inferiori l'attività metanigena risulta via via ridotta e per valori del pH inferiori a 6 gravemente compromessa. In relazione alle temperature di processo, si distinguono tre tipici intervalli entro i quali viene condotta la digestione anaerobica: il termofilo (50-60°C), con tempi di ritenzione nel reattore di 14-16 giorni, il mesofilo (20-40°C) con tempi di residenza di 14-30 giorni e lo psicofilo (10-20°C) con tempi di ritenzione superiori a 30 giorni (Cecchi et al, 2005).

Negli ultimi anni la digestione anaerobica è stata impiegata soprattutto per la co-digestione della FORSU e dei fanghi di depurazione o con altri substrati: in questo modo, oltre a trattare diversi flussi di rifiuto in un unico impianto, si massimizza il contenuto di metano nel biogas, grazie ai nutrienti aggiunti dei cosubstrati. La FORSU può essere impiegata in prove di co-digestione con i sottoprodotti agroindustriali (siero di latte, scarti dell'industria olearia), che di per sé avrebbero rese in biogas molto modeste. In Letteratura sono riportate prove sperimentali in cui la FORSU viene co-digerita con i fanghi di depurazione delle acque di

scarico (75% in volume di fanghi e 25% in volume di FORSU) in condizioni termofile (56°C). Tale binomio risulta essere molto promettente dal momento che il biogas che si ottiene da questa miscela è il doppio di quello relativo alla digestione dei soli fanghi di depurazione e con un contenuto di metano pari al 60% (Sosnowski et al., 2003). Altre fonti di Letteratura mostrano come la presenza e la natura di un inoculo sia un parametro importante al fine di raggiungere un rapido inizio del processo e un giusto equilibrio della popolazione microbica. Tra le principali tipologie di inoculo sono indicati reflui bovini e suini e fanghi digeriti. Le condizioni di processo più impiegate per la co-digestione sono: 25% in peso di inoculo, temperatura pari a 55°C (valore ottimale nel range termofilo), un contenuto di solidi totali del 30%, ottenuto aggiungendo alla materia prima sia acqua che inoculo. Da prove effettuate su impianti pilota si evince che le rimozioni più alte di materia organica sono state ottenute dalla digestione dei fanghi, mentre i reflui bovini sono risultati l'inoculo meno efficiente in termini di rimozione della sostanza organica e di produzione di metano (Forster-Carneiro et al., 2007). Nella pratica comune sta divenendo sempre più frequente l'inoculazione del substrato mediante digestato liquido recuperato a valle del processo di digestione anaerobica. Questo tipo di inoculo è in grado di fornire al substrato stesso il giusto apporto di batteri necessario per avviare le reazioni fin dai primi giorni di prova. In Letteratura sono riportati i rapporti in peso fra substrato e inoculo in corrispondenza dei quali si ha la maggior produzione di biogas e di metano. Charles, Walker e Cord-Ruwish (2009) hanno ottenuto risultati soddisfacenti eseguendo una digestione anaerobica in condizioni wet su un substrato costituito da FORSU e digestato liquido recuperato da un impianto di trattamento della stessa. Il liquido, una volta prelevato, è stato conservato a temperatura ambiente in atmosfera di N₂. Prima di essere inserito nel reattore, è stato riscaldato in un bagno d'acqua, fino ad una temperatura di 55°C, ed è stato mantenuto in tali condizioni per un periodo di tre giorni. La digestione della FORSU richiede inoltre grande attenzione nel controllo del pH durante le varie fasi del processo; infatti è fondamentale evitare l'accumulo di acidi grassi volatili che inibiscono il processo di bio-metanazione. Gli acidi grassi volatili (AGV) sono gli acidi organici che si producono nel corso della degradazione della sostanza organica, in particolare nella fase di acidogenesi. La concentrazione di AGV, espressa come concentrazione di acido acetico nel volume di materiale (mg/l), dipende dalla qualità e quantità di materiale caricato nel digestore e dall'equilibrio tra batteri acidogeni e batteri metanigeni. In generale un incremento degli AGV è conseguente all'aumento del carico organico da trattare. Ciò spiega come, nel caso della digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani, la produzione degli AGV sia notevole e immediata a causa delle sostanze facilmente biodegradabili. Gli AGV determinano una acidificazione irreversibile del substrato, con conseguente inibizione della fase metanigena. Il valore del pH dipende anche dall'alcalinità del substrato, che può essere espressa come concentrazione di carbonato di calcio. In Letteratura, prove sperimentali di digestione anaerobica in cui il pretrattamento alcalino della FORSU viene effettuato con idrossido di calcio (Ca(OH)₂), hanno dimostrato un incremento del 172% nella produzione di metano rispetto ad un campione di controllo (Lopez Torres e Espinosa Llorens, 2008). Un altro metodo impiegato per far fronte

all'abbassamento del pH è l'immissione nel reattore di basi forti, come l'idrossido di sodio (NaOH). Dati di Letteratura mostrano che l'iniziale pH della frazione organica risulta essere sostanzialmente acido (4,5) e che quindi generalmente è necessario un aggiustamento di quest'ultimo con idrossido di sodio (6 M) fino a raggiungere un valore di 8,5 (Forster-Carneiro et al., 2007). Con queste modifiche, il pH e l'alcalinità (all'incirca pari a 0,3g CaCO₃/kg) assumono valori adeguati, al fine di mantenere una condizione di stabilità nel reattore per un'ottimale attività biologica. Altri studi, per ovviare all'iniziale acidificazione del substrato, suggeriscono di sottoporre la FORSU ad un trattamento aerobico della durata di alcuni giorni, prima che questa venga inserita nel digestore (Charles et al., 2009).

