

PRODUZIONE SOSTENIBILE DI ENERGIA ELETTRICA MEDIANTE GASSIFICAZIONE DI BIOMASSE E CELLE A COMBUSTIBILE

P.U. Foscolo*, A. Germanà*, G. Braccio° e D. Matera°

*Università dell'Aquila, 67100 L'Aquila, foscolo/germana@ing.univaq.it

°Centro Ricerche ENEA, Trisaia, 75025 Policoro (MT), braccio/matera@trisaia.enea.it

SOMMARIO

Questo lavoro riassume i risultati ottenuti fino ad oggi nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato in parte dalla Commissione Europea (Contratti JOR3-CT97-0196 e ENK5-CT2000-00314) e ora anche dal MIUR (FISR 2004), imperniato sulla realizzazione ed esercizio di un impianto pilota da 500 kW termici, localizzato presso il Centro Ricerche ENEA della Trisaia. L'impianto comprende: una sezione di gassificazione con vapor d'acqua della biomassa (gusci di mandorle, scarti legnosi), in reattore a letto fluidizzato circolante e in presenza di un catalizzatore a base di nichel, sviluppato allo scopo, che consente la produzione di un combustibile gassoso ricco in idrogeno (40% in volume del gas secco) e praticamente privo di composti organici condensabili (peci o "tar"); una sezione di "clean-up" del gas, ad alta temperatura per aumentare l'efficienza termica della conversione, finalizzata all'abbattimento del particolato solido e delle tracce di componenti acidi (HCl, H₂S); una cella a combustibile a carbonati fusi, da 125 kW elettrici, operante anch'essa ad alta temperatura (650°C) e perciò in grado di accettare integralmente, come combustibile anodico, il gas prodotto nella sezione di gassificazione, attualmente in fase di integrazione nell'impianto di produzione e pulizia del gas, già esistente.

INTRODUZIONE

Le biomasse crescono immagazzinando energia solare e rappresentano quindi una fonte di energia abbondante, ben distribuita, e rinnovabile: per queste loro caratteristiche possono costituire una alternativa credibile alle fonti fossili, in vista della affermazione di modelli di sviluppo sostenibili.

Le biomasse di rifiuto (scarti forestali, sottoprodotti del settore agro-alimentare, combustibili derivati da rifiuti urbani) costituiscono una materia prima importante in tutti quei Paesi, come ad esempio quelli Mediterranei, in cui scarsa è la disponibilità di biomasse vergini appositamente coltivate per scopi energetici. Inoltre, il loro utilizzo consente di evitare i costi connessi con lo smaltimento in discarica e, quindi, contribuisce positivamente al bilancio economico del processo di conversione ad energia.

Lo studio della integrazione diretta tra gassificazione di biomasse e celle a combustibile riveste particolare importanza per lo sviluppo delle tecnologie di conversione delle biomasse e di celle a combustibile affidabili, efficienti e competitive sul piano dei costi [1,2].

In effetti, l'accoppiamento celle a combustibile – gassificazione di biomasse, una volta che alcuni specifici progressi tecnologici siano stati raggiunti, rappresenta un sistema per la generazione di energia elettrica caratterizzato da elevata efficienza e bassissimo impatto ambientale, a causa della assenza quasi completa di emissioni di gas serra, considerando l'intero ciclo di produzione e consumo delle biomasse.

Il progetto è mirato alla dimostrazione della fattibilità tecnica della integrazione di un processo catalitico di gassificazione con vapore delle biomasse con una cella a combustibile del tipo a carbonati fusi, per la generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Il raggiungimento di questo obiettivo implica la progettazione e gestione di un impianto pilota integrato, e un programma strettamente connesso di attività di ricerca focalizzate su alcuni aspetti chiave per la ottimizzazione del processo stesso e delle sue prestazioni [3].

Pertanto, insieme con la realizzazione dell'impianto, sono state svolte ricerche di laboratorio mirate alla preparazione e caratterizzazione di un catalizzatore Ni/Olivina, che per le sue caratteristiche di basso costo, resistenza all'abrasione meccanica, facilità di produzione su larga scala (senza problemi di smaltimento di solventi nocivi) consente un impiego ottimale nel letto fluidizzato del reattore di gassificazione [4].

Il comportamento fluido-dinamico di quest'ultimo è stato studiato approfonditamente mediante un prototipo "freddo" operante in condizioni di similitudine dinamica, nonché attraverso un modello matematico rigoroso che considera gli aspetti fisici, chimici e di scambio termico.

L'intero sistema integrato di conversione è stato oggetto di approfonditi studi di simulazione e ottimizzazione.

I partecipanti al progetto di ricerca sono Università, Industrie, e l'ENEA. La Tabella 1 indica la composizione del Consorzio e le funzioni principali svolte da ciascuna organizzazione.

OBIETTIVI SPECIFICI DEL PROGETTO

La gassificazione catalitica delle biomasse

Tra tutti i processi di conversione delle biomasse in un vettore di energia chimica direttamente utilizzabile nella generazione di energia elettrica, la gassificazione ad alta temperatura (800-900°C) è senz'altro quello più prossimo alla applicazione su

larga scala.

Tabella 1: Struttura del progetto di ricerca

Istituzione	Funzioni nel progetto
Università di L'Aquila (Italia)	Coordinazione del progetto; progettazione impianto pilota integrato; studi di laboratorio sulla gassificazione catalitica.
Università Tecnica di Vienna (Austria)	Progettazione e realizzazione del gassificatore FICFB (<i>fast internally circulating fluidized bed</i>); Simulazione del sistema integrato.
University College London (Gran Bretagna)	Modello freddo e simulazione CFD (<i>computational fluid dynamics</i>) del gassificatore.
Università di Strasburgo (Francia)	Preparazione e caratterizzazione del catalizzatore Nichel/Olivina.
Ansaldo Ricerche Srl Genova (Italia)	Sistema di pulizia a caldo del gas: eliminazione a secco dei composti acidi.
Pall Schumacher GmbH Cralsheim (Germania)	Sistema di pulizia a caldo del gas: eliminazione del particolato solido per filtrazione.
ENEA – Ente nazionale per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente Trisaia (Italia)	Assemblaggio e conduzione dell'impianto pilota integrato.
Ansaldo Fuel Cells SpA Genova (Italia)	Progettazione e realizzazione dello <i>stack</i> della cella a combustibile a carbonati fusi (MCFC).

Quando una particella di biomassa viene riscaldata fino a tali livelli di temperatura, dapprima si verifica una abbondante produzione di vapori organici (prodotti primari della pirolisi), e, in quantità minori, di carbone vegetale e ceneri. L'analisi chimica mostra infatti che oltre l'80% in peso delle biomasse è costituito da materia volatile.

Successivamente, in presenza di vapor d'acqua, i prodotti della devolatilizzazione subiscono reazioni di *cracking* e *reforming*, con produzione di gas permanenti (idrogeno, ossido di carbonio – syn-gas – anidride carbonica) e idrocarburi leggeri (metano), e di polimerizzazione, con formazione di composti organici ossigenati, ad alto peso molecolare, che costituiscono la frazione, indesiderata, di *tar* (peci). Per ridurre la produzione di tar, bisogna operare a livelli elevati di temperatura, con rapido riscaldamento delle particelle di biomassa, nonché in presenza di vapore e di sostanze con attività catalitica per le reazioni di reforming.

Anche il carbone reagisce con il vapor d'acqua per formare ulteriori quantità di idrogeno e ossido di carbonio, ma queste reazioni eterogenee hanno una cinetica più lenta.

La gassificazione è un processo globalmente endotermico. Diverse sono le soluzioni adottate in pratica per fornire la necessaria quantità di calore. La più comune consiste nell'alimentare al reattore una portata sub-stoichiometrica di aria, in modo da bruciare una parte della biomassa. Lo svantaggio principale risiede nella diluizione del gas

combustibile prodotto con una notevole quantità di azoto (circa 50% in volume).

Rispetto alla combustione, che trasforma direttamente l'energia chimica della biomassa in energia termica, la gassificazione offre i vantaggi legati all'utilizzo di tecnologie più efficienti per la generazione di energia elettrica: motori a combustione interna, turbine a gas, celle a combustibile, cicli combinati. Inoltre, la portata di gas è minore, così che i trattamenti di purificazione risultano meno onerosi.

