Produzione di syngas ricco in idrogeno tramite gassificazione in acqua supercritica di rifiuti umidi

Domenico Macrì[1], Pasquale Licastro[2], Salvatore De Luca[3], Miriam Sellaro[4], Adolfo Le Pera[5], Massimo Migliori[6], Emanuel Muraca[7], Girolamo Giordano[8]

1, 2, 3, 7 **Techfem SpA**, Via Toniolo 1/D, 61032 Fano, 4, 5 **Calabra Maceri & Servizi SpA**, via M. Polo, 87036 Rende, 6, 8 Dipartimento di Ingegneria dell'ambiente, **Università della Calabria**, 87036 Rende (CS)

DOI: 10.63111/QES-2025.1.0008

ABSTRACT

Questa collaborazione tra Techfem, Calabra Maceri & Servizi e l'Università della Calabria si concentra sulla produzione di energia sostenibile tramite gassificazione in acqua supercritica (SCWG) di rifiuti ad alto contenuto di umidità, con particolare attenzione a materiali di scarto industriale come digestati, percolati e fanghi di depurazione. A tal fine, è stato progettato e costruito un impianto pilota per affrontare le sfide poste dalla tipologia di rifiuti trattati con SCWG. Il progetto ha coinvolto sia attività sperimentali che simulazioni computazionali di processo, consentendo un'analisi completa del processo SCWG in condizioni operative controllate. Testando una serie di parametri operativi, come temperatura, pressione e composizione del materiale di partenza, lo studio mira a ottimizzare le condizioni che massimizzano la qualità del syngas e la resa di H_2. Inoltre, è stata valutata la fattibilità tecnica ed economica della scalabilità industriale di questa tecnologia,

analizzando la sua efficienza energetica, l'impronta di carbonio e l'idoneità per l'integrazione nei sistemi di gestione dei rifiuti e produzione di energia. I risultati mostrano che l'SCWG è un metodo efficace per convertire i rifiuti umidi in syngas ricco di H_2. Questa tecnologia facilita la gestione dei rifiuti difficili e supporta la riduzione dell'uso di combustibili fossili e delle emissioni di gas serra, confermandosi come soluzione pratica e sostenibile per la produzione di energia pulita.

INTRODUZIONE

La gestione sostenibile dei rifiuti umidi rappresenta una delle principali sfide ambientali e tecnologiche del nostro tempo. Materiali come fanghi di depurazione, digestati e residui liquidi organici derivanti da processi industriali e urbani, sono difficili da smaltire a causa del loro alto contenuto di umidità e della complessità delle loro componenti organiche. In questo contesto, la gassificazione in acqua supercritica (SCWG) emerge come una soluzione innovativa e promettente per trasformare questi scarti in energia pulita, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra e al contenimento dell'uso di combustibili fossili.

Che cos'è la gassificazione in acqua supercritica?

La gassificazione in acqua supercritica (SCWG) è un processo avanzato che sfrutta le proprietà uniche dell'acqua in condizioni supercritiche, cioè quando si trova a temperature superiori a 374 °C e pressioni superiori a 220 bar. In questo stato, l'acqua si comporta come un solvente non convenzionale, con caratteristiche intermedie tra quelle di un liquido e di un gas. Queste condizioni consentono reazioni chimiche estremamente efficienti e la completa conversione delle biomasse umide in gas sintetico (syngas), senza necessità di pretrattamenti come l'essiccazione[1].

Uno dei principali vantaggi della SCWG è la possibilità di trattare biomasse con elevato contenuto di umidità, superando i limiti delle tecnologie di gassificazione tradizionali. Nei processi convenzionali, l'umidità deve essere asportata tramite evaporazione, con un significativo dispendio energetico. Al contrario, nella SCWG l'umidità presente nei rifiuti diventa un elemento chiave del processo, partecipando attivamente alle reazioni chimiche. Il syngas prodotto è costituito principalmente da idrogeno (H_2), anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4) e monossido di carbonio (CO). Grazie alle condizioni supercritiche, le reazioni chimiche avvengono in modo rapido e completo, garantendo alte rese in idrogeno e una riduzione significativa dei residui solidi. Inoltre, la SCWG permette una separazione efficace dei materiali inorganici, che rimangono inerti durante il processo e possono essere facilmente rimossi. Le proprietà dell'acqua in stato supercritico favoriscono anche la miscelazione dei composti organici, migliorando la cinetica delle reazioni e l'efficienza complessiva del processo. Questo rende la SCWG una soluzione particolarmente adatta per gestire rifiuti difficili come fanghi di depurazione, digestati e percolati, trasformandoli in risorse energetiche con un basso impatto ambientale. Infine, il gas prodotto dalla SCWG è già pressurizzato, un aspetto vantaggioso per l'utilizzo diretto in turbine o in processi industriali successivi, come la produzione di combustibili sintetici o di etanolo. Questo riduce ulteriormente i costi operativi e aumenta la sostenibilità del sistema.

Il Progetto Wet Waste to Green Fuel

L'emergenza rifiuti e la necessità di sviluppare nuove tecnologie per la gestione sostenibile delle risorse sono tra le sfide più urgenti del nostro tempo. L'accumulo di rifiuti organici, in particolare quelli ad alto contenuto di umidità, rappresenta un problema significativo per l'ambiente e un'opportunità in termini di economia circolare. In questo contesto, un innovativo progetto denominato "Wet Waste to Green Fuel (WWGF) – Gassificazione rifiuti organici umidi con acqua supercritica per produzione di biometano e GNL", coordinato dal Distretto Tecnologico Nazionale sull'Energia (DITNE), ha visto la collaborazione di ENEA, CNR-IITAE, Techfem S.p.a., Calabra Maceri & Servizi S.p.a., Università della Calabria, Politecnico di Torino e SOL S.p.a. Finanziato dal Ministero dell'Istruzione e della Ricerca nell'ambito del PON "Ricerca e Innovazione 2014 – 2020", il progetto si inserisce nel panorama delle iniziative più avanzate per la transizione verso un modello energetico sostenibile.

Nel contesto del progetto WWGF la stretta collaborazione tra Techfem S.p.a. e l'Università della Calabria ha portato allo sviluppo di un impianto pilota per testare la gassificazione in acqua supercritica di rifiuti umidi. Tale sviluppo ha tenuto conto delle esigenze specifiche e delle matrici umide messe a

1 Macrì, D., Catizzone, E., Molino, A., & Migliori, M. (2020). Supercritical water gasification of biomass and agro-food residues: Energy assessment from modelling approach. Renewable Energy, 150, 624-636.

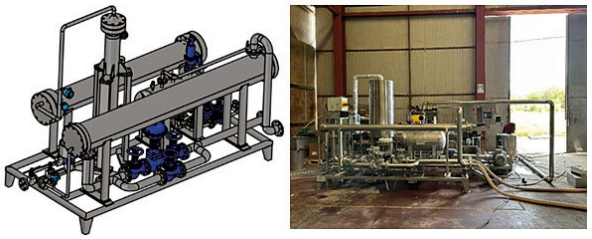
disposizione da Calabra Maceri & Servizi S.p.a., fornendo una base progettuale solida e orientata alle esigenze applicative.

L'impianto pilota è stato progettato per operare in condizioni controllate di temperatura e pressione, permettendo uno studio dettagliato delle reazioni chimiche che avvengono in condizioni supercritiche. Durante la sperimentazione sono stati analizzati diversi parametri operativi per identificare le condizioni ottimali del processo. In particolare, è stata posta attenzione alla temperatura e alla pressione, valutando come queste influenzino la produzione di idrogeno e la riduzione di sottoprodotti indesiderati. Inoltre, l'efficienza energetica è stata un elemento cruciale di analisi, con il confronto del bilancio energetico rispetto a quello delle tecnologie tradizionali di smaltimento. Ora sono stati fatti solo sul percolato. Nel prossimo futuro, si intende studiare la tipologia del materiale di partenza, con test su diversi tipi di rifiuti umidi come digestati, fanghi di depurazione e percolati, per comprendere l'impatto della loro natura sulla resa complessiva del processo.

