

Ricerca di Sistema elettrico



Analisi e modellazione del processo di metanazione biologica per applicazioni Power to Gas (LA 2.2)

V. Segneri, L. Colelli, P. Deiana, C. Bassano, B. Mazzarotta,
M.P. Parisi, A. Trinca, N. Verdone, G. Vilardi i



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

ANALISI E MODELLAZIONE DEL PROCESSO DI METANAZIONE BIOLOGICA PER APPLICAZIONI POWER TO GAS

Autori: Valentina Segneri, Leonardo Colelli, Barbara Mazzarotta, Antonio Trinca, Maria Paola Parisi, Nicola Verdone, Giorgio Vilardi (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente, La Sapienza Università di Roma), P. Deiana e C. Bassano, ENEA

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: Progetto Integrato Tecnologie dell'idrogeno

Linea di attività: 2.2

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti (ENEA)

Responsabile Linea di Attività: *Giorgio Vilardi, Sapienza Università di Roma*

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2002

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi, modellazione e studio dell'integrazione di processi di metanazione biologica e catalitica per applicazioni Power to Gas"

Responsabile scientifico ENEA: Claudia Bassano

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Giorgio Vilardi

Indice

1.	Risultati attesi	3
2.	Risultati ottenuti	4
3.	Prodotti attesi	6
4.	Prodotti sviluppati	6
5.	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	6
6.	Sintesi delle attività svolte	6
7.	Dettaglio delle attività svolte.....	7
	7.1 Studio delle tecnologie di metanazione e stato dell'arte.....	7
	7.2 Definizione delle assunzioni e ipotesi.....	7
	7.3 Scelta dei sistemi termodinamici e cinetici per la simulazione	7
	7.4 Descrizione della corrente di gas e modellazione degli archeobatteri metanigeni	7
	7.5 Modellazione meccanismo cinetico di biometanazione	8
	7.6 Simulazione in stato stazionario e flowsheet: condizionamento del gas, condizionamento dei batteri metanigeni, bioreattore, sezione di separazione e ricircolo	9
	7.7 Analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione	10
	7.8 Analisi di sensibilità: temperatura, pressione, tempo di residenza, rapporto H ₂ /CO ₂ , nutrienti.....	11
8.	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	13
9.	Pubblicazioni scientifiche.....	14
10.	Eventi di disseminazione	15

1. Risultati attesi

I risultati attesi per questa attività comprendono i seguenti punti:

- Analisi critica della letteratura scientifica riguardo l'applicabilità reale di modelli cinetici biologici nell'ambito della progettazione di reattori di biometanazione
- Flowsheet e simulazione allo stato stazionario in ambiente Aspen Plus di un reattore di metanazione biologica, con validazione mediante dati di letteratura o sperimentali di campo
- Analisi di sensibilità dei risultati

Il presente studio ha come obiettivo principale quello di analizzare criticamente le cinetiche del processo di biometanazione presenti in letteratura (individuando quelle maggiormente rappresentative da un punto di vista industriale e quindi di reale applicabilità per la modellazione dell'unità di processo) per procedere a una modellazione in ambiente Aspen Plus di un reattore cinetico, per una prima analisi di sensibilità dei parametri operativi (temperatura, pressione, concentrazione nutrienti, tempo di residenza, portate dei reagenti).

L'intento è fornire un'analisi dei risultati recentemente pubblicati che riguardano i processi di biometanazione biologica eseguiti utilizzando colture miste o pure, focalizzandosi sugli aspetti microbiologici e di processo. Particolare attenzione è posta sulla descrizione dei diversi microrganismi coinvolti nel processo, insieme alle relative vie metaboliche, evidenziando le loro caratteristiche cinetiche e termodinamiche specifiche. Inoltre, l'attenzione viene focalizzata sui parametri di processo che influenzano il rendimento, come il tipo di reattore, il tipo di diffusore e la scelta tra l'iniezione di idrogeno (in situ o ex situ), nonché le diverse condizioni operative. Nel corso dell'analisi, vengono fornite spiegazioni sulle variazioni di rendimento osservate nella letteratura scientifica, identificando eventuali ostacoli tecnici e proponendo possibili soluzioni per superare tali limitazioni.

