



LUCIANO FALQUI, JOSEPHINE PACE
PLASTICA ALFA, CALTAGIRONE (CT)
LUCIANO.FALQUI@PLASTICALFA.IT

LA SIMBIOSI INDUSTRIALE COME STRUMENTO PER LA GREEN ECONOMY

Partendo dai risultati del progetto “BIO4BIO: Valorizzazione biomolecolare ed energetica di biomasse residuali del settore agroindustriale” finanziato dal MIUR, vengono illustrate nuove tecnologie basate sull’economia circolare nel settore agroindustriale per una maggiore sostenibilità ambientale e lo sviluppo di nuovi mercati nel settore della green economy.



Il Progetto BIO4BIO come esempio di “simbiosi industriale”

Uno degli strumenti sicuramente più efficaci per la green economy è la *simbiosi industriale*, ovvero la possibilità di innescare un circolo virtuoso dove, su scala industriale, scarti di produzione e sottoprodotti da “problema” di gestione per le imprese diventano “risorsa” per un’impresa dello stesso territorio che opera in un settore completamente diverso.

Su questo concetto fondamentale si è sviluppato l’intero progetto BIO4BIO: “Valorizzazione biomolecolare ed energetica di scarti del settore agroindu-

striale”. Il Progetto BIO4BIO ha visto quale soggetto attuatore il Distretto Tecnologico Agrobiopesca, nato in Sicilia dall’esigenza di rendere competitivo il settore produttivo agroindustriale, strategico per la regione, attraverso la promozione della capacità di innovazione da parte della PMI e la creazione di un polo di aggregazione stabile e sistemica sul territorio tra enti di ricerca e PMI.

Al progetto hanno partecipato le Università degli Studi di Catania, Palermo e Messina, quattro Dipartimenti del Consiglio Nazionale delle Ricerche e otto PMI appartenenti a diversi settori produttivi: agroindustriale, zootecnico, mecatronico, chimico, trasformazione materie plastiche, farmaceutico. Il progetto BIO4BIO ha avuto come obiettivo principale la valorizzazione degli scarti agroindustriali attraverso l’estrazione mirata di composti e/o biomolecole per il farmaceutico, la produzione di formulati per il settore della mangimistica, la conversione energetica di biomasse residuali, la produzione di biofuels e, infine, la conversione biochimica della CO₂ da flussi esausti di processo in microalghe per l’estrazione di selezionati composti ad alto valore aggiunto per il settore della farmaceutica, della nutraceutica e della cosmeceutica.

Il punto di forza del progetto è stato senza dubbio una forte sinergia tra le PMI che avevano un “proble-



Fig. 1 - Installazione di un impianto di essiccazione a bassa temperatura e basso consumo energetico



Fig. 2 - Processo di trasformazione del settore agrumicolo e produzione di formulati per la mangimistica dal pastazzo di agrumi

ma" reale di sostenibilità ambientale legato alla gestione dei sottoprodotti e gli enti di ricerca e le altre PMI in grado di sviluppare una soluzione concreta attraverso prototipi su scala industriale capaci di dimostrare la replicabilità della soluzione tecnologica adottata.

Il progetto, concluso nel dicembre del 2015, ha determinato una serie di reali ricadute industriali nel campo della green economy. Di seguito vengono riportati solo alcuni dei risultati del progetto e le loro ricadute a titolo di esempio di applicazione della "simbiosi industriale".

Produzione di formulati per il settore mangimistico da scarti della produzione agroindustriale

Il comparto agrumicolo siciliano costituisce certamente uno dei settori a più alto impatto ambientale legato alla gestione e allo smaltimento controllato del pastazzo e del melasso nella produzione di succhi ed estratti da agrumi.

Grazie alla stretta collaborazione tra il Consorzio Filiera Carni, il Dipartimento di Veterinaria dell'Università di Messina, l'Azienda Agrumigel e l'azienda Mangimi di Pasquale è stato possibile creare un reale allungamento di filiera dove il pastazzo di agrumi, sottoprodotto di processo, diventa una risorsa per le aziende del settore zootecnico.

Attraverso la messa a punto di un sistema di essiccazione del pastazzo a bassa temperatura (Fig. 1),

e quindi a bassi consumi energetici, è stato possibile ridurre l'umidità di partenza (superiore all'85%). Questa tecnologia, unitamente allo sviluppo di un sistema di estrusione della matrice organica in pellets a monte del processo (e non a valle come nei sistemi convenzionali) [1] consente di essiccare in modo estremamente controllato senza compromettere la componente nutrizionale del pastazzo fondamentale per la produzione di formulati innovativi. Grazie a questo processo il pastazzo essiccato, già standardizzato in forma, dimensioni e grado di umidità finale, diventa un prodotto ad alto valore aggiunto per il settore della mangimistica consentendo di produrre nuovi alimenti generati direttamente dalla filiera agroindustriale da destinare al mercato degli alimenti zootecnici in sostituzione di quelli di importazione, con benefici diretti di natura sia economica che ambientale. Questi alimenti vengono inseriti nelle diete di bovini, suini, ovini e caprini dopo un'attenta caratterizzazione della qualità nutrizionali. In Fig. 2 viene mostrato il pastazzo prima e dopo il trattamento in essiccazione controllata pronto per la preparazione di formulati nel settore della mangimistica.

Grazie al progetto BIO4BIO è stato concretamente possibile effettuare un reale allungamento di filiera che vede oggi collaborare dal punto di vista industriale due realtà produttive ieri assolutamente distanti tra loro, l'agroindustria e la zootecnia. L'azienda agrumicola oggi non gestisce uno scarto da smaltire (riduzione dei costi) ma produce un nuovo output (aumento fatturato) sotto il controllo dell'azienda mangimistica che può trovare sul mercato interno un nucleo proteico di qualità per la produzione di formulati innovativi per il settore mangimistico.

Conversione energetica di biomasse residuali

Lo sfruttamento delle fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica costituisce uno degli obiettivi strategici sottoscritti con il Protocollo di Kyoto per la riduzione ed il contenimento dei cosiddetti gas ad effetto serra e la riduzione dei consumi di combustibili fossili.

Recentemente lo sviluppo tecnologico dei sistemi di conversione termochimica e di generazione elettrica ha permesso la progettazione e la realizzazione di impianti di generazione elettrica di piccola-media scala, di taglia inferiore a 1 MW, compatibili con approvvigionamenti localmente distribuiti sul territorio ed opportunamente dimensionati per mitigare e/o annullare l'impatto ambientale.



Fig. 3 - Biomassa residuale del processo di produzione dell'olio: nocciolino di oliva



L'utilizzo per scopi energetici delle biomasse può essere vantaggioso quando si presentano concentrate e disponibili con sufficiente continuità nell'arco dell'anno. Le biomasse normalmente impiegate per fini energetici sono disponibili in varie forme e fanno riferimento a comparti di provenienza specifici, quali il settore agricolo (paglie di cereali, stocchi, sarmanti di vite, ecc.), forestale (residui legnosi), zootecnico (deiezioni animali), agroindustriale (vinaccia, sansa, ecc.), rifiuti (frazione organica dei rifiuti solidi urbani).

Per molte di queste categorie di residui il recupero di tali materiali di scarto per scopi energetici assume una doppia valenza, sia economica sia ambientale, nella gestione dello smaltimento e della gestione dei rifiuti. Da "materiale di scarto" esso viene convertito in "risorsa energetica" da sfruttare opportunamente ed in maniera ecosostenibile. In Fig. 3 viene mostrata il nocciolino di oliva, la biomassa residuale a fine processo dell'estrazione dell'olio.

La valorizzazione energetica delle biomasse permette di sottrarre, attraverso opportune scelte logistiche e gestionali del circuito di raccolta, milioni di tonnellate di residui ogni anno con benefici

di tipo ambientale, economico e occupazionale. L'impiego di motori endotermici a combustione interna e di turbine a gas per la generazione elettrica necessita di combustibili liquidi o gassosi, pertanto l'impiego di biomasse solide deve necessariamente prevedere un processo di trasformazione della matrice solida di partenza in un combustibile in forma liquida o gassosa attraverso tecnologie differenti:

- combustione: tra i processi di conversione termica è certamente la più consolidata e matura dal punto di vista tecnologico e perlopiù sfruttata per la produzione di energia termica;
- gassificazione: processo termochimico in presenza di ossigeno e/o aria ad alta temperatura. Il syngas ottenuto è costituito principalmente da CO e H₂;
- pirolisi: processo di decomposizione termochimica della biomassa in completa assenza di ossigeno a temperature comprese tra 450 °C e 850 °C. In questo caso l'energia termica necessaria al processo viene prodotta esternamente e fornita in maniera indiretta alla biomassa, consentendo il maggior grado di conversione del potenziale chimico intrinseco della biomassa con la trasformazione in un pyrogas (diverso dal syngas ottenuto in gassificazione) ad elevato potere calorifico, compreso tra 2.500 e 3.500 kcal/Nm³. A seconda delle condizioni di processo, unitamente al syngas, si produce una frazione liquido (olio di pirolisi) ed una frazione solida (*char*).

Nel progetto BIO4BIO l'attenzione è stata focalizzata sullo sviluppo dei processi di pirolisi di matrici lignocellulosiche. Sebbene questi processi siano noti [2-7], dal punto di vista dell'applicazione industriale su larga scala questa tecnologia presenta ancora alcune problematiche di non facile soluzione quali la formazione di catrame (*TARs*), la produzione di oli di pirolisi non sempre facilmente gestibili (alte viscosità, pH<3, alta componente aromatica, ecc.), il trattamento e la pulizia del pyrogas prima di essere alimentato ai generatori elettrici (turbine e/o motori). Queste problematiche impiantistiche nascono dalla complessa struttura chimica tipica delle biomasse lignocellulosiche come il nocciolino di oliva, la sansa, il legno, la vinaccia, ecc.

La degradazione termochimica mediante pirolisi determina la trasformazione della fase solida in una fase gassosa costituita da una miscela di gas, quali idrogeno, monossido di carbonio, anidride carbonica, metano, azoto, idrocarburi (C_xH_y) sino al C₄-C₅, una fase liquida (olio di pirolisi) ed un residuo solido definito *char*, il sottoprodotto carbonioso.



Fig. 4 - Impianto di pirolisi su scala industriale e motori endotermici per la conversione energetica del pyrogas



In Fig. 4 sono riportate alcune immagini di un impianto di pirolisi a tamburo rotativo su scala industriale installato a Priolo Gargallo (SR) da 1,5 ton/h di biomassa in ingresso, con produzione di 1,2 MWe di energia elettrica in assetto trigenerativo [8]. I motori endotermici impiegati in questa installazione sono GE Jenbacher da 588 kWe cadauno. Questo impianto, entrato a regime con oltre 7.000 ore/anno, ha prodotto, oltre all'energia elettrica, anche 200 kg/h di olio di pirolisi (completamente reintegrato nel ciclo produttivo per il sostentamento energetico del processo). Il carbonizzato, sottoprodotto del processo di pirolisi, è stato trasformato attraverso un secondo stadio di attivazione fisica in carbone attivo granulare ed in polvere, con una produttività pari a circa 20 ton/settimana.

In Fig. 5 viene invece riportato il sistema di condensazione progettato ed installato per la purificazione del gas di pirolisi. Il pyrogas in uscita dalla sezione di pirolisi a 650 °C viene raffreddato grazie ad un processo di raffreddamento (*quenching*) sino a 60 °C. In questa fase condensano tutte le frazioni liquide presenti nel pyrogas (acqua, olio di pirolisi) che vengono opportunamente separate nel processo.



Fig. 5 - Impianto di condensazione del pyrogas

Partendo dall'esperienza maturata su scala industriale nel progetto BIO4BIO sono state affrontate tutte le problematiche impiantistiche legate al processo di degradazione termochimica delle matrici lignocellulosiche con l'obiettivo di limitare la formazione dei TARs e individuare le migliori condizioni di processo per la produzione ottimale delle tre fasi gas/olio/char. Nel progetto, oltre a Plastica Alfa (che nel team R&S ha assorbito il know-how sviluppato nella precedente esperienza industriale di Priolo Gargallo) hanno partecipato il CNR-ITAE di Messina, il CNR-IPCB di Catania e il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Catania.

Lo schema sviluppato nel progetto BIO4BIO è riportato nella Fig. 6. La biomassa viene inizialmente essiccata (recuperando i cascami termici del proces-

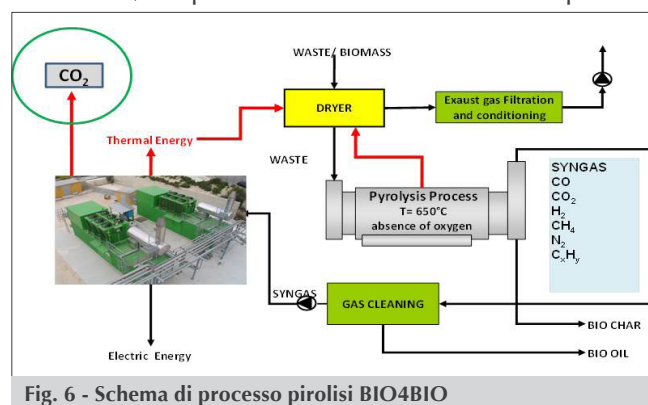


Fig. 6 - Schema di processo pirolisi BIO4BIO

so) e poi introdotta nel reattore di pirolisi dove, in assenza di ossigeno e ad alta temperatura, la matrice solida viene trasformata in una frazione gassosa costituita da una miscela di gas ad alto potere calorifico. In questa prima fase di processo il sottoprodotto carbonizzato viene separato automaticamente in un tank appositamente progettato. Il pyrogas prodotto viene invece sottoposto ad un processo di condensazione per separare la frazione liquida eventualmente presente. Il gas pulito viene poi sottoposto a caratterizzazione gascromatografica prima di essere



Fig. 7 - Impianto prototipo di pirolisi da 20 kg/h in continuo

alimentato ai motori endotermici. La CO_2 prodotta dal processo di generazione elettrica e/o dai flussi esausti di processo vengono poi captati e riutilizzati nella produzione di biomassa algale come riportato successivamente.

Le attività di sviluppo sperimentale hanno consentito la progettazione e la realizzazione di una piattaforma tecnologica installata presso il sito industriale di Plastica Alfa nella zona industriale di Caltagirone (CT) (<http://www.plasticaalfa.it>).

Nell'ambito del progetto è stato sviluppato un impianto in continuo di pirolisi da 20 kg/h in grado di operare sino a $750\text{ }^\circ\text{C}$ in assenza di ossigeno ed un sistema di trattamento gas in assetto trigenerativo. In Fig. 7 e 8 sono mostrate rispettivamente le sezioni di pirolisi e quella di condensazione. In Fig. 9 viene mostrato anche un campione dell'olio di pirolisi. Ha una densità superiore a quella dell'acqua (1.170 kg/m^3), un potere calorifico compreso tra 16-23 MJ/l ed un pH compreso tra 2 e 3. La composizione chimica risulta molto complessa e presenta una forte componente aromatica. Di seguito una tipica com-



Fig. 8 - Impianto prototipo di condensazione per la separazione dell'olio di pirolisi

posizione (p/p%): 4,3% acidi (formico, acetico, propionico), 2,2% alcoli (metanolo, glicole etilenico), 15,4% aldeidi, chetoni, furani, 34,4% polisaccaridi, 13,4% lignina e derivati fenolici, 4,35% resine, 23,9% acqua.

Nella Fig. 10 vengono mostrati alcuni risultati sperimentali ottenuti dal processo di conversione termochimica a bassa temperatura ed alta temperatura. All'aumentare della temperatura e del tempo di residenza l'equilibrio si sposta verso la formazione di

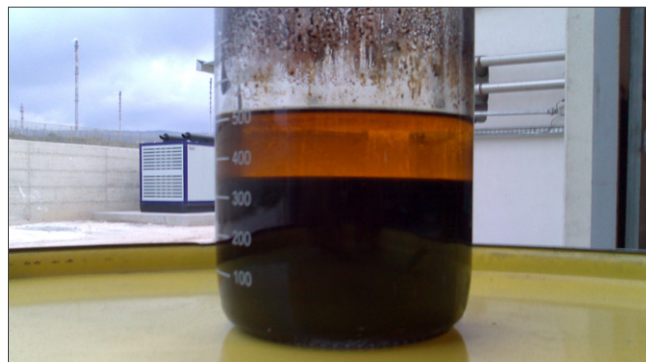


Fig. 9 - Campione di olio di pirolisi



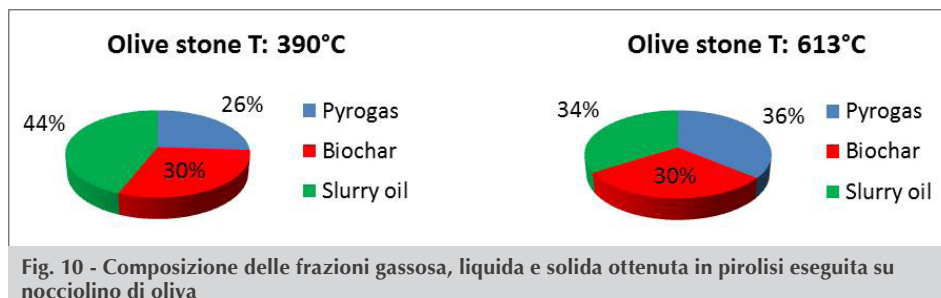


Fig. 10 - Composizione delle frazioni gassosa, liquida e solida ottenuta in pirolisi eseguita su nocciolino di oliva

una maggiore quantità della frazione gassosa. La piattaforma tecnologica verrà utilizzata per lo sviluppo di studi di fattibilità per la determinazione di bilanci di massa e di energia per diverse biomasse selezionate. Attraverso sperimentazioni in continuo in diverse condizioni di processo è possibile ottenere le informazioni necessarie per un dimensionamento corretto di impianti su scala industriale.

Conversione biochimica della CO₂ da flussi gassosi esausti

Nel progetto BIO4BIO è stata affrontata anche la problematica legata alla riduzione delle emissioni in atmosfera legata alla produzione di CO₂ dagli impianti industriali. Anche in questo caso la simbiosi industriale ha determinato lo schema di processo principale da sviluppare per giungere all'industrializzazione di impianti di captazione e conversione biochimica di anidride carbonica su larga scala in biomasse ad alto valore aggiunto.

L'emissione in atmosfera della CO₂ concentrata nei flussi esausti di tutti i processi di generazione elettrica, siano essi basati sull'impiego di turbine a gas o vapore piuttosto che motori endotermici, costituisce il problema più pesante dal punto di vista ambientale

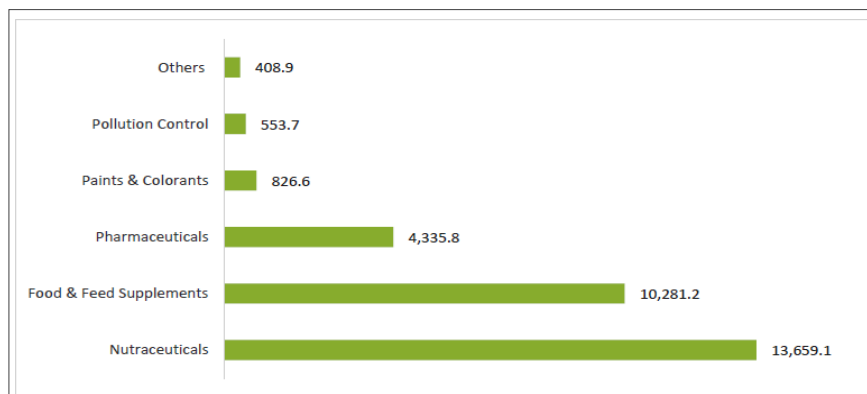
accrescimento algale in fotobioreattori a ciclo chiuso. Il progetto BIO4BIO mira infatti a ribaltare completamente l'approccio al problema dell'abbattimento delle emissioni gassose. Rispetto allo stato dell'arte relativo al sequestro e stoccaggio della CO₂ nel sottosuolo in giacimenti idrocarburici esausti si intende separare l'anidride carbonica per convertirla completamente e direttamente per via biochimica in altri prodotti ad elevato valore aggiunto per il settore nutraceutico, farmaceutico, cosmetico, mangimistico. Il raggiungimento di tale obiettivo è da considerarsi assolutamente strategico sia dal punto di vista ambientale che produttivo ed è in grado di incidere pesantemente sullo sviluppo tecnologico del nostro sistema industriale.

In Fig. 11 viene mostrato a titolo di esempio l'interesse del mercato mondiale nei confronti di composti ad alto valore aggiunto estratti da microalghe.

L'obiettivo del progetto BIO4BIO è quello di determinare le migliori condizioni di processo in cui selezionati ceppi algali crescono in modo controllato attraverso la somministrazione controllata di CO₂, luce (naturale e/o artificiale a LED), specifici nutrienti e particolari condizioni di processo quali temperatura e pH.

Le microalghe costituiscono uno dei sistemi microbici più interessanti nel settore delle biotecnologie in funzione dell'enorme potenziale nel settore delle energie rinnovabili, nel campo della depurazione delle acque reflue, ma soprattutto nel campo della produzione di integratori alimentari, di prodotti per la mangimistica, di numerosi prodotti per uso chimico e farmaceutico. In Fig. 12 vengono riportati i principali composti presenti nella struttura di questi organismi unicellulari [9-11].

Lo sfruttamento delle microalghe non può prescindere da un adegua-



Source: Credence Research Analysis

Fig. 11 - Global Algae Products Market, 2015, by application (US\$ Mn); mercato mondiale di composti ad alto valore aggiunto estratto da specie algali

- Carboidrati**
- Polisaccaridi (amido, glucosio, zuccheri)
- Lipidi**
- acidi polinsaturi grassi (PUFAs), EPA (acido eicoisapentenoico) e DHA (acido docosaesaenoico)
- Proteine**
- Aminoacidi essenziali
 - Antiossidanti e Pigmenti (Clorofilla, carotenoidi and astaxantina)
- Altri prodotti biologici**
- Vitamine essenziali (A, B1, B2, B6, B12, C, E, nicotinato, biotin, acido folico and acido pantotenico)

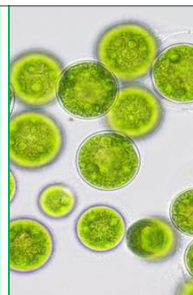


Fig. 12 - Principali composti presenti in molte specie algali

to sistema di coltura riconducibile a due tipologie principali: vasca aperta (*open ponds*) o fotobioreattori chiusi (*closed photobioreactors*). Tra questi, la vasca aperta è la più diffusa, considerato che circa il 90% delle microalghe prodotte al mondo proviene da questa tipologia di impianti. I bacini aperti (Fig. 13), tuttavia, presentano seri limiti, tra cui l'elevata superficie necessaria, il difficile controllo dei contaminanti, la perdita di ingenti quantitativi di acqua per evaporazione (100-200 m³ per ha al giorno) e le forti variazioni di salinità conseguenti l'apporto di acqua piovana che compromettono la stabilità del sistema.

Per questo motivo negli ultimi anni si è investito molto nella messa a punto di sistemi chiusi (fotobioreattori) più facilmente gestibili dal punto di vista impiantistico e più controllabili dal punto di vista del processo.

Nell'ambito del progetto BIO4BIO Plastica Alfa, in stretta collaborazione con l'Università di Messina, del CNR ICB (Istituto di Chimica Biomolecolare), l'AAT (Agroindustry Advanced Technologies) ha sviluppato un processo di conversione biochimica di CO₂ in impianti basati sull'impiego di fotobioreattori a base polimerica. È stato progettato e realizzato un impianto prototipo su scala industriale installato presso la piattaforma tecnologica nello stabilimento produttivo nella Zona Industriale di Caltagirone (CT) come mostrato in Fig. 14 e 15. Partendo dal know-how specifico sviluppato nel



Fig. 13 - Impianti di accrescimento algale di tipo *open pond*

progetto BIO4BIO, Plastica Alfa progetta e realizza impianti di conversione biochimica di CO₂ sviluppando impianti di accrescimento algale su scala industriale. Il processo si basa sull'assorbimento della CO₂ da parte di selezionati ceppi algali predisposti su scala di laboratorio e in seguito inoculati nel volume di accrescimento nell'impianto su scala industriale. Il volume di crescita, definito "medium" viene opportunamente predisposto per garantire le migliori condizioni di accrescimento della biomassa algale.

Il processo prevede un primo stadio di inoculo in laboratorio (Fig. 16a), quindi una fase di crescita nell'impianto di accrescimento algale (Fig. 16b). Al termine del processo di crescita la fase di *dewatering* per separare la microalga dal medium di crescita mediante centrifuga (Fig. 16c) ed infine la produzione del prodotto finito (Fig. 16d).

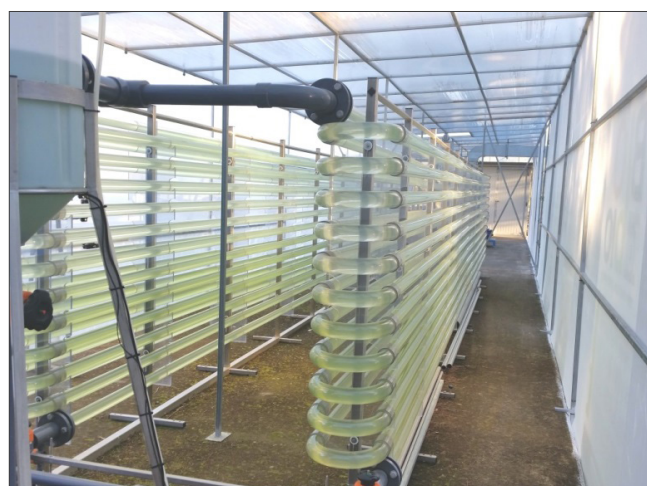


Fig. 14 - Impianti di accrescimento algale basato su fotobioreattori chiusi



Fig. 15 - Particolare impianto algale a fotobioreattori chiusi



Fig. 16 - Stadi di produzione di prodotti ad alto valore aggiunto da microalghe

Le condizioni fondamentali di crescita sono riconducibili a:

- accurata selezione e predisposizione del ceppo algale;
- assorbimento CO_2 ;
- assorbimento radiazione luminosa (naturale e/o artificiale a LED);
- dosaggio nutrienti;
- controllo costante parametri di processo quali temperatura, pH, concentrazione O_2 ;
- post trattamento e separazione microalga a fine ciclo di crescita.

Nell'ambito della green economy attualmente sono in fase di sviluppo impianti di accrescimento algale su scala industriale per la conversione di CO_2 su larga scala [12, 13]. In Fig. 17 viene mostrata la configurazione impiantistica della superficie di 1 ha.

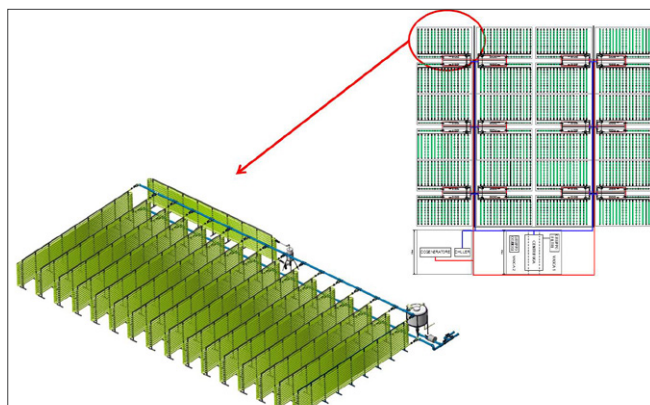


Fig. 17 - Sviluppo impianti algali su scala industriale

Questo genere di impianto viene, ad esempio, integrato con impianti di produzione di biometano a partire da biogas. In questo caso dalla miscela di biogas, costituita da circa il 55% di metano e il 45% di CO_2 , viene separata la frazione di anidride carbonica per l'immissione in rete del biometano puro. La CO_2 separata costituisce una sorgente ad elevata purezza per la conversione biochimica in microalghe per la produzione di composti per la nutraceutica e la farmaceutica.

La produzione prevista per questo genere di impianto è compresa tra le 60 e le 80 ton/anno per ettaro di biomassa secca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brevetto ITVI20110259 (Cartigliano Off SpA [IT]).
- [2] D. Mohan, C.U. Pittman, P.H. Steele, *Energy & Fuels*, 2006, **20**, 848.
- [3] A.V. Bridgwater, *Biomass and Bioenergy*, 2012, **38**, 68.
- [4] T. Kan, V. Strezov, T.J. Evans, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **57**, 1126.
- [5] R.L. McCormick et al., *Energy Fuels*, 2015, **29**, 2453.
- [6] A. Oasmaa et al., *Energy Fuels*, 2010, **24**, 5264.
- [7] S. T-Gopakumar et al., *Energy Fuels*, 2011, **25**, 1191.
- [8] E. Benanti et al., *Thermal Science*, 2011, **15**, 145.
- [9] J.W. Richardson et al., *Algal Research*, 2014, **4**, 96.
- [10] Z. Sun et al., *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, 2016, **153**, 37.
- [11] G. Chen, L. Zhao, Y. Qi, *Applied Energy*, 2015, **137**, 282.
- [12] E. Ryckebosch et al., *Food Chemistry*, 2014, **160**, 393.
- [13] M.R. Tredici et al., *Applied Energy*, 2015, **154**, 1103.

Industrial Symbiosis as a Tool for Green Economy

Starting from the results of the project "BIO4BIO: biomolecular and energetic enhancement of residual biomass in the agroindustrial sectors" financed by MIUR, new technologies based on the agro-industrial circular economy for greater environmental sustainability and the development of new markets in the green economy sector are here presented.