Oltre ad un trattamento di tipo biologico, la frazione organica deve essere sottoposta anche ad un trattamento di tipo meccanico, che consiste nella riduzione delle dimensioni delle particelle. Così facendo si aumenta la superficie specifica a disposizione dei batteri, con un conseguente aumento della resa in biogas. L'impiego di digestato liquido, oltre che di un giusto quantitativo di acqua, consente di ottenere un alto valore di umidità (circa 95%) e quindi di condurre un tipo di digestione wet, particolarmente indicato per questa tipologia di rifiuto e per processi di tipo batch o discontinui. Questo tipo di trattamento è stato il primo ad essere impiegato nel trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani, dal momento che sfruttava le conoscenze acquisite in decenni di attività nel processo di digestione anaerobica dei fanghi di supero. Nei processi di tipo wet il rifiuto di partenza viene opportunamente trattato e diluito, al fine di raggiungere un tenore in solidi totali inferiore al 10%. I processi di tipo wet hanno inoltre il vantaggio di consentire la diluizione dei picchi di concentrazione di substrato e, nel caso della frazione organica, di aumentare il valore inizialmente acido del pH.

MATERIALI E METODI

I campioni di FORSU sono stati raccolti in un impianto di compostaggio seguendo le specifiche della UNI CEN TS 15442. In tale occasione sono stati prodotti campioni di FORSU Slurry e FORSU Waste mediante una macchina per il trattamento della frazione organica dei rifiuti proveniente dalla raccolta differenziata; sono stati inoltre prelevati campioni di FORSU tal quale. Il campione di FORSU Slurry è stato ottenuto dalla spremitura della sostanza tal quale mediante una macchina spremitrice modello Tiger DSP 25; essa ha lo scopo di separare gli inerti (plastiche e legno) dalla frazione umida (Slurry). Il macchinario è costituito da una tramoggia in acciaio inox di circa 5 m³ di volume, completamente stagna ed isolata, all'interno della quale è presente una coclea di alimentazione che trasferisce il prodotto da trattare al gruppo di spremitura. Il gruppo di spremitura consiste in un albero verticale sul quale sono disposti in modo ordinato degli elementi a coclea intercambiabili. L'albero verticale è completamente racchiuso all'interno di un guscio, entro il quale avviene il processo di trattamento del prodotto.

In uscita dalla macchina si ha una purea pompabile (15 % di sostanza solida) ed una frazione solida, prevalentemente secca, costituita dalle plastiche e dagli inerti.

Le analisi effettuate sono le seguenti:

- 1) FORSU tal quale per la quale sono stati determinati:
 - a) contenuto di solidi totali e solidi volatili;

- b) prove ABP;
- 2) FORSU Slurry (frazione liquida ottenuta dalla spremitura), per la quale sono stati determinati:
 - a) contenuto di solidi totali e solidi volatili;
 - b) prove ABP;
 - c) prove di digestione anaerobica in impianto pilota.

Il Laboratorio del Centro di Ricerca sulle Biomasse permette di caratterizzare le biomasse conoscendo alcuni parametri quali il Potere Calorifico Superiore (PCS) ed Inferiore (PCI), le caratteristiche chimiche (contenuto di Carbonio, Idrogeno e Azoto) e le caratteristiche fisiche (contenuto di umidità, ceneri, sostanze volatili e carbonio fisso). Il Laboratorio è dotato delle seguenti strumentazioni: mulino Retsch SM 2000 per la preparazione dei campioni, TGA 701 LECO per analisi prossima (contenuto di umidità, ceneri e sostanze volatili, carbonio fisso), TRUSPEC CHN LECO per analisi ultima (contenuto di Carbonio, Idrogeno Azoto), Calorimetro AC350 LECO per misure di potere calorifico superiore, Lignotester New Dolmen Tekpro per misure di durabilità del pellet, Cromatografo ionico Dionex per misure del contenuto di Cloro e Zolfo. Per la determinazione del contenuto di Umidità, Sostanze Volatili e Ceneri è impiegato l'Analizzatore Termogravimetrico TGA-701 LECO, che effettua analisi in conformità a quanto prescritto dalla normativa CEN/TS 1477 4 *Methods for determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in the analysis sample*, dalla normativa CEN/TS 14775 *Method for the determination of ash content* e dalla CEN/TS 15148 *Solid Biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter*. Per la preparazione del campione si è fatto riferimento alla CEN/TS 14780 *Solid Biofuels - Methods for sample preparation*.

Attrezzature per prove ABP

La valutazione dell'ABP (Anaerobic Biomethane Potential), ovvero del potenziale di biometanazione del substrato in esame, è stata condotta mediante l'impiego di particolari contenitori (fig.1) e si è svolta sempre in parallelo con la prova di digestione anaerobica condotta nell'impianto pilota. I contenitori sono realizzati in vetro borosilicato (Pyrex) della capacità di 1 litro e dotato di aperture attraverso le quali è possibile monitorare l'andamento della pressione, estrarre il biogas prodotto, misurare il pH e saturare mediante azoto lo spazio di testa; le uscite sono provviste di appositi tappi filettati atti a garantire le condizioni di tenuta ed anaerobiosi durante tutto il corso della prova.