Questa attività si prefigge di fornire una panoramica esaustiva delle conoscenze attuali nel campo della biometanazione, al fine di contribuire alla comprensione e allo sviluppo di questa promettente tecnologia nel contesto dell'energia rinnovabile e colmare il gap riscontrato nella letteratura scientifica.

2. Risultati ottenuti

I risultati ottenuti per questa attività sono coerenti con i risultati attesi. In particolare, il lavoro svolto ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

- Analisi critica della letteratura scientifica riguardo l'applicabilità reale di modelli cinetici biologici nell'ambito della progettazione di reattori di biometanazione
- Flowsheet e simulazione allo stato stazionario in ambiente Aspen Plus di un reattore di metanazione biologica, con validazione mediante dati di letteratura o sperimentali di campo
- Analisi di sensibilità dei risultati

L'attività svolta in questo lavoro ha sottolineato la possibilità di utilizzare l'ambiente di simulazione Aspen Plus nel campo della tecnologia dei processi di biometanazione. In base alla conoscenza degli autori, finora non è stata pubblicata alcuna simulazione cinetica di un processo di metanogenesi biologica in un ambiente simulativo di questa concezione.

Questo concetto di simulazione si è dimostrato uno strumento prezioso per migliorare il bilanciamento elementare dei bioprocessi stimando le velocità di reazione, la conversione e l'efficienza del bioprocesso.

In particolare, rappresenta un valido strumento per l'implementazione di analisi di sensibilità, per l'individuazione dei parametri operativi caratteristici e per l'ottimizzazione del processo.

L'elevata efficienza di oltre il 70% ha dimostrato, inoltre, che la metanogenesi biologica è un'alternativa promettente alla trasformazione chimica che offre anche una maggiore tolleranza alle impurità. Aspen Plus si è rivelato uno strumento adattabile e utile per eseguire simulazioni adattive dell'efficienza dei bioprocessi implementando al contempo modelli cinetici di formazione del prodotto ottenuti sperimentalmente su scala di laboratorio. Sebbene il modello simulato non possa fornire informazioni dettagliate sul processo biologico stesso, esso si è dimostrato molto utile per la disposizione e lo studio del bioprocesso integrato. Una simulazione dettagliata potrebbe essere utilizzata non solo per l'ampliamento del processo, ma anche per l'ottimizzazione. Anche l'utilizzo per bilanciare bioprocessi simili potrebbe essere di grande interesse.

La combinazione della simulazione Aspen Plus con l'indagine fisiologica in condizioni di bioreattore è un nuovo approccio per lo scale-up dei bioprocessi e riassumendo i risultati, è stato dimostrato che Aspen Plus, sebbene usato raramente in questo campo, è uno strumento prezioso nella tecnologia dei bioprocessi. Visti i tempi di residenza significativi per tale processo e l'impossibilità di arrivare a conversione completa, sarà fondamentale analizzare l'accoppiamento fra il processo di biometanazione e quello di metanazione catalitica nello studio futuro.

I risultati ottenuti dall'analisi di sensibilità sono riportati nella seguente figura.