La tipologia di reattori maggiormente utilizzata per la realizzazione di processi di gassificazione in larga scala è quella a letto fluidizzato, caratterizzata da:

- ottimo mescolamento del letto;
- omogeneità di temperatura;
- elevate velocità di riscaldamento della biomassa;
- possibilità di aggiunta di un catalizzatore nel letto;
- possibilità di circolazione interna ed esterna del materiale costituente il letto.

A fronte di questi vantaggi, vanno considerate la elutriazione delle particelle fini (inclusi carbone e ceneri) con il gas combustibile, il controllo della pezzatura della biomassa alimentata, l'accuratezza della progettazione e della gestione dell'apparecchiatura.

L'impianto pilota comprende un gassificatore da 500 kW termici, caratterizzato da un letto di materiale solido (inerte e/o con proprietà catalitiche [5]) fluidizzato, circolante tra due zone distinte: quella di gassificazione vera e propria, dove avviene la decomposizione termica della biomassa in corrente di vapor d'acqua, e quella di combustione del carbone residuo e di un eventuale combustibile addizionale, dove è utilizzata aria come agente di fluidizzazione. In quest'ultima il materiale del letto è trascinato dalla corrente gassosa (*fast fluidized bed*), separato dai fumi in testa al reattore, e ricircolato nella zona di gassificazione, alla quale apporta il necessario input di energia termica. Il salto di temperatura tra le due zone è di circa 50-100°C [6].

Il principio di funzionamento del gassificatore è illustrato in Figura 1 [7]. Questo assetto del reattore consente di evitare la diluizione del gas combustibile con l'azoto dell'aria.

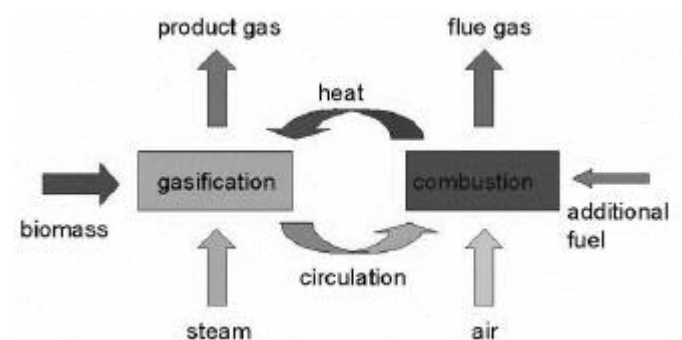


Figura 1: Principio di funzionamento del gassificatore FICFB.

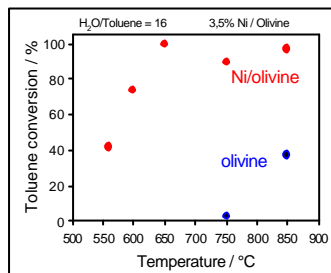
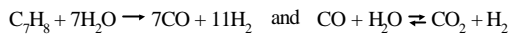
Per ridurre la quantità di composti organici ad alto peso molecolare nel gas combustibile prodotto, è stato preparato e caratterizzato un catalizzatore a basso costo in grado di operare alle condizioni di esercizio del gassificatore [8,9].

Come mostrano i risultati illustrati in Figura 2, ottenuti in laboratorio con riferimento al toluene, assunto come composto rappresentativo di tutti i costituenti il tar, questo catalizzatore, diversamente dall'Olivina naturale, è in grado di convertire

completamente la struttura ciclica dell'anello aromatico, e con attività notevolmente più elevata; i prodotti finali sono ossido di carbonio, anidride carbonica e idrogeno.

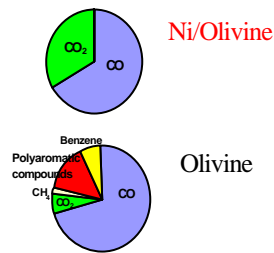
In tal modo, l'energia chimica del tar viene utilizzata per aumentare il rendimento del processo di gassificazione, e non è persa, come invece accadrebbe se si utilizzassero operazioni di semplice separazione del tar dal gas, con il problema aggiuntivo in questo caso di dover smaltire sotto-prodotti difficili da trattare.

Tar reforming Steam reforming of toluene



- high activity of **Ni/Olivine** in toluene reforming at 800°C
- stability (no deactivation) after 7 h on stream

Selectivity 850°C



- total toluene conversion to permanent gases CO₂, CO and H₂ with **Ni/Olivine** catalyst

Figura 2: Attività del catalizzatore Ni/Olivina nella distruzione del tar.

Come effetto collaterale, la presenza del catalizzatore nel reattore di gassificazione determina la riduzione della frazione degli idrocarburi leggeri, in particolare il metano, e un ulteriore contributo alla resa in gas di sintesi.

Campioni di catalizzatore Ni/Olivina sono stati adoperati in numerosi test di gassificazione catalitica, utilizzando un impianto da banco operante in continuo, illustrato in Figura 3.

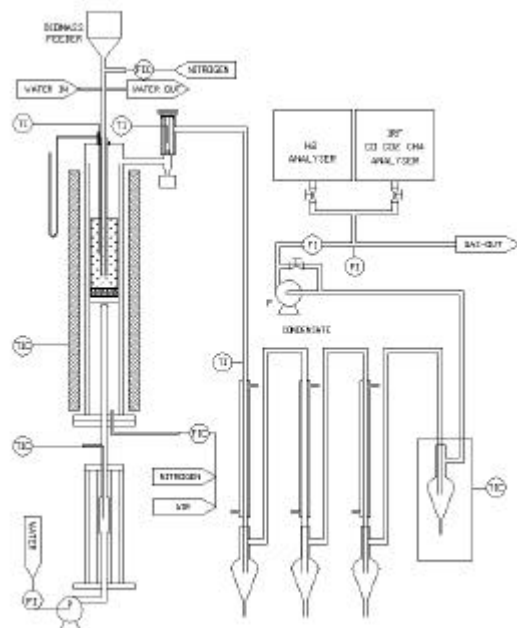


Figura 3: Impianto da banco di gassificazione.

Questi test hanno confermato l'assenza di fenomeni rilevanti di disattivazione del catalizzatore nel tempo, legati in particolare alla deposizione di *coke* sulla superficie attiva; le determinazioni analitiche *after test* hanno mostrato che questo fenomeno è irrilevante, a causa della elevata dispersione delle particelle di nichel sulla superficie del catalizzatore e del loro legame con la matrice cristallina della Olivina.

I test di laboratorio hanno anche mostrato che sono necessarie temperature di gassificazione superiori a 750°C per ridurre il contenuto di tar a meno di 500 mg/Nm³ di gas combustibile.

E' stata quindi ottimizzata la procedura di produzione del catalizzatore su larga scala, producendone una quantità totale dell'ordine di mezza tonnellata. Ciò ha consentito di effettuare alcune campagne di prove in scala pilota, con il gassificatore FICFB. Alcuni risultati, rappresentativi della qualità del gas, sono riportati in Figura 4.

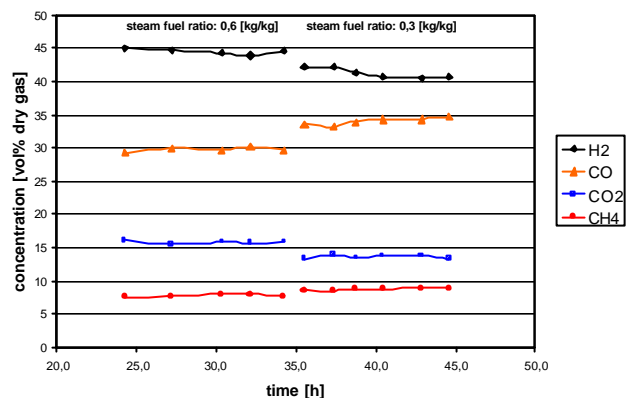


Figura 4: Composizione del gas combustibile.

I test effettuati in scala pilota hanno confermato i risultati ottenuti in laboratorio con l'impianto da banco, in particolare l'effetto positivo del catalizzatore Ni/Olivina sul tenore di idrogeno nel gas (oltre 40% in volume) e sulla riduzione del tar (meno di 500 mg/Nm³ di gas secco). La temperatura di gassificazione è stata fissata a 850°C e il rapporto vapore/biomassa è stato mantenuto nell'intervallo 0.3-0.6. La produzione di gas secco è risultata compresa nell'intervallo 1.2-1.5 Nm³/kg di biomassa, con potere calorifico inferiore di circa 13 MJ/Nm³.

Nella zona di combustione, il livello di temperatura necessario per mantenere le suddette condizioni di gassificazione è oscillato nell'intervallo 900-930°C, a conferma della buona circolazione del materiale del letto tra le due zone.

La concentrazione di azoto nel gas combustibile ha raggiunto il valore del 5% in volume, stimato in fase di progetto.

Dal punto di vista fluido-dinamico, le condizioni operative del gassificatore FICFB sono state studiate attraverso un modello freddo in plexiglas, che opera in condizioni di similitudine geometrica e dinamica con il reattore dell'impianto pilota integrato della Trisaia. In particolare, è stato verificato l'effetto di deviazioni rispetto alle condizioni operative nominali.

La simulazione CFD della sezione di gassificazione è stata effettuata attraverso lo sviluppo di un modello numerico bidimensionale, implementato su un software commerciale. Le condizioni al contorno sono state rese compatibili con la

particolare geometria del gassificatore. Inoltre, è stata descritta la presenza di due fasi solide distinte nel letto: il catalizzatore Ni/Olivina e le particelle di combustibile, di dimensioni maggiori e di densità minore. Si è anche tenuto conto della notevole portata di gas sviluppata per effetto del fenomeno della devolatilizzazione della biomassa [10]. La cinetica della pirolisi è stata aggiunta al modello fluido-dinamico, utilizzando i risultati di uno studio di laboratorio mediante il quale è stato monitorato lo sviluppo istantaneo di volatili che avviene quando sferette di legno di diametro controllato sono lasciate cadere in un letto fluidizzato ad alta temperatura [11].

Lo schema del modello freddo ed alcuni significativi risultati della simulazione numerica sono riportati in Figura 5.

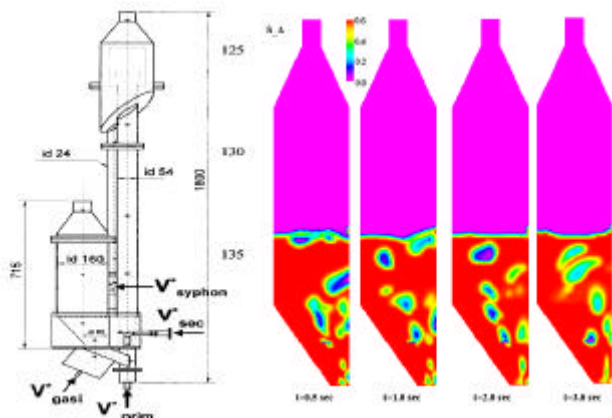


Figura 5: Modello freddo del gassificatore e risultati della simulazione numerica.

Purificazione a caldo del gas combustibile

I trattamenti di purificazione messi in atto riguardano l'abbattimento della concentrazione di composti acidi e la eliminazione praticamente completa del particolato solido, in accordo con le specifiche dettate dalla cella a combustibile a carbonati fusi.

Le biomasse contengono, seppur in concentrazione ridotta, zolfo e cloro, che svolgono una funzione importante nella crescita cellulare. Nelle condizioni riducenti del gassificatore, questi elementi danno luogo alla formazione di idrogeno solforato e acido cloridrico, mal tollerati dai catalizzatori presenti nella cella a combustibile.

Ugualmente, a valle del ciclone, il gas contiene particolato solido di piccolo diametro (elevata frazione di particelle con diametro minore di 0.5 micron, ma anche presenza di particelle notevolmente più grandi; il diametro medio è di circa 35 micron). Si tratta di ceneri volanti, carbone, particelle fini risultanti dall'abrasione del materiale del letto.

Per l'abbattimento dei componenti acidi si utilizza un sorbente basico (ossido di calcio), addizionato mediante un apposito dispositivo di dosaggio e mantenuto in sospensione nel gas all'interno del reattore di de-acidificazione, operante alla temperatura di circa 600°C. Il sorbente esausto viene successivamente separato in un ciclone a valle del reattore, insieme con la frazione più grossa del particolato solido elutriato dal gassificatore.

I rapporti di abbattimento, ottenuti nei test finora effettuati con l'impianto integrato della Trisaia, sono riportati nella Tabella 2. Le concentrazioni di idrogeno solforato e acido cloridrico sono ancora troppo elevate per garantire una lunga

durata dei componenti della cella; è necessario ottimizzare il dosaggio e la dimensione dell'ossido di calcio alimentato al reattore per raggiungere le specifiche di progetto.

Tabella 2: Prestazioni del reattore di de-acidificazione

Ca/(Cl+S) [molare]	4.3
H ₂ S ingresso [ppmv]	250
HCl ingresso [ppmv]	105
H ₂ S uscita [ppmv]	40
HCl uscita [ppmv]	36
Rapporto abbattimento S [%]	84
Rapporto abbattimento Cl [%]	66

Per quanto riguarda il filtro ad alta temperatura, la velocità di filtrazione, e quindi il numero e le dimensioni delle candele ceramiche sono state fissate in relazione alla distribuzione granulometrica della polvere da separare e alla scarsa permeabilità che caratterizza le ceneri volanti prodotte nel processo di gassificazione delle biomasse.

Oltre ai materiali, anche la tecnica di filtraggio adottata è innovativa, basata su una accurata programmazione degli impulsi di contro-pressione forniti agli elementi filtranti con il gas inerte di lavaggio (azoto), efficaci per il distacco delle particelle più fini e appiccicose dalle pareti filtranti. L'azoto è mantenuto a temperatura superiore a 200°C, per evitare la condensazione dei composti organici pesanti eventualmente presenti [12,13].

In Tabella 3 sono riassunte le prestazioni del filtro, parte integrante dell'impianto pilota della Trisaia.

Tabella 3: Prestazioni del filtro ad alta temperatura

Portata gas [Nm ³ /h]	140
Temperatura gas [°C]	550
Perdite di carico [mbar]	12
Temp. N ₂ pulizia candele [°C]	220
Particolato ingresso [g/Nm ³]	6.4
Particolato uscita [mg/Nm ³]	2.1

La cella a combustibile

Le attività già concluse riguardano la progettazione e la realizzazione dello stack della cella a carbonati fusi da 125 kW elettrici nominali.

Nella progettazione si è partiti dalla definizione delle interfacce con le rimanenti sezioni dell'impianto pilota. Le specifiche della cella e di ogni suo componente sono state definite sulla base di tecnologie sviluppate al di fuori di questo programma di ricerca, con gli opportuni adattamenti alla particolare applicazione di interesse.

E' stato anche progettato il sistema di controllo della cella, particolarmente complesso trattandosi di una applicazione del tutto innovativa.

La fase successiva è stata quella della realizzazione di tutti i componenti e dell'assemblaggio della cella. Si è quindi proceduto ai test di condizionamento, in una piattaforma adatta allo scopo, situata a Guadalix in Spagna.

Nell'ambito di questi test, la cella è stata portata alle condizioni operative di pressione e di temperatura. E' stata anche simulata la composizione della alimentazione anodica dell'impianto di destinazione, cioè quella del gas combustibile

prodotto dalla gassificazione della biomassa, per verificare il comportamento della cella in queste condizioni; è stata dimostrata la capacità di generare oltre 100 kW di potenza elettrica, un risultato più che soddisfacente dato il carattere preliminare di questi test [14].

L'impianto integrato

La progettazione e la realizzazione dell'impianto pilota integrato ha comportato la definizione del diagramma di processo, dall'alimentazione della biomassa all'alternatore di corrente elettrica in uscita, dei bilanci di massa e di energia, delle specifiche di tutte le apparecchiature, del *lay-out* dell'intero impianto, delle tubazioni, connessioni elettriche, isolamenti termici, etc.

In Figura 6 è mostrata una foto delle sezioni di gassificazione e purificazione del gas combustibile dell'impianto della Trisaia, completamente realizzate, e utilizzate in campagne di prove, come descritto nei paragrafi precedenti.

Il BoP (*Balance of Plant*) della cella a combustibile sarà invece realizzato nell'ambito del progetto FISR recentemente finanziato (Gazzetta Ufficiale n°146 del 24 Giugno 2004).



Figura 6: Impianto pilota della Trisaia – sezioni di gassificazione e purificazione a caldo del gas.

CONCLUSIONI

Sono stati presentati i principali risultati ottenuti nell'ambito di un progetto di ricerca indirizzato a dimostrare la fattibilità tecnica dell'accoppiamento di un processo catalitico di gassificazione di biomasse con vapor d'acqua, con una cella a combustibile a carbonati fusi, mediante un sistema di purificazione a caldo del gas.