Fig. 1 Contenitori per prove ABP

La determinazione del pH dei substrati e degli inoculi è effettuata mediante il misuratore Hanna Instruments HI9124 dotato di elettrodo di vetro combinato a compensazione termica automatica. Lo strumento è in grado di operare tra le

temperature di -20°C e 120°C e ha una risoluzione sulla misura del pH di 0,01. Prima della prova, allo scopo di realizzare condizioni anossiche all'interno dei contenitori, viene fatto gorgogliare azoto in modo da eliminare tutto l'ossigeno presente. I contenitori sono mantenuti a $T=\text{cost}$ e pari a 55°C in camera climatica. La produzione di biogas viene valutata misurando le variazioni di pressione nello spazio di testa, mediante dei manometri tradizionali con f.s. di 1,6 bar; in particolare si procede ad effettuare due misure di pressione al giorno e a liberare il gas in eccesso. In fase di ricostruzione delle curve di produzione del biogas si tiene conto della quantità di gas liberato. Durante le prove si è proceduto al prelievo del biogas prodotto mediante delle siringhe a tenuta di gas HAMILTON 1025 SL della capacità di 25 ml ciascuna; il biogas è quindi analizzato mediante gascromatografia.

Digestore pilota da laboratorio di tipo batch

L'impianto pilota di digestione anaerobica (fig. 2) è costituito da un recipiente cilindrico realizzato in acciaio INOX AISI dotato di coperchio per la chiusura del corpo del reattore, mediante quattro ganci che assicurano la tenuta del sistema e le condizioni anaerobiche del processo. Sulla parete del cilindro è presente un rubinetto, per permetterne il collegamento al sistema di misura del biogas mediante una tubazione in teflon. Un sistema di riscaldamento, costituito da riscaldatori flessibili in gomma siliconica, posizionati esternamente al digestore, garantisce il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di processo. La temperatura è regolata da un termoregolatore attivo (PID) collegato ad un sensore di temperatura interna al digestore, costituito da una termocoppia. Il digestore è dotato di tre sonde ad immersione per la misura della temperatura, inserite attraverso dei fori praticati nel coperchio: una termoresistenza, la termocoppia che comanda il sistema di riscaldamento e un'altra termocoppia collegata alla sonda di misura del pH. L'impianto è inoltre fornito di una seconda termoresistenza per la misura della temperatura ambiente. Il pH del substrato è misurato attraverso un sistema di rilevazione in continuo, in quanto di fondamentale importanza per garantire la stabilità del processo. Il digestore è collegato mediante un tubo flessibile al sistema di misura del volume del biogas (gasometro), che consente anche lo stoccaggio temporaneo del biogas prodotto e di effettuare prelievi per l'analisi del biogas stesso. Il gasometro è costituito da due camere di forma cilindrica in acciaio INOX AISI 304, disposte l'una dentro l'altra, coassiali e in comunicazione tra di loro ed è chiuso superiormente tramite flangia bullonata. Sono presenti due rubinetti, uno di collegamento tra il digestore e il gasometro e l'altro per il prelievo del biogas. Nella parte bassa è predisposto un ulteriore rubinetto per permettere la fuoriuscita del fluido di controllo. Il principio di funzionamento del gasometro è di tipo idraulico: il biogas proveniente dal digestore esercita una pressione sul pelo libero del fluido di controllo della camera esterna; questo provoca l'innalzamento del pelo libero del fluido di controllo della camera interna fino al ristabilirsi dell'equilibrio tra le pressioni. Un misuratore elettronico di livello acquisisce la variazione del pelo libero nella camera interna del gasometro, attraverso il quale è possibile calcolare il volume di biogas prodotto. I valori acquisiti dai sistemi di misura e controllo sono inviati al sistema di acquisizione dati in ambiente Labview, attraverso PC Windows e specifici

supporti hardware e software forniti dalla National Instruments. Il biogas, periodicamente prelevato, è analizzato mediante l'analizzatore di biogas GA 2000 PLUS che permette la misura della concentrazione di CH₄, CO₂, O₂, CO e H₂S nel gas; la voce BALL indica la percentuale di tutte le altre specie presenti all'interno del biogas non espressamente indicate dall'analizzatore.



Fig. 2 Digestore anaerobico da laboratorio e sistema di accumulo del biogas

FORSU TAL QUALE

Caratterizzazione del campione

Il campione, in quantità pari a circa 5 m³, è stato prelevato dal magazzino di stoccaggio attraverso delle pale ed è stato posto nel piazzale interno dell'impianto. Il materiale è stato sottoposto a procedura di campionamento con metodologia di *quartatura*, in accordo con la UNI CEN/TS 15442. Il campione di rifiuti in questione era costituito principalmente da scarti di ristorazione e da scarti mercatali; tuttavia in esso erano contenuti anche materiali e oggetti indesiderati, quali plastiche e componenti di imballaggio dei prodotti, eliminabili mediante processi di vagliatura. Il campione è stato preparato ai sensi della norma CEN/TS 14780 *Solid Biofuels - Methods for sample preparation*. Ciascun parametro è stato misurato su due diversi campioni, dei quali si è considerato il valore medio. I risultati sono riportati successivamente indicando con U (%) la percentuale di umidità, con ST (%) quella di solidi totali e con SV (%) quella di solidi volatili su base secca (Tab.1).

