

Caratterizzazione delle emissioni inquinanti e composti organici volatili prodotti da una caldaia a legna ad alta efficienza per usi residenziali

In questo lavoro si sono caratterizzate le emissioni prodotte dalla combustione della legna di abete utilizzando diverse parti della pianta: ramaglie, rami, tronco (senza corteccia), radici, corteccia e aghi. Le prove sono state svolte presso i laboratori dell'Università degli Studi di Trento, in una caldaia a gassificazione a fiamma rovesciata ad alta efficienza da 25kW. I risultati sono stati confrontati con dati di letteratura scientifica.

GASEOUS EMISSIONS AND VOLATIL ORGANIC COMPOUND CHARACTERIZATION FROM A GASIFYING WOOD STOVE FOR RESIDENTIAL APPLICATION

The aim of this section is the characterization of the emissions of the spruce. The experimental campaign has been carried out in the laboratories of Trento University, Italy, using a two staged, high efficiency (25kW), air wood stove. The following parts of the spruce have been tested: branches, branchlets, trunk (bark free), roots, bark and needles. The average values calculated from the data collected have been compared with other values found in literature.

INTRODUZIONE

La combustione della legna, considerata tra le più promettenti fonti energetiche vista l'ampia disponibilità e diffusione sul territorio, è un processo che, se non opportunamente controllato, può comportare alti livelli di emissioni inquinanti.

Questo lavoro fa parte di un progetto di ricerca denominato "BI-QUEEN" - Biomasse di Qualità per la produzione Efficiente di Energia - e finanziato dalla fondazione CARITRO. Il progetto si basa sulle sinergie e collaborazioni tra istituti e centri di ricerca localizzati in Trentino, quali IVALSA/CNR, Università di Trento e FBK-Fondazione Bruno Kessler, e ha lo scopo di caratterizzare le emissioni gassose, dei composti organici volatili (VOC) e del materiale particolato, prodotti dalla combustione della legna di abete, che è una delle specie più diffusa in Trentino.

SISTEMA SPERIMENTALE

Le prove di combustione sono state svolte presso i laboratori dell'Università degli Studi di Trento, in una caldaia a gassificazione a fiamma rovesciata ad alta efficienza con potenza termica compresa tra gli 11 e 30 kW adatta alla produzione di acqua calda per il riscaldamento.

Durante la fase sperimentale si è scelto di caratterizzare le emissioni delle singole parti della pianta bruciando campioni separati di radici, tronco, rami, rametti e aghi. In una prima fase i campioni di legna sono stati manualmente omogeneizzati per avere, per quanto possibile, ciocchi di eguale lunghezza. In una seconda fase la legna è stata sminuzzata e sono state create delle bricchette.

I fumi al camino sono stati monitorati attraverso l'utilizzo di due linee dedicate di prelievo: la prima per l'analisi dei gas e la seconda per le analisi del materiale particolato (linea di diluizione a freddo).

L'analisi dei gas emessi al camino viene svolta attraverso l'utilizzo di un analizzatore fumi a sensori elettrochimici ed ad infrarosso. La linea di prelievo dei gas presenti nei fumi della combustione è stata completata con la possibilità di raccogliere alcuni campioni di gas in sacche per l'analisi successiva utilizzando tecniche dedicate di laboratorio. I composti volatili presenti nei campioni sono stati misurati tramite spettroscopia laser PA e spettrometria PTR-MS presso i laboratori della FBK-Fondazione Bruno Kessler.

Nella linea di diluizione a freddo sono state misurate le concentrazioni di polveri con l'utilizzo di un contatore di particelle dotato di tecnologia laser-scattering.

Le analisi fisiche della legna sono state operate in modo autonomo, al fine della determinazione dell'umidità e del peso della legna utilizzata, presso i laboratori dell'Università di Trento. Sono state inoltre monitorate le temperature sia in camera di combustione sia lungo le sezioni d'ingresso e uscita dallo scambiatore di calore, sia per quanto riguarda il lato acqua sia per quello fumi.

METODOLOGIE DI CALCOLO

Il combustibile utilizzato in questa ricerca è costituito da parti distinte provenienti da alberi di abete rosso. Il contenuto idrico presente nella legna utilizzato nelle prove di combustione è stato misurato essiccando un campione rappresentativo in stufa secondo la procedura indicata dalla norma UNI CENT/TS 14774-2 (Metodi per la determinare l'umidità - Metodo di essiccazione in stufa).

Parametri di combustione

L'impianto sperimentale è stato monitorato durante la prova con una serie di sensori di temperatura e un misuratore di portata che permette la misura del flusso d'acqua circolante nell'impianto idraulico della caldaia. Sulla base dei parametri monitorati e dalla conoscen-

za delle caratteristiche del combustibile si possono ricavare alcune informazioni utili per descrivere il processo di combustione secondo le specifiche presenti nelle normative tecniche: UNI EN 12809:2004 "Caldaia domestiche indipendenti a combustibile solido - Potenza termica nominale non maggiore di 50 kW - Requisiti e metodi di prova".

Emissioni

Il problema delle emissioni al camino può essere affrontato utilizzando tre diversi metodi di calcolo delle emissioni:

- la concentrazione di inquinante nei fumi (ppm oppure mg/Nm³);
- fattore di emissione input-based, ossia per unità di energia del combustibile (mg/MJ_{fuel});
- fattore di emissione output-based, ossia per unità di energia utile prodotta (mg/MJ_{utile}).

Nel primo caso (concentrazione) non vi è un immediato legame tra quantità d'inquinante emesso ed energia del combustibile e non vi è nessuna informazione sull'efficienza della conversione.

Nel secondo caso (fattore di emissione input-based) non vi è nessuna informazione sull'efficienza della conversione. Invece, nel terzo caso (fattore di emissione output-based) vi è un chiaro indicatore del rapporto tra il costo ambientale (emissioni) e l'energia utile prodotta dal sistema. I diversi approcci sono utilizzati in diversi contesti: ad esempio, a livello normativo si trovano spesso i limiti di emissione di inquinanti espressi in termini di concentrazione (fanno eccezione Austria e Germania), gli inventari delle emissioni contengono informazioni in termini di fattore di emissione input-base, invece in letteratura scientifica si cerca sempre più di fornire i dati di emissione in termini di fattori di emissione sia input-based che output-based.

Composti Organici Volatili (VOC)

La tecnica utilizzata per la determinazione dei composti organici volatili è la spettrometria di massa con ionizzazione per reazione di trasferimento protonico. I composti scelti sono quelli che presentano un rapporto segnale/rumore significativo dal punto di vista dell'analisi. In questo lavoro saranno presentati i valori dei composti organici volatili totali come sommatoria dei singoli composti, analizzati mediante spettrometria di massa con ionizzazione per reazione di trasferimento protonico.

Materiale particolato

Il conta particelle utilizzato può fornire la misura di concentrazione o in numero di particelle per unità di volume o in µg/m³ (concentrazione di massa) per ogni classe granulometrica. Si è scelto di ottenere i dati in particelle per unità di volume (particle/m³) e di trasformarli successivamente in concentrazioni in massa su volume normalizzato. La concentrazione ricavata, espressa in mg/Nm³, è stata corretta utilizzando il fattore di diluizione dei fumi così da tener conto dell'effetto della linea di diluizione. Per ogni intervallo sono stati, quindi, calcolati i valori di concentrazione cumulata espressi come PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ e PM_{totale}.

MISURE SPERIMENTALI

Il combustibile utilizzato in questa ricerca è costituito da parti differenti della pianta provenienti da alberi di abete rosso. La sperimentazione ha previsto due fasi sperimentali distinte: nella prima fase si è cercato di caratterizzare la combustione dei campioni di

legna di abete secondo un criterio di utilizzo reale; si sono preparati i campioni secondo la pezzatura che solitamente viene utilizzata nella combustione in caldaia.

Nella seconda fase della sperimentazione si è cercato di ridurre una delle variabili in gioco che caratterizzava i campioni di abete: la forma. Si è quindi operato in modo da uniformare i campioni di legna. I campioni sono stati sminuzzati e bricchettati; è stato possibile preparare sei campioni distinti: radici, fusto (senza corteccia), rami, ramaglie, corteccia e aghi (Tabella 1).

Descrizione in italiano	Nome completo in inglese	Codice campione
I fase sperimentale - Combustibile tal quale		
Rami grandi diametro 40-80 mm	Big Branches	BBRA_1
Rami medi diametro < 40 mm	Medium Branches	MBRA_1, MBRA_2, MBRA_3
Tronco (senza corteccia)	Trunk	TRUN_1
Radici	Roots	ROOT_1, ROOT_2
Ramaglie secche	Dry Branchlets	DBRA_1, DBRA_2
Ramaglie fresche	Wet Branchlets	WBRA_1, WBRA_2
II fase sperimentale - Combustibile in bricchette		
Tronco (senza corteccia)	Trunk	B_TRUN_1
Corteccia	Bark	B_BARK_1, B_BARK_2
Radici	Roots	B_ROOT_1
Rami medi diametro < 40 mm	Medium Branches	B_MBRA_1
Ramaglie	Branchlets	B_BRAN_1
Aghi	Needles	B_NEED_1

TABELLA 1 - Campioni bruciati durante la ricerca e relativi codici identificativi utilizzati

I campioni così ottenuti sono stati bruciati in caldaia seguendo una procedura che replicasse per ogni prova gli stessi parametri di combustione. I dati registrati nelle diverse prove ritenute valide sono stati allineati a partire dalla fase di accensione per poter confrontare l'andamento dei profili di temperatura. Tutti i profili mostrano un andamento di temperatura che presenta periodi di crescita e decrescita, caratterizzati dalla fase di combustione in corso al momento della registrazione dei dati (accensione o pre-combustione, combustione a regime e post-combustione o spegnimento) e condizionata dalla manovra di apertura e chiusura del portello di carica della caldaia. La media della potenza utile fornita dal processo di combustione all'acqua presente nel circuito idraulico è di circa 30 kW durante le prove di combustione con combustibile tal quale, per abbassarsi a un valore medio di circa 23 kW durante la combustione delle bricchette. Il fenomeno può essere giustificato dal fatto che si è modificata la sezione utile della griglia di combustione per effettuare la combustione delle bricchette, di conseguenza si è vista diminuire la portata di combustibile e quindi la potenza totale disponibile. Le grandezze in gioco sono tra loro paragonabili: si riscontra in media (su tutte le prove) una potenza utile del 78% e valori di perdite rispettivamente del 17.8%, 0.5% e 3.7% per le perdite termiche ai fumi, chimiche ai fumi e di trasmissione al mantello.

ANALISI DELLE EMISSIONI

In prima analisi si sono confrontati i risultati delle emissioni ottenute dalle due campagne di misura del progetto: combustibile tal quale e combustibile in bricchette. Si è scelto di utilizzare come parametro di confronto i fattori di emissione output-based perché meglio rappresentano tutte le informazioni disponibili riguardanti il processo di combustione.

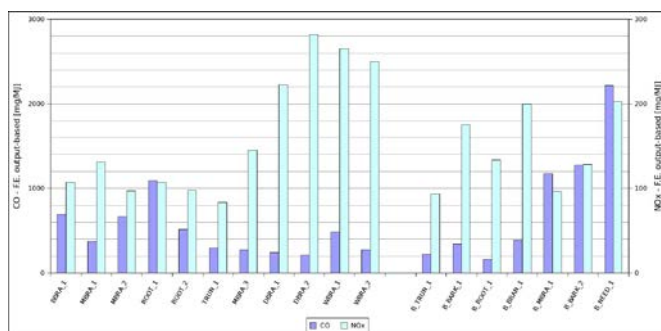


FIGURA 1 - Fattori di emissione di CO e NO_x - progetto BiQuEEn

Da una prima analisi dei dati si nota (Figura 1) come vi sia una relazione tra CO e NO_x: quando vi sono valori molto bassi di CO si riscontrano alti valori di NO_x. Questo è giustificato dal fatto che le basse concentrazioni di CO implicano una buona combustione in cui il carbonio disponibile viene trasformato prevalentemente in CO₂. Una buona combustione implica temperature maggiori in camera di combustione con la conseguente formazione di concentrazioni maggiori di ossidi di azoto. Si nota, inoltre, una variabilità nelle emissioni di CO tra campioni della stessa matrice come ad esempio le radici, ramaglie secche e bricchette di corteccia. Questo a sottolineare un'importanza primaria della tecnologia di combustione rispetto alla natura del combustibile utilizzato.

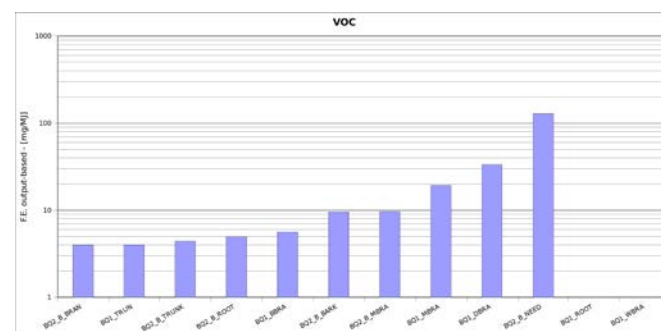


FIGURA 2 - Fattori di emissione di VOC - progetto BiQuEEn

I fattori di emissione dei VOC totali, espressi in mg/MJ per energia utile prodotta, sono stati calcolati come sommatoria di tutti i composti analizzati (20 composti di massa compresa tra 30 e 137). Si nota (Figura 2) come i campioni di tronco, radici e rami grandi presentino fattori di emissioni minori anche della metà rispetto ai campioni di corteccia, rametti e aghi. Da questo tipo d'indagine si può concludere come il fattore di forma sia un discriminante per quanto riguarda la produzione di composti organici volatili. Le

bricchette presentano fattori di emissione di VOC minori rispetto alla combustione di campioni tal quale ad eccezione dei campioni di tronco che presentano all'incirca lo stesso fattore di emissione. I fattori di emissione di campioni tal quale seguono un andamento in funzione delle dimensioni del materiale, i campioni di tronco e rami grandi presentano fattori di emissioni minori rispetto ai rami medi e ramaglie secche.

L'assenza di dati sui campioni tal quale di radici e corteccia non permette un'analisi completa del fenomeno. In generale tra le bricchette composte da varie parti della pianta si osserva una diminuzione della produzione di VOC per quanto riguarda l'utilizzo dei rametti, tronco, rami o radici rispetto all'utilizzo di corteccia o aghi.

I valori relativi ai fattori di materiale particolato (polveri sottili) sono disponibili solamente per la seconda campagna di misure. La presenza di materiale omogeneo ha provocato una combustione più regolare e questo ha permesso una regolazione ottimale del sistema di diluizione; è stata possibile un'analisi delle concentrazioni misurate per tutti i campioni ad eccezione del campione di aghi per problemi al sistema di campionamento.

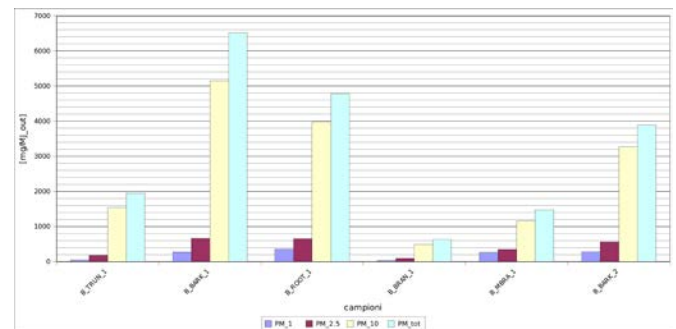


FIGURA 3 - Fattori di emissione di Materiale Particolato in mg/MJ

I valori relativi ai fattori di materiale particolato (polveri sottili) divisi secondo quattro diametri ritenuti rappresentativi (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ e PM_{totale}) sono presentati. Si nota come il campione dei rami presenta bassi valori di polveri totali, ma valori di polveri di granulometria inferiore (PM₁) simili ai campioni di corteccia e abete. In generale, il PM₁₀ è in media l'80% del particolato totale per tutti le prove analizzate con scostamenti poco significativi tra i vari campioni.

Confronti con dati di letteratura

I dati ottenuti possono essere confrontati con altre ricerche presenti negli articoli di letteratura scientifica ