



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Combinazione della digestione anaerobica con il processo di carbonizzazione idrotermica del fango

R. Ferrentino, L. Fiori, G. Andreottola



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

Report RdS/PTR2021/188

COMBINAZIONE DELLA DIGESTIONE ANAEROBICA CON IL PROCESSO DI CARBONIZZAZIONE IDROTERMICA DEL FANGO

R. Ferrentino, L. Fiori, G. Andreottola
(Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica – Università di Trento)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 5 - Efficiamento energetico degli impianti di depurazione municipale e del trattamento delle acque reflue in ambito industriale

Linea di attività: LA 5.11 "Screening di tecnologie di riduzione dei fanghi con impatto sostenibile sul bilancio energetico dell'impianto di depurazione integrato"

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Davide Mattioli, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie per la riduzione dei fanghi di depurazione con impatto sostenibile sul bilancio energetico complessivo dell'impianto di depurazione integrato*"

Responsabile scientifico ENEA: Michela Langone

Responsabile scientifico: prof. Gianni Andreottola

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 MATERIALI E METODI.....	5
2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE BIOMASSE	5
2.2 TEST DI CARBONIZZAZIONE IDROTERMICA	7
2.3 TEST DI DIGESTIONE ANAEROBICA	9
2.4 TEST DI DISIDRATABILITÀ	11
2.5 ANALISI CHIMICHE	11
3 RISULTATI	11
3.1 TEST HTC: RESA SOLIDA, LIQUIDA E GASSOSA.....	12
3.2 CARATTERIZZAZIONE DEI PRODOTTI DEL PROCESSO HTC.....	12
3.3 TEST BMP	13
3.4 TEST DI DISIDRATABILITÀ	16
3.5 SCENARI APPLICATIVI.....	17
4 DISSEMINAZIONE	20
5 CONCLUSIONI.....	21
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	22
CURRICULUM VITAE	24

Sommario

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecnologie per la riduzione, il trattamento e il riutilizzo dei fanghi derivanti da impianti di depurazione di reflui municipali. Tra tutte, il processo di digestione anaerobica è, ad oggi, la tecnologia maggiormente utilizzata. Sebbene tale processo sia ormai maturo dal punto di vista tecnico e gestionale e consenta la conversione del fango biologico in biogas, esso necessita tuttavia lunghi tempi di ritenzione e, di conseguenza, grandi volumi di trattamento. Il fattore limitante della digestione anaerobica è il processo di idrolisi, ovvero la conversione di composti organici complessi in composti semplici più facilmente biodegradabili da parte dei batteri anaerobi. Il digestato, inoltre, possiede un elevato contenuto di composti organici che potrebbero essere convertiti in energia. La combinazione della digestione anaerobica (AD) con il trattamento di carbonizzazione idrotermica (HTC) consentirebbe l'accelerazione del processo di idrolisi e la valorizzazione del digestato. In particolare, il processo combinato HTC+AD favorirebbe la riduzione della produzione di fango, l'incremento della disidratabilità e l'incremento di produzione di biogas/biometano attraverso il ricircolo in AD di sottoprodotti della reazione HTC: HTC liquor e lo slurry. Inoltre, l'utilizzo di parte della frazione organica dei rifiuti solidi (FORSU) in aggiunta al digestato potrebbe ulteriormente incrementare la produzione di biogas favorendo l'autosostentamento energetico del processo combinato HTC+AD e un effetto positivo sul bilancio energetico complessivo dell'impianto di depurazione.

I risultati dello studio sperimentale condotto hanno evidenziato una produzione di biogas crescente al crescere della percentuale di FORSU aggiunta al digestato, sino a raggiungere 160 ± 10 mL biogas/g COD e 240 ± 15 mL biogas/g COD quando, rispettivamente, HTC liquor e slurry, derivanti da trattamento HTC di un feedstock composto per metà da digestato e metà da FORSU, vengono riciccolati in AD.

1 Introduzione

Il trattamento per la riduzione della produzione di fanghi più comunemente utilizzato negli impianti di depurazione di acque reflue municipali è, ad oggi, la digestione anaerobica. Nonostante, la digestione anaerobica sia un processo ormai consolidato sia dal punto di vista tecnico che economico, richiede, tuttavia, lunghi tempi di residenza per convertire il fango biologico in energia. Il fattore limitante del processo di digestione anaerobica è l'idrolisi, ovvero la conversione di molecole organiche complesse (quali ad esempio carboidrati, proteine e lipidi) in composti più semplici (come monosaccaridi, aminoacidi e acidi grassi volatili) che possono essere facilmente metabolizzati dai batteri all'interno del comparto di digestione anaerobica.

Vista la crescente produzione dei fanghi di depurazione, il mondo scientifico è da diversi anni alla ricerca di nuove soluzioni tecnologiche che consentano di ottenere una maggiore riduzione dei fanghi in tempi ridotti.

Tra tutte le tecnologie investigate, molte soluzioni non sono percorribili per gli elevati consumi energetici. Di fatti, la soluzione ottimale sarebbe quella di implementare una tecnologia, o una combinazione di differenti tecnologie, che consenta di ridurre la produzione di fanghi e, al contempo, di contenere i consumi energetici dell'impianto oppure di valorizzare il più possibile il recupero di energia e di materia.

La realizzazione di un trattamento combinato di carbonizzazione idrotermica e di digestione anaerobica (HTC+AD) mira proprio a raggiungere quest'obiettivo. Diversi studi di letteratura hanno dimostrato che il processo HTC rappresenta una tecnologia promettente per una riduzione efficiente e sostenibile della produzione dei fanghi di depurazione e per la loro valorizzazione. Il processo combinato AD+HTC consente di ridurre la produzione dei fanghi di depurazione, migliorare la disidratabilità del fango e incrementare in maniera significativa la produzione di biogas, riciclando al comparto di digestione anaerobica parte o tutto l'HTC liquor o l'idrochar. In particolare, il processo di carbonizzazione idrotermica (HTC), realizzato come post-trattamento della digestione anaerobica (AD) consente di accelerare il processo di idrolisi che avviene all'interno dell'unità di AD e di valorizzare il digestato che, possedendo un elevato contenuto di sostanza organica, può essere utilizzato per incrementare la produzione di energia mediante la conversione termochimica. In aggiunta al digestato, il processo HTC è stato utilizzato anche per la valorizzazione della frazione organica dei rifiuti solidi urbana (FORSU), composta principalmente da polisaccaridi e proteine che rappresentano una risorsa preziosa per incrementare la produzione di biogas in AD. Ad oggi la FORSU viene raccolta ed inviata ad impianti di stabilizzazione per la produzione di compost. Tuttavia, in alcuni casi, i quantitativi di FORSU prodotti risultano maggiori della capacità di trattamento degli impianti. Di conseguenza, parte della FORSU deve essere inviata ad altri impianti di trattamento, dove presenti. In questi casi, potrebbe essere conveniente valutare soluzioni alternative che consentano comunque la valorizzazione della FORSU non in termini di recupero di materia ma come recupero di energia.

Il presente studio riporta l'applicazione del processo combinato AD+HTC dove tre differenti percentuali di FORSU sono state aggiunte al digestato da fango biologico per formare tre miscele di feedstock in ingresso al reattore HTC. Obiettivo dello studio è verificare l'incremento della produzione di biogas e il conseguente recupero energetico derivante dalla combinazione di digestato e FORSU in ingresso al processo HTC.

In questo modo, nonostante l'HTC sia un processo che richiede una fonte di energia in input, il recupero di energia derivante dal ricircolo in AD dei prodotti della reazione HTC consentirebbe un autosostentamento energetico del processo combinato AD+HTC contribuendo, quindi, ad avere un impatto energetico positivo sull'intera gestione dell'impianto di depurazione.

2 Materiali e metodi

2.1 Caratterizzazione delle biomasse

L'attività sperimentale del presente progetto di ricerca è stata condotta utilizzando due matrici differenti:

- feedstock 1: digestato da fanghi di depurazione;
- feedstock 2: miscela composta da digestato da fanghi di depurazione e dalla frazione organica dei rifiuti solidi (FORSU)

Il feedstock 1, ovvero il digestato, è stato prelevato presso l’impianto di depurazione di reflui municipali di Trento Nord (TN, Italia) (Figura 1). In particolare, l’impianto di depurazione prevede che il digestore anaerobico sia alimentato da due flussi differenti: 1) da fanghi misti (primari e secondari da impianto MBR) derivanti da post ispessimento statico e 2) da fanghi secondari, derivanti dal processo convenzionale a fanghi attivi (CAS), post ispessimento dinamico. Il feedstock 1 è stato prelevato in due punti della linea di trattamento: in corrispondenza della condotta di uscita dal reattore anaerobico (n.4 in Figura 1), avente una concentrazione di solidi totali (ST) pari a circa 3%, e di quella di uscita dell’ispessitore dinamico (condotta n. 5), dove la concentrazione di ST è pari a circa 25%. I due campionamenti sono stati eseguiti al fine di ottenere un digestato ad una concentrazione di solidi totali pari a 10% che, come emerso da diversi studi di letteratura, rappresenta la concentrazione ottimale per le prove di carbonizzazione idrotermica [1].

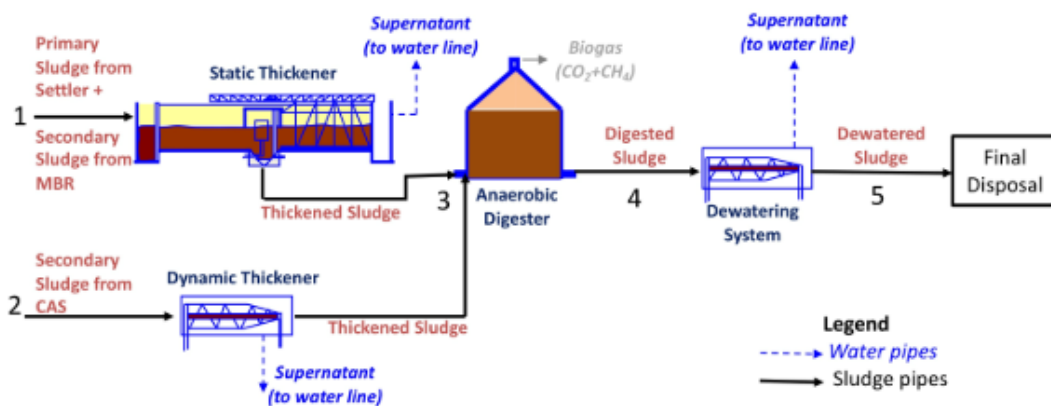


Figura 1. Schema dell’impianto di depurazione di Trento Nord (Trento) [2]

La seconda matrice, ovvero la FORSU, che insieme al digestato costituisce la miscela utilizzata come feedstock 2 dell’attività di ricerca, è stata prelevata presso l’impianto di trattamento FORSU di Lana (Bolzano, Italia) (Figura 2) che tratta circa 11.500 tonnellate di rifiuti organici a fronte di un totale di rifiuti organici raccolti nel comule pari a circa 16.600 tonnellate. Dai dati emerge dunque che la produzione di rifiuto organico è maggiore della capacità di trattamento dell’impianto di Lana; per cui circa 5,100 tonnellate di rifiuto devono essere inviate ad altri impianti di trattamento.

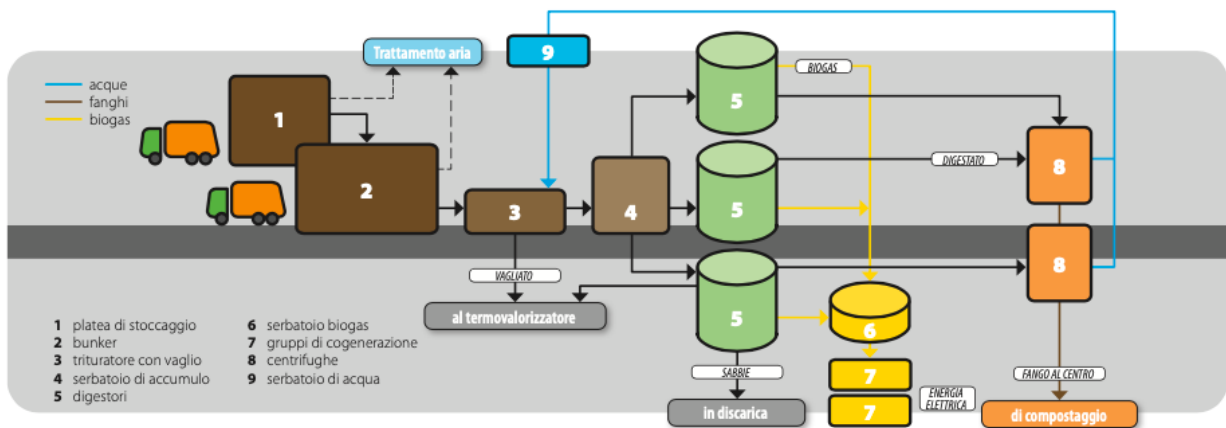


Figura 2. Schema dell’impianto di trattamento della FORSU di Lana (Bolzano) [3]

La FORSU utilizzata per la presente sperimentazione è stata prelevata dalla condotta di uscita del serbatoio di accumulo n.4 riportato in Figura 2 e rappresenta lo stream influente al trattamento di digestione anaerobica.

Dopo il prelievo presso i relativi impianti di trattamento, il digestato e la FORSU sono stati opportunamente caratterizzati mediante l'esecuzione di analisi chimiche. Le concentrazioni dei principali inquinanti di entrambe le matrici sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche chimiche del digestato e della FORSU

Parametro	DIG	FORSU
ST [%]	10.2 ± 0.3	16.4 ± 0.6
TKN [g TKN/L]	7.4 ± 2.5	5.5 ± 2.2
NH ₄ -N [mg NH ₄ -N/L]	2.0 ± 0.5	0.7 ± 0.3
PO ₄ -P [mg PO ₄ -P/L]	700 ± 10	120 ± 7
TP [g PT/L]	3.5 ± 0.3	0.8 ± 0.2
sCOD [g sCOD/L]	13 ± 2	78 ± 9
COD [g COD/L]	116 ± 15	227 ± 12

2.2 Test di carbonizzazione idrotermica

Il processo HTC è un processo termochimico per la conversione di biomasse residuali a condizioni di temperatura comprese tra 180 – 250 °C e pressioni di 10 – 50 bar così da operare in un ambiente di reazione caratterizzato da acqua allo stato liquido. L'HTC è un processo esotermico, per cui, una volta raggiunta la temperatura a cui il processo si attiva, la reazione viene poi sostenuta dall'energia liberata durante il processo stesso. Durante la reazione HTC, acqua, anidride carbonica e altri composti vengono scissi dalla biomassa generando un solido carbonioso, chiamato idrochar, con caratteristiche molto simili alla lignite, e un residuo liquido, chiamato HTC liquor, ricco di nutrienti. Il vantaggio di tale tecnologia, rispetto ad altre, deriva dal fatto che il processo avviene in acqua liquida, per cui la carbonizzazione idrotermica è idonea a trattare anche biomasse con un alto livello di umidità, senza che esse debbano essere preventivamente disidratate e/o essiccate.

I test di carbonizzazione idrotermica di digestato e della miscela di digestato e FORSU sono stati eseguiti utilizzando il sistema sperimentale HTC, a scala di laboratorio, progettato presso il Dipartimento di Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento e costruito internamente presso l'officina meccanica della stessa Università secondo gli standard della normativa Europea UNI EN 13445-3:2014.

Il sistema è costituito da due parti principali: il reattore HTC e il sistema di misurazione del gas (Figura 3).



Figura 3. Sistema sperimentale di carbonizzazione idrotermica

Il reattore HTC allestito per le prove della presente linea di ricerca è costituito da un recipiente batch in acciaio inossidabile AISI 316 del volume interno di 2 L, realizzato per poter resistere a temperature fino a 300 °C e pressioni fino a 140 bar. Una guarnizione, generalmente in rame o teflon, consente la perfetta tenuta tra il reattore e la flangia superiore. Quest'ultima è collegata a due tubi che consentono l'insufflazione di gas, generalmente azoto, mediante le valvole di ingresso V1 e V2 e l'uscita dell'aria dal corpo del reattore attraverso le valvole V3 e V4. Sulla tubazione in ingresso al reattore è posizionato un disco di rottura, a monte di un manometro, in modo da proteggere il reattore HTC da pressioni maggiori rispetto alla pressione massima di progetto.

La temperatura all'interno del reattore HTC è misurata da quattro termocoppie (T1, T2, T3, T4) che, passando attraverso la flangia superiore, sono posizionate a diverse altezze all'interno del reattore. In particolare, le termocoppie T1 e T2 sono poste nella parte superiore del reattore che, generalmente, non viene occupata dalla biomassa per cui consentono la misura della temperatura della fase gassosa. La termocoppia T3, invece, è posta in prossimità del centro del reattore HTC mentre la T4 è a pochi centimetri dal fondo del reattore. Entrambe le termocoppie, T3 e T4, consentono la misura della temperatura della biomassa posta all'interno del reattore. Tutte le termocoppie sono collegate al relativo trasmettitore di temperatura (TT) che, insieme al trasmettitore di pressione del reattore (PT), inviano le misure rilevate ad un software di acquisizione dati realizzato in LabView. Attraverso l'interfaccia grafica del software è possibile controllare la temperatura di reazione, le misure di temperature delle quattro termocoppie, le misure di pressione e il tempo di reazione. Il reattore HTC è riscaldato da quattro resistenze elettriche, ciascuna della potenza di 1 kW, inserite in una camicia di alluminio che consente un efficiente trasferimento del calore all'interno del reattore attraverso le sue pareti cilindriche. La camicia esterna è dotata di uno strato interno costituito da materiale isolante per evitare la dispersione del calore.

Al termine del tempo di reazione impostato, l'alimentazione delle resistenze elettriche viene automaticamente interrotta. A questo punto è possibile aprire la camicia esterna riscaldante per consentire il raffreddamento del reattore HTC che avviene mediante il posizionamento di dischi di metallo refrigeranti (-24 °C) sul fondo e sulla flangia superiore e flussando aria compressa sulle pareti esterne del reattore.

Quando il reattore raggiunge la temperatura ambiente, il gas prodotto viene inviato al sistema di misurazione del volume del gas aprendo le valvole V3 e V4. Il sistema di misurazione del volume del gas è costituito da un

cilindro graduato in PVC con la parte inferiore immersa nell'acqua. Prima della misurazione, una pompa a vuoto solleva il menisco dell'acqua fino allo zero della scala graduata. Quando il gas prodotto entra nel cilindro graduato, sposta un certo volume d'acqua permettendo la determinazione del proprio volume. Maggiori dettagli relativi al sistema sperimentale HTC sono riportati in Merzari et al. [4].

Al termine di ciascun test è stato possibile determinare la resa solida, liquida e gassosa. Assumendo che il gas prodotto dalla reazione HTC sia costituito principalmente da CO₂, così come evidenziato da studi di letteratura che mostrano un contenuto di CO₂ maggiore del 90 vol% [5], la resa gassosa è stata determinata secondo l'Equazione 1, considerando la legge dei gas ideali a temperatura e pressione standard:

$$Y_{gas} = \frac{W_{CO_2}}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

dove W_{CO₂} corrisponde al peso di CO₂ mentre W₀ è il peso secco della biomassa prima del trattamento HTC. L'idrochar e il liquor prodotti dopo il trattamento HTC sono stati separati mediante un filtro qualitativo in cellulosa. La resa solida dell'idrochar è stata calcolata secondo l'Equazione 2, come rapporto tra la massa secca di idrochar prodotta dopo reazione HTC (W_i) e la massa secca della biomassa prima del trattamento HTC (W₀).

$$Y_{solida} = \frac{W_i}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

La resa liquida, invece, è stata calcolata come il complemento a 100% della resa gassosa e solida.

I test HTC della presente attività di ricerca sono stati condotti alla temperatura di 190°C e per un tempo di reazione pari ad 1 ora. Ogni test HTC è stato eseguito in duplicato.

Si riportano di seguito i test realizzati variando le biomasse alimentate al reattore HTC e i relativi quantitativi:

- Test #1: DIG → 1200 g di digestato con una concentrazione di 10.2 ± 0.3% TS
- Test #2: DIG+10%FORSU → 1080 g di digestato e 120 g FORSU per una concentrazione di solidi totali pari a 10.8 ± 0.2% TS
- Test #3: DIG+20%FORSU → 960 g di digestato e 240 g FORSU per una concentrazione di solidi totali pari a 11.2 ± 0.1% TS
- Test #4: DIG+50%FORSU → 600 g di digestato e 600 g FORSU per una concentrazione di solidi totali pari a 11.8 ± 0.3% TS

Nella Tabella 2 si riportano le caratteristiche delle miscele utilizzate per i test HTC.

Tabella 2. Caratteristiche chimiche dei feedstock per i test HTC

Parametro	DIG	DIG+10%FORSU	DIG+20%FORSU	DIG+50%FORSU
ST [%]	10.2 ± 0.3	10.8 ± 0.5	11.2 ± 0.1	11.8 ± 0.3
TKN [g TKN/L]	7.4 ± 2.5	6.8 ± 2.5	6.6 ± 0.5	6.4 ± 1.0
NH ₄ -N [mg NH ₄ -N/L]	2.0 ± 0.5	1.6 ± 0.5	1.5 ± 0.3	1.3 ± 0.4
TP [mg PT/L]	3.5 ± 0.3	2.7 ± 0.4	2.4 ± 0.2	2.1 ± 0.4
sCOD [g sCOD/L]	13 ± 2	27 ± 5	32 ± 3	40 ± 5
COD [g COD/L]	100 ± 15	120 ± 12	134 ± 10	175 ± 17

2.3 Test di digestione anaerobica

Il test di digestione anaerobica, definito anche come test del potenziale di produzione di biometano (BMP), consente di determinare la biodegradabilità di una matrice solida o liquida e la sua potenziale produzione di metano in condizioni anaerobiche mesofile. La matrice solida o liquida che si vuole testare viene miscelata con un inoculo, generalmente un fango prelevato da un digestore anaerobico che abbia caratteristiche

qualitative quanto più simili possibili a quelle della matrice da investigare in modo che al suo interno sia presente una comunità microbica già acclimatata per la degradazione della matrice in esame.

In questo studio, l'inoculo è stato prelevato dal digestore anaerobico dell'impianto di depurazione di reflui municipali di Trento Nord. In Tabella 3 sono riportate le principali caratteristiche fisico-chimiche dell'inoculo.

Tabella 3. Caratteristiche chimiche dell'inoculo dei test BMP

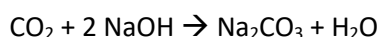
Parametro	INOCULO
ST [%]	2.8 ± 0.1
VS [%tq]	77 ± 0.3
TKN [g TKN/L]	2.5 ± 0.1
NH ₄ -N [mg NH ₄ -N/L]	0.5 ± 0.1
PO ₄ -P [mg PO ₄ -P/L]	210 ± 7
TP [mg PT/L]	740 ± 40
sCOD [g sCOD/L]	20 ± 1
COD [g COD/L]	35 ± 2
pH	7.1

L'inoculo è stato incubato per 40 giorni alla temperatura di 35 °C in modo che tutta la massa di COD biodegradabile presente all'interno dell'inoculo al momento del suo campionamento potesse essere consumata prima dell'inizio del test BMP, consentendo, quindi, al fango di raggiungere la condizione di endogena.

I test BMP sono stati condotti in bottiglie in vetro del volume di 135 mL con chiusura con tappo a vite in silicone, che ne consente la deformazione derivante dalla produzione di gas. In ogni test, il rapporto tra g SV_{substrato} e i g COD_{aggiunto} è stato scelto pari a 0.5 in modo da evitare l'accumulo di acidi grassi volatili o, di contro impedire l'induzione enzimatica della biodegradazione [6]. Un'aliquota di campione di fango o di miscela fango e FORSU post HTC è stata aggiunta ad un'aliquota di inoculo sino a raggiungere un volume massimo di miscela (campione da testare + inoculo) pari a 90 mL, lasciando, quindi, 45 mL di spazio di testa libero all'interno di ciascuna bottiglia in vetro. All'interno dello spazio di testa di ciascuna bottiglia sono stati posizionati due aghi, uno di ingresso e uno di uscita, ed è stato insufflato azoto per un tempo pari a circa 2 minuti in modo da favorire la fuoriuscita dell'ossigeno presente all'interno della bottiglia. Ciascun campione è stato analizzato in triplicato. Un test BMP è stato eseguito con solo inoculo in modo da poter quantificare la sua eventuale produzione residua ed eliminare il suo contributo dai test dove è presente sia l'inoculo che il substrato da testare. Inoltre, tre test BMP sono stati eseguiti con il fango non trattato che, ad oggi, viene alimentato al comparto di digestione anaerobica dell'impianto di depurazione di Trento Nord, in modo da poter valutare il miglioramento relativo al trattamento HTC rispetto alla configurazione attuale.

La durata dei test BMP è stata fissata pari a 28 giorni; le bottiglie sono state posizionate all'interno di un bagno termostatico a temperatura costante pari a 35 °C. Il gas prodotto all'interno di ciascuna bottiglia viene misurato ogni giorno durante i primi 15 giorni di test, quando la produzione di biogas è maggiore, e ogni 3 giorni dopo, quando la produzione di biogas va lentamente diminuendo.

La misura del biogas prodotto è stata eseguita mediante l'utilizzo di un manometro. Successivamente, per determinare la quantità di biometano prodotto, il gas presente all'interno dello spazio di testa di ciascuna bottiglia viene lasciato fluire all'interno di un cilindro graduato contenente una soluzione di NaOH (2M). La soluzione a pH elevato consente la precipitazione della CO₂ presente nel gas sottoforma di carbonato di sodio secondo la reazione:



Di conseguenza, il volume di gas misurato, valutato attraverso la variazione del livello della soluzione di NaOH all'interno del cilindro graduato, è dovuto al solo contributo di CH₄. I volumi di biogas e biometano misurati

sono stati convertiti in volumi in condizioni standard ($P_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$) utilizzando la legge dei gas ideali per rendere i risultati dei vari test BMP confrontabili tra loro.

Al termine del test BMP è possibile analizzare i dati e determinare la produzione specifica di biogas (SBP), espressa come $\text{mL}_{\text{biogas}} / \text{g COD}_{\text{aggiunto}}$, e la produzione specifica di biometano (SMP), espressa come $\text{mL}_{\text{CH}_4} / \text{g COD}_{\text{aggiunto}}$, secondo le Equazioni 3 e 4:

$$SBP = \frac{V_{\text{biogas}}}{\text{COD}_{\text{aggiunto}}} \quad (3)$$

$$SMP = \frac{V_{\text{CH}_4}}{\text{COD}_{\text{aggiunto}}} \quad (4)$$

Dove V_{biogas} e V_{CH_4} rappresentano, rispettivamente, il volume di biogas e il volume di biometano prodotti dalle biomasse post trattamento con HTC già depurate dell'eventuale contributo derivante dall'inoculo; $\text{COD}_{\text{aggiunto}}$ è la massa di COD presente all'interno del campione da testare e aggiunta al test BMP.

2.4 Test di disidratabilità

Oltre all'incremento di produzione di biogas, un ulteriore obiettivo atteso dalla presente attività di ricerca è valutare il miglioramento della disidratabilità del fango digestato post trattamento HTC e della miscela di fango e FORSU. Per valutare la disidratabilità delle matrici testate sono state eseguite misure del tempo di suzione capillare (Capillary suction time, CST) mediante l'utilizzo dello strumento CST-304B (Triton Electronics Ltd). La misura di CST rappresenta un metodo di analisi semplice della disidratabilità del fango, ovvero del rilascio di acqua da matrici solide. Quando una sospensione di solidi viene trattenuta in una colonna, si formerà alla base uno strato o un letto di solidi ispessiti. Un sottile strato poroso, come una carta da filtro, esposto alla base di questo letto consentirà all'acqua "libera", ovvero non legata chimicamente ai solidi, di defluire attraverso il letto di solidi. Quest'acqua viaggia radialmente dalla base della colonna a causa della pressione di aspirazione capillare dello strato poroso. La velocità di movimento attraverso lo strato poroso dipende principalmente dalla permeabilità del letto di solidi ispessiti e dalla capacità di trattenere l'acqua dei solidi sia essi depositati che in sospensione. Laddove i solidi depositati formano un letto denso e compattato con piccoli interstizi, l'acqua passerà attraverso lentamente (cioè, valore di CST elevato). Laddove i solidi formano grandi aggregati o sono meno compattati con interstizi più grandi, l'acqua passerà attraverso il letto a una velocità maggiore (cioè, CST basso).

Lo strumento utilizzato nella presente sperimentazione è costituito da un'unità di filtrazione e un timer.

L'unità di filtrazione comprende due blocchi in Perspex tra i quali è posizionata la carta da filtro di dimensioni standard (Whatman n. 17). La lastra superiore è dotata di un foro in cui viene posizionato un imbuto in acciaio per l'alloggiamento del campione da analizzare. Il CST viene misurato registrando il tempo in secondi in cui l'acqua drena attraverso il fango versato nell'imbuto centrale e percorre una distanza prestabilita. Ciò è ottenuto da due elettrodi che sono incorporati nella piastra superiore in Perspex a una distanza standard dall'imbuto che apre e chiude un circuito mentre l'acqua nel filtro attraversa gli elettrodi.

Le analisi di disidratabilità sono state eseguite su tutte le miscele pre e post-trattamento HTC in modo da poter determinare l'efficienza del trattamento HTC. Ciascun test è stato eseguito in triplicato ed i risultati sono stati riportati come valore medio \pm la deviazione standard.

2.5 Analisi chimiche

Il fango digestato, la FORSU e le tre differenti miscele di fango e FORSU utilizzate come feedstock dei test HTC sono stati caratterizzati mediante analisi chimiche eseguite in triplicato. In particolare, le concentrazioni di solidi volatili (SV), solidi totali (ST), la domanda chimica di ossigeno totale (COD), l'azoto ammoniacale ($\text{NH}_4\text{-N}$), l'azoto Kjeldahl totale (TKN) e l'azoto organico totale (N_{org}) sono stati quantificati secondo i metodi standard [7]. Il COD solubile (sCOD) e l'azoto ammoniacale sono stati misurati dopo la filtrazione del campione su un filtro carta da $0,45 \mu\text{m}$.

3 Risultati

3.1 Test HTC: resa solida, liquida e gassosa

A conclusione di ciascun test HTC, dopo la fase di raffreddamento del reattore, è stata valutata la resa solida, liquida e gassosa della reazione HTC mediante le Equazioni (1) e (2).

La Figura 4 riporta le rese di idrochar, di liquor e la resa in gas per le diverse matrici analizzate.

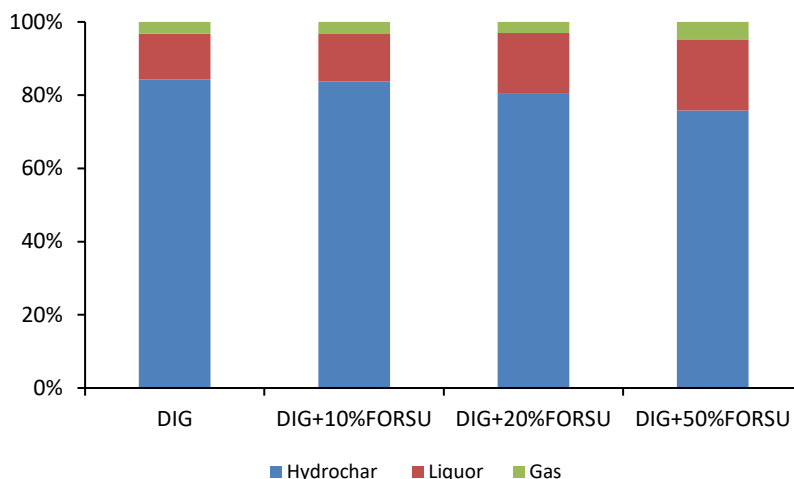


Figura 4. Resa solida, liquida e gassosa post HTC

I risultati mostrano che la resa solida del digestato post trattamento HTC a 190°C per 1 h è pari a 84±1% ed è uguale a quella ottenuta aggiungendo al digestato una percentuale pari al 10% di FORSU (rispetto alla massa complessiva di feedstock pari a 1200 g). Aumentando, invece la percentuale di FORSU rispetto alla massa di feedstock totale, la resa solida diminuisce raggiungendo un valore pari a 80±1% e 76±1%, rispettivamente, per percentuali di FORSU pari al 20% e al 50%.

La resa gassosa, invece, è pari al 3% per i campioni DIG, DIG+10%FORSU e DIG+20%FORSU ed aumenta in maniera lieve e fino al 5% per il campione DIG+50%FORSU. Quest'ultimo campione, inoltre, evidenzia anche la resa liquida maggiore, 19±1%, seguito dal campione DIG+20%FORSU che ha una resa pari al 17±1%. I campioni DIG e DIG+10%FORSU mostrano le rese liquide minori e pari, rispettivamente, a 12±2% e 13±1%. In particolare, i dati sperimentali mostrano che quando il feedstock del processo HTC è costituito per metà da FORSU e per metà da digestato allora è possibile ottenere una resa solida bassa che, di contro, evidenzia una maggiore riduzione del volume da smaltire.

In generale, la presente attività sperimentale conferma che uno dei principali effetti del processo HTC è legato alla riduzione del volume delle biomasse utilizzate come feedstock. Questo effetto è di particolare interesse per la gestione dei rifiuti in quanto contribuisce a risolvere i problemi economici e ambientali connessi allo smaltimento dei fanghi. La riduzione del volume dei fanghi viene valutata attraverso la valutazione della resa solida dopo il trattamento con HTC. Come riportato da diversi studi in letteratura, all'aumentare della severità del processo, ovvero all'aumentare della temperatura e del tempo di permanenza, la resa in solido in generale diminuisce con conseguente notevole riduzione del volume dei fanghi.

Liu et al. [8], in una recente review, ha riportato che gli studi HTC hanno mostrato una resa solida media di 60.2 (22.6 10% percentile, 84.9 90% percentile), evidenziando che esiste una variazione considerevole dovuta alla severità della reazione HTC. I risultati del presente studio risultano in linea con le rese solide riportate in letteratura.

3.2 Caratterizzazione dei prodotti del processo HTC

I prodotti della reazione HTC, l'HTC liquor e lo slurry (ovvero l'insieme di HTC liquor e hydrochar), sono stati caratterizzati mediante analisi chimiche. I risultati sono mostrati in Tabella 4.

Tabella 4. Caratteristiche dei campioni post trattamento HTC

Parametro	L_DIG	L_DIG+ 10%FORSU	L_DIG+ 20%FORSU	L_DIG+ 50%FORSU	S_DIG	S_DIG+ 10%FORSU	S_DIG+ 20%FORSU	S_DIG+ 50%FORSU
TCOD [g TCOD/L]	41 ± 3	50 ± 7	72 ± 5	105 ± 3	96 ± 10	115 ± 7	125 ± 15	170 ± 10
TKN [g TKN/L]	5.8 ± 0.1	6.1 ± 0.2	6.0 ± 0.5	6.0 ± 0.1	4.8 ± 0.3	5.7 ± 0.2	5.8 ± 0.2	6.2 ± 0.2
NH ₄ -N [g NH ₄ -N/L]	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.3	0.9 ± 0.3	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.3	0.9 ± 0.3
TP [g TP/L]	0.15 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.25 ± 0.01	3.4 ± 0.3	2.4 ± 0.2	2.2 ± 0.1	2.3 ± 0.3
PO ₄ -P [g PO ₄ -P/L]	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.22 ± 0.01
TS [%]	3.1 ± 0.1	3.4 ± 0.5	3.5 ± 0.2	4.1 ± 0.1	8.6 ± 0.1	9.0 ± 0.1	9.0 ± 0.1	8.9 ± 0.2
VS [% d.b.]	78.5 ± 0.5	87.1 ± 0.1	86.7 ± 0.2	88.7 ± 0.5	70.1 ± 1.9	74.3 ± 1.2	77.6 ± 1.8	86.0 ± 1.1

Le concentrazioni di TCOD riferite ai liquor e agli slurry confermano che il trattamento HTC tende a velocizzare il processo di idrolisi della sostanza organica secondo cui composti organici a basso peso molecolare vengono trasferiti dalla biomassa alla fase liquida. Di conseguenza, come è intuibile, la concentrazione di TCOD degli slurry rimane invariata rispetto a quella della biomassa iniziale. Al contrario, invece, la concentrazione di TCOD degli HTC liquor, che corrisponde alla frazione solubile del COD dello slurry, aumenta rispetto a quella pre-trattamento HTC. In particolare, il rapporto tra TCOD_{HTCL} e TCOD_{SLURRY} è pari a 13%, 22%, 24% e 23%, rispettivamente, per i campioni DIG, DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU pre-trattamento HTC. Il rapporto TCOD_{HTCL} e TCOD_{SLURRY}, post-trattamento HTC, aumenta fino a raggiungere il 43%, per i campioni DIG e DIG+10%FORSU, il 48% DIG+20%FORSU e 62% per DIG+50%FORSU evidenziando un aumento della solubilizzazione del TCOD all'aumentare della frazione di FORSU aggiunta al feedstock iniziale.

Considerando invece i composti dell'azoto, si può notare come la concentrazione di NH₄-N e TKN, dopo trattamento HTC, risultano lievemente inferiori rispetto alla concentrazione pre-trattamento HTC in tutti i feedstock testati, che potrebbe derivare dalla perdita di composti dell'ammoniaca sotto forma gassosa.

Il fosforo totale post-trattamento HTC, invece, così come riportato in numerosi studi di letteratura, tende ad accumularsi nella fase solida ovvero nell'idrochar per cui la concentrazione di TP nell'HTC liquor è molto bassa, e assimilabile alla concentrazione di PO₄-P, mentre tutto il TP del campione iniziale (pre-HTC) viene ritrovato all'interno dello slurry.

Infine, dall'analisi dei dati dei TS viene confermato che il processo HTC consente anche di ottenere una riduzione della produzione di fango in questo caso variabile dal 16% (per i campioni DIG e DIG+10%FORSU) sino al 24% (per il campione DIG+50%FORSU).

3.3 Test BMP

I test BMP sono stati eseguiti su HTC liquor e sugli slurry, derivanti dal processo HTC di digestato e FORSU, quest'ultima aggiunta con differenti percentuali rispetto alla massa totale di feedstock, per determinare la produzione specifica di biogas e di biometano. All'inizio dei test BMP, ciascun campione di HTC liquor e slurry, è stato miscelato con l'inoculo ed è stato misurato il pH della miscela iniziale del test (substrato+inoculo) che è risultato per tutti i test BMP ottimale, compreso tra 7 e 7.5, per l'instaurarsi dei processi di digestione anaerobica. I test BMP sono stati condotti in condizioni mesofile per una durata pari a 31 giorni finché non è stato osservato nessun ulteriore incremento di produzione di biogas.

Gli andamenti della produzione specifica di biogas degli HTC liquor, espresse come mL biogas per grammi di SV aggiunti, sono riportati in Figura 5 e sono confrontabili con il trend della produzione specifica di biogas del fango di supero in ingresso alla digestione anaerobica di Trento Nord.

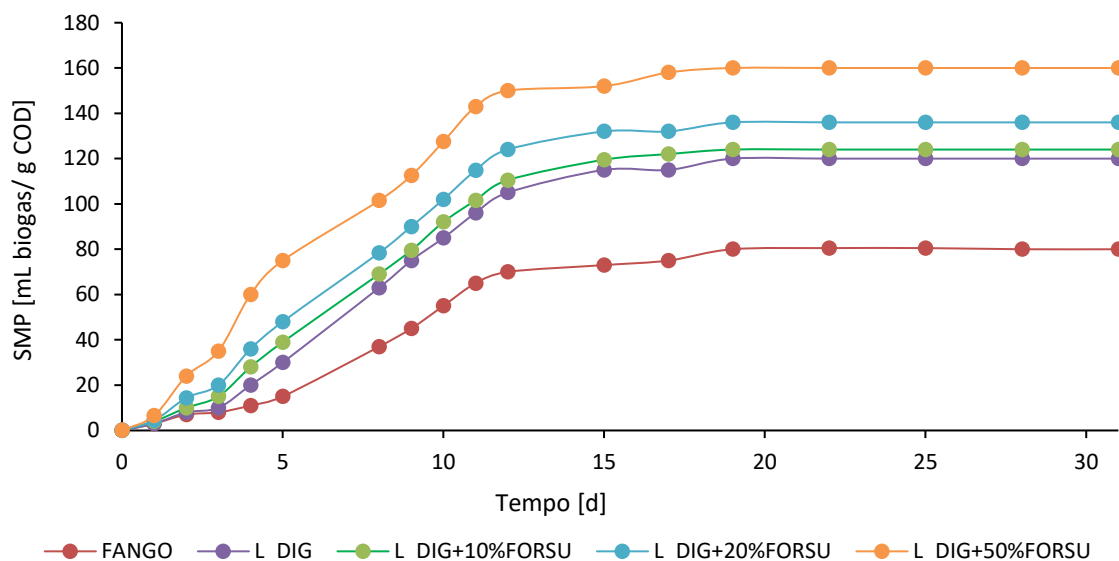


Figura 5. Andamento delle produzioni specifiche di biogas degli HTC liquor

Le produzioni specifiche di biogas derivanti dalla digestione anaerobica di HTC liquor risultano pari a 120 ± 12 mL, 124 ± 10 mL, 136 ± 15 mL e 160 ± 10 mL biogas/g COD, rispettivamente per i campioni DIG, DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU. La produzione specifica di biogas del solo fango biologico risulta pari a 80 ± 8 mL biogas/ g COD.

I risultati evidenziano che tutti gli HTC liquor mostrano un incremento nella produzione di biogas rispetto a quella del fango biologico. L'incremento di biogas, inoltre, risulta essere tanto più elevato quanto maggiore è la percentuale di FORSU aggiunta al volume complessivo di feedstock. In particolare, l'aggiunta di HTC liquor derivante da trattamento HTC del digestato evidenzia un incremento della produzione di biogas pari al 50% rispetto al fango biologico. L'aggiunta di una percentuale di FORSU pari al 10% rispetto alla massa iniziale di feedstock del reattore HTC non evidenzia alcun incremento della produzione di biogas rispetto al solo digestato. Tuttavia, un incremento della massa di FORSU pari al 20% (rispetto alla massa complessiva di feedstock HTC) evidenzia un incremento della produzione di biogas pari al 70% rispetto al fango biologico e pari al 13% rispetto al liquor del digestato. Il risultato migliore si raggiunge quando il test BMP è condotto con liquor da feedstock HTC costituito per metà da FORSU e per metà da digestato. In questo caso è possibile osservare un incremento della produzione di biogas pari al 100% rispetto al solo fango biologico.

Recenti studi scientifici hanno dimostrato che anche l'idrochar può contribuire in maniera significativa all'incremento della produzione di biogas in digestione anaerobica [9]. Per tale ragione, i test BMP sono stati eseguiti sia con HTC liquor che con HTC slurry utilizzati come substrato, in aggiunta all'inoculo anaerobico. Gli andamenti di produzione di biogas relativi all'HTC slurry sono riportati in Figura 6. I risultati sono confrontabili con il campione di solo fango biologico e con i campioni di HTC liquor di digestato e FORSU riportati in Figura 5.

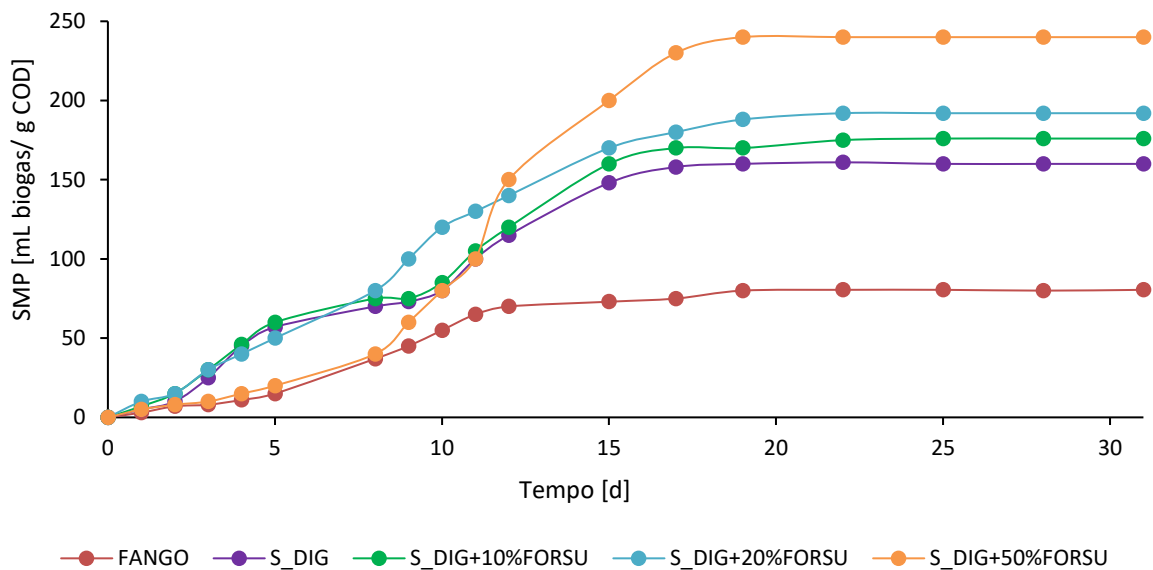


Figura 6. Andamento delle produzioni specifiche di biogas degli HTC slurry

Le produzioni specifiche di biogas derivanti dalla digestione anaerobica di HTC slurry risultano pari a 160 ± 8 mL, 176 ± 10 mL, 192 ± 13 mL e 240 ± 15 mL biogas/g COD, rispettivamente per i campioni DIG, DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU. Anche in questo caso, tutti i campioni con HTC slurry come substrato presentano una produzione specifica di biogas superiore a quella del solo fango biologico. In aggiunta, la produzione di biogas derivante dalla digestione anaerobica di HTC slurry è maggiore di quella osservabile per i test BMP dove HTC liquor è stato usato come substrato.

Considerando il campione di digestato, si nota che l'HTC slurry contribuisce ad un incremento del 33% di produzione di biogas rispetto a quella osservabile con HTC liquor. L'incremento di produzione di biogas legato all'HTC slurry risulta pari al 42%, 41% e 50% rispettivamente per i campioni DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU, rispetto ai test BMP con HTC liquor.

Anche nel caso di HTC slurry il risultato migliore si osserva in corrispondenza del campione DIG+50%FORSU che consente di ottenere una produzione di biogas del 200% maggiore rispetto a quella osservabile con l'alimentazione di solo fango biologico al comparto di digestione anaerobica.

I test BMP consentono, inoltre, di determinare la produzione specifica di metano dei vari substrati utilizzati. I risultati, riportati in Tabella 5, evidenziano una produzione di metano variabile dal 56 al 63%.

Tabella 5. Produzione specifica di metano

Campione	SMP [mL CH ₄ /g COD]	CH ₄ [%]
L_DIG	67 ± 8	56
L_DIG+10%FORSU	69 ± 10	56
L_DIG+20%FORSU	79 ± 13	58
L_DIG+50%FORSU	98 ± 9	61
S_DIG	91 ± 10	57
S_DIG+10%FORSU	104 ± 6	59
S_DIG+20%FORSU	119 ± 4	62
S_DIG+50%FORSU	151 ± 8	63

I test BMP hanno mostrato dati molto promettenti nel miglioramento della produzione di biogas che può essere ottenuto mediante un'alimentazione combinata di digestato e FORSU al reattore HTC e con il conseguente ricircolo in digestione anaerobica del derivante HTC liquor o slurry. Questi risultati trovano conferma in numerosi studi di letteratura dove viene riportato che il maggiore vantaggio derivante dall'utilizzo del trattamento HTC come post-trattamento della digestione anaerobica è relativo al miglioramento nella produzione di biogas e biometano derivante dall'alimentazione dei prodotti della reazione HTC al comparto anaerobico di trattamento fanghi [6,9–11].

3.4 Test di disidratatilità

I test CST sono stati condotti sul digestato, sulle tre miscele di fango e FORSU e sugli slurry post trattamento HTC per avere indicazioni della velocità di filtrazione e, quindi, della disidratatilità corrispondente alle diverse aliquote di FORSU aggiunte al digestato. La Figura 7 mostra il trend dei valori di CST e le relative riduzioni percentuali.

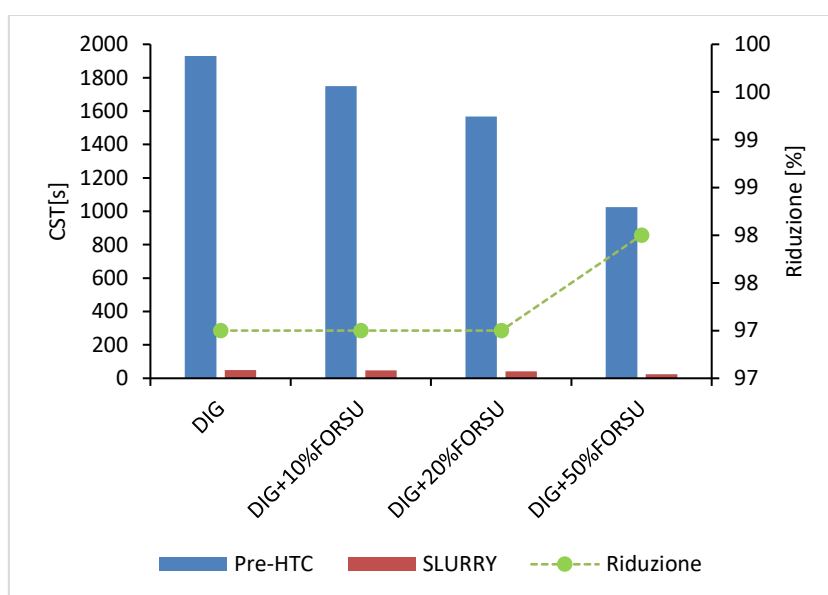


Figura 7. Risultati del test CST

I risultati mostrano che i valori CST diminuiscono all'aumentare della percentuale di FORSU aggiunta al digestato sia nel campione non trattato che nei fanghi HTC. In tutti i campioni è stata osservata una significativa riduzione del valore CST fino al 98% dopo il trattamento con HTC.

Lo slurry, derivante dal trattamento HTC delle diverse miscele digestato+FORSU, possiede una concentrazione di ST differente rispetto alla matrice pre-trattamento HTC e, questo potrebbe rendere i diversi campioni non confrontabili tra loro. Per tale ragione, per neutralizzare l'effetto della concentrazione dei solidi, i valori di CST sono stati anche riportati in rapporto ai valori di ST dei vari campioni analizzati (Tabella 6). Anche in questo caso il CST decresce da 0.58 ± 0.08 s/g/L dello slurry corrispondente al digestato fino a 0.53 ± 0.12 , 0.45 ± 0.06 e 0.27 ± 0.05 s/g/L, rispettivamente, per gli slurry dei campioni DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU. In definitiva, anche riportando i valori di CST specifici rispetto alla concentrazione di ST, il risultato migliore in termini di riduzione del CST si verifica in corrispondenza del campione DIG+50%FORSU.

Tabella 6. Risultati specifici rispetto ai ST del tempo di suzione capillare (CST)

	Campione	CST medio [s]	ST [g/L]	CST/ST [s/g/L]
Pre-HTC	DIG	1930 ± 15	102	18.92 ± 0.15
	DIG+10%FORSU	1749 ± 10	108	16.16 ± 0.21
	DIG+20%FORSU	1568 ± 18	112	14.00 ± 0.16
	DIG+50%FORSU	1025 ± 13	118	8.60 ± 0.11
Slurry	DIG	50 ± 4	86	0.58 ± 0.08
	DIG+10%FORSU	48 ± 4	90	0.53 ± 0.12
	DIG+20%FORSU	41 ± 4	90	0.45 ± 0.06
	DIG+50%FORSU	24 ± 5	89	0.27 ± 0.05

In generale, i risultati riportati in Tabella 6 confermano che il trattamento HTC, a 190°C per 1 h di reazione, migliora in maniera significativa la disidratabilità delle matrici trattate contribuendo, quindi, alla riduzione del volume di fango da smaltire. Come riportato in diversi studi di letteratura, la disidratabilità dei fanghi può essere migliorata mediante trattamenti termici a temperature superiori a 150°C [12–14].

Attualmente il processo HTC è considerato una delle tecnologie più promettenti per risolvere il problema della disidratazione dei fanghi. Il trattamento HTC porta alla rottura dei fiocchi di fango con conseguente aumento dell'acqua libera. Pertanto, il processo HTC è in grado di convertire l'acqua legata chimicamente alle particelle e immagazzinata al loro interno in acqua libera, migliorando così la disidratabilità [15].

Il miglioramento della disidratabilità osservato nel presente lavoro sperimentale conferma quanto già evidenziato in precedenti studi di letteratura. In particolare, Kim et al. [16], applicando il processo HTC per trattare il digestato a 180, 220 e 250°C per 30 min, ha verificato che il valore di CST del fango grezzo era pari a 72 s e che esso subiva una forte diminuzione dopo HTC raggiungendo 15.3, 10.9 e 10.1 s, rispettivamente, a 180, 220 e 250°C. Ahmed et al. [17] ha evidenziato, invece, la dipendenza della disidratabilità dalla durata del trattamento HTC, alla temperatura HTC di 190°C. Il CST decresce da 278 ± 26 s per il digestato tal quale a 204 ± 33 s dopo 30 minuti di HTC, rivelando un miglioramento molto scarso nella disidratabilità dei fanghi. Al contrario, quando la durata del trattamento HTC è pari ad 1 ora, si evidenzia una forte riduzione del valore CST (25 ± 2 s), che significa un aumento della disidratabilità di un fattore 7. Inoltre, aumentando il tempo di reazione HTC fino a 2 e 3 ore non è stato evidenziato un ulteriore miglioramento della disidratabilità, tale da giustificare l'aumento del tempo di reazione. Pertanto, i risultati delle misurazioni CST raccomandano una durata del trattamento di 1 ora per la separazione meccanica dell'idrochar dall'HTC, mentre tempi di trattamento inferiori potrebbero essere utilizzati quando non è necessaria una separazione solido/liquido dopo il trattamento con HTC, il che significa un post utilizzo dell'intero HTC slurry.

3.5 Scenari applicativi

Considerando i dati derivanti dai test HTC, di seguito si riportano i bilanci di massa e di energia degli scenari in cui HTC liquor e lo slurry, derivanti da digestato e dalle differenti miscele di digestato e FORSU, vengono riciclati all'interno del comparto di digestione anaerobica per incrementare la produzione di biogas.

I bilanci sono stati eseguiti considerando 100 m³ di digestato ad una concentrazione di solidi pari a 2.8% da trattare al giorno. Il digestato viene inviato ad un trattamento di separazione solido/liquida per ottenere un digestato ispessito ad una concentrazione di solidi pari al 10% e, successivamente, viene inviato al trattamento HTC eseguito a 190°C per 1h.

Nello scenario a) (Figura 7a) lo slurry post-trattamento HTC viene inviato ad un separatore solido/liquido che consente di ottenere 3.1m³ di idrochar umido con contenuto di solidi pari al 60% [18,19] e 18.2 m³ di HTC liquor con 1.9% TS. L'HTC liquor ha una concentrazione di COD pari a 41 g/L e una produzione specifica di metano pari a 67 mL CH₄/g COD. Di conseguenza, il trattamento HTC di digestato al 10% TS e il ricircolo di HTC liquor in digestione anaerobica consente di ottenere una produzione di biogas pari a 50 m³ al giorno corrispondente ad una produzione di energia pari a 500 kWh. Il processo HTC richiede un consumo energetico pari a 100 kWh e 15 kWh per tonnellata di fango trattato, rispettivamente, di energia termica ed elettrica

[18], mentre il consumo energetico della digestione anaerobica può essere assunto pari al 25% dell'energia recuperata dalla produzione di biogas [20]. Quindi, nello scenario 1, l'energia necessaria in input per il processo integrato HTC e AD è pari a 2655 kWh mentre l'output di energia ottenuta dal ricircolo in AD dell'HTC liquor è pari a 500 kWh. Di conseguenza, la digestione anaerobica di HTC liquor, derivante da HTC di digestato al 10%, consente di coprire il 19% dei consumi energetici del processo combinato HTC+AD.

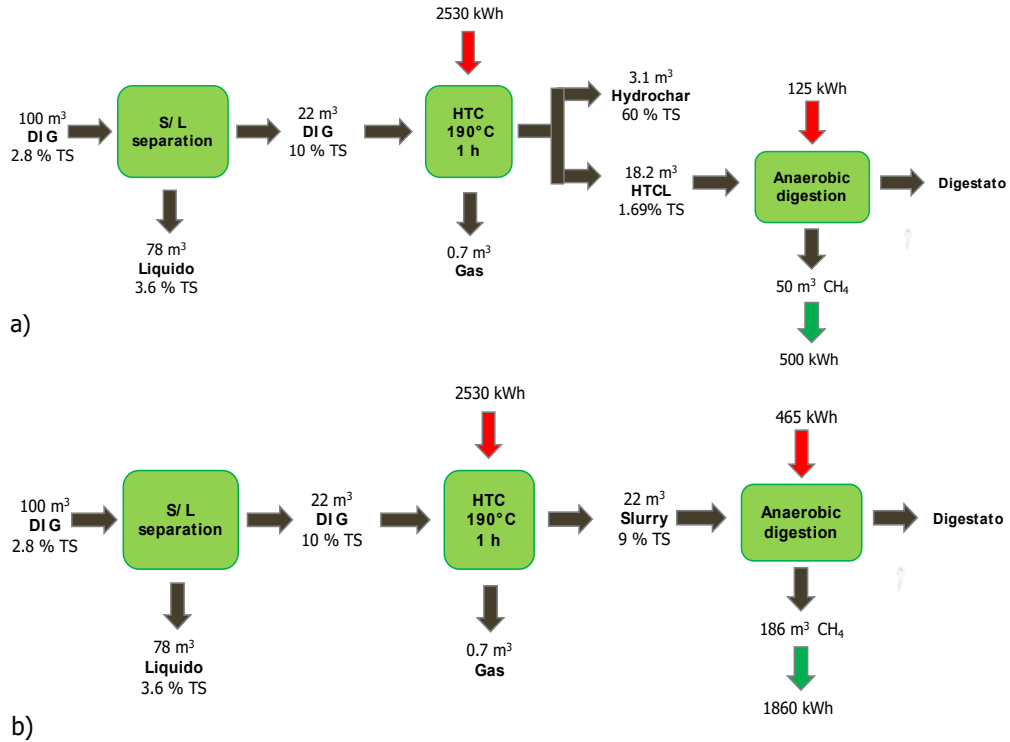
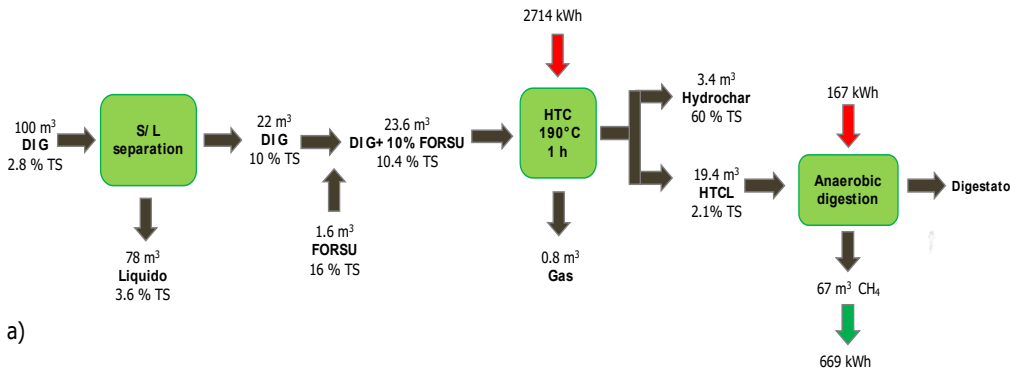
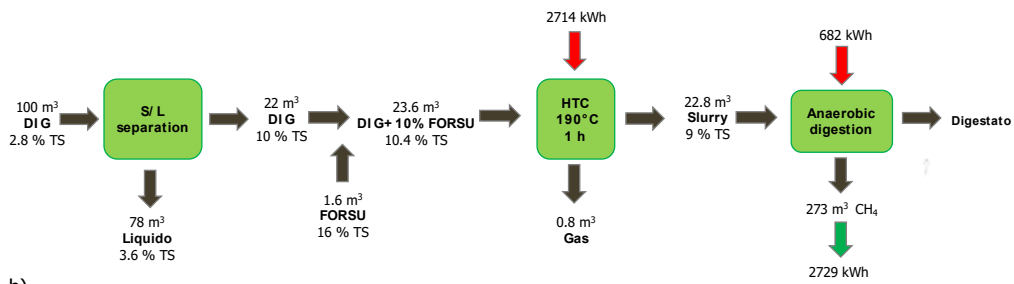


Figura 7. Bilancio energetico e di massa del ricircolo di a)HTCL liquor e b) slurry da HTC di DIG in AD

Nello scenario b) (Figura 7b), tutto lo slurry derivante da HTC di digestato al 10% viene ricircolato in AD. In questo caso, considerando la concentrazione di COD dello slurry pari a 96 g/L e la produzione di metano pari a 91 mL CH₄/g COD, si ottiene una produzione di metano giornaliera pari a 186 m³. In questo caso, l'energia di input del processo combinato HTC+AD è pari a 2995 kWh, mentre quella derivante dal ricircolo dello slurry in AD è pari a 1860 kWh. Ne deriva, quindi, che l'alimentazione dello slurry in AD consente di coprire circa il 60% dei consumi energetici del processo HTC+AD.

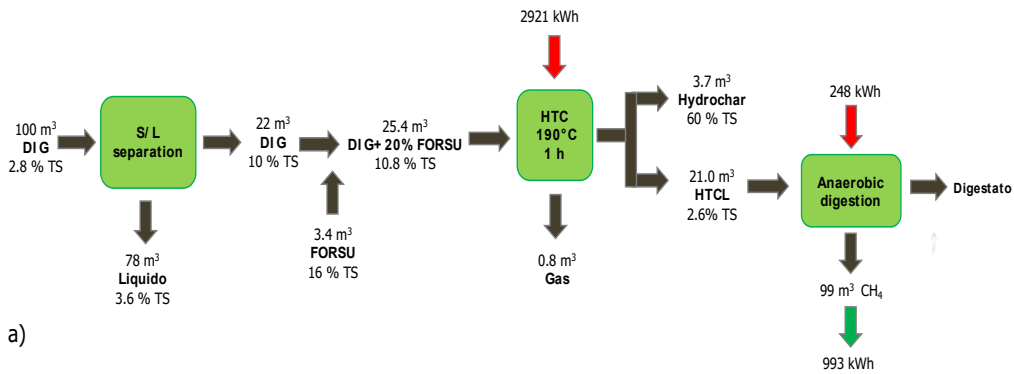
Analogamente allo scenario a) e b), nelle Figure 8, 9 e 10 si riportano gli scenari riferiti, rispettivamente, alla miscela DIG+10%FORSU, DIG+20%FORSU e DIG+50%FORSU.



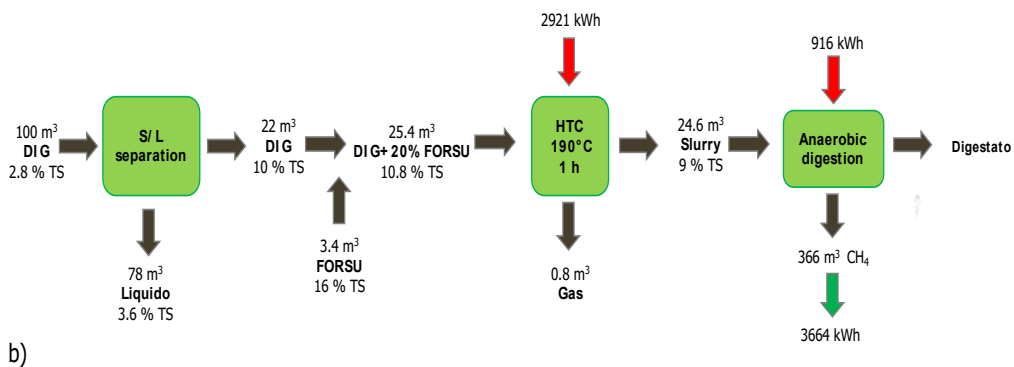


b)

Figura 8. Bilancio energetico e di massa del ricircolo di a) HTCL liquor e b) slurry da HTC di DIG+10%FORSU in AD

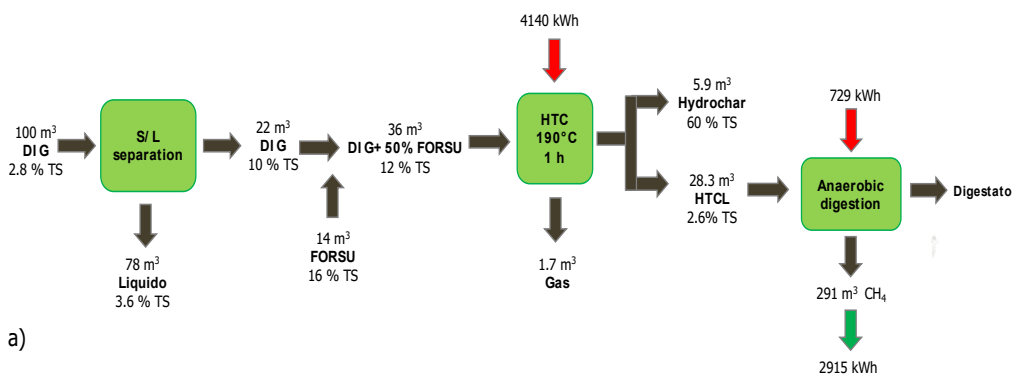


a)



b)

Figura 9. Bilancio energetico e di massa del ricircolo di a) HTCL liquor e b) slurry da HTC di DIG+20%FORSU in AD



a)

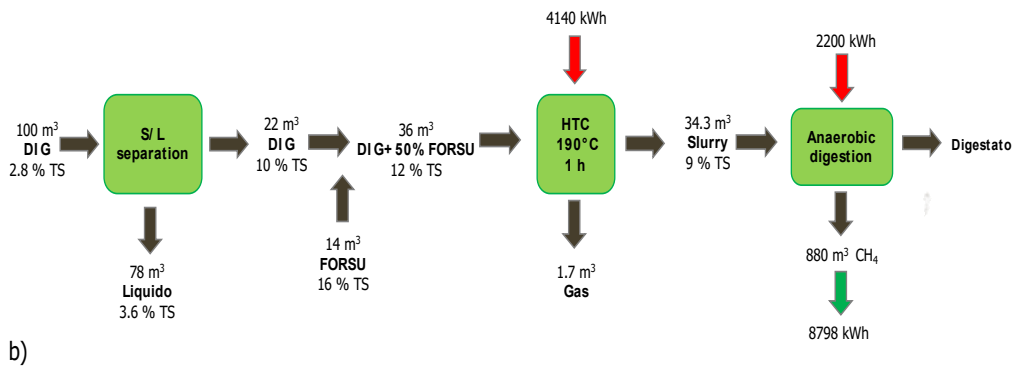


Figura 10. Bilancio energetico e di massa del ricircolo di a) HTCL liquor e b) slurry da HTC di DIG+50%FORSU in AD

In Tabella 7 sono riassunti i dati derivanti dai bilanci di massa e di energia di tutti gli scenari proposti.

Tabella 7. Sintesi dei bilanci energetici e di massa

	DIG		DIG+10%FORSU		DIG+20%FORSU		DIG+50%FORSU	
	Scenario		Scenario		Scenario		Scenario	
	a) HTCL	b) Slurry	a) HTCL	b) Slurry	a) HTCL	B)Slurry	a) HTCL	b) Slurry
Portata alimentata in AD [m³]	18.2	22	19.4	22.8	21	24.6	28.3	34.3
Produzione di biogas [m³]	50	186	67	273	99	366	291	880
Energia input HTC [kWh]	2530	2530	2714	2714	2921	2921	4140	4140
Energia input AD [kWh]	125	465	167	682	248	916	729	2200
Energia output (da biogas) [kWh]	500	1860	669	2729	993	3664	2915	8798
Rapporto Output/Input	19%	62%	23%	80%	31%	95%	60%	139%

Dai dati riportati in Tabella 7, emerge che, il ricircolo di solo HTC liquor contribuisce in maniera solo parziale a coprire il consumo energetico necessario per il processo combinato HTC+AD. Di contro invece, l'alimentazione di HTC slurry al comparto di digestione anaerobica consente un incremento significativo della produzione di biogas e, nel caso di alimentazione con la miscela di DIG+20%FORSU, può contribuire a coprire l'intero consumo energetico del trattamento HTC+AD. Nel caso invece della miscela DIG+50%FORSU, oltre a coprire l'intero consumo energetico sarebbe anche possibile un recupero di energia utilizzabile per altre attività all'interno dell'impianto di depurazione.

4 Disseminazione

Il contenuto del presente lavoro è stato utilizzato per la redazione di una pubblicazione scientifica dal titolo "Hydrothermal carbonization of digestate and organic fraction of municipal solid waste to enhance biogas production in anaerobic digestion process" inviata alla rivista Processes (Impact Factor: 2.847) per l'eventuale pubblicazione a seguito di esito positivo del processo di revisione.

Quanto contenuto all'interno del presente documento è stato di supporto alla redazione di materiale di studio per i corsi di laurea in Ingegneria Sanitaria dell'Università di Trento dove sono stati discussi alcuni aspetti descritti nei paragrafi precedenti.

5 Conclusioni

Il presente lavoro sperimentale mostra i risultati del processo combinato di digestione anaerobica e carbonizzazione idrotermica. I test HTC sono stati realizzati considerando quattro differenti feedstock: digestato e digestato con l'aggiunta di una percentuale pari a 10% (DIG+10%FORSU), 20% (DIG+20%FORSU) e 50% FORSU (DIG+50%FORSU). Le performance del processo combinato AD+HTC sono state valutate in termini di incremento della produzione di biogas, miglioramento della disidratabilità e riduzione della produzione di fango. I dati hanno evidenziato un aumento di produzione di biogas e di biometano all'aumentare della percentuale di FORSU aggiunta al digestato. In particolare, con feedstock del processo HTC costituito per metà da digestato e metà da FORSU è stata osservata una produzione di biogas pari a 160 ± 10 mL biogas/g COD e 240 ± 15 mL biogas/g COD quando, rispettivamente, HTC liquor e slurry sono stati riciclati all'interno del comparto di digestione anaerobica. Questa situazione, che rappresenta la più vantaggiosa, consentirebbe un significativo recupero energetico che, nel caso di ricircolo di HTC liquor consentirebbe di coprire circa il 60% dei consumi energetici del processo combinato mentre, nel caso di ricircolo di tutto lo slurry, consentirebbe una copertura pari al 100% dei consumi energetici con un surplus di energia (39%) utilizzabile a coprire parte dei consumi energetici dell'impianto di depurazione. La configurazione DIG+50%FORSU è risultata essere la più vantaggiosa anche in termini di miglioramento della disidratabilità del fango e riduzione della produzione di fango. In ogni caso, tutti i test HTC hanno evidenziato una percentuale di riduzione della produzione di fango variabile dal 16 al 24%.

6 Riferimenti bibliografici

1. Ferrentino, R.; Merzari, F.; Fiori, L.; Andreottola, G. Coupling Hydrothermal Carbonization with Anaerobic Digestion for Sewage Sludge Treatment: Influence of HTC Liquor and Hydrochar on Biomethane Production. *Energies* **2020**, *13*.
2. Merzari, F.; Goldfarb, J.; Andreottola, G.; Mimmo, T.; Volpe, M.; Fiori, L. Hydrothermal Carbonization as a Strategy for Sewage Sludge Management: Influence of Process Withdrawal Point on Hydrochar Properties. *Energies* **2020**, *13*, 2890–2912.
3. Eco-center Available online: <https://www.eco-center.it>.
4. Merzari, F.; Lucian, M.; Volpe, M.; Andreottola, G.; Fiori, L. Hydrothermal carbonization of biomass: Design of a bench-Scale reactor for evaluating the heat of reaction. *Chem. Eng. Trans.* **2018**, *65*, 43–48.
5. Basso, D.; Patuzzi, F.; Castello, D.; Baratieri, M.; Rada, E.C.; Weiss-Hortala, E.; Fiori, L. Agro-industrial waste to solid biofuel through hydrothermal carbonization. *Waste Manag.* **2016**, *47*, 114–121.
6. Ahmed, M.; Andreottola, G.; Elagroudy, S.; Negm, M.S.; Fiori, L. Coupling hydrothermal carbonization and anaerobic digestion for sewage digestate management: Influence of hydrothermal treatment time on dewaterability and bio-methane production. *J. Environ. Manage.* **2021**, *281*, 111910.
7. APHA; AWWA; WEF Standard methods for the examination of water and wastewater. *Am. Public Heal. Assoc.* 2012.
8. Liu, H.; Basar, I.A.; Nzihou, A.; Eskicioglu, C. Hydrochar derived from municipal sludge through hydrothermal processing: A critical review on its formation, characterization, and valorization. *Water Res.* **2021**, 117186.
9. Ferrentino, R.; Merzari, F.; Fiori, L.; Andreottola, G. Coupling hydrothermal carbonization with anaerobic digestion for sewage sludge treatment: Influence of HTC liquor and hydrochar on biomethane production. *Energies* **2020**, *13*.
10. Aragón-Briceño, C.; Ross, A.B.; Camargo-Valero, M.A. Evaluation and comparison of product yields and bio-methane potential in sewage digestate following hydrothermal treatment. *Appl. Energy* **2017**, *208*, 1357–1369.
11. Lucian, M.; Volpe, M.; Merzari, F.; Wüst, D.; Kruse, A.; Andreottola, G.; Fiori, L. Hydrothermal carbonization coupled with anaerobic digestion for the valorization of the organic fraction of municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* **2020**, *314*, 123734.
12. Bougrier, C.; Delgenès, J.P.; Carrère, H. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. *Chem. Eng. J.* **2008**, *139*, 236–244.
13. Neyens, E.; Baeyens, J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *J. Hazard. Mater.* **2003**, *98*, 51–67.
14. Nyktari, E.; Danso-Boateng, E.; Wheatley, A.; Holdich, R. Anaerobic digestion of liquid products following hydrothermal carbonisation of faecal sludge at different reaction conditions. *Desalin. Water Treat.* **2017**, *91*, 245–251.
15. Wang, L.; Chang, Y.; Li, A. Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *108*, 423–440.
16. Kim, D.; Lee, K.; Park, K.Y. Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sludge for solid fuel production and energy recovery. *Fuel* **2014**, *130*, 120–125.
17. Ahmed, M.; Andreottola, G.; Elagroudy, S.; Negm, M.S.; Fiori, L. Coupling hydrothermal carbonization and anaerobic digestion for sewage digestate management: Influence of hydrothermal treatment time on dewaterability and bio-methane production. *J. Environ. Manage.* **2021**, *281*, 111910.
18. Merzari, F.; Langone, M.; Andreottola, G.; Fiori, L. Methane production from process water of sewage sludge hydrothermal carbonization. A review. Valorising sludge through hydrothermal carbonization. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2019**, *49*, 1–42.
19. Escala, M.; Zumbühl, T.; Koller, C.; Junge, R.; Krebs, R. Hydrothermal carbonization as an energy-efficient alternative to established drying technologies for sewage sludge: A feasibility study on a laboratory scale. *Energy and Fuels* **2013**, *27*, 454–460.

20. Gerin, P.A.; Vliegen, F.; Jossart, J.M. Energy and CO₂ balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* **2008**, *99*, 2620–2627.

Curriculum vitae

Roberta Ferrentino

Roberta Ferrentino nel 2016 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Ambientale presso l'Università di Trento con una tesi sperimentale sulla riduzione della produzione dei fanghi di depurazione con il processo anaerobico side-stream. Dal 2016 al 2018 è stata assegnista di ricerca presso l'Università di Cassino e del Lazio Meridionale dove ha svolto un progetto finanziato dalla Fondazione Caritro, in collaborazione con l'Università di Trento e due realtà imprenditoriali trentine. Da Marzo 2019 a Dicembre 2021 è stata assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dove, da Gennaio 2022, è ricercatrice a tempo determinato (RTDA). Attualmente si occupa di processi di riduzione della produzione dei fanghi, processi termici innovativi, recupero di energia e risorse negli impianti di depurazione ed economia circolare.

Ha sempre svolto attività di ricerca nell'ambito dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale, occupandosi in particolare di trattamenti delle acque reflue, dei fanghi e dei rifiuti. Ha partecipato a diversi lavori sperimentali pubblicati su riviste italiane e straniere o presentati a Congressi nazionali ed internazionali. È autrice di 20 pubblicazioni nazionali ed internazionali. È co-inventrice e titolare di un brevetto nel settore delle tecnologie innovative di riduzione dei fanghi di depurazione.

Luca Fiori

Luca Fiori è professore associato di Ingegneria Chimica, è il leader del Green Process Engineering Group (detto anche Gruppo Biomasse) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università di Trento. Ha conseguito il dottorato di ricerca in ingegneria chimica e di processo nel 2003 presso l'Università di Genova, dove si è anche laureato con il massimo dei voti in ingegneria chimica nel 1998. Attualmente si occupa principalmente di processi di estrazione e di conversione termochimica, in particolare ad alta pressione (estrazione con CO₂ supercritica, gassificazione con H₂O supercritica, carbonizzazione idrotermica) per lo sfruttamento di rifiuti organici urbani e agroindustriali e biomasse più in generale: rifiuti e biomassa per recupero di energia e materia o da cui estrarre composti ad alto valore aggiunto. Ha più di 160 pubblicazioni, tra cui oltre 80 articoli su riviste ISI peer-reviewed e 4 capitoli di libri (H-index: 35, citazioni > 3800 – Scopus database). Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca, spesso in veste di coordinatore. I suoi fondi di ricerca provengono da progetti di R&D nazionali ed europei e da consulenze a società private dei settori agroindustriale, dei rifiuti e dell'ingegneria. È revisore di numerose riviste scientifiche e valutatore di proposte di ricerca nazionali, europee (CIP-IEE 2012, CIP-IEE 2013) ed internazionali.

Gianni Andreottola

Gianni Andreottola è professore ordinario di Ingegneria Sanitaria-Ambientale (Gruppo ICAR 03) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università degli Studi di Trento. Laureato con lode in Ingegneria Civile Idraulica presso il Politecnico di Milano, ha iniziato la sua carriera scientifica presso l'Istituto di Ingegneria Sanitaria del medesimo Politecnico, conseguendo nel 1989 il titolo di Dottore di Ricerca con una tesi sperimentale sulla rimozione biologica dei nutrienti dalle acque di scarico. Negli anni 1990 e 1991 ha lavorato come ricercatore presso l'Istituto per l'Ambiente. Dal 1991 al 1993 ha svolto attività di ricerca come borsista post-dottorato presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento del Politecnico di Milano. Dal 1993 svolge attività didattica e di ricerca presso l'Università di Trento. Dal 2008 è professore Ordinario presso la stessa sede.

Ha sempre svolto attività di ricerca nell'ambito dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale, occupandosi in particolare di trattamenti delle acque reflue, dei fanghi, dei rifiuti e dei terreni contaminati. In questi ed altri settori di ricerca ha svolto numerosi lavori sperimentali e modellistici pubblicati su riviste italiane e straniere o presentati a Congressi nazionali ed internazionali.

È Autore o co-autore di oltre 200 pubblicazioni nazionali ed internazionali.

E' co-autore di 3 brevetti nel settore delle tecnologie innovative di riduzione dei fanghi di depurazione.
E' responsabile del Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale (LISA) dell'Università di Trento.
Svolge con la sua struttura di laboratorio e con collaboratori qualificati (ricercatori, dottori di ricerca, borsisti, post-doc, assegnisti) attività di supporto tecnico e consulenza di processo ed impiantistica ad Enti territoriali ed Aziende