Dal punto di vista tecnico, l'impianto si caratterizza per parametri dimensionanti significativi che definiscono la sua capacità operativa. Esso è in grado di trattare una portata massima di biomassa umida pari a 75 kg/h, contenente almeno l'80% in peso di acqua, e può operare a temperature fino a 500 °C e pressioni massime di 225 bar. La potenza termica nominale dell'impianto è di 200 kW, rendendolo un sistema altamente performante per la conversione di biomasse umide in syngas. Il suddetto impianto è suddiviso in tre unità funzionali principali, ciascuna con un ruolo specifico nel processo:

- **Unità 1: Pretrattamento della biomassa umida.** Questa unità si occupa di preparare la biomassa prima della gassificazione. Comprende operazioni come la rimozione di impurità, la frantumazione e il controllo dell'umidità. Un mulino colloidale riduce le dimensioni delle particelle solide a meno di 350 micron, garantendo il corretto funzionamento della pompa per alta pressione. La biomassa viene poi trasportata attraverso una pompa booster che assicura una corretta omogeneizzazione e facilita il successivo trasferimento al reattore.
- **Unità 2: Gassificazione con acqua supercritica**. Cuore dell'impianto, questa unità contiene il reattore ad alta pressione in cui avviene la conversione termochimica della biomassa umida. Il package di gassificazione è dotato di scambiatori di calore per il preriscaldamento dell'alimentazione e il raffreddamento dei prodotti, un reattore in acciaio inossidabile con rivestimento termico e riscaldamento a induzione elettromagnetica, e un sistema di separazione liquido-gas che facilita la raccolta del syngas prodotto.
- **Unità 3: Analisi e trattamento del syngas prodotto**. Questa unità è dedicata al monitoraggio e alla caratterizzazione del syngas. Un analizzatore multigas misura la composizione chimica del gas, fornendo dati essenziali per l'ottimizzazione del processo. Include anche un sistema di venting sicuro per il gas in eccesso.

FIGURA 1 Modello CAD e foto dell'unità di gassificatore con acqua supercritica dell'impianto prototipale



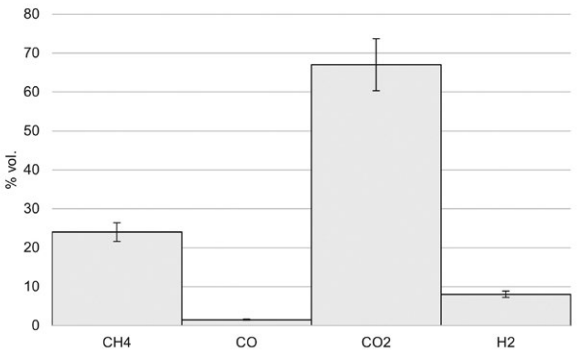
Queste unità funzionali, insieme a infrastrutture ausiliarie come i sistemi di raffreddamento e alimentazione elettrica, garantiscono il funzionamento sicuro ed efficiente dell'impianto.

Principali risultati e implicazioni del progetto

La campagna sperimentale condotta presso l'impianto pilota ha prodotto risultati significativi, evidenziando sia i punti di forza che le aree di miglioramento del processo di gassificazione in acqua supercritica. Durante la fase di sperimentazione, sono stati testati diversi parametri operativi per individuare le condizioni ottimali. Temperatura e pressione si sono rivelate determinanti, influenzando significativamente la resa del processo e la qualità dei prodotti ottenuti. Un'attenzione particolare è stata dedicata anche all'efficienza tecnico-economica ed energetica, confrontando i bilanci dell'impianto pilota con quelli delle tecnologie tradizionali di smaltimento. Questo confronto ha permesso di evidenziare il potenziale vantaggio di adottare approcci più sostenibili.

I primi test sono stati condotti utilizzando un residuo liquido organico, industrialmente noto come percolato, un fluido prodotto durante il trattamento biologico di materiali organici come il digestato e i fanghi di depurazione. Il digestato, residuo solido generato dai processi di digestione anaerobica della FORSU (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani), e i fanghi di depurazione rilasciano il percolato durante il compostaggio o altri trattamenti biologici. Questo fluido, identificato con il Codice CER 161002, rappresenta un rifiuto speciale non pericoloso, contenente sostanze organiche e inorganiche disciolte, tra cui azoto ammoniacale, composti organici volatili e tracce di metalli. Se adeguatamente trattato, il percolato non solo può essere gestito

FIGURA 2 Composizione media del syngas prodotto da SCWG del percolato



in modo sicuro, ma può anche rappresentare una risorsa per applicazioni innovative, come la produzione di idrogeno o syngas.