Tab. 1 Caratteristiche chimico-fisiche della FORSU

	U (%)	ST (%)	SV (%)
FORSU	81.09	18.91	83.43

FORSU SLURRY

Caratterizzazione del campione

Il campione di FORSU Slurry è stato ottenuto dalla spremitura della sostanza tal quale mediante una macchina spremitrice modello Tiger DSP 25; essa ha lo scopo di separare gli inerti (plastiche e legno) dalla frazione umida (Slurry). In uscita dalla macchina si ha un una purea

pompabile, avente circa il 15 % di sostanza solida ed una frazione solida, prevalentemente secca, costituita dalle plastiche e dagli inerti. La frazione umida è stata prelevata mediante campionamento discontinuo, affinché si potesse garantire la massima rappresentabilità del campione ed è stata stoccata in 3 fusti a tenuta stagna da 30 litri ciascuno. Si sono determinati umidità, solidi totali e solidi volatili di due campioni di Slurry e si è assunto come valore rappresentativo la media dei valori ottenuti per i due campioni. I risultati sono riportati successivamente (Tab. 2)

Tab. 2 Caratteristiche chimico-fisiche della FORSU Slurry

	U (%)	ST (%)	SV (%)
FORSU Slurry	86,74	13,26	87,94

Prove ABP: prima campagna (senza inoculo)

La prova di valutazione del potenziale metanigeno della biomassa è stata eseguita introducendo in un contenitore di vetro da 1 litro circa 400 grammi di Slurry; il recipiente è stato collegato, tramite tubazioni in PVC, ad una sacca di stoccaggio del gas a tenuta d'aria ed il reattore è stato mantenuto in camera climatica alla temperatura di 55°C per un periodo di 30 giorni. Il campione ha fornito quantità di biogas trascurabili, tali da non poter essere analizzate tramite gascromatografia. E' possibile ricondurre la mancata produzione all'assenza di diluizione e di correzione del pH, che potrebbero aver generato una acidificazione irreversibile del substrato, inibendo la fase metanigena del processo di digestione, come riportato nei paragrafi precedenti.

Prove ABP: seconda campagna (con inoculo)

In accordo con quanto evidenziato in Letteratura, sono state effettuate prove aggiuntive diluendo il campione e inoculando con un digestato suino proveniente da un impianto di trattamento anaerobico alimentato con liquame suino. Sono stati pertanto preparati contenitori nei quali è stato introdotto un substrato costituito da 200 grammi di Slurry, 200 grammi di digestato da reflui suinicoli e 200 grammi di acqua. Il rapporto tra inoculo e biomassa e il quantitativo di acqua necessario per ottenere un contenuto di solidi totali minore del 10%, sono stati stabiliti in base a precedenti prove di digestione effettuate presso il laboratorio del CRB (Fantozzi et al., 2008; Fantozzi e Buratti, 2009).

I valori del rapporto tra inoculo e biomassa riportati in Letteratura sono molto differenti tra loro (Liu et al., 2008, Fernandez et al., 2008, Forster-Carneiro et al., 2009) e variano a seconda della tipologia di reattore (continuo o batch), del contenuto in solidi e del regime di temperatura. Anche se ancora non esiste un *modus operandi* comune, tuttavia sulla necessità dell'impiego di un inoculo batterico c'è assoluto accordo, come sottolineato anche dalle normative di standardizzazione dei metodi per la valutazione del potenziale metanigeno. L'inoculo selezionato era stato già impiegato in diverse prove di digestione anaerobica effettuate presso il CRB, ed è costituito da flora batterica mesofila; tuttavia gli studi riguardanti l'adattabilità dei ceppi batterici alle diverse condizioni ambientali (Montero et al., 2008, Ortega et al., 2008, Vismara et al., 2008) hanno messo in luce come all'interno della fasce di temperatura mesofile siano presenti ceppi batterici termofili che possono essere riattivati quando la

temperatura viene portata nel regime di termofilia. Prima dell'avvio della prova, si sono effettuate le analisi chimico-fisiche della miscela Slurry+inoculo e dei singoli componenti della stessa (Tab.3).

Il processo di fermentazione si è svolto in condizioni di termofilia (55°C) e per un tempo di ritenzione di 17 giorni. Il gas prodotto è stato raccolto in sacche di dimensioni variabili da 1 a 3 litri, sostituite durante la prova, e successivamente analizzate mediante gas cromatografo che ha permesso la valutazione quantitativa e qualitativa della composizione del biogas.

Tab. 3 caratteristiche chimico-fisiche della miscela e dei componenti della stessa

	Umidità (%)	Solidi Volatili (%)	Ceneri (%)	Carbonio Fisso (%)
FORSU Slurry	86,74	11,7	1,1	0,46
Inoculo	98,9	0,6	0,44	0
Mix (FORSU Slurry e inoculo)	92,82	6,15	0,77	0,23

La prova ha mostrato uno start up immediato e una produzione continua di biogas. L'impiego dell'inoculo batterico e la diluizione con acqua hanno garantito un corretto bilanciamento tra carica batterica e carico organico, che ha permesso una degradazione regolare e continua del substrato. La produzione giornaliera di biogas è stata caratterizzata da un picco di produzione in corrispondenza del settimo giorno di prova, al quale è seguito un progressivo decremento e si è pressoché azzerata dopo circa sedici giorni di prova.