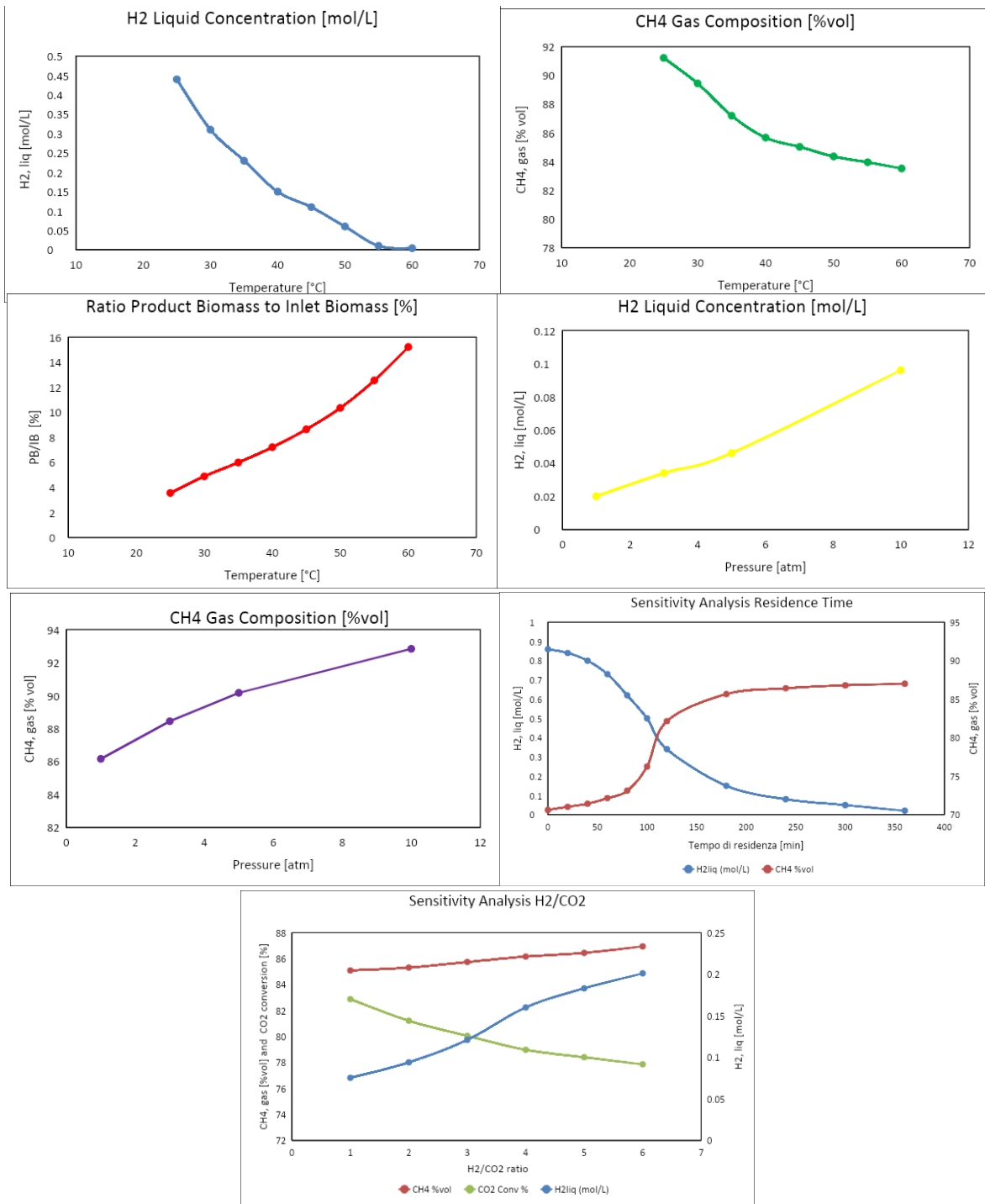


Figura 1. Risultati ottenuti dall'analisi di sensibilità

3. Prodotti attesi

I prodotti attesi per questa attività comprendono i seguenti punti:

- La stesura del documento “Deliverable” nel quale è descritto in dettaglio il lavoro svolto per questa attività;
- La simulazione in stato stazionario che permette di analizzare il processo considerato mediante l’utilizzo del software Aspen Plus.

4. Prodotti sviluppati

I prodotti sviluppati hanno rispettato i prodotti attesi descritti in precedenza:

- Documento di testo “Deliverable”;
- Simulazione in stato stazionario in ambiente di simulazione Aspen Plus.

5. Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il presente lavoro non ha subito alcuno scostamento dalle attività prefissate.

6. Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte sono le seguenti:

- Studio delle tecnologie di metanazione e stato dell’arte
- Definizione delle assunzioni e ipotesi
- Scelta dei sistemi termodinamici e cinetici per la simulazione
- Descrizione della corrente di gas e modellazione degli archeobatteri metanigeni
- Modellazione meccanismo cinetico di biometanazione
- Simulazione in stato stazionario e flowsheet: condizionamento del gas, condizionamento dei batteri metanigeni, bioreattore, sezione di separazione e ricircolo
- Analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione
- Analisi di sensibilità: temperatura, pressione, tempo di residenza, rapporto H₂/CO₂, nutrienti

La simulazione del processo è stata condotta utilizzando il software di simulazione di processo Aspen Plus®, basandosi su un modello cinetico sviluppato in base ai dati sperimentali precedentemente pubblicati. Il modello cinetico implementato permette di stabilire una relazione tra la velocità di produzione di metano e biomassa e le concentrazioni dei reagenti limitanti.

7. Dettaglio delle attività svolte

Nella seguente sezione si illustrano in dettaglio le attività svolte, sulla base dei risultati ottenuti per questo lavoro. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla lettura del “Deliverable” associato a questo documento.

7.1 Studio delle tecnologie di metanazione e stato dell’arte

La prima fase di questo lavoro ha previsto uno studio dello stato dell’arte e un approfondimento delle tecnologie di metanazione attualmente presenti in letteratura. In questo modo è stato possibile contestualizzare l’attività svolta ed evidenziare i progressi di questa tecnologia. Inoltre, particolare attenzione è stata posta sull’utilizzo del simulatore Aspen Plus, il quale rappresenta uno strumento di simulazione utilizzato regolarmente nell’ingegneria dei processi chimici e adatto per il bilanciamento dei bioprocessi.

7.2 Definizione delle assunzioni e ipotesi

Al fine di procedere con la simulazione del sistema è stato necessario operare delle assunzioni e ipotesi di carattere tecnico con lo scopo di favorire l’implementazione del processo studiato. Di conseguenza, sono state individuate le principali condizioni di base come temperatura e pressione, oltre alle assunzioni riguardanti il sistema termodinamico e cinetico. Particolare attenzione è stata posta sull’implementazione del sistema biologico atto a descrivere le caratteristiche dei microrganismi utilizzati per la metanazione. In ambiente di simulazione è stato possibile fornire una comprensione fondamentale del processo e dei modi in cui i parametri, come la temperatura, pressione operativa, la diluizione dei gas reagenti e la quantità di nutrienti, influenzano le prestazioni del processo. La taglia del processo è stata fissata assumendo i seguenti valori: 0.4 kg/h di gas di alimentazione (senza idrogeno) e 2.7 kg/h di una miscela contenente H₂ e CO₂ al 20% di CO₂.

7.3 Scelta dei sistemi termodinamici e cinetici per la simulazione

Nel presente lavoro sono state utilizzate informazioni dalla letteratura per la scelta ottimale del sistema termodinamico, e per confermare la validità dei risultati forniti dal simulatore, essi sono stati confrontati con i risultati sperimentali. Il sistema termodinamico scelto per il processo in esame è:

- ELECNRTL, utilizzato per il calcolo dei coefficienti di attività nella fase liquida
- RSK, il quale si basa su un’equazione cubica nel volume, l’equazione di stato di Soave-Redlich-Kwong.

Per i calcoli della solubilità del gas è stato fatto riferimento alla legge di Henry.

Per questo studio ci si è basati su un modello cinetico sviluppato in base ai dati sperimentali precedentemente pubblicati. Il modello cinetico implementato permette di stabilire una relazione tra la velocità di produzione di metano e biomassa e le concentrazioni dei reagenti limitanti.

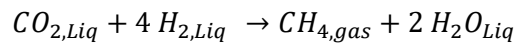
7.4 Descrizione della corrente di gas e modellazione degli archeobatteri metanigeni

La modellazione degli archeobatteri metanigeni (*Methanobacterium thermoautotrophicum*), è stata modellata sul simulatore partendo dai dati riportati in letteratura ed utilizzando i composti presenti nella

banca dati di Aspen Plus®. Sono stati considerati degli studi sperimentali presenti in letteratura in cui vengono analizzati i valori della Ultimate Analysis e la sua composizione biochimica. Di conseguenza, le simulazioni sono state inizializzate modellando l'alimentazione degli archeobatteri metanigeni, prima con una corrente con "Non conventional compound" inserendo i dati di ultimate analysis, e poi convertita in una corrente convenzionale all'interno di un reattore RYield, il quale scompone la corrente in ingresso in n composti modello, scelti dal database Aspen, rispettando il bilancio atomico e la caratterizzazione biochimica. Le simulazioni sono state inizializzate modellando l'alimentazione degli archeobatteri metanigeni.