Durante i test, si è osservato una resa media in di circa 0,4 litri di gas per kg di percolato trattato, con una composizione media dominata da idrogeno, anidride carbonica, metano e monossido di carbonio (Figura 2). Sebbene questa resa sia inferiore ai valori riportati in letteratura, che si aggirano tra 0,5 e 0,9 Nm³ di syngas per kg di biomassa, è importante sottolineare la tipologia di percolato utilizzato nella prima campagna di prove sperimentali presenta un basso contenuto di materiale organico, con una frazione che non supera il 5% in peso.

Nel prossimo futuro, lo studio verrà ampliato per includere altre tipologie di materiali di scarto. Verranno effettuati test su digestati, fanghi di depurazione e altri rifiuti organici umidi di provenienza agro-alimentare, per valutare come la diversa natura di questi materiali possa influire sulla resa complessiva del processo. Questo approccio rappresenta un'importante frontiera nella gestione sostenibile dei rifiuti e nella valorizzazione delle risorse, con potenziali benefici per l'ambiente e il settore energetico.

Le implicazioni del progetto vanno oltre la sperimentazione stessa. La gassificazione in acqua supercritica si dimostra una tecnologia promettente per la valorizzazione dei rifiuti umidi, offrendo una soluzione innovativa e sostenibile per la produzione di energia e riducendo al contempo l'impatto ambientale dello smaltimento dei rifiuti. I risultati ottenuti suggeriscono che, con le opportune migliorie dell'impianto pilota e un maggiore perfezionamento del sistema, questa tecnologia potrebbe essere scalabile per applicazioni industriali, contribuendo alla transizione verso un futuro energetico più pulito e sostenibile.

Studio di fattibilità tecnico-economica per lo scale-up industriale

A seguito dei risultati ottenuti con l'impianto pilota, è stato avviato uno studio di fattibilità tecnica ed economica per valutare la possibilità di uno scale-up industriale della tecnologia. Il case study si basa sulle rilevazioni industriali dell'azienda partner del progetto Calabra Maceri & Servizi S.p.a. che produce biogas attraverso digestione anaerobica e compost utilizzando digestato e fanghi di depurazione provenienti da impianti urbani e industriali. L'obiettivo dello studio è analizzare l'integrazione del processo di gassificazione in acqua supercritica come soluzione per valorizzare ulteriormente i residui derivanti dalle attività dell'azienda, migliorandone l'efficienza energetica complessiva e riducendo al contempo l'impatto ambientale.

Le matrici attualmente gestite da Calabra Maceri & Servizi includono il digestato per un volume di circa 80 tonnellate al giorno. Questo materiale viene trasformato in compost per l'agricoltura biologica e venduto a un prezzo medio di 30 €/tonnellata. I fanghi di depurazione, provenienti da impianti urbani e industriali, vengono trattati con un processo di compostaggio simile, generando circa 8-11 tonnellate giornaliere di materiale, che viene venduto a un valore compreso tra 20 e 25 €/tonnellata. Infine, il percolato, generato come sottoprodotto del compostaggio, è prodotto in quantità di 3-4 tonnellate al giorno e attualmente inviato a impianti di depurazione esterni, con costi aggiuntivi per l'azienda dovuti a trasporto e trattamento.

Il quadro economico attuale evidenzia che, sebbene la vendita del compost rappresenti un'importante fonte di ricavo, con un valore medio di 30 €/tonnellata per il digestato e di 20-25 €/tonnellata per i fanghi, questi guadagni non sono sufficienti a compensare i costi operativi complessivi. La gestione del percolato, in particolare, rappresenta un onere significativo, con costi stimati tra 200 e 400 €/tonnellata.

Secondo i parametri tecnici individuati durante la sperimentazione, il processo SCWG permette di ottenere circa 0,4 litri di syngas per ogni kg di percolato trattato e, sulla base dei risultati ricavati da modelli computazionali di processo, tra 150 e 180 litri per ogni kg di fanghi o digestato contenente almeno l'80% di umidità. Su questa base, la produzione giornaliera stimata di syngas si attesta tra 13.200 e 16.400 Nm³, con un valore di mercato stimato tra 5.760 e 7.160 € al giorno, in base al prezzo corrente del syngas pari a 0,045 €/MJ[2].

Simulazioni di processo hanno dimostrato che il syngas prodotto può essere ulteriormente trasformato in metano attraverso un processo di upgrading. Durante questa fase, il

2 Syngas Prices, Historical and Current – Intratec. Disponibile su www.intratec.us/chemical-markets/syngas-price

monossido di carbonio e l'anidride carbonica reagiscono con l'idrogeno per formare metano. I dati indicano che la produzione giornaliera di metano può variare tra 3.300 e 4.600 Nm³ al giorno. Con un prezzo medio del metano derivante da syngas[3] pari a 0,85 €/Nm³, si ottiene un ricavo compreso tra 2.760 e 3.890 € al giorno. Tale conversione non solo aumenta il valore commerciale del prodotto finale, ma rende il gas adatto all'immissione nella rete nazionale, facilitandone la distribuzione e migliorandone la competitività sul mercato.

Per realizzare l'impianto su scala industriale, con capacità adeguata al trattamento di 90 tonnellate/giorno complessive di digestato e fanghi e fino a 4 tonnellate/giorno di percolato, i costi di investimento iniziali (CAPEX) sono stimati tra 6 e 10 milioni di euro. Questa stima tiene conto delle principali sezioni di impianto necessarie. Il sistema di pretrattamento costituisce una fase essenziale del processo. Esso richiede l'impiego di apparecchiature come un mulino colloidale per la riduzione dimensionale dei solidi e un sistema di omogeneizzazione per garantire un'alimentazione uniforme e con la corretta umidità. L'efficienza di questa sezione è fondamentale per evitare malfunzionamenti o inefficienze successive, soprattutto durante la fase di pompaggio al reattore. Il sistema di reazione è la sezione centrale del processo, in cui avviene la conversione delle matrici umide in syngas. L'ampliamento del sistema comporterà un adeguato dimensionamento degli scambiatori di calore e dei reattori, con possibili configurazioni in parallelo per mantenere le prestazioni operative ottimali. Sarà inoltre necessario prevedere sistemi dedicati alla rimozione degli scarti solidi accumulati, per garantire la continuità operativa e ridurre i tempi di manutenzione.

Infine, il sistema di upgrading del syngas a metano rappresenta una delle componenti più costose ma strategiche dell'impianto. Questa fase richiede reattori di metanazione con catalizzatori specifici per la conversione di monossido di carbonio e anidride carbonica in metano, nonché sistemi di purificazione avanzati a membrana per ottenere un prodotto finale conforme agli standard di immissione in rete. La necessità di resistere a condizioni operative severe e l'impiego di materiali avanzati comportano costi rilevanti, ma contribuiscono significativamente al valore commerciale del prodotto finale.

Per valutare la sostenibilità operativa di un impianto su scala industriale, sono stati stimati i costi operativi (OPEX), legati principalmente ai consumi energetici e delle utilities. Considerando il trattamento di 90 tonnellate/giorno di digestato, l'energia elettrica necessaria si attesta intorno ai 3 MW. Questo valore, tradotto in termini economici, comporta un costo annuo di circa 1,4 milioni di euro, assumendo un prezzo medio dell'energia di mercato.

Un altro fattore rilevante è il consumo di acqua per il processo e per il raffreddamento, stimato in circa 35.000 m³ annui, con un costo che supera i 75.000 euro all'anno. Questi costi rappresentano una quota significativa dell'OPEX totale, ma vengono bilanciati dai vantaggi economici derivanti dalla riduzione dei costi di smaltimento tradizionale. Infatti, in termini di bilancio economico complessivo, lo scale-up della tecnologia SCWG garantirebbe un risparmio considerevole legato al mancato smaltimento del digestato in discarica. Attualmente, il costo di smaltimento del digestato è stimato intorno a 400 euro per tonnellata. Con un trattamento di 90 tonnellate/giorno, il risparmio annuale ammonta a circa 12 milioni di euro, rappresentando un vantaggio economico sostanziale per l'azienda.

Dal punto di vista energetico, il syngas prodotto presenta un potere calorifico medio di circa 2,5 kWh/m³. Il rendimento energetico complessivo del processo è pari a 1,13 kWh di energia contenuta nel syngas per ogni kWh di energia consumata, dimostrando la sostenibilità energetica del sistema SCWG.

L'implementazione di questa tecnologia non solo consentirebbe di ridurre i costi legati allo smaltimento delle matrici umide di scarto, ma genererebbe anche significativi ricavi aggiuntivi derivanti dalla vendita di syngas e metano, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione. Con un'adeguata ottimizzazione tecnica e gestionale, lo scale-up industriale della gassificazione in acqua supercritica potrebbe rappresentare una soluzione strategica e redditizia per il trattamento dei rifiuti organici, valorizzando le risorse locali e promuovendo l'innovazione energetica a livello territoriale.

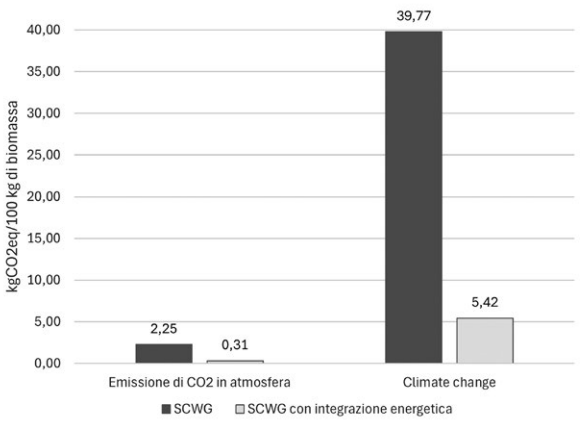
Analisi LCA e impatto ambientale del processo

L'impatto ambientale del processo SCWG è stato valutato mediante un'accurata analisi del ciclo di vita (LCA), condotta seguendo le metodologie definite dalle norme UNI EN ISO 14040-14044 e con il supporto del software OpenLCA. Lo studio è stato strutturato con l'obiettivo di analizzare le emissioni di gas serra e quantificare l'impatto del processo sul cambiamento climatico, in conformità con i parametri stabiliti dalla Direttiva UE 2018/2001 che rappresenta il quadro normativo principale dell'Unione Europea per la promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.

Nello specifico, sono stati esaminati due scenari operativi: il processo SCWG nella sua configurazione standard e una versione ottimizzata con integrazione energetica. Quest'ultima ipotesi prevede il recupero del calore residuo dalla corren-

3 Insights in the current cost of biomethane production from real industry data – BIP Europe (2023)

FIGURA 3 Principali risultati ottenuti dallo studio LCA



te in uscita dal gassificatore, con effetti diretti sulla riduzione delle emissioni e del consumo energetico complessivo. I risultati dell'analisi sono riportati in Figura 3.

Dai risultati è emerso che il quantitativo di CO_2 equivalente (CO_2eq) diminuisce sensibilmente grazie all'implementazione dell'integrazione energetica. Questo miglioramento deriva dalla riduzione del calore netto da fornire al reattore, limitando di conseguenza il consumo di energia elettrica richiesta per il funzionamento del sistema di riscaldamento elettrico. Tale aspetto assume particolare rilevanza nel contesto italiano, dove la produzione di energia elettrica è ancora fortemente legata all'utilizzo di fonti fossili, come il gas naturale, che presentano un impatto climatico significativo.

L'analisi dettagliata ha incluso anche le emissioni indirette, derivanti non solo dall'anidride carbonica, ma anche da altri gas serra come il metano e il protossido di azoto (N_2O), i quali sono stati opportunamente contabilizzati per stimare l'impatto complessivo sul cambiamento climatico. L'integrazione energetica ha dimostrato di mitigare ulteriormente queste emissioni, migliorando l'efficienza complessiva del processo e riducendo la dipendenza energetica da fonti non rinnovabili. Secondo i parametri fissati dalla Direttiva UE 2018/200, il biometano è considerato sostenibile se le emissioni sono inferiori a 24 g CO_2eq/MJ. I calcoli indicano che, per un impianto pilota con integrazione energetica finalizzato alla produzione di metano, le emissioni totali di CO_2eq risultano pari a 30 g CO_2eq/MJ. Pur superando leggermente il limite normativo, questo risultato rappresenta un dato preliminare influenzato dalle approssimazioni introdotte durante le simulazioni di processo.

È importante sottolineare che, grazie a futuri interventi di ottimizzazione del processo, come un migliore recupero energetico e l'adozione di fonti di energia rinnovabile per alimentare il sistema di riscaldamento, le emissioni potrebbero essere ulteriormente ridotte fino a raggiungere o superare gli standard richiesti dalla normativa europea. Questi risultati preliminari forniscono un quadro promettente per l'implementazione industriale della tecnologia SCWG, confermandone il potenziale per una gestione sostenibile dei rifiuti umidi e la produzione di energia pulita.