Il gas combustibile prodotto dalla gassificazione delle biomasse (scarti legnosi, gusci di mandorle) soddisfa le specifiche di progetto in termini di elevato contenuto di idrogeno (40% in volume), potere calorifico, e basso tenore di tar (meno di 500 mg/Nm³).

Il sistema di purificazione a caldo del gas combustibile consente l'abbattimento praticamente completo del particolato solido, e una buona separazione dei componenti acidi (H₂S, HCl).

La cella a combustibile a carbonati fusi ha dimostrato di produrre sufficiente potenza elettrica con alimentazione

anodica costituita da un gas che simula, per composizione, il prodotto della gassificazione. Trattandosi di una cella che opera ad elevata temperatura, l'ossido di carbonio è utilizzato come combustibile in aggiunta all'idrogeno.

La realizzazione del BoP della cella, e la integrazione di quest'ultima nell'impianto pilota della Trisaia saranno effettuati nell'ambito di un progetto FISR recentemente finanziato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. Germanà, R. Rauch, S. Brandani, A. Kiennemann, M.L. Pelizza, S. Heidenreich, G. Braccio, D. Matera e M. Zappaterra, Coupling biomass gasification with fuel cell, 2nd World Conf. and Technol. Exhibition on "Biomass for Energy, Industry and Climate Protection", Rome, Italy, May 10-14, 2004.
2. R. Avella, G. Braccio, P. Marzetti e D. Matera, Biomass Gasification: Enea's Research Activities, 4th Conference on High Temperature Air Combustion and Gasification, Rome, Italy, 27-30 November 2001.
3. A. Germanà, P.U. Foscolo, N. Jand e R. Barbieri, Clean Energy from Biomass: Progress in coupling biomass gasification and fuel cell, Int. Conf. H2:WWW, Pisa, Italy, May 16-19, 2004.
4. A. Kiennemann, C. Petit, C. Courson, P.U. Foscolo, S. Rapagnà e D. Matera, Catalyseur pour la gazéification de la biomasse en lit fluidisé, procédé d'obtention et utilisations d'un tel catalyseur, PCT Patent Application No. PCT/FR01/01547, May 18, 2001.
5. N. Jand, P.U. Foscolo, A. Germanà e A. Kiennemann, Biomass Catalytic Gasification Process, Chem. Eng. Transactions 3 (2003) 63-69.
6. C. Pfeifer, H. Hofbauer e R. Rauch, In-Bed Catalytic Tar Reduction in a Dual Fluidized Bed Biomass Steam Gasifier, Ind. Eng. Chem. Res. 43 (2004) 1634-1640.
7. H. Hofbauer, R. Rauch, G. Loeffler, S. Kaiser, E. Fercher e H. Tremmel, Six Years Experience with the FICFB-Gasification Process, 12th European Conference on Biomass for Energy, Amsterdam, The Netherlands, 17-21 June 2002.
8. C. Courson, L. Udron, D. Swierczynski, C. Petit e A. Kiennemann, Hydrogen production from biomass gasification on nickel catalysts, Catalysis Today, 76 (2002) 75-86.
9. S. Rapagnà, H. Provendier, C. Petit, A. Kiennemann e P.U. Foscolo, Development of catalysts suitable for hydrogen or syn-gas production from biomass gasification, Biomass and Bioenergy 22 (2002) 377-388.
10. S. Brandani e K. Zhang, A new model for the prediction of the behaviour of homogeneously expanded and bubbling fluidized beds, AIChE Annual Meeting, Austin TX, USA, 7-12 November, 2004.
11. N. Jand e P.U. Foscolo, Decomposition of wood particles in fluidized beds, Ind. Eng. Chem Res., in press.
12. M. Nacken e S. Heidenreich, Development of a catalytic filter element for hot gas cleaning in biomass and waste gasification, Proceedings Filtech Europe 2003, 210-217.
13. S. Heidenreich, M. Nacken, K. Engelen e G. Baron, Decomposition of tars in biomass and waste gasification gas by catalytic ceramic filters, Proceedings Partec 2004.
14. M. Zappaterra e F. Parodi, Rapporto interno AFCo SpA, 2003.