7.5 Modellazione meccanismo cinetico di biometanazione

Il meccanismo cinetico di biometanazione ha previsto una modellazione al fine di poter eseguire un'analisi in ambiente di simulazione. Il fulcro del processo in esame è la reazione di metanazione:



Il meccanismo cinetico di reazione utilizzato consiste in un modello integrato, tenendo conto del trasporto di materia nella fase liquida reagente, essendo la metanogenesi biologica un bioprocesso che si svolge tendenzialmente in condizioni di limitazione del trasferimento di gas.

Per descrivere la "methane evolution rate (MER)" globale è stata utilizzato il seguente modello:

$$r_D = \alpha * \left(G_{IN} - \frac{1}{2} * r_D * V_L \right)^\beta * \left(\frac{1}{2} * \left(y_{D,IN} + \frac{G_{IN} * y_{D,IN} - r_D * V_L}{G_{IN} - r_D * V_L} \right) * \frac{P}{H_D} - \frac{(D + Y'_{X/D} * m) * k_D}{\mu^{max} - D} \right)$$

Poiché la forma dell'equazione cinetica di reazione non rientra nelle classiche tipologie presenti di default su Aspen Plus, ai fini dell'implementazione è stato utilizzato il formato GENERAL-CUSTOM.

La simulazione della crescita di *M. thermoautotrophicum* è stata simulata modellando la corrente in uscita dal fotobioreattore, andando a variare la quantità delle proteine presenti. Infatti, nel reattore i batteri metanigeni accrescono, consumando biomassa e nutrienti, e agiscono come biocatalizzatori nella reazione di biometanazione.

Quindi, per simulare le reazioni pertinenti alla crescita dei batteri metanigeni, il primo passo è stato quello di rimodellare una corrente in uscita dal bioreattore, ipotizzando che l'unico gruppo di composti a prendere parte alle reazioni di accrescimento fosse quello delle proteine (essendo responsabili dell'accrescimento della biomassa).

Una volta modellata la Chlorella dopo l'accrescimento, sono state modellate le reazioni che andassero a modellare questa crescita. Considerando come reagenti le tre proteine (Cisteina, Treonina e Glicina) che diminuiscono ed il substrato costituito dalla corrente di gas.

Per descrivere l'intero processo di reazione è stato il modello cinetico di Monod:

$$-r_s = \frac{\mu_{max} * x * s}{Y_{s/x} * (K_S + s)}$$

L'implementazione della cinetica di Monod per l'accrescimento della biomassa in ambiente Aspen Plus, ha previsto l'utilizzo del modello di Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LHHW) definita come:

$$r = \frac{(kinetic\ factor)(driving\ force\ expression)}{(adsorption\ term)}$$

Considerando di trattare reazioni non reversibili $A + B \rightarrow C + D$, il modello di LHHW si modifica come di seguito:

$$r = \frac{k' e^{-\frac{E}{RT}} \{k_f [A][B]\}}{\{1 + k_A [A] + k_B [B] + k_C [C] + k_D [D]\}^n}$$

La cinetica di Monod è stata dunque riportata nella seguente forma:

$$r = \frac{\mu_{max} \left\{ \frac{1}{Y_{s/x} K_s} [S][X] \right\}}{\left\{ 1 + \frac{1}{K_s} [S] \right\}}$$

7.6 Simulazione in stato stazionario e flowsheet: condizionamento del gas, condizionamento dei batteri metanigeni, bioreattore, sezione di separazione e ricircolo

Di seguito verranno descritte le apparecchiature utilizzate durante la simulazione e le loro condizioni operative. Il programma ha permesso di prevedere portate, composizioni e proprietà delle correnti, nonché dimensioni e funzionamento delle apparecchiature. Alcuni parametri fisici sono stati estrapolati dai dati presenti in letteratura, mentre altri sono stati dedotti dalla letteratura e poi ottimizzati. Il flowsheet completo del processo simulato in stato stazionario mediante l'utilizzo del software Aspen Plus è riportato nella seguente figura.