Le percentuali di metano nel biogas è stata elevata sin dai primi giorni di produzione, mostrando un andamento a campana tipico del processo di fermentazione anaerobica (fig. 3). La ridotta pezzatura della biomassa ha favorito la degradazione del substrato con elevata continuità e l'inoculo batterico, benché costituito da ceppi batterici mesofili, non ha dimostrato problemi di acclimatamento alle elevate temperature, garantendo il giusto equilibrio tra le fasi della degradazione.

Il quantitativo di metano prodotto ha raggiunto il valore massimo in prossimità del picco di produzione di biogas, con un valore percentuale sul totale del gas prodotto del 68,5 %.

Le curve di produzione cumulata di biogas e metano (fig. 4) denotano un andamento crescente molto marcato nei primi giorni di prova ed una crescita meno marcata dopo il raggiungimento del picco di produzione che si è avuto nel settimo giorno. Il biogas complessivamente ottenuto presenta ottime caratteristiche energetiche, essendo costituito da una percentuale media del 59,7% in metano.

Si sono calcolate le rese complessive in biogas e metano riferite all'unità di massa di sostanze volatili al fine di renderle confrontabili con i dati presenti in Letteratura (Tab. 4). Esse risultano congruenti con i dati di Letteratura (Zhang et al., 2007, Chynoweth et al., 2001) con valori lievemente inferiori per il biogas e rese in metano lievemente maggiori.

Prove ABP: terza campagna (con inoculo)

Sulla base delle differenze sostanziali riscontrate tra le prove con substrati non inoculati e quelle con substrati

inoculati, si è deciso di proseguire la sperimentazione utilizzando degli inoculi. Sono stati impiegati n. 2 inoculi, che saranno indicati nel seguito come inoculo 1 e inoculo 2, costituiti da digestato liquido proveniente da due diversi impianti di digestione della FORSU. Gli inoculi sono stati campionati ed analizzati. Una serie di prove è stata effettuata caricando contemporaneamente più contenitori e facendo variare le proporzioni tra substrato e inoculo; è stata effettuata anche una prova con controllo iniziale del pH. La composizione dei substrati nei vari contenitori è riportata nella tabella 5.

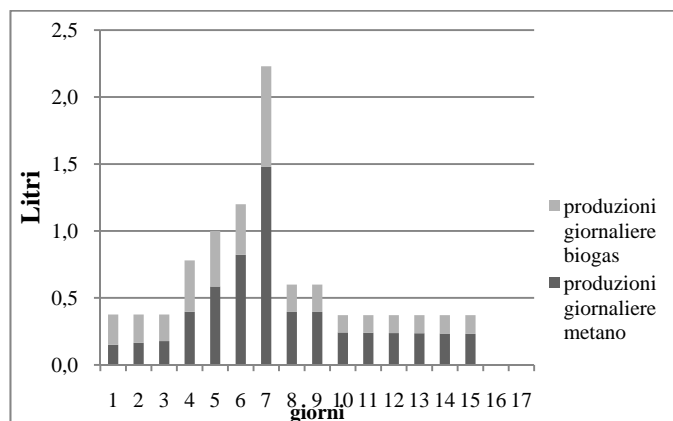


Fig. 3 Produzione giornaliera di metano nella prova della miscela Slurry + digestato di reflui suini + acqua

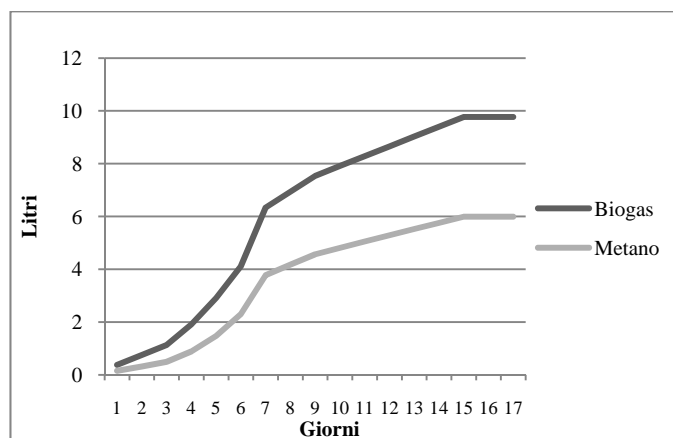


Fig. 4 Curva di produzione cumulata del biogas e del metano nella prova della miscela Slurry + digestato di reflui suini + acqua

Tab. 4 Rese delle produzioni di biogas e metano

Rese in biogas	0,398 Nm ³ /kgSV
Rese in metano	0,238 Nm ³ /kgSV

La percentuale massima di metano che si è registrata è stata per la miscela n.2 e pari a 52,9% e le rese di biogas e metano sono state rispettivamente pari a 0,08 Nm³/kgSV e a 0,042 Nm³/kgSV Tali valori sono inferiori ai dati di riferimento di Letteratura (Sosnowski et al., 2003). Dai dati desunti dalle prove di valutazione del BMP si evince che l'aspetto qualitativo della produzione di metano rispecchia i dati di Letteratura, mentre le produzioni di biogas sono state

notevolmente inferiori ai risultati attesi.

Tab. 5 Composizione delle miscela con Slurry + inoculo 1

CONTENITORE	COMPOSIZIONE		U (%)	V (kg)	pH iniz
1 (70%-30% in massa)	Subst	0,056 kg	95	0,012	4,98
	inoc 1	0,023 kg			
	acqua	0,225 kg			
2 (70%-30% in SV)	Subst	0,067 kg	92	0,017	-
	inoc 1	0,094 kg			
	acqua	0,150 kg			
3 (70%-30% in massa, controllo del pH con NaOH)	Subst	0,056 kg	96	0,08	5,46
	inoc 1	0,023 kg			
	acqua	0,225 kg			
	NaOH	60ml			

Digestione anaerobica: prima prova

La prima prova di digestione anaerobica ha interessato la polpa di spremitura dei rifiuti in uscita dalla macchina spremitrice e si è svolta senza diluizione con acqua né correzione del pH. La prova è stata eseguita in condizioni termofile alla temperatura di 55°C ed ha avuto una durata di 35 giorni. La miscela caricata nel digestore è costituita unicamente da 7 kg di Slurry. Nonostante la purea abbia caratteristiche idonee alla fermentazione anaerobica, l'assenza di inoculo batterico ha compromesso lo start-up iniziale della fermentazione. Il risultato di questa prova è caratterizzato da una produzione qualitativamente discontinua e quantitativamente povera di biogas, la percentuale massima di metano riscontrata nel biogas è solo del 5,3 %, che indica una fase metanigena decisamente inibita.

I valori delle rese (Tab. 6) sono notevolmente inferiori rispetto ai dati di Letteratura. Numerosi studi riguardano la digestione anaerobica di scarti di mense o della frazione organica dei rifiuti ma i risultati sono variabili; ad es. Zhang et al. (2007) mostrano una resa in biogas di 0,435 Nm³/kg SV per scarti di mensa selezionati mentre Fernandez et al., 2008 riportano valori del potenziale in metano della frazione organica dei rifiuti pari a 0,11 Nm³/kg SV.

Tab. 6 rese biogas e metano dello Slurry puro (prova n.1)

Resa in biogas	0,051 Nm ³ /kgSV
Resa in metano	0,002 Nm ³ /kgSV

Si sottolinea tuttavia che le rese evidenziate, sempre maggiori di quelle misurate, sono relative a prove con inoculo. Come previsto, l'assenza di inoculo ha portato ad un deficit significativo della flora batterica necessaria alla degradazione del substrato ad alto contenuto organico; inoltre l'iniziale carica batterica è risultata evidentemente carente di ceppi termofili, in quanto il substrato utilizzato non si è mai trovato nelle condizioni ideali per sviluppare tale carica batterica.

Digestione anaerobica: seconda prova

Sulla base di quanto riscontrato in Letteratura e delle prove ABP condotte parallelamente, si è proceduto all'effettuazione della seconda prova di digestione che ha interessato lo Slurry diluito con acqua e inoculato con il digestato liquido

proveniente da un impianto di digestione della FORSU operante in condizioni termofile (inoculo 1). Prima dell'inizio della prova sono state determinate le caratteristiche chimico-fisiche e i valori del pH del nuovo substrato e dell'inoculo 1 (Tab. 7). Il campione di Slurry attuale risulta meno umido (circa 77% contro 87%) e quindi più ricco di solidi totali e solidi volatili rispetto a quello originariamente campionato presso lo stabilimento di compostaggio.

Tab. 7 Caratteristiche chimico-fisiche della FORSU Slurry e dell'inoculo1

	U (%)	ST (%)	SV (%)	pH
FORSU Slurry	76,82	23,18	81,86	4,53
Inoculo 1	91,51	8,49	69,96	7,21

Dopo la caratterizzazione del substrato, si è proceduto alla preparazione del miscuglio da inserire nel digestore, realizzando una miscela costituita dal 70% in massa di Slurry e dal 30% in massa di inoculo. In particolare, nel reattore è stato inserito un miscuglio di FORSU Slurry, inoculo e acqua nelle quantità riportate in tabella 8 (massa totale di 8 kg).

La miscela ottenuta presenta un contenuto di umidità pari al 95% e un contenuto di solidi volatili pari a 0,29 kg. Quest'ultimo dato è in linea con i valori delle quantità di solidi volatili misurati nelle prove sperimentali precedentemente svolte nell'impianto pilota del CRB. La prova è stata condotta in condizioni termofile, ad una temperatura di 55°C e per un tempo di ritenzione di 40 giorni.

Tab. 8 Composizione della miscela

Sostanza	Contenuto (kg)
Slurry	1,4
Inoculo 1	0,6
Acqua	6
Totale	8

Il riscaldamento del sistema è stato effettuato innalzando gradualmente la temperatura per favorire una migliore acclimatazione dei batteri inizialmente presenti. Durante il corso della prova si è monitorato l'andamento del pH della miscela. Inizialmente questo presentava un valore acido, pari a 4,82, che si ulteriormente abbassato a 3,83 dopo un giorno di fermentazione; dopo tre giorni il pH ha raggiunto il valore massimo di 5,44 e si è infine stabilizzato a 4,73-4,74 per tutta la durata della prova.

La produzione di biogas nei primi giorni di fermentazione è stata notevole; l'andamento giornaliero (fig. 5) evidenzia infatti una maggiore resa nella fase iniziale, con la presenza di un picco di produzione in corrispondenza del secondo giorno di prova. La percentuale di metano nel biogas è rimasta tuttavia esigua per tutta la durata della prova, con un valore massimo del 27,7% nel quinto giorno di prova.

La produzione cumulata di biogas (fig. 6) è pari a 0,258 Nm³/kgSV, mentre quella di metano è pari a 0,035 Nm³/kgSV. Anche in questo caso, confrontando le produzioni con i dati di Letteratura, si evince che la digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi urbani ha un alto potenziale nella produzione di metano (Edelmann et al., 2000), dell'ordine di 0,2 a 0,4 Nm³/kgSV di metano, con percentuali intorno al 40-60%. Tuttavia, nonostante la FORSU fosse biologicamente attiva, la prova di digestione anaerobica

effettuata nel digestore pilota ha mostrato una modestissima produzione di metano.

Totale	8
--------	---

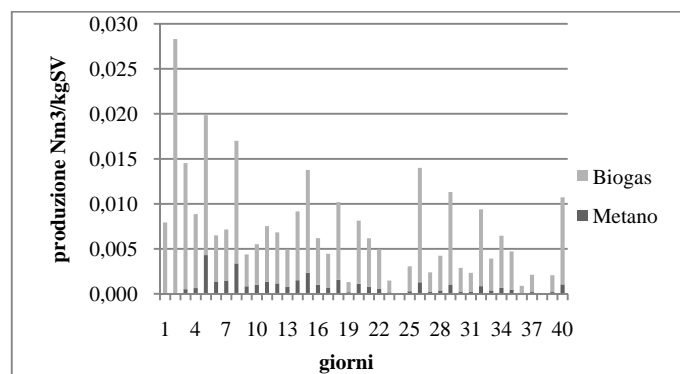


Fig. 5 Produzione giornaliera di biogas e metano (prova n. 2)

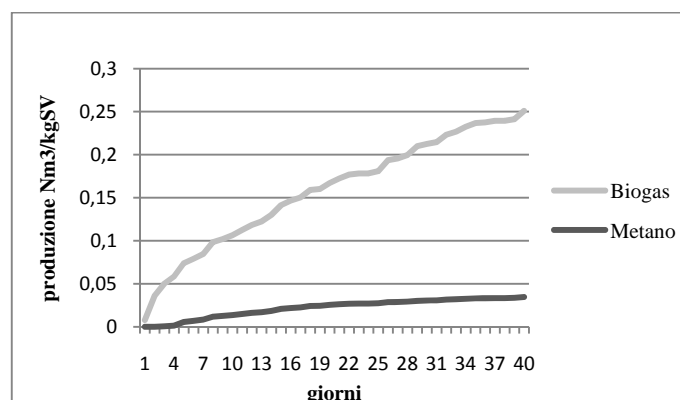


Fig. 6 Produzione cumulata di biogas e metano (Prova n.2)

Digestione anaerobica: terza prova

La terza prova di digestione anaerobica è stata effettuata con una miscela caratterizzata dal 70% in massa di Slurry e dal 30% in massa di inoculo, denominato inoculo 2 e costituito anch'esso da digestato proveniente da un impianto di digestione anaerobica della FORSU; anche in questo caso non si è proceduto alla regolazione del pH. È stata inizialmente effettuata la caratterizzazione chimico-fisica dell'inoculo 2 (Tab. 9)

Tab. 9 Caratteristiche chimico-fisiche dell'inoculo 2

	U (%)	ST (%)	SV (%)
Inoculo 2	92,81	7,18	68,83

Le caratteristiche chimico-fisiche dei due inoculi sono risultate molto simili, pertanto si sono inseriti nel digestore gli stessi quantitativi di sostanza impiegati nella prova precedente (Tab. 10).

Tab. 10 Composizione della miscela (prova n. 3)

Sostanza	Contenuto (kg)
Slurry	1,4
Inoculo 2	0,6
Acqua	6

La miscela è caratterizzata da un contenuto di solidi volatili pari a 0,29 kg e da un contenuto di umidità pari al 95,4%. Anche in tal caso la temperatura di digestione è stata impostata a 55°C. Durante il corso della prova è stato monitorato l'andamento del pH, che è risultato essere costantemente acido.

Dopo 9 giorni si è ritenuta inutile la prosecuzione del test; si è comunque effettuato un tentativo di regolazione del pH, pertanto all'undicesimo giorno di digestione è stata apportata una modifica del pH mediante 720 ml di idrossido di sodio (NaOH) 1 molare. Tale correzione ha permesso di aumentare il valore del pH da 3,30 a 6,20; tuttavia, dopo un giorno di fermentazione, il pH è diminuito nuovamente poichè evidentemente la correzione è avvenuta troppo tardi; pertanto la prova è stata interrotta al 15° giorno. Il quantitativo di biogas prodotto è stato ridotto e il contenuto di metano praticamente nullo (percentuale massima 0,02% all'ottavo giorno).

CONCLUSIONI

La campagna sperimentale ha valutato la produttività di biogas e di metano di campioni di FORSU raccolti presso un impianto di compostaggio nel centro Italia. La FORSU, derivante da raccolta differenziata, è stata pre-trattata meccanicamente attraverso una macchina spremitrice che la separa in due frazioni: una liquida (FORSU Slurry) e una residua solida, costituita prevalentemente da materiali inerti quali plastica o legno (FORSU Waste). Per la FORSU Slurry i test ABP hanno mostrato produzioni di biogas e metano rispettivamente pari a 0,398 e 0,238 Nm³/kgSV utilizzando come inoculo digestato di reflui suini e 0,080 e 0,042 utilizzando come inoculo digestato proveniente da un impianto di digestione anaerobica della FORSU. Le prove di digestione anaerobica svolte nell'impianto pilota del Centro di Ricerca sulle Biomasse hanno mostrato una produzione di biogas pari a 0,051 Nm³/kgSV senza diluizione con acqua e inoculo. Aggiungendo invece acqua e come inoculo il digestato di un impianto di digestione anaerobica della FORSU la produzione di biogas è salita a 0,258 Nm³/kgSV. La produzione di metano è stata pari a 0,035 Nm³/kgSV a causa del pH che è rimasto acido per tutta la durata della prova (4,8 – 5,5).

BIBLIOGRAFIA

- Battistoni P, Fava G, Pavan P, Musacco A, Cecchi F. Phosphate removal in anaerobic liquors by struvite crystallization without addition of chemicals. Preliminary results. *Wat Res* 1997;31(11):2925-9.
- Battistoni P, Pavan P, Cecchi F, Mata Alvarez J. Phosphate removal in real anaerobic supernatants. Modelling and performance of a fluidized bed reactor. *Wat Sci Technol* 1998;38(1), 275- 83.
- Battistoni P, Pavan P, Prisciandaro M, Cecchi F. Struvite crystallization: a feasible and reliable way to fix phosphorus in anaerobic liquors. *Wat Res* 2000;34(11):3033-41.

4. Cecchi F, Battistoni P, Pavan P. Manuale APAT sulla digestione anaerobica dei rifiuti solidi urbani; 2005.
5. CEN/TS 14774. Methods for determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in the analysis sample.
6. CEN/TS 14775. Method for the determination of ash content.
7. CEN/TS 14780. Solid Biofuels - Methods for sample preparation.
8. CEN/TS 15148. Solid Biofuels - Method for the determination of the content of volatile matter.
9. Charles W, Walker L, Cord-Ruwisch R. Effect of pre-areation and inoculums on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource Technol* 2009;100: 5103-8.
10. Chynoweth, D.P., Owen, J.M., Legrand, R., 2001. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renew. Energ.* 22, 1-8.
11. Edelman, W, Engeli, H., Gradenecker, M., 2000. Co-digestion of organic solid waste and sludge from sewage treatment. *Water Sci. Technol.* 41, 213-221.
12. Fantozzi F, Buratti C, Morlino C, Massoli S. Analysis of Biogas Yield and Quality produced by Anaerobic Digestion of Different Combination of Biomass and Inoculum. 2008.
13. Fantozzi F, Buratti C. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester. *Bioresource Technol* 2009;100:5783-9.
14. Fernandez J, Perez M, Romero LI. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technol* 2008;6075-80.
15. Forster-Carneiro T, Perez M, Romero LI, Sales D. Thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculums sources. *Bioresource Technol* 2007;98:3195-203.
16. Forster-Carneiro, Perez, Romero. Influence of total solid and inoculums contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresource Technol* 2009; 99:6994-7002.
17. Kayhanian, M., Rich, D., 1995. Pilot-scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements; *Biomass Bioenerg* 8, 433-444.
18. Liu, C., Yuan, X., Zeng, G., Li, W., Li, J., 2008. Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technol.* 99, 882-888.
19. Lopez Torres M, Espinosa Llorens M. Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes. *Waste Manage* 2008;28.
20. Montero B, Garcia-Morales, Sales, Solera. Evolution of microorganisms in thermophilic-dry anaerobic digestion. *Bioresource Technol* 2008;99:3233-43.
21. Ortega, L., Barrington, S., Guiot S.R., 2008. Thermophilic adaptation of a mesophilic anaerobic sludge for food waste treatment. *J. Environ. Manage.* 88, 517-525.
22. Sosnowski P, Wieczorek A, Ledakowicz S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Advances in Environmental Research Volume 7*; 2003.
23. UNI CEN/TS 15442. Metodi di campionamento, combustibili solidi secondari. 2007.
24. Vismara, R., Malpei, F., Centemero, M., 2008. Biogas da rifiuti solidi urbani, Flaccovio Editore, Palermo.
25. Wilkie, A., Colleran, E., 1986. Pilot-scale digestion of pig slurry supernatant using an upflow anaerobic filter, *Environ. Lett.* 7, 65-76.
26. Zhang, R., Hamed El-Mashad, M., Hartman, K., Wang, F., Guangqing, L., Choate, C., Gamble, P., 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technol.* 98, 929-935.

SUMMARY

The most promising process for OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) is anaerobic digestion. However biomethane yields and plant performances are often impaired by the presence of not volatile solids, therefore OFMSW pretreatment may be a solution to improve feedstock quality. In this study laboratory tests of mechanically pretreated OFMSW to obtain a Slurry were carried out on a laboratory scale digester and backed up with ABP tests.

Tests were carried out with different inocula concentration and pH control in thermophilic conditions. Each test was preceded and followed by analyses for biomass characterization, carried out at the CRB's Laboratory. Particular attention was focused on the daily biogas production and comparison by periodic samplings and analyses for the estimation of the percentage of methane and, therefore, of the energetic content. The results show that OFMSW Slurry must be inoculated and diluted and the pH controlled to increase the biogas production and are coherent with data available in the Literature.