

Formazione e caratterizzazione del particolato (PM) e suoi effetti sulla salute umana
Misure primarie e secondarie per la riduzione degli inquinanti e raccomandazioni

LA COMBUSTIONE DEL LEGNO IN PICCOLI APPARECCHI E CALDAIE

THOMAS NUSSBAUMER

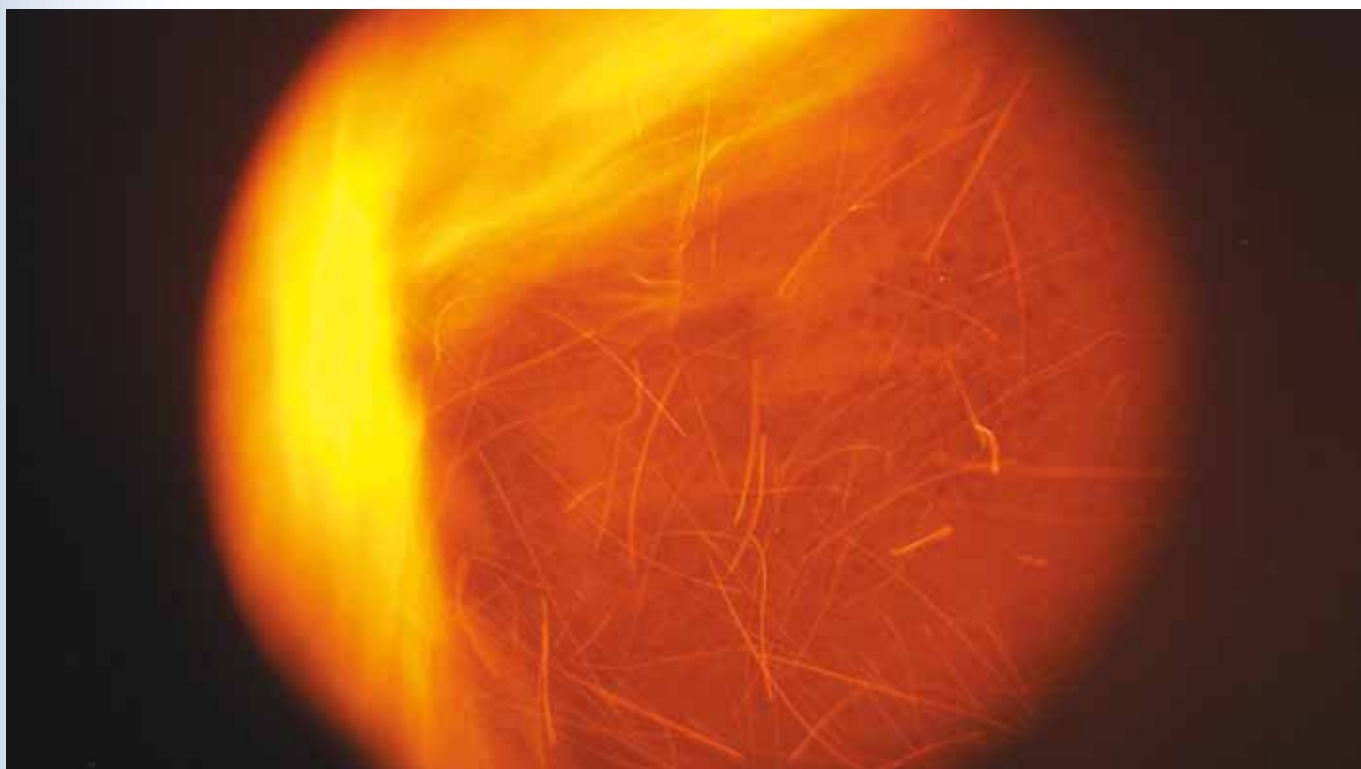
Università di Lucerna (Svizzera)
e Verenum di Zurigo
thomas.nussbaumer@verenum.ch
www.verenum.ch

*Proponiamo la sintesi dell'intervento dell'autore
al workshop «Emissions in small-scale biomass plants»
tenutosi il 22 febbraio 2012 a Verona
nell'ambito della manifestazione Progetto Fuoco*

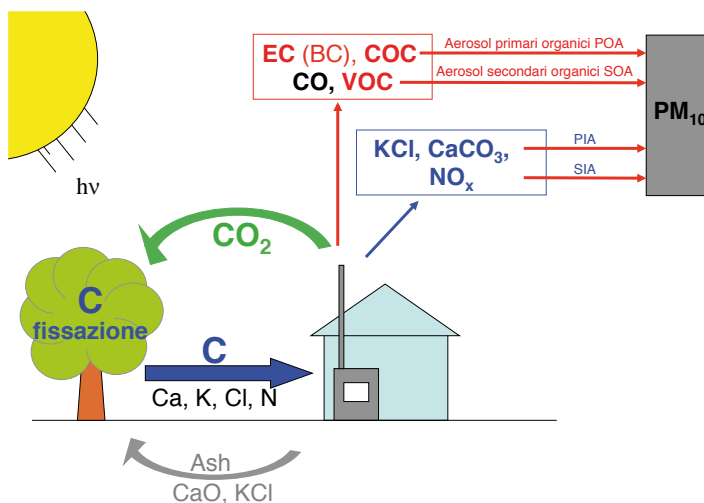


La combustione della biomassa è una fonte rilevante di emissioni di particolato. In Svizzera, l'energia dal legno concorre a produrre circa il 4% del fabbisogno energetico complessivo ma contribuisce per circa il 16% alla produzione di particolato di dimensioni inferiore a 10 micron (PM_{10}) immesso nell'aria. Dal momento che le particelle di combustio-

ne costituiscono un problema sanitario e i valori limite di PM_{10} sono regolarmente superati, specialmente nei periodi invernali, le misure di riduzione di particolato da combustione di biomassa legnosa sono particolarmente importanti. Per quanto riguarda l'aerosol dalla combustione di biomassa, si distinguono due fonti principali di particolato:



1. la combustione incompleta delle biomasse legnose conduce alla produzione di fuliggine (nerofumo) in atmosfera (BC, *black carbon*) e a materiale organico, contribuendo a formare l'**aerosol primario organico** (POA) sotto forma di composti organici condensabili (COC) che tipicamente si trovano sotto forma di goccioline denominate anche «catrame».



Questa frazione organica contribuisce alla formazione in atmosfera del cosiddetto carbonio marrone (*Cbrown*). Inoltre, aerosol secondari di tipo organico (SOA) si formano da composti organici volatili (VOC) mediante reazioni fotochimiche che avvengono nell'atmosfera.

2. le componenti del combustibile legnoso che sono alla base della formazione delle ceneri portano alla creazione di **particelle inorganiche** denominate anche «ceneri leggere» costituite principalmente di sali quali cloruri e ossidi in forma di cloruro di potassio (KCl), solfato di potassio (K_2SO_4), carbonato di calcio ($CaCO_3$) e monossido di calcio (CaO).

Le indagini epidemiologiche hanno mostrato in generale rilevanti effetti negativi del PM_{10} sulla salute. Tuttavia, successive indagini biologiche effettuate su specifiche componenti del particolato da combustione hanno evidenziato rilevanti effetti sulla salute da parte della fuliggine prodotta da motori Diesel e un impatto ancora più

negativo da parte di particelle con alte concentrazioni di composti organici prodotte dalla combustione incompleta del legno.

D'altro canto però, è stato rilevato che le particelle inorganiche derivanti dalla combustione quasi completa di combustibili legnosi (cippato) in una moderna caldaia automatica gestita correttamente, hanno un impatto significativamente inferiore sulla mortalità delle cellule polmonari del criceto.

Accanto agli aspetti legati alla salute, sono da menzionare anche gli effetti del cambiamento climatico. I sali bianchi e in misura minore il «carbonio marro-

ne» riflettono la luce solare e agiscono come nuclei di condensazione (*cloud*), riducendo la temperatura della superficie terrestre.

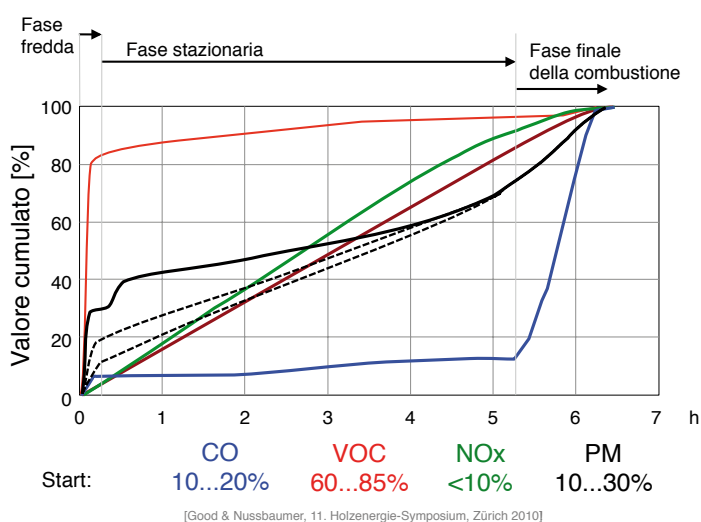
La componente di «carbonio marrone» può anche agire come nucleo condensante e assorbire quindi la luce solare e condurre ad un aumento diretto della temperatura, un motivo in più per ridurre il più possibile la formazione di fuliggine.

Poiché i prodotti della combustione incompleta (PIC) manifestano gli effetti negativi più rilevanti, il requisito fondamentale per la combustione della biomassa è quello di ottenere la quasi completa combustione. Ciò richiede una progettazione adeguata della camera di combustione e quindi del suo funzionamento.

Le esigenze teoriche per la quasi completa combustione sono: combustione ad alta temperatura ($> 800-850\text{ }^\circ\text{C}$), un tempo sufficiente per la reazione ($> 0,3-0,5$ secondi) e adeguata turbolenza per ottenere un'omogenea miscelazione di aria e gas (rispettivamente comburente e combustibile n.d.t.).

Nel loro insieme, temperatura, tempo e turbolenza sono tipicamente riassumibili come la regola delle 3 «TTT». La temperatura di combustione è fortemente influenzata dal rapporto di eccesso d'aria, cioè il rapporto aria/combustibile λ , il contenuto idrico del combustibile e le perdite di calore dalla camera di combustione.

ACCENSIONE: FASE CRITICA PER LE EMISSIONI



Le perdite di calore della fiamma sono elevate durante l'avvio dell'apparecchio a freddo.

Inoltre, gli apparecchi di piccola taglia mostrano valori particolarmente elevati di perdite di calore specifiche dovute allo sfavorevole rapporto tra superficie (di solito maggiore) e volume.

Di conseguenza, un aumento delle emissioni inquinanti derivanti dalla combustione del legno a scala domestica si verificano durante la fase di accensione e le misure per migliorarle sono pertanto fondamentali.

MISURE PRIMARIE: RIDUZIONE DI PM_{10} E NO_x

Un primo effetto positivo di riduzione del PM_{10} si ottiene con l'accensione ottimizzata di stufe a legna tradizionali (con fiamma verso l'alto e combustione a uno stadio), accendendo il carico di combustibile (pezzi di legna) dall'alto con un piccolo modulo di accensione composto da piccoli pezzi di legno tenero molto secco. Ulteriori misure sono necessarie e sono in fase di sviluppo, ad esempio combinando una ridotta capacità termica nella sezione di accensione della legna con una camera di post-combustione separata.

Per le caldaie manuali a legna è fondamentale l'installazione di un accumulatore termico inerziale adeguatamente dimensionato al fine di evitare modulazioni nel funzionamento della caldaia, che, per questo tipo di caldaie manuali, è un elemento molto importante per ridurre i loro fattori di emissione. Il principio di combustione a due stadi con l'inie-

zione di aria primaria per la conversione dei gas del combustibile solido seguita da iniezione di aria secondaria per la successiva ossidazione della fase gassosa in una camera di combustione isolata è ormai da tempo normale prassi per le moderne caldaie a legna. Questo ha consentito un significativo miglioramento della qualità del processo di combustione e delle emissioni correlate.

Per il controllo elettronico in continuo della combustione la caldaia è equipaggiata con sonde lambda e/o sensori di temperatura che consentono di garantire un'adeguata somministrazione di aria in eccesso in tempo reale.

Un ulteriore miglioramento della qualità della combustione si ottiene attraverso l'alimentazione automatica del combustibile che consente condizioni di combustione più regolari e costanti. Per applicazioni residenziali il pellet di legno si adatta bene a differenti tipi di stufe e caldaie e, grazie al basso contenuto idrico e al suo elevato potere calorifico, può tranquillamente raggiungere elevate temperature di combustione.

Per gli impianti industriali e i teleriscaldamenti il combustibile tipicamente uti-

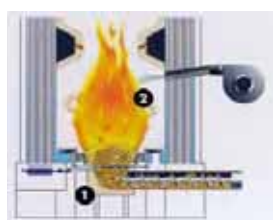
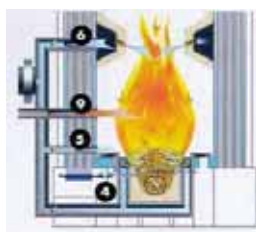
lizzato è il cippato di origine forestale o industriale.

A seconda del contenuto idrico e del tipo di combustibile sono impiegabili diverse tipologie di apparecchi per la conversione energetica delle biomasse legnose. Le caldaie sottoalimentate sono adatte per i combustibili legnosi con contenuto idrico limitato e basso contenuto di ceneri, mentre le caldaie a griglia mobile sono in grado di utilizzare combustibili legnosi con contenuto di cenere più alto e con maggiori contenuti idrici. Per le applicazioni su larga scala, è altresì disponibile la camera di combustione a letto fluido che consente l'utilizzo di miscele di combustibile se la quantità del combustibile è limitato.

Oltre ai costituenti della cenere, la biomassa legnosa contiene anche azoto che è parzialmente convertito in ossidi di azoto (NO_x). Poiché la formazione di NO_x è favorita dalla combustione completa del combustibile, vi è una correlazione tra produzione di particolato e NO_x . Per minimizzare entrambi i tipi di inquinanti possono essere intro-

dotte nella combustione a due stadi delle specifiche misure primarie, ad esempio con ulteriori e separati stadi di iniezione d'aria e combustibile, creando quindi un'ulteriore zona nella caldaia dove l'azoto del combustibile legnoso è convertito - in condizioni sub-stechiometriche - in azoto molecolare (N_2). Se le misure primarie si rilevano ancora insufficienti, possono essere applicate misure secondarie come l'iniezione in caldaia di

IMMISSIONE DI ARIA E COMBUSTIBILE A STADI DIFFERENTI



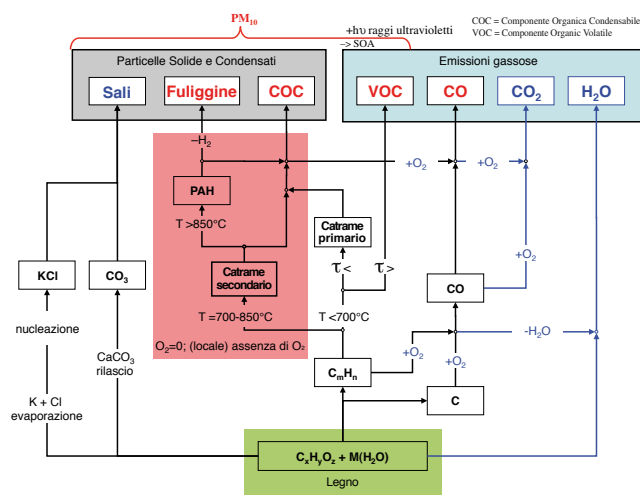
un ulteriore agente ad effetto riducente che agisce ad alte temperature o un catalizzatore a valle dell'impianto. In caso di adozione di queste misure secondarie, si possono formare co-prodotti come l'ammoniaca (NH_3) e acido cianidrico (HCN) e quindi le rispettive emissioni devono, con un funzionamento corretto, essere evitate.

Poiché una miscela omogenea di gas combustibili e aria comburente è il presupposto per la combustione a basso eccesso d'aria e ad alta efficienza, il comportamento fluido-dinamico della caldaia è di particolare importanza. Per questo si applicano modelli teorici e sperimentali per migliorare ulteriormente la progettazione della camera di combustione mediante l'uso di software per la gestione della fluido-dinamica (CFD) i cui dati sono poi convalidati da prove sperimentali e indagini su modelli fluidi freddi con la tecnica delle immagini usando il «velocimetro» di particelle (PIV).

Con il raggiungimento di alti livelli di qualità della combustione, il particolato derivante dalla combustione incompleta può essere ridotto a livelli assai contenuti nei gas di scarico, così come si rimane sotto i limiti di emissione per il monossido di carbonio (CO) e il carbonio organico volatile (VOC) con basso contenuto di composti carboniosi riscontrabili come PM in condizioni stazionarie.

Poiché la componente delle particelle derivante da combustione incompleta può aumentare nella

SCHEMA DI FORMAZIONE DI PARTICELLE DALLA COMBUSTIONE DEL LEGNO



Graph: [Nussbaumer & Lauber 2011]

fase di accensione e in una certa misura nelle fasi di funzionamento a carico parziale, è di fondamentale importanza progettare l'impianto in modo che la caldaia possa lavorare per lunghi periodi a pieno carico. La progettazione degli impianti a biomasse è quindi fondamentale, per questo è raccomandabile l'impiego delle linee guida "QM Quality Management - Centrali a biomassa", un sistema di gestione qualità per impianti di combustione a biomassa già attivo in Svizzera, Germania e Austria.

MISURE SECONDARIE: SISTEMI FILTRO

Dal momento che gli impianti automatici di combustione a biomassa presentano emissioni di PM relativamente elevate,

sono state implementate misure secondarie per consentire il rispetto dei limiti di emissione previsti dalla legge.

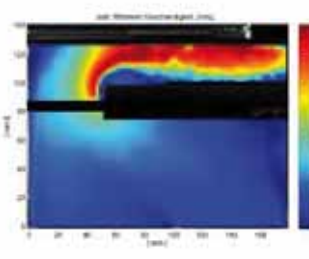
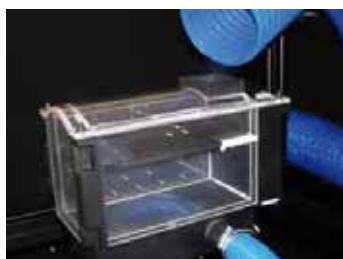
I **filtri a tessuto o a manica** possono condurre a livelli di separazione molto elevati, tuttavia, a causa di una caduta di pressione e l'uso di aria compressa per la pulizia, risultano particolarmente energivori. Inoltre, questi filtri possono essere facilmente danneggiati dalle condense e quindi di solito sono applicati in caldaie che fanno uso di combustibili a basso contenuto idrico.

Il filtro a manica può essere combinato con un adsorbimento a secco per la rimozione di gas acidi come anidride solforica (SO_2) e acido cloridrico (HCl) nonché per la rimozione di diossine e furani (PCDD/F), nel caso di combustibili contaminati.

I **filtri elettrostatici** (ESP) sono i più comunemente impiegati per le caldaie a biomassa in quanto il loro funzionamento è meno soggetto a danni dovuti sia alla formazione di condensa sia anche alle particelle incandescenti. I filtri ESP hanno costi di investimento maggiori e necessitano di più spazio rispetto ai filtri a manica, tuttavia presentano due vantaggi: minore caduta di pressione e minori costi operativi [9].

Poiché i filtri ESP e quelli a tessuto sono solitamente gestiti con limitata efficienza o addirittura «by-passati» a basse temperature, la loro corretta gestione ed impiego risultano cruciali. Benché i filtri elettrostatici siano relativamente robusti e si adattino mol-

IMMAGINI 2D E 3D DEL PARTICOLATO



to bene alla rimozione del particolato, la loro efficienza dipende fortemente dalla composizione delle particelle.

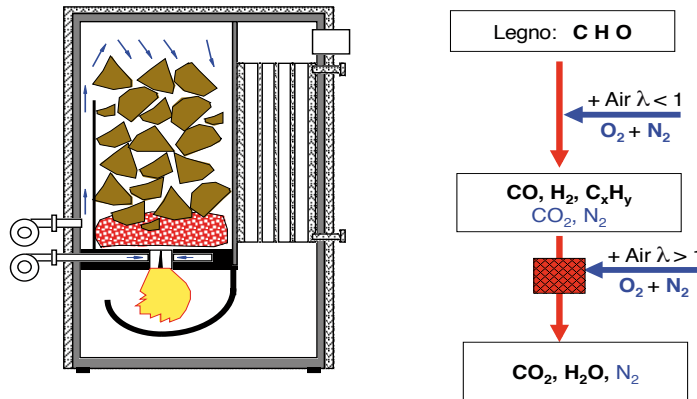
Un'importante proprietà del particolato è la sua resistenza elettrica e la viscosità delle particelle stesse nonché dello strato nel precipitatore. Gli ESP sono adatti per particelle con resistenza media che si riscontra tipicamente in sali prodotti dalla combustione "quasi completa".

La fuliggine che si forma ad alta temperatura di combustione in carenza di ossigeno nella fiamma è altamente conduttiva e ciò porta a un ri-trascinamento di agglomerati di particelle.

Inoltre, la componente organica condensabile del PM (COC) prodotta dalla combustione incompleta a bassa (insufficiente) temperatura presenta un'elevata resistività e crea localmente fenomeni perturbativi al voltaggio operativo dell'elettrofiltro e un sensibile decadimento dell'effetto di rimozione (effetto di *back corona*).

I COC formano uno strato adesivo che è difficile da rimuovere dalle superfici del filtro. Infine, il contenuto di carbonio del particolato nel separatore deve essere limitato a causa del rischio d'incendio. Di conseguenza un buon dispositivo di combustione a monte (misure primarie) è fondamentale per un'efficace applicazione di entrambi i filtri sia a manica (per i combustibili asciutti) sia elettrofiltri.

COMBUSTIONE A DUE STADI A TIRAGGIO FORZATO DAL BASSO



rendimento >90% indispensabile l'installazione dell'accumulo termico

Altri dispositivi di separazione del particolato applicabili agli impianti a biomassa sono i filtri a lavaggio (*wet scrubber*). Tuttavia, a causa della loro limitata efficienza di separazione del particolato prodotto dalla combustione delle biomasse, essi non sono comunemente usati per la rimozione del PM. Nel caso di impianti che fanno uso di biomassa con alto tenore di umidità si può applicare un sistema di condensazione a valle del generatore per aumentare significativamente l'efficienza energetica dell'impianto. In questi casi l'abbinamento con un si-

stema filtro, ad esempio un ESP a umido è altresì applicabile. Mentre i filtri elettrostatici e a tessuto sono comunemente impiegati in impianti industriali, con le descritte limitazioni, i filtri anti-particolato per applicazioni domestiche (apparecchi e caldaie) sono ancora in fase di sviluppo e alcuni sono stati testati sul campo negli ultimi dieci anni.

Per tali applicazioni l'ESP è stato proposto come applicazione separata dopo la caldaia e inserito nel tubo di scarico dell'apparecchio prima del camino, oppure come inserto nel camino, o come dispositivo separato installato direttamente sulla parte sommatata dell'impianto fumario.

Ognuna di queste applicazioni ha mostrato specifici vantaggi e svantaggi. Questi piccoli ESP – se correttamente applicati e gestiti – consentono di ottenere livelli di separazione da buoni (50%) a molto elevati (> 95%). Tuttavia le esperienze sul campo fin qui condotte mostrano limiti di efficienza e di applicazione pratica.

In particolare per molte applicazioni l'efficienza di abbattimento durante l'avviamento a freddo – fase ad alta emissione – non è ancora stata chiaramente provata. Pertanto le misure primarie volte a conseguire la quasi completa combustione rimangono ancora fondamentali per le applicazioni residenziali. ●

EVOLUZIONE DEI PARAMETRI DI COMBUSTIONE