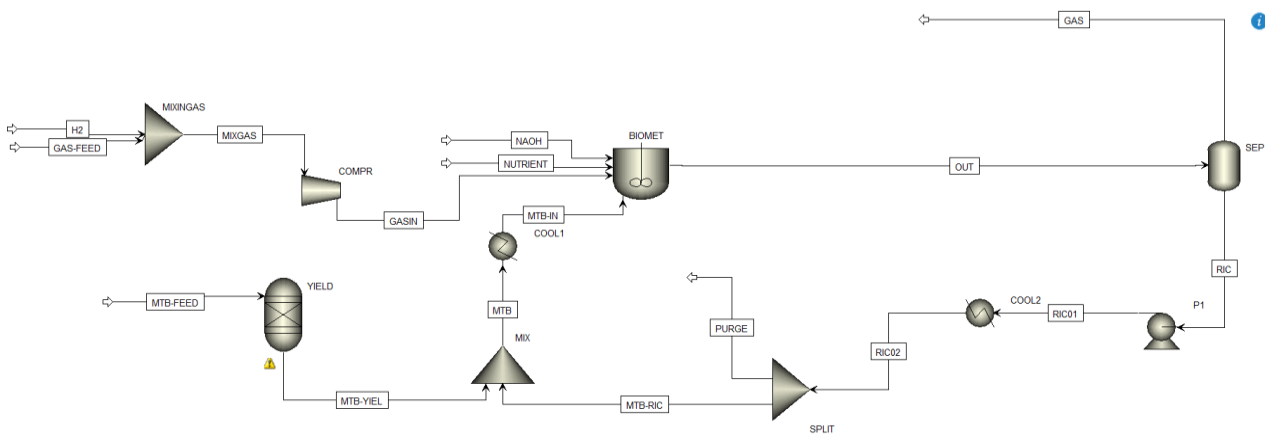


Figura 2. Flowsheet completo del processo di metanazione in ambiente Aspen Plus

Di seguito vengono riassunte le caratteristiche delle principali sezioni del flowsheet.

- **Condizionamento del gas:** la corrente di gas (GAS-FEED) proveniente dal trattamento di digestione anaerobica, che si trova 40°C e 1 bar, viene miscelata con la corrente di idrogeno in quantità regolata da un controllore, tale per cui il rapporto molare tra H2 e CO2 sia pari a 4:1 per rispettare la

stechiometria della reazione. Dopo la miscelazione, la corrente viene compressa alla pressione desiderata nell'unità operativa, ed immessa nel reattore insieme alla biomassa, ai nutrienti e alla soda per regolare il pH.

- **Condizionamento dei batteri metanigeni:** la corrente rappresentante la biomassa batterica viene modellata come un composto non convenzionale attraverso la Ultimate Analysis. Per poter prevedere le reazioni di accrescimento della biomassa è stato necessario convertire la corrente in composti convenzionali. Tale operazione viene effettuata all'interno del reattore RYield fittizio, mediante la risoluzione del bilancio atomico in modo da rispettare la ultimate analysis e la composizione biochimica. La corrente uscente dal reattore (MTB_YIEL) rappresenta la quantità di make up di batteri metanigeni che vengono reimmessi nel reattore rispetto al ricircolo. Per ovviare ad alcune limitazioni imposte dall'ambiente di simulazione utilizzato, la corrente di batteri viene fatta entrare nel reattore in continuo e ricircolata per un certo tempo, inoltre si è ipotizzato che la biomassa entrante nel reattore, accresca ed esca in continuo, prevedendo un ricircolo in modo da garantire il giusto tempo di residenza, maggiore rispetto a quello gas.
- **Bioreattore:** nell'unità di reazione "BIOMET", il gas viene miscelato con la biomassa batterica e i nutrienti, ed il pH della reazione viene regolato mediante l'aggiunta di NaOH. Nel reattore i gas in ingresso H_2 e CO_2 vengono convertiti in CH_4 , H_2O e biomassa. Il bioreattore è stato modellato mediante l'utilizzo di un reattore CSTR nel quale sono state implementate mediante un modello cinetico le reazioni di biometanazione e accrescimento della biomassa. Il reattore lavora ad una temperatura di $40^\circ C$ ed alla pressione di 1 bar, con un tempo di residenza di 180 minuti. Il volume del reattore risulta pari a $86\ m^3$.
- **Sezione di separazione e ricircolo:** a valle del reattore è stato implementato un sistema di "trattenimento cellulare" che simula una fase di filtrazione a flusso tangenziale (costituita dal separatore e ricircolo nel diagramma di flusso). La corrente "OUT" uscente dal reattore viene inviata al separatore dove si ha la separazione della corrente gassosa contenente CH_4 e H_2O prodotti, nonché H_2 , H_2S , NH_3 e CO_2 in eccesso, dalla corrente liquida contenente la biomassa, la quale viene ricondizionata, spurgata per evitare accumuli, e miscelata con la corrente di makeup. La separazione avviene tramite l'utilizzo di una unità di flash che lavora a $30^\circ C$ e ad 1 bar. In questo modo si riesce a separare la corrente contenente i volatili, dalla corrente contenente i microrganismi metanigeni.

7.7 Analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione

Per validare il meccanismo di reazione selezionato, sono stati confrontati i risultati delle rese e velocità di reazione in due diverse condizioni con i valori sperimentali riportati in letteratura scientifica, al fine di verificare l'affidabilità del meccanismo implementato nel modello. Dall'analisi emerge come il modello riesca a replicare i dati sperimentali con coerenza e un buon grado di affidabilità.

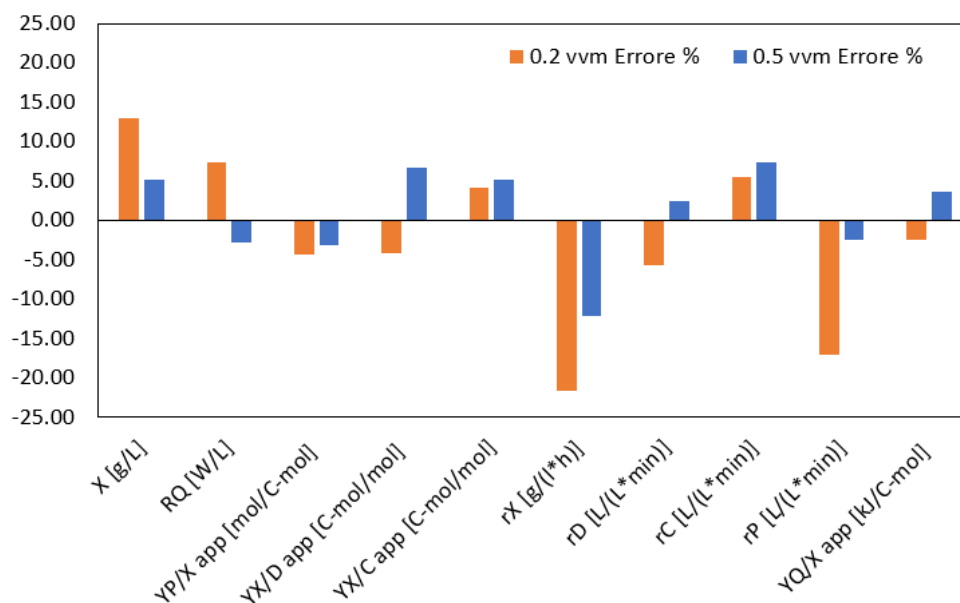


Figura 3. Confronto tra i dati sperimentali e i dati di simulazione.

7.8 Analisi di sensibilità: temperatura, pressione, tempo di residenza, rapporto H₂/CO₂, nutrienti

L'ottimizzazione e l'analisi della sensibilità si sono dimostrate fondamentali per lo sviluppo del processo e hanno permesso di approfondire le prestazioni dell'impianto implementato e il comportamento del reattore in diverse condizioni operative. In particolare, è stata eseguita un'indagine sulla variazione di temperatura, pressione, rapporto di idrogeno rispetto alla CO₂ e quantità di nutrienti. In questo modo è stata studiata l'incidenza sulle rese della fase gassosa e della biomassa da accrescimento, la conversione in metano e altri parametri operativi caratteristici del processo di biometanazione. Di seguito vengono riassunte le caratteristiche principali dell'analisi di sensibilità:

- Temperatura:** all'aumentare della temperatura aumenta la conversione di CO₂, ma l'andamento della resa in CH₄ non è direttamente proporzionale perché all'aumentare della temperatura si ha una riduzione della solubilità dell'H₂, di conseguenza la maggiore conversione della CO₂ è dovuta all'aumento della resa in biomassa da accrescimento. Globalmente, all'aumentare della temperatura, rispettando i range di vita dei batteri mesofili o termofili (25-60°C), si riscontrano risultati positivi nella simulazione della biometanazione, comportando una maggiore efficienza termica ed economica.
- Pressione:** L'impatto della pressione favorisce la solubilità del gas e contribuisce ad aumentare la quantità di gas disciolto disponibile per i microrganismi. Di conseguenza, un aumento della pressione del reattore porta ad un aumento della velocità di reazione del metano. D'altra parte però l'aumento della pressione comporta maggiori costi dovuti alla richiesta energetica di compressione. In questi casi, l'ottimizzazione viene effettuata valutando se l'aumento della velocità di reazione di produzione

del metano dovuto all'aumento della pressione del reattore compensi la maggiore energia di compressione.

- **Tempo di residenza:** all'aumentare del tempo di residenza della fase gassosa, si ha un aumento della conversione della CO_2 , e un aumento della produzione di metano. Tale aumento non è lineare, bensì si può individuare un range di tempi nel quale si ha la massima variazione, oltre il quale si raggiunge una condizione di plateau.
- **Rapporto H_2/CO_2 :** Il rapporto tra i due reagenti, idrogeno e anidride carbonica, nel processo di biometanazione è un fattore chiave che influenza la produzione di metano. In particolare, aumentando il rapporto molare tra i due reagenti, ovvero aumentando l'idrogeno e/o riducendo la CO_2 , si verifica un aumento della solubilità dell'idrogeno nella fase liquida e una riduzione della conversione della CO_2 . Questo comporta un andamento della produzione di CH_4 circa costante. Tuttavia, è importante notare che il rapporto H_2/CO_2 ottimale può variare a seconda delle condizioni specifiche del reattore e dei tipi di microrganismi presenti nel sistema.
- **Nutrienti:** Per controllare le perdite di azoto dal mezzo del bioreattore sotto forma di NH_3 , sono state eseguite simulazioni in Aspen Plus per diverse portate di NH_4Cl in funzione del pH di reazione ad una velocità di diluizione fissa. I valori simulati mostrano una percentuale decrescente dell'azoto alimentato trasferito nella fase gassosa a portate crescenti di NH_4Cl , con pH e portate costanti. Ciò è spiegato dall'aumento della concentrazione di NH_4Cl e, in assoluto, da una maggiore quantità di moli prelevate dalla fase liquida nel bioreattore (mezzo di reazione).

8. Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nessuna consulenza è stata utilizzata per le attività sopra descritte.

9. Pubblicazioni scientifiche

L'attività svolta ha contribuito alla stesura del lavoro "Modeling and analysis of the biological methanation process for Power to Gas applications " da pubblicare prossimamente sul Journal "Energy Conversion and Management".

10. Eventi di disseminazione

Il lavoro svolto per questa attività è stato utilizzato in vista del seguente congresso internazionale:
“CHISA 2024: 27th International Congress of Chemical and Process Engineering, Dates: Sunday, August 25, 2024 - Thursday, August 29, 2024, Venue: Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic”