



Ricerca di Sistema elettrico

## Caratterizzazione del coal slurry, definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo

*Caterina Frau, Eusebio Loria, Francesca Ferrara*

## CARATTERIZZAZIONE DEL "COAL SLURRY", DEFINIZIONE E TRATTAMENTO DEGLI EFFLUENTI TIPICI DEL PROCESSO

Caterina Frau, Eusebio Loria, Francesca Ferrara (SOTACARBO)  
Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: Parte B1 - b - Cattura della CO<sub>2</sub> in Ossi-Combustione

Task: b1- Caratterizzazione del "coal slurry" di alimentare del reattore. Definizione e trattamento degli effluenti tipici del processo da inviare alla sezione di trattamento fumi

Responsabile del Progetto: ing. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana.

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 TECNOLOGIE DI SEPARAZIONE DELLA CO <sub>2</sub> .....	6
2.1 CATTURA PRE-COMBUSTIONE: CENNI .....	6
2.2 SEPARAZIONE POST-COMBUSTIONE: CENNI.....	6
2.3 OSSICOMBUSTIONE .....	7
2.3.1 <i>Lo sviluppo dei processi di ossicombustione</i> .....	7
2.3.2 <i>Caratteristiche principali dei processi di ossicombustione</i> .....	8
2.3.3 <i>Principali differenze tra la combustione in ossigeno e la combustione in aria</i> .....	9
2.3.4 <i>Peculiarità costruttive e funzionali delle apparecchiature di combustione</i> .....	11
2.3.5 <i>Emissioni inquinanti</i> .....	11
3 OSSI-COMBUSTIONE IN PRESSIONE.....	12
3.1 L'OSSICOMBUSTIONE IN ITALIA. IL PROGETTO ISOTHERM®.....	12
3.2 IL PROGETTO SOTACARBO-ITEA-ENEA .....	14
3.2.1 <i>Componenti principali</i> .....	14
3.2.2 <i>Sezioni ausiliarie</i> .....	15
3.2.3 <i>Componenti aggiuntivi</i> .....	15
4 CARATTERIZZAZIONE DELLE CORRENTI DEL REATTORE DI COMBUSTIONE.....	15
4.1 CORRENTI DI INPUT.....	16
4.2 CORRENTI DI OUTPUT .....	17
5 CARATTERIZZAZIONE DEL COAL WATER .....	17
6 CONCLUSIONI.....	19
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	20

## Sommario

Sotacarbo sta avviando, in collaborazione con ENEA e Itea (società italiana del gruppo Sofinter), un progetto per la realizzazione di un impianto pilota di ossi-combustione da 48 MW termici, che verrà installato nel Sulcis e sperimentato in scala significativa per la prima volta a livello mondiale. La tecnologia, sviluppata da Itea e operante in pressione e senza fiamma apparente (“flameless”), promette di essere una soluzione particolarmente interessante al problema della riduzione delle emissioni di anidride carbonica dagli impianti di generazione elettrica alimentati con combustibili fossili e potrebbe essere una delle soluzioni tecnologiche più convenienti per il progetto dimostrativo CCS Sulcis che si prevede di realizzare nei prossimi anni.

Il piano di lavoro prevede lo sviluppo di una serie di studi preliminari alla realizzazione del progetto e di alcune delle apparecchiature che saranno successivamente installate nell’impianto, tra le quali particolare interesse è dedicato alla sezione preliminare di studio di caratterizzazione delle correnti di input ed output al combustore ISOTHERM, che rappresenta il cuore dell’impianto.

Scopo di questo lavoro è appunto individuare le principali caratteristiche delle miscele di acqua e carbone e la composizione dei fumi di combustione per la definizione delle successive fasi di trattamento. Per la caratterizzazione dello slurry di carbone è stato attivato un Contratto di Collaborazione con l’Università di Cagliari. Nel corso di tale attività sono state confrontate differenti soluzioni tecnologiche per la produzione di slurry, valutandone gli effettivi limiti applicativi, individuando le più idonee per affidabilità e precisione da implementare nella prossima annualità.

In questo studio, dopo una breve trattazione sullo stato dell’arte delle tecnologie di ossicombustione ed il loro riconoscimento tra le CCS, viene presentato un panorama delle applicazioni esistenti ed in progetto della tecnologia ISOTHERM, con particolare riferimento all’impianto da 48 MWth Sotacarbo-Itea-ENEA.

## 1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA hanno stipulato data 4 marzo 2013 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2012-2014 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente report tecnico afferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2013, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente"; nello specifico, si riferisce all'obiettivo della parte B1, del progetto B.2 "Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili".

I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e SOTACARBO S.p.A. afferiscono al "Polo Tecnologico per il Carbone Pulito nell'Area del Sulcis", recentemente costituito con accordi siglati dalla Regione Autonoma Sardegna e MiSE. Tali attività sono finalizzate al perseguimento di un doppio interesse strategico, che si concretizza nel contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni italiane di CO<sub>2</sub> e nel consentire al sistema industriale nazionale di competere in campo internazionale con i principali attori tecnologici nel prossimo futuro. In particolare riguardano lo sviluppo e la messa a punto di studi e applicazioni sperimentali funzionali alla dimostrazione, nel sito del Sulcis nel Sud-Ovest della Sardegna, delle soluzioni tecnologiche più mature applicate ad impianti di produzione energetica equipaggiati con cattura e stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

L'attività si inserisce nel Protocollo di Intesa, sottoscritto in data 2 agosto 2013 tra Regione Autonoma Sardegna (RAS) e MSE, nel quale si prevede lo sviluppo del "Polo Tecnologico per il Carbone Pulito" attraverso un programma pluriennale relativo allo sviluppo ed applicazione di tecnologie di cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>. Tale Protocollo prevede inoltre lo sviluppo di una tecnologia avanzata di ossi-combustione pressurizzata, con la realizzazione di un impianto pilota di potenza inferiore a 50 MWt. Le finalità del predetto Protocollo, sono state successivamente recepite in un Accordo Quadro di collaborazione tra ENEA e RAS, sottoscritto in data 20 dicembre 2013.

Il progetto esecutivo dell'impianto pilota ad ossi-combustione sarà basato su una tecnologia già testata, a livello sperimentale, in scala 5 MWt sull'impianto ISOTHERM-PWR di Gioia del Colle (BA), sviluppato e realizzato da SOFINTER SpA per la combustione di solidi e liquidi.

Con riferimento alla tecnologia prescelta, il sistema che si intende implementare nel Sulcis può essere considerato come l'unico esempio di applicazione del regime MILD alla combustione in ossigeno di carbone, tecnica che presenta significativi vantaggi, sia in termini di efficienza che di economicità, rispetto ad altre soluzioni più tradizionali.

Nel caso di un reattore ad ossi-combustione finalizzato alla cattura di CO<sub>2</sub>, le condizioni tipiche del regime MILD (cioè combustione in assenza di fronte di fiamma, ma "di volume", ottenuta diluendo fortemente il comburente con CO<sub>2</sub> inerte) sono realizzate sfruttando la ricircolazione esterna dei gas combusti.

L'ambiente di reazione che si crea è caratterizzato da un'elevata presenza di molecole triatomiche (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), conseguente all'assenza di azoto (la cui capacità termica è sostituita dalla corrente di ricircolo dei fumi) e dall'ingresso, nel sistema, di ingenti quantità di acqua utilizzata per il trasporto del carbone e per l'atomizzazione della miscela fangosa risultante (slurry). La miscela gassosa ha per conseguenza un potere emissivo molto elevato, amplificato peraltro dalle condizioni di pressurizzazione della camera (10 bar).

Il vantaggio in termini di efficienza, rispetto alle soluzioni convenzionali di ossi-combustione proposte in altri progetti, è relativo alla possibilità di diminuire le perdite termiche in caldaia e alla capacità di recuperare calore dai fumi in pressione. Il vantaggio economico, invece, è riconducibile alla possibilità di utilizzare grazie a questa tecnologia, tipologie di carboni, più economici di quelli usuali, che attualmente non vengono impiegati nelle tradizionali caldaie, per via della bassa temperatura di fusione delle loro ceneri che crea i ben noti problemi di slagging. Questi carboni si prestano bene all'utilizzo in questa tecnologia che prevede l'allontanamento delle ceneri allo stato fuso.

Fatte salve una serie di attività preliminari e di progettazione, svolte da SOTACARBO nel corso del l'anno 2014, e finanziate nell'ambito di altro programma di ricerca, interamente supportato dalla Regione Autonoma Sardegna, ENEA e SOTACARBO identificano una serie di azioni di ricerca a supporto della realizzazione di un impianto pilota, dimostrativo della tecnologia di ossi-combustione pressurizzata, relative

allo sviluppo di sistemi diagnostici, la definizione e il trattamento degli effluenti tipici del processo, l'analisi di ciclo per l'individuazione di soluzioni impiantistiche di maggiore efficienza.

Tra le suddette problematiche di interesse, vi è la **caratterizzazione del coal slurry in input al reattore** (tipica problematica dell'applicazione di ossi-combustione pressurizzata)..

In questo ambito sono state individuate le principali caratteristiche delle miscele di acqua carbone utilizzate in alimentazione, e la composizione degli effluenti gassosi dal sistema "reattore", la cui caratterizzazione è fondamentale per assicurare il corretto funzionamento delle unità a valle e per caratterizzarne la qualità ambientale. Per la caratterizzazione dello slurry di carbone è stato attivato un Contratto di Collaborazione con l'Università di Cagliari. Nel corso di tale attività sono state confrontate differenti soluzioni tecnologiche per la produzione di slurry, valutandone gli effettivi limiti applicativi, individuando le più idonee per affidabilità e precisione da implementare nella prossima annualità.

## 2 Tecnologie di separazione della CO<sub>2</sub>

Le tecnologie di separazione e stoccaggio della CO<sub>2</sub> o CCS (Carbon Captur and Sequestration) includono la cattura eseguita sui prodotti della combustione o della gassificazione, il condizionamento (purificazione in relazione alle esigenze del trasporto e del confinamento), la compressione, il trasporto e lo stoccaggio permanente in siti geologici di caratteristiche idonee. A tal proposito le tecnologie CCS e, in particolare, quelle di separazione della CO<sub>2</sub>, sono comunemente suddivise in tre macro categorie:

- processi di cattura pre-combustione;
- processi di cattura post-combustione;
- processi di ossicombustione

### 2.1 Cattura pre-combustione: cenni

I processi di separazione dell'anidride carbonica pre-combustione si applicano essenzialmente agli impianti di gassificazione del carbone. Secondo tale approccio la CO<sub>2</sub> viene rimossa dal syngas, prima che questo venga bruciato.

In questo caso, tipicamente vengono utilizzati processi di assorbimento fisico come ad esempio i processi Rectisol (commercializzato dalla Lurgi GmbH e impiegante come solvente il metanolo), Selexol (commercializzato dalla UOP llc. e impiegante una miscela di dimetiletere e glicol polietilenico come solvente), sviluppati originariamente per la desolforazione del syngas e ampiamente consolidati a livello commerciale. In tali processi la CO<sub>2</sub>, rilasciata durante il processo di rigenerazione del solvente, viene compressa per essere poi trasportata e immagazzinata nei siti di stoccaggio. La corrente gassosa purificata, composta principalmente da idrogeno (a diversi gradi di purezza), può essere utilizzata come combustibile o come materia di base per l'industria chimica e petrolchimica

### 2.2 Separazione post-combustione: cenni

Nei processi di separazione della CO<sub>2</sub> post-combustione, l'anidride carbonica può essere rimossa dai gas reflui (gas di combustione) mediante processi di assorbimento chimico già consolidati a livello commerciale e di uso comune negli impianti chimici. Tali processi sono tipicamente basati su opportuni solventi di tipo amminico, generalmente monoetanolamina (MEA), o mediante processi chimici innovativi ancora in via di sviluppo come per esempio il processo Chilled Ammonia. La CO<sub>2</sub> è quindi rilasciata dal solvente durante il processo di rigenerazione termica dello stesso. Anche in questo caso essa viene successivamente compressa per essere poi trasportata e immagazzinata nei siti di stoccaggio.

Altre tecnologie di separazione post-combustione della CO<sub>2</sub>, attualmente poco adatte alle applicazioni su grossa scala per via degli elevati costi operativi, sono rappresentate dalle membrane ad alta pressione e dalla separazione criogenica.

Le tecnologie post-combustione sono concepite con particolare riferimento alla loro applicazione ai moderni impianti a ciclo a vapore ultrasupercritico (USC), ma possono essere anche impiegate per il *retrofitting* di impianti a vapore esistenti, dal momento che la separazione della CO<sub>2</sub> può essere effettuata

con un limitato impatto sul funzionamento dell'impianto (salvo la forte riduzione dell'energia elettrica prodotta, legata agli elevati consumi energetici del processo di rigenerazione dei solventi).

### 2.3 Ossicombustione

L'ossicombustione (ossia l'utilizzo come comburente dell'ossigeno al posto dell'aria), consente di ottenere fumi di combustione privi quasi totalmente di azoto (rimane solo la parte eventualmente proveniente dal combustibile stesso) e composti principalmente da CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, facilmente separabili attraverso la condensazione del vapor d'acqua con un semplice processo di raffreddamento. A seguito di raffreddamento e condensazione, la corrente gassosa, caratterizzata da una concentrazione di CO<sub>2</sub> tipicamente compresa tra l'80 e il 98% (a seconda del combustibile utilizzato e delle condizioni operative del processo di combustione) può essere ulteriormente purificata in maniera più o meno spinta con la possibilità di ottenere CO<sub>2</sub> praticamente pura, da inviare a compressione e trasporto ai siti di stoccaggio per il confinamento.

Per l'industria della generazione di energia elettrica l'ossicombustione rappresenta una soluzione particolarmente attraente e competitiva rispetto alle soluzioni pre-combustione e post-combustione, soprattutto per quanto riguarda la *retrofitting* di impianti esistenti, con particolare riferimento a impianti di nuova costruzione.

#### 2.3.1 Lo sviluppo dei processi di ossicombustione

La combustione in ossigeno finalizzata alla cattura della CO<sub>2</sub> è stata proposta per la prima volta nel 1981 presso l'Argonne National Laboratory (ANL) da Abraham et al. [1]. Lo scopo di questi primi studi era quello di valutare la possibilità di produrre, con la combustione in ossigeno, un gas composto quasi esclusivamente di CO<sub>2</sub> idoneo al confinamento dello stesso senza successivi trattamenti, eliminando in tal modo la necessità della desolforazione, richiesta invece dalle tecnologie CCS pre- e post-combustione per esigenze dei processi di separazione della CO<sub>2</sub>. Il processo basato sull'ossicombustione risultava nel complesso energeticamente meno oneroso dei processi pre- e post-combustione, e particolarmente attraente per il confinamento della CO<sub>2</sub> nei siti EOR (*enhanced oil recovery*) localizzati anche a notevole distanza dai siti di produzione.

Verificate le potenzialità dell'ossicombustione nell'ambito delle tecnologie CCS, l'ANL proseguì le attività di ricerca nel settore, con studi e ricerche sia di carattere tecnico-economico che di carattere fenomenologico su un impianto in scala pilota svolti anche in collaborazione con l'Energy & Environmental Research Center (EERC) [2-4].

Nei primi anni del '90 ci fu quindi un notevole impulso verso la ricerca di soluzioni tecnologiche per la riduzione dei gas serra con lo svolgimento di studi e ricerche nel settore dell'ossicombustione soprattutto in Europa, Giappone e Canada. Tali studi erano principalmente focalizzati sul *retrofitting* di impianti esistenti. In particolare:

- In Europa, con finanziamenti della Commissione Europea nell'ambito del Programma Joule-Thermie (1994-98) l'IFRF (International Flame Research Foundation) coordinò un consorzio di ricerca, i cui membri includevano Mitsui Babcock, Air Products, International Combustion, l'Università di Ulster, l'Imperial College e l'Università di Napoli, con lo scopo di investigare le caratteristiche della combustione ossigeno-carbone con ricircolo dei gas reflui [5-6].
- In Giappone, Ishikawajima Harima Engineering – IHI, coordinò tra il 1992 e il 2000 un consorzio di ricerca finanziato dal NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) per lo svolgimento di studi e ricerche sull'ossicombustione che comprendevano numerosi aspetti, da quelli tecnico-economici, alle caratteristiche delle fiamme e alle emissioni inquinanti, [7-8].
- In Canada, il CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) Energy Technology Centre coordinò, fin dai primi anni del 1990, studi sull'ossicombustione del carbone utilizzando un combustore verticale da 300 kW. Gli studi includevano la caratterizzazione sperimentale delle fiamme, la modellazione CFD (*computational fluid dynamics*) e la caratterizzazione dei carboni [9].

L'interesse per l'ossicombustione è andato quindi crescendo con numerose attività di ricerca, sviluppo e dimostrazione svolte principalmente in Europa, Australia, Giappone, Stati Uniti, Canada e Corea del Sud.

Per questo motivo, l'IEA GHG (Greenhouse Gases) ha promosso la costituzione di uno specifico organismo volto a promuovere il dialogo tra i vari soggetti attivi a livello internazionale in specifiche attività di ricerca,

sviluppo e dimostrazione (RD&D) nel settore delle tecnologie CCS basate sull'ossicombustione. L'organismo, denominato "International Network on Oxyfuel Combustion", è stato quindi costituito nel novembre del 2005 nel corso di un workshop inaugurale [10-11] ospitato a Cottobus (Germania) dalla Vattenfall AG, società particolarmente attiva nel settore.

In letteratura sono presenti numerose recensioni critiche sullo sviluppo delle tecnologie di ossicombustione [12-18].

Dall'esame della letteratura scientifica sull'argomento emerge nel complesso che l'ossicombustione del carbone con ricircolo dei gas rappresenta una delle più promettenti tecnologie CCS per il settore della generazione elettrica, intravedendo negli impianti a vapore ultra-supercritici la più efficace e interessante applicazione; nondimeno essa risulta particolarmente attraente per il *retrofitting* di impianti a vapore esistenti.

### 2.3.2 Caratteristiche principali dei processi di ossicombustione

Negli impianti convenzionali di generazione elettrica alimentati con combustibili fossili la combustione avviene con aria, il cui contenuto di azoto, circa il 79% in volume, diluisce la CO<sub>2</sub> contenuta nei prodotti della combustione riducendone la concentrazione a valori intorno al 5% (in volume e su base secca) nel caso di gas naturale e fino a valori che, nel caso di carbone, sono dell'ordine del 15%.

Nella combustione con aria, l'azoto svolge inoltre un'azione moderante della temperatura, mentre se si effettua la combustione con solo ossigeno la temperatura tende ad aumentare significativamente fino a livelli insostenibili dai materiali. Nel caso dell'ossicombustione, dunque, il ruolo dell'agente moderatore viene sostituito operando un ricircolo dei gas di combustione oppure mediante iniezione di acqua o di vapore direttamente nel combustore.

La tecnica più utilizzata negli impianti di ossicombustione di prima e di seconda generazione è quella del ricircolo dei gas di combustione (fino all'80%), in modo che l'anidride carbonica e il vapor d'acqua contenuti nei fumi agiscano da moderatori della temperatura di combustione.

L'iniezione di acqua o di vapore è invece una tecnica presa in considerazione per gli impianti di ossicombustione di terza generazione, tuttora in fase di sviluppo concettuale.

Tipicamente negli impianti con ossicombustione si utilizza come comburente, una miscela di ossigeno quasi puro (generalmente con purezza maggiore del 95%) e gas riciclati composti principalmente da CO<sub>2</sub> e vapore d'acqua. I prodotti di combustione che si creano in questo processo sono principalmente costituiti da CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, facilmente separabili poi per condensazione dell'acqua. A seguito di tale separazione si ottengono prodotti di combustione in cui la concentrazione di CO<sub>2</sub> può essere ritenuta idonea al confinamento. Per tale motivo i progetti di ricerca per la costruzione di impianti dimostrativi di ossicombustione stanno suscitando sempre più interesse in tutto il mondo.

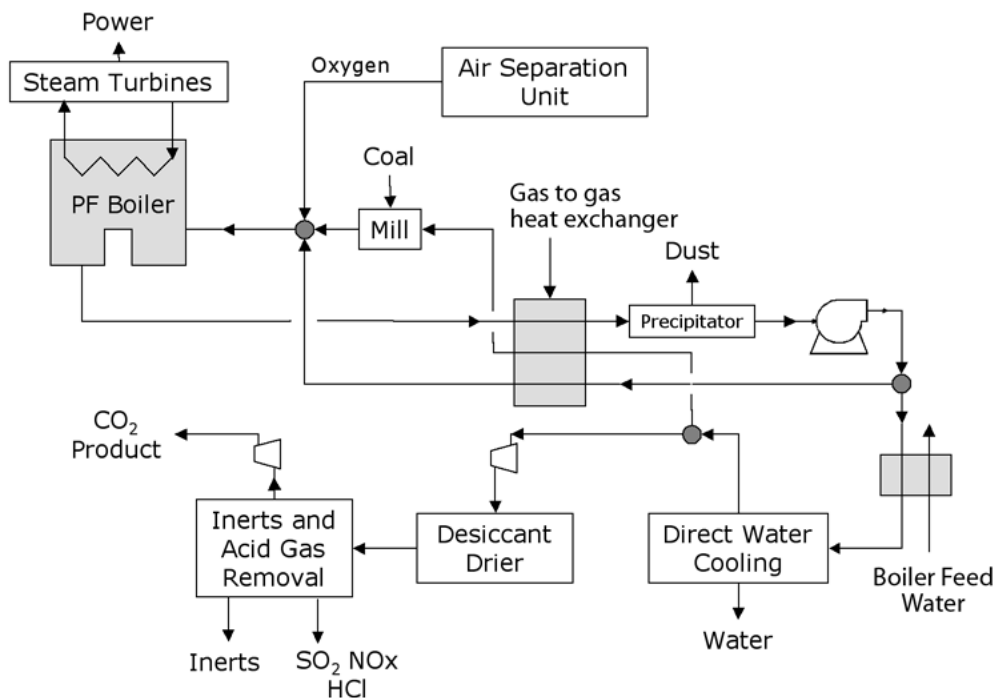
In condizioni operative ideali, i prodotti della combustione possono avere una concentrazione di CO<sub>2</sub> su base secca fino al 95% circa nel caso del carbone o perfino al 98% circa nel caso del gas naturale. Le impurità sono fondamentalmente costituite da specie gassose derivate dal combustibile, quali ad esempio SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl e Hg, ovvero dal comburente o da infiltrazioni d'aria, quali ad esempio argon, ossigeno e azoto. Valori inferiori della concentrazione di CO<sub>2</sub>, anche fino all'80% possono essere determinati da diluizione con aria proveniente da infiltrazioni indesiderate nelle varie sezioni di impianto quando queste operano a pressione inferiore rispetto all'atmosfera [17, 19].

Un impianto di ossicombustione è fondamentalmente costituito da almeno tre sezioni principali:

1. l'unità di separazione dell'aria (ASU, *air separation unit*);
2. il sistema preposto alla ossicombustione;
3. il sistema di trattamento e recupero della CO<sub>2</sub> prodotta (CPU, *CO<sub>2</sub> compression and purification unit*).

La Figura 2.1 mostra uno schema semplificato di impianto di generazione elettrica mediante ossicombustione di polverino di carbone.





**Figura 2.1. Schema semplificato di un impianto di ossicombustione del carbone [33].**

L'unità ASU rappresenta un componente fondamentale dell'impianto, in quanto preposta alla produzione dell'ossigeno. D'altra parte, per via degli elevati assorbimenti di energia che penalizzano fortemente il rendimento complessivo dell'intero impianto, essa rappresenta uno dei due principali punti critici delle tecnologie di ossicombustione. Per tale motivo le attività di ricerca nel settore dell'ossicombustione includono lo sviluppo di tecnologie e processi quanto più possibile efficienti per la produzione dell'ossigeno. Una valida alternativa futura ai sistemi di separazione criogenica dell'aria potrebbe essere rappresentata dalle ITM (*Ion Transport Membranes*), che potrebbero presentare una maggiore efficienza energetica, ma che ancora si trovano in fase di sviluppo [20].

L'ossicombustione finalizzata alla rimozione e al confinamento della CO<sub>2</sub> comporta, rispetto a impianti convenzionali della stessa taglia, una penalizzazione in termini energetici dell'ordine di 7-10 punti percentuali di rendimento sul processo di generazione elettrica, ciò principalmente a causa degli assorbimenti di energia del sistema di produzione dell'ossigeno e di compressione della CO<sub>2</sub>. Tale penalizzazione è tuttavia generalmente inferiore o uguale alla penalizzazione che si ha nei sistemi basati sulle tecnologie di pre-combustione e di post-combustione a causa degli assorbimenti energetici dei processi di separazione della CO<sub>2</sub> e di compressione della stessa [16].

L'eliminazione dell'azoto presente nella combustione con aria determina una drastica riduzione della portata volumetrica finale dei gas reflui fino a valori dell'ordine del 25% rispetto alla combustione con aria a cui corrispondono dimensioni sensibilmente ridotte delle apparecchiature per l'eventuale trattamento finale dei gas. L'assenza (o quasi) di azoto nei gas reflui causa inoltre un contemporaneo aumento della concentrazione di tutte le altre specie presenti quali H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Hg, particolato, ecc., ponendo problemi ulteriori di corrosione, erosione, superamento di valori limite normativi di concentrazione, che impongono specifiche soluzioni.

### 2.3.3 Principali differenze tra la combustione in ossigeno e la combustione in aria

La combustione con ossigeno differisce per molti aspetti dalla combustione con aria. Le principali differenze sono da attribuire ai seguenti aspetti:

- stabilità della combustione;
- ritardo all'accensione;
- temperatura e propagazione della fiamma;
- caratteristiche dello scambio termico;

























