

H₂ da fermentazione di biomasse

Un impianto pilota - Parte seconda

La tecnologia dei digestori anaerobici è ormai nota ed utilizzata in modo diffuso per la stabilizzazione delle acque reflue attraverso la conversione della frazione organica in biogas. L'impianto è basato su un contenitore chiuso a tenuta ermetica, in genere riscaldato, dove avvengono le succitate reazioni biochimiche e dal quale viene prelevato il gas. Il digestore, a seconda dei parametri fisico-chimici che vengono imposti, può produrre biogas, ovvero una miscela di metano ed anidride carbonica, o una miscela di gas contenente idrogeno. L'impianto è completato da apparecchiature per il pretrattamento della biomassa ed il post-trattamento (purificazione dei gas), e da dispositivi accessori quali ad esempio pompe, compressori, gasometri, gruppi di riscaldamento.

Al fine di valorizzare il più possibile il liquame trattato (biomassa), si è pensato di inviare il refluo uscente dal digestore per la produzione di idrogeno in un secondo digestore, per la produzione di biogas. In tal modo è possibile ottimizzare il processo anaerobico ed ottenere dati utili al bilancio economico finale del processo. Il processo considerato prevede quindi la produzione in continuo di idrogeno e biogas per via fermentativa a partire da biomasse, nonché la purificazione di tali gas. L'impianto, concepito come prototipo in vista di uno scale-up su scala industriale, è dotato di strumentazione analitica tale da permettere il monitoraggio delle variabili chiave di processo al fine di ottimizzarne la produttività. Le apparecchiature sono inoltre dotate di controlli automatici e di allarmi tali da garantire una gestione agevole, flessibile ed in sicurezza delle apparecchiature.

Alimentazione

La biomassa entrante nel sistema arriva all'impianto stoccata all'interno di serbatoi a tramoggia in polietilene lineare di media densità, di capacità pari a 700 litri, facilmente trasportabili con carrello elevatore a forca, dotati di struttura in acciaio con verniciatura epossidica, con valvola a farfalla per lo scarico del contenuto. Eventuali biomasse solide, come ad esempio mais, cereali o residui di patatatura, vengono aggiunte all'interno di tali serbatoi.

La biomassa viene in seguito movimentata con l'ausilio di una pompa trituratrice all'interno di un secondo serbatoio in polipropilene, di capacità pari a 1 m³. Tale cisterna, che al contrario dei serbatoi a tramoggia è fissa, permette al sistema di lavorare in continuo e, quando è piena, assicura il funzionamento dell'impianto per 12 giorni circa. In tal modo, l'approvvigionamento delle biomasse può essere effettuato con una frequenza di 1 volta a settimana. Si tratta di un contenitore in polietilene ad alta densità ed alto peso molecolare, contenuto in una gabbia di tubi di acciaio elettrosaldati, dotato di apertura per il riempimento, sfiato e valvola a farfalla di scarico. Il gruppo pompa trituratrice permette di ottenere un liquame con solidi in sospensione di di-

mensioni tali da favorire l'idrolisi ed evitare intasamenti all'interno delle apparecchiature e delle connessioni che costituiscono l'impianto pilota. Esso è costituito da un rototrituratore lento ad elevato momento torcente e da una pompa a vite per il trasporto della biomassa trattata nel serbatoio. Il rototrituratore ha una portata di 50 m³/h e pertanto si prevede di farlo lavorare in discontinuo, mentre la pompa a vite, dotata di motoriduttore, ha portata pari a 215 l/h (a 280 rpm). Il trituratore permette di sminuzzare il materiale di partenza per mezzo di gruppi di lame in lega indurita; viene previsto un bypass sulla linea di mandata in modo da rilavorare il materiale quando la dimensione della biomassa tritata eccede il valore di 1,5 mm. Viene pertanto inserito un filtro tangenziale che permette il passaggio del liquame della dimensione adeguata alla cisterna di alimentazione dell'impianto; il materiale inadatto torna invece nel serbatoio di partenza. La pompa P1 (Figura 4) movimentata il liquame dal serbatoio di alimentazione al serbatoio (A) di pretrattamento della biomassa. Si tratta di una pompa dosatrice a membrana (in teflon) a controllo elettronico che permette la movimentazione di portate molto basse, nell'ordine di 5 l/h. Il serbatoio miscelato di alimentazione dei bioreattori (A), realizzato in acciaio inox AISI316, ha le seguenti caratteristiche:

- capacità 200 litri;
- dimensioni: diametro 500 mm, altezza 1.100 mm;
- fondo bombato;
- coperchio bombato saldato;
- boccaporto di ispezione sul coperchio in posizione laterale;
- tre piedi;
- ingressi ed attacchi previsti: alimentazione e diluizione biomasse, agitatore, -sonda livello minimo e massimo, sonda di temperatura, sonda misura pH, ingresso ricircolo, sfiato;
- scarico: dal fondo.

L'agitatore è montato sul coperchio superiore: è stato adottato un sistema ad elica a bassa velocità, in modo da ottenere una miscela omogenea. L'operazione di omogeneizzazione del liquame viene migliorata eseguendo un ricircolo della biomassa nel serbatoio (A) per mezzo della pompa P4, di caratteristiche analoghe alla pompa P1: ciò consente di ottenere un materiale pretrattato con proprietà chimico-fisiche stabili nel tempo. La regolazione del carico organico in entrata ai serbatoi avviene attraverso diluizione con acqua di processo, la cui portata è regolata mediante un apposito flussometro - scala da 1 a 10 l/h - dotato di valvola di regolazione. Tale soluzione permette ai digestori di lavorare con la giusta quantità di materia fermentescibile e quindi di dosare opportunamente i nutrienti da immettere nei bioreattori. In Figura 3 è illustrato il layout della sezione di alimentazione dell'impianto pilota.

Digestore per la produzione di idrogeno

Il digestore per la produzione di idrogeno costituisce la sezione più importante dell'impianto pilota. Dal fondo del serbatoio conico di alimentazione A, il liquame viene trasferito grazie alla pompa dosatrice

Prof. Bernardo Ruggeri, DISMIC, Politecnico di Torino; dott. ing. Paola Zitella, ing. Aron Scaletta, Environment Park SpA, Torino; dott. ing. Michele Goretti, TISS Srl, Spin-off Università degli Studi di Perugia.

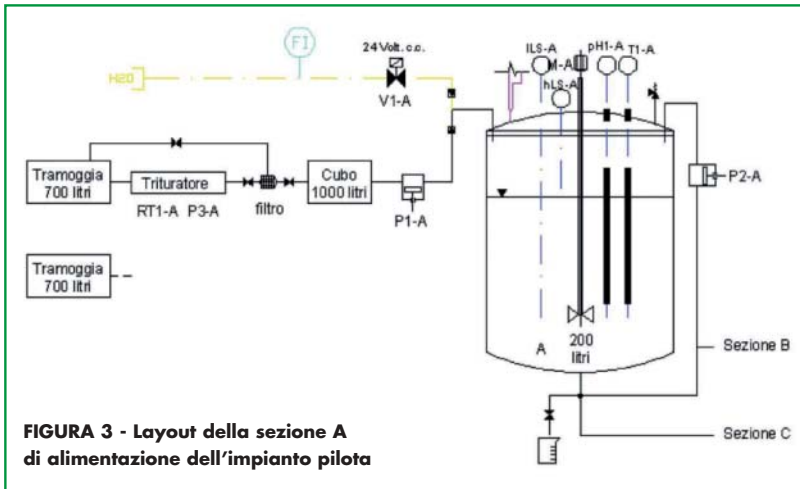


FIGURA 3 - Layout della sezione A di alimentazione dell'impianto pilota

P2, di caratteristiche analoghe alla pompa P1, all'interno del bioreattore per la produzione di idrogeno (B). La portata alimentata può variare tra 1,7 e 3,3 l/h. L'alimentazione avviene in discontinuo: una valvola viene comandata in modo automatico da un timer in maniera tale da immettere nel sistema un volume fisso (regolato dal tempo di

apertura della valvola essendo la portata costante) con una certa frequenza (regolata dall'intervallo di apertura della valvola e dettata dalla portata media che si vuole ottenere). Studi precedenti hanno dimostrato che tempi di permanenza della materia organica pari a 6 ore corrispondono alla massima produttività di idrogeno. Tale tempo di permanenza permette di evitare la crescita di popolazioni metanigene e di ottimizzare quindi la produttività di idrogeno. Trattandosi di un reattore miscelato, il tempo di permanenza idraulica (HRT) risulta essere pari a quello di ritenzione della materia organica solida (SRT). Di conseguenza, il minimo volume utile (volume di reazione) del bioreattore sarà pari a:

$$V_{\text{utile, min}} = Q \cdot \text{HRT} = 1,7 \cdot 6 = 10 \text{ l}$$

Il massimo volume utile del bioreattore sarà invece pari a:

$$V_{\text{utile, max}} = Q \cdot \text{HRT} = 3,3 \cdot 6 = 20 \text{ l}$$

Considerando il volume di gas sovrastante la fase liquida si ottiene:

$$V_{\text{totale}} = 25 \text{ l}$$

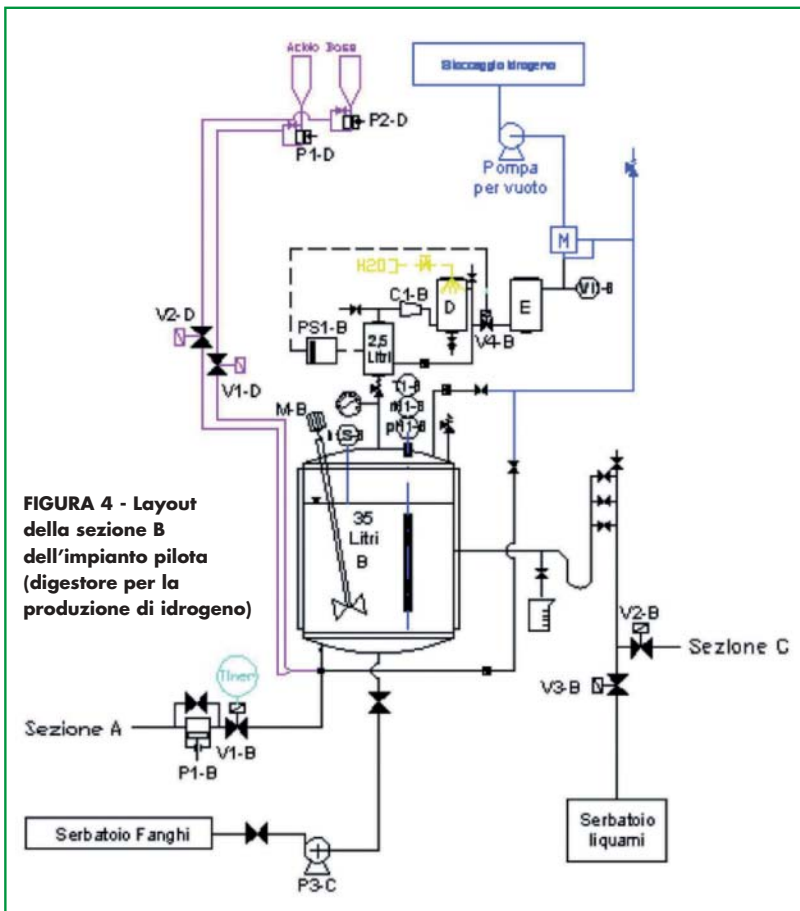


FIGURA 4 - Layout della sezione B dell'impianto pilota (digestore per la produzione di idrogeno)

È prevista la possibilità di modificare la temperatura del liquame attraverso una camicia del reattore; tuttavia si prevede di intervenire soltanto se necessario per non andare incontro ad un incremento dei consumi energetici e comunque di utilizzare cascami termici derivanti dall'impianto stesso per il riscaldamento del fluido di scambio (acqua di processo). Pertanto il digestore è realizzato in acciaio inossidabile AISI316 ed è dotato di tenute per gas altamente corrosivi e di una camicia esterna per consentire un'eventuale termoregolazione del processo. Si prevede di adottare una forma cilindrica con fondo e coperchio bombati per agevolare rispettivamente lo scarico dei liquami ed il prelievo dell'idrogeno gassoso prodotto. Riassumendo esso ha le seguenti caratteristiche tecniche:

- capacità 30 litri;
- dimensioni: Ø 267 mm, altezza 600 mm;
- fondo bombato;
- coperchio bombato saldato;
- camicia esterna coibentata per l'eventuale termoregolazione; l'isolamento termico serve evidentemente ad evitare la dispersione termica;
- tre piedi;
- ingressi ed attacchi previsti: alimentazione e diluizione delle biomasse, soluzioni correttive, agitatore, sonda livello massimo, sonda multiparametrica di misura di pH ed Rh, sonda di temperatura, prelievo dell'idrogeno prodotto, ingresso del ricircolo dei gas, sfiato, uscita della biomassa;
- scarico: dal fondo.

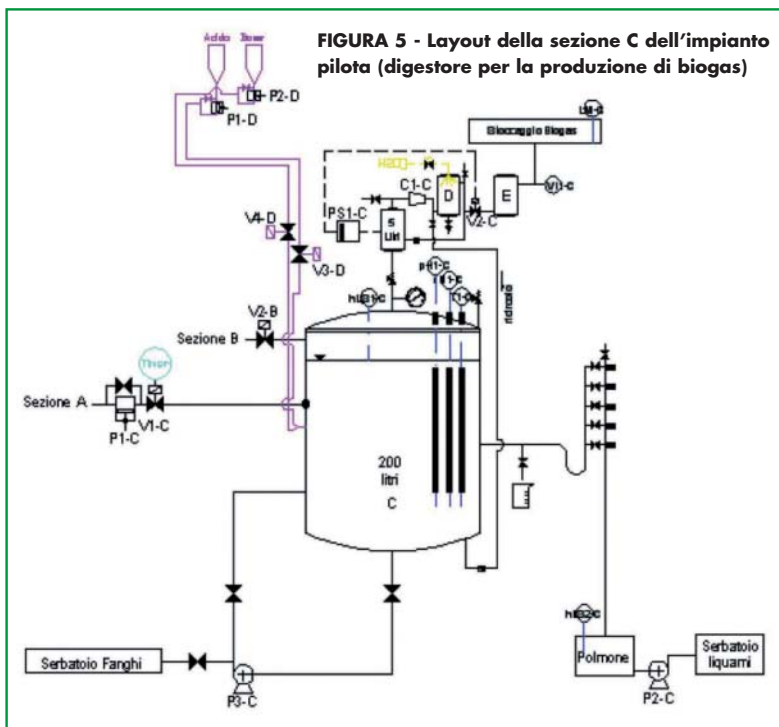
Più nel dettaglio, l'agitatore è montato sul coperchio superiore in posizione decentrata, con un albero disassato per lasciare posto, prestando particolare attenzione al fatto che l'elica dell'agitatore non sia ostacolata dalla presenza delle sonde. L'ingresso del liquame nel digestore per la produzione di idrogeno avviene dal fondo. È previsto uno scarico sul fondo del reattore per permettere il deflusso di eventuali depositi di solidi sul fondo del reattore e per agevolare le operazioni di lavaggio. La manutenzione all'interno del digestore sarà assicurata dal posizionamento di un'apposita diosfera montata sul digestore. Il pH viene regolato in continuo tramite l'opportuno dosaggio automatico di HCl e KOH. Il potenziale redox viene misurato in continuo. Due serbatoi contengono le soluzioni correttive; due pompe elettroniche e due elettrovalvole, comandate in retroazione dal sensore di pH, consentono di inviare il giusto quantitativo di correttivo alla biomassa. I gas prodotti nel digestore vengono allontanati automaticamente man mano che si formano grazie ad una valvola di sfioro posta sulla testa dell'apparecchiatura, tarata in modo tale da mantenere costante la pressione all'interno del bioreattore ad un valore all'incirca di 15-20 mbar. I gas vengono quindi purificati per ottenere H₂ ad elevata purezza. Al fine di massimizzare la produzione di idrogeno, la corrente gassosa uscente dalla fase di purificazione, povera di H₂, viene nuovamente immessa nel digestore per diminuire la pressione parziale di idrogeno. In tal modo viene favorita la produzione di tale gas. I gas possono essere immessi sia nella fase gassosa, sia nella fase liquida per gorgogliamento. Il passaggio del liquame dal reattore B al digestore C avviene per caduta, tramite un sistema a sifone ad altezza variabile che consente la regolazione del livello nel bioreattore per la produzione di idrogeno. Sono previste tre diverse regolazioni corrispondenti a tre volumi di lavoro (10, 15 e 20 L). In questa maniera potrà essere variato il tempo di permanenza nel reattore consentendo una maggiore flessibilità dei parametri sperimentali. Il layout della sezione B dell'impianto pilota, costituita dal digestore per la produzione di idrogeno, è mostrato in Figura 4.

Digestore per la produzione di biogas

Il digestore per la produzione di biogas ha lo scopo di ottimizzare la valorizzazione energetica della biomassa, anche se nell'impianto pilota gioca un ruolo secondario rispetto al digestore B per la produzione di idrogeno. Esso viene realizzato in acciaio inossidabile AISI316, coibentato per ridurre le dispersioni termiche, con tenute per gas altamente corrosivi, ed ha le seguenti caratteristiche tecniche:

- capacità 200 litri;
- dimensioni: diametro 500 mm, altezza 1.100 mm;
- fondo bombato;
- coperchio saldato;
- boccaporto di ispezione sul coperchio in posizione laterale;
- tre piedi;
- ingressi ed attacchi previsti: ingresso biomassa, ingresso delle soluzioni correttive, sonda di livello massimo, sonda di temperatura, sonda di misura pH, sonda di misura Rh, prelievo del biogas prodotto, ingresso del ricircolo di liquame, sfioro, uscita della biomassa;

FIGURA 5 - Layout della sezione C dell'impianto pilota (digestore per la produzione di biogas)



sa; è previsto inoltre un ingresso tangenziale dalla parete laterale per il ricircolo del liquame allo scopo di sostituire l'agitatore;

- scarico dal fondo.

Più nel dettaglio, il liquame proviene dal sifone del digestore B e viene alimentato per caduta al digestore C dall'alto. Quest'ultimo non viene agitato in modo tale da aumentare il tempo di ritenzione della sostanza organica solida e favorire la crescita delle popolazioni metanigene. Il tempo di permanenza (HRT) all'interno del digestore può variare fra 24 e 96 ore. La sedimentazione della frazione solida permette di ottenere SRT di gran lunga maggiori. Al fine di assicurare un giusto apporto di nutrienti (fonti di carbonio principalmente) è previsto un reintegro di liquame proveniente dal serbatoio conico A, movimentato dalla pompa P3, dello stesso tipo della pompa P1 precedentemente descritta. Il pH è regolato ad un valore pari a 7, ritenuto ottimale per lo sviluppo di biogas in base ad esperienza pregressa. Il potenziale redox viene misurato in continuo. È previsto uno spurgo in discontinuo dei fanghi sedimentati dal fondo del digestore. Variando i tempi di scarico dei fanghi è possibile variare il tempo di ritenzione della frazione solida (SRT). Il livello è mantenuto costante tramite un sistema a sifone ad altezza variabile, che permette la regolazione del livello nell'apparecchiatura e lo scarico del liquame digerito. Sono previste cinque diverse regolazioni corrispondenti ad altrettanti volumi di lavoro (80, 100, 120, 140 e 160 litri). In questa maniera potrà essere variato il tempo di permanenza idraulico nel reattore consentendo una maggiore flessibilità dei parametri sperimentali. La Figura 5 riproduce il layout della sezione C dell'impianto pilota, costituita dal digestore per la produzione di biogas.

Scarico liquami e fanghi di esubero

I liquami scaricati sono raccolti all'interno di un serbatoio polmone di capacità pari a 60 L, dotato di galleggiante. Il controllo di livello aziona la pompa di scarico che movimentata i liquami dal serbatoio polmone ad



FIGURA 6 - Sistema di purificazione gas

un serbatoio di capacità pari a 1 m³. Si tratta di un contenitore in polietilene ad alta densità e alto peso molecolare, contenuto in una gabbia di tubi di acciaio elettrosaldati, dotato di apertura per riempimento, sfiato e valvola a farfalla di scarico. I liquami vengono poi smaltiti. Il serbatoio polmone e la pompa di scarico liquami sono stati introdotti per evitare che l'impianto si sviluppasse troppo in altezza; in tal modo l'accesso ai bioreattori B e C risulta più agevole. I fanghi di esubero sedimentati al fondo dei due digestori sono convogliati in discontinuo per mezzo di una pompa centrifuga a girante aperta all'interno di un serbatoio in polipropilene da 250 litri prima dello smaltimento.

Linea di regolazione pH

Le soluzioni acide e basiche per il controllo del pH dei liquami sono stoccate all'interno di due serbatoi di capacità 5 litri. Entrambi i ser-

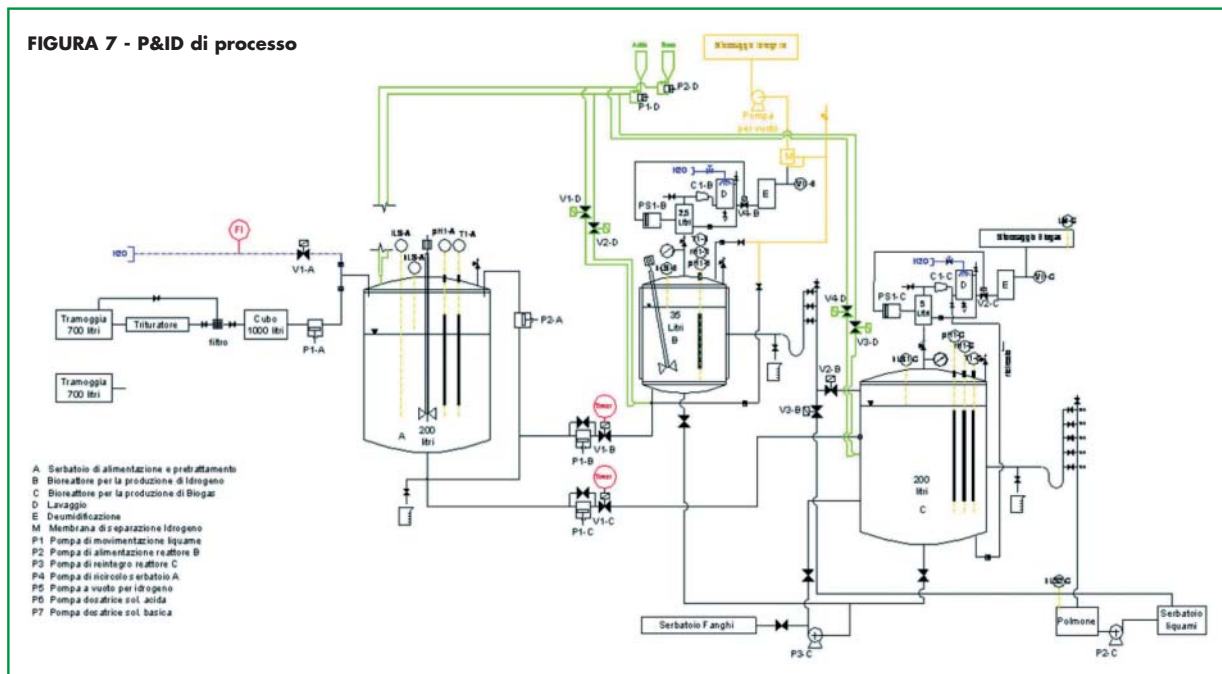
batoi sono asserviti ad una pompa (P6 e P7), dello stesso tipo della pompa P1 precedentemente descritta ma con portate più basse (1 l/h). Ognuna delle due pompe alimenta due linee, una per il digestore (B), l'altra per il digestore (C); su ogni linea è montata un'elettrovalvola per la regolazione del correttivo - in tutto sono presenti quindi quattro elettrovalvole. I serbatoi sono collegati mediante tubazioni in polietilene al digestore per la produzione di idrogeno (B) ed al digestore per la produzione di biogas (C). Come detto in precedenza, ognuna di queste apparecchiature è dotata di un sistema automatico di misura del pH ed Rh. Il controllore di pH confronta il valore misurato con quello di set-point ed apre le elettrovalvole per il tempo necessario ad aggiustare il pH.

Sezione purificazione idrogeno

Il gas contenente idrogeno, uscente in discontinuo dalla valvola di sfioro posta sulla testa del digestore B, viene inviato al primo stadio di purificazione, costruito dalla torre di lavaggio D, che permette di diminuire il contenuto di CO₂, CO, CH₄ ed eventuale H₂S. Il gas lavato viene poi trasferito al secondo stadio di purificazione (E) nel quale viene ridotta l'umidità della corrente gassosa, che si è saturata di vapore acqueo negli stadi precedenti. La deumidificazione è realizzata in una colonna contenente gel di silice. Nel caso in cui si ottenesse una corrente ricca in H₂S, è prevista un'ulteriore colonna contenente ossidi di Zinco o di Ferro per l'abbattimento di tale sostanza (necessario per non compromettere la purificazione finale dell'idrogeno).

Sulla linea sono presenti un barilotto tampone in AISI316 (capacità 2,5 litri), un punto di campionamento, una pompa per vuoto da laboratorio con membrana in teflon a bassa portata e prevalenza, un contatore per il gas, un sistema di depurazione (Figura 6) composto da un barilotto di lavaggio in vetro, completo di doccino e riempito di anelli Rashig, alimentato in continuo e con la possibilità di essere allagato per fare gorgogliare il gas, ed un filtro di deumidificazione da 4-5 litri con gel di silice, dove passa il gas prima di essere prele-

FIGURA 7 - P&ID di processo



vato, ma viene bypassato per il ricircolo; si prevede di montare due di questi filtri in parallelo, in modo da potere sostituire il filtro saturo senza interrompere il funzionamento dell'impianto. Viene previsto infine un terzo serbatoio da 5 litri vuoto, realizzato in vetro, per una eventuale ulteriore operazione di purificazione del gas. La pompa da laboratorio adottata, del tipo a membrana, è costituita da una testata in PPS (polifenilensolfuro), ha una membrana strutturata in PTFE (teflon) e le valvole in FPM (kalerez); la portata e la pressione sono molto basse ed adeguate al tipo di applicazione.

L'impianto è inoltre predisposto per una terza fase di purificazione che consiste in una membrana di separazione (M) ad elevata selettività per l'idrogeno, che lavora in depressione in maniera tale da separare l'idrogeno dagli altri gas presenti. Una pompa per vuoto P5 crea la depressione necessaria ed invia l'idrogeno purificato allo stoccaggio definitivo. Esistono due meccanismi distinti di permeazione attraverso le membrane: attraverso il bulk del materiale (membrane dense) ed attraverso i pori (membrane porose).

grazie ad un'elevata selettività. Per aumentare i flussi attraverso tali membrane e contenerne i costi è possibile depositare strati sottili di materiale metallico su supporti ceramici porosi o metallici. Tale membrana, in presenza di idrogeno a basse temperature, può venire danneggiata da stress derivanti dall'intrappolamento delle molecole di idrogeno all'interno della membrana. L'aggiunta di elementi quali l'argento o il rame permettono di evitare tale problema. Tali membrane lavorano a temperature comprese tra 300 e 600 °C. Sono sensibili ai solfuri, al cloro ed al monossido di carbonio.

Le membrane in carbonio lavorano a temperature comprese tra 500 e 900 °C in ambienti non ossidanti. Il difetto principale di queste membrane è la fragilità del materiale, che non permette grosse dimensioni. Sono inoltre molto costose. Le membrane ceramiche sono costruite per combinazione di un metallo con un non-metallo sotto forma di ossido, nitruro o carburo. Possono essere sia dense (200-600 °C) che porose (600-900 °C). Il principale difetto è la sensibilità a H₂S. In Tabella 5 sono proposte varie tipologie di membrana per

	Polimeriche dense	Micro-porose ceramiche	Metalliche dense	Carbonio porose	Ceramiche dense
Temperature	< 100 °C	200-600 °C	300-600 °C	500-900 °C	600-900 °C
Selettività per H ₂	bassa	5-139	> 1.000	4-20	> 1000
Flusso di H ₂ per P = 1 bar [10 ⁻³ mol/m ² s]	basso	60-300	60-300	10-200	6-80
Veleni	HCl, SO _x , (CO ₂)		H ₂ S, HCl, CO	Forti adsorbimenti di vapori di componenti organici	H ₂ S
Materiali	Polimeri	Silicio, allumina, zirconio, titanio, zeoliti	Leghe di palladio	Carbonio	SrCeO ₃ , BaCeO ₃
Meccanismi di trasporto	Dissoluzione/diffusione	Setaccio molecolare	Dissoluzione/diffusione	Diffusione superficiale/setaccio molecolare	Diffusione superficiale (conduzione di protoni)
Stato di sviluppo	In commercio	Prototipo	In commercio	In commercio	Prototipo

TABELLA 5 - Categorie e relative caratteristiche di membrane selettive per l'idrogeno [17]

Il trasporto delle sostanze attraverso le membrane dense avviene per adsorbimento su una faccia della membrana, dissoluzione e diffusione attraverso la membrana e desorbimento dall'altra faccia della membrana. Nelle membrane porose possono instaurarsi quattro diversi meccanismi di trasporto:

- diffusione di Knudsen (per elevati valori del numero di Knudsen);
- diffusione superficiale (adsorbimento sulle pareti dei pori e diffusione sulla superficie);
- condensazione capillare (avviene in presenza di una fase condensante tramite dissoluzione nella fase liquida);
- setaccio molecolare (quando la dimensione dei pori è dell'ordine della dimensione delle molecole).

Le membrane ad elevata selettività per l'idrogeno possono essere distinte a seconda dei materiali di costruzione. Le membrane polimeriche dense possono essere suddivise in:

- vetrose: preparate a temperature al di sotto della transizione vetrosa del materiale, presentano selettività maggiori e flussi minori;
- gombose: preparate a temperature maggiori rispetto alla transizione vetrosa, presentano selettività minori e flussi maggiori.

I vantaggi di tale tipologia di membrana sono le basse temperature di esercizio (90-100 °C), la resistenza ad elevati salti di pressione, i costi contenuti e la facilità di scale-up. Gli svantaggi possono derivare dalla bassa resistenza chimica nei confronti di HCl, SO_x e CO₂, e dalla resistenza meccanica limitata. Le membrane metalliche dense (Palladio o leghe di Palladio) permettono di ottenere idrogeno puro

la separazione dell'idrogeno con le relative caratteristiche. In alternativa al sistema a membrana è possibile ricorrere al processo PSA (Pressure Swing Absorption), nel quale l'idrogeno viene separato dalle impurezze (CO₂, CH₄, H₂S, mercaptani) su letti di carbone attivo, attraverso variazioni di pressione indotte.

L'idrogeno in uscita dal PSA può raggiungere purezze superiori a 99,9% in volume. L'adsorbimento PSA è un processo batch; sono quindi necessari più letti adsorbenti che lavorano in alternanza per potere trattare portate gassose costanti. Il ciclo di pressurizzazione/depressurizzazione è diviso in 5 step:

- adsorbimento: il gas da purificare è introdotto sotto pressione all'interno di un letto adsorbente; le impurezze sono adsorbite;
- depressurizzazione in equicorrente: permette di recuperare l'idrogeno intrappolato all'interno degli spazi vuoti del letto adsorbente, che viene in seguito utilizzato per la ripressurizzazione e lo spurgo dei gas in altri letti adsorbenti;
- depressurizzazione in controcorrente: le impurezze vengono espulse dall'adsorbente;
- spurgo dei gas a bassa pressione: viene effettuato con idrogeno ad elevata purezza proveniente dalla depressurizzazione in equicorrente;
- ripressurizzazione: viene effettuata prima di immettere una nuova corrente di gas da purificare, con idrogeno proveniente dalla depressurizzazione in equicorrente ed una parte dell'idrogeno purificato. La pressione massima di lavoro varia da 10 a 40 bar.

Generalmente, un ciclo di pressurizzazione e depressurizzazione dura da 15 a 20 minuti. In entrambi i casi (membrana e PSA), i gas separati sono in parte inviati nuovamente all'interno del digestore al fine di abbassare la pressione parziale di idrogeno e di favorirne la produzione. I gas di supero vengono evacuati mediante una valvola di sfioro e mandati in cappa.

Sezione purificazione biogas

I gas generati nel digestore per la produzione di biogas C sono inviati in discontinuo alla sezione di purificazione mediante una valvola di sfioro che mantiene la pressione costante all'interno del digestore (circa 1.5 mbar, come nel digestore B). I primi due stadi di purificazione sono del tutto simili a quelli visti precedentemente per l'idrogeno, ovvero vengono eseguiti il lavaggio (D) e la deumidificazione del gas (E). La corrente purificata viene quindi inviata all'utilizzo. Sulla linea sono presenti un barilotto tampone in AISI316 (capacità 5 litri), un punto di campionamento, una pompa per vuoto da laboratorio con membrana in teflon a portata e prevalenza basse, un contatore per il gas, un sistema di depurazione (Figura 6) composto da un barilotto di lavaggio in vetro, completo di doccino e riempito di anelli Rashig, alimentato in continuo e con la possibilità di essere allagato per fare gorgogliare il gas, ed un filtro di deumidificazione con gel di silice, dove passa il gas prima di essere prelevato, ma viene bypassato per il ricircolo; si prevede di montare due di questi filtri in parallelo, in modo da potere sostituire il filtro saturo senza interrompere il funzionamento dell'impianto. Viene previsto infine un terzo serbatoio vuoto, realizzato in vetro, per una eventuale ulteriore operazione di purificazione del gas. La pompa da laboratorio adottata, del tipo a membrana, è dello stesso tipo di quella usata nella sezione di purificazione dell'idrogeno.

Sistema di controllo dei bioreattori

Il livello nel miscelatore di alimentazione A è mantenuto grazie a due sensori di livello alto e basso, di tipo ON/OFF, che comandano rispettivamente lo spegnimento e l'accensione della pompa di alimentazione del miscelatore. La temperatura del liquame all'interno di tale apparecchiatura viene monitorata al fine di valutare l'eventuale quantità di calore da fornire al liquame per ottimizzare i successivi processi biologici.

Il livello del digestore per la produzione di idrogeno B è mantenuto costante dal sifone di scarico ad altezza variabile. La pressione nell'apparecchiatura è mantenuta costante grazie alla valvola di sfioro posta sulla testa del reattore. La temperatura del liquame all'interno dell'apparecchiatura è misurata in continuo. Il livello del digestore per la produzione di biogas C è anch'esso regolato da un sistema a sifone ad altezza variabile. La pressione nel bioreattore è mantenuta costante da una valvola di sfioro. La temperatura è monitorata anche in questo caso. Il controllo del pH nelle tre apparecchiature è già stato descritto precedentemente.

Sistemi di sicurezza

Il miscelatore A, lavorando a pressione atmosferica, non necessita di allarmi di alta pressione. Il sensore di alto livello prevede anche un allarme tale da bloccare la portata in entrata ed evitare il traboccamento. Il digestore per la produzione di idrogeno B presenta un allarme di alto livello, di tipo ON/OFF, qualora si verificasse un intasamento dello scarico. Tale allarme chiude la valvola di alimentazione al reattore. Nel caso in cui la valvola di sfioro del digestore B non

dovesse funzionare adeguatamente, è prevista una valvola di sicurezza che scarichi i gas prodotti in cappa. Per quanto riguarda il digestore per la produzione di biogas C, è previsto un allarme di alto livello, di tipo ON/OFF; ed una valvola di sicurezza, analoghi a quelli visti precedentemente. In Figura 7 è mostrato il layout complessivo dell'impianto pilota.

Bibliografia

- [1] ITABIA Italian Biomass Association, *Le Biomasse per l'Energia e per l'Ambiente* - Rapporto 2003.
- [2] National Renewable Energy Laboratory, *Minnesota Biomass - Hydrogen and Electricity Generation Potential*, 2005.
- [3] A. Quaglia, *Determinazione delle linee guida per la produzione di idrogeno per via biologica*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, 2004.
- [4] M. Camilli and P. M. Pedroni, *Comparison of the performance of three different reactors for BioHydrogen production via dark anaerobic fermentations*, Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC, 2005.
- [5] M. Göttel, L. Gautier, T. Dhainaut, C. Posten and G. Schaub, *Fermentative Hydrogen Production from Waste and Wastewater*, a Literature Survey, Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC, 2005.
- [6] I. Valdez-Vazquez, E. Rios-Leal, F. Esparza-Garcia, F. Cecchi and H. M. Poggi-Varaldo, *Semi-continuous solid substrate anaerobic reactors for H₂ production from organic waste: Mesophilic versus thermophilic regime*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, pp. 1383-1391, 2004.
- [7] S. Sung, D. A. Bazylinski L. Raskin and R. Danz, *Biohydrogen Production from Renewable Organic Wastes, Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies*, FY 2003 Progress Report.
- [8] S. Van Ginkel, S. Sung and J. J. Lay, *Biohydrogen Production as a Function of pH and Substrate Concentration*, Environ. Sci. Technol., vol. 35, pp. 4726-4730, 2001.
- [9] S.-E. Oh, S. Van Ginkel and B. E. Logan, *The relative Effectiveness of pH and Heat Treatment for Enhancing Biohydrogen Gas Production*, Environ. Sci. Technol., vol. 37, pp. 5186-5190, 2003.
- [10] D. B. Levin, L. Pitt and M. Love, *Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, pp. 173-185, 2004.
- [11] S. Van Ginkel and B. Logan, *Increased biological hydrogen production with reduced organic loading*, Water Research, vol. 39, pp. 3819-3826, 2005.
- [12] N. Kumar, N. Roy, J. Mishra, L. Mukherjee and D. Das, *A Case Studies on the Hydrogen Production Using Immobilized Enterobacter cloacae IIT-BT 08*, Science, Technology and Education of Microscopy: an Overview, pp. 352-362.
- [13] S. Van Ginkel and B. Logan, *Increased biological hydrogen production with reduced organic loading*, Water Research, vol. 39, pp. 3819-3826, 2005.
- [14] I. K. Kapdan and F. Kargi, *Bio-hydrogen production from waste material*, Enzyme and Microbial Technology, Vol. 38, pp. 569-582, 2006.
- [15] S. Sung, *Biohydrogen Production from Renewable Organic Wastes*, 2004.
- [16] N. Nishio, Y. Nakashimada, Y. Mitani and T. Hiraga, *Hydrogen-Methane Two-Stage Fermentation (Hy-Met Process) for Anaerobic Waste Treatment*.
- [17] S.C.A. Kluiters, *Status review on membrane systems for hydrogen separation*, 2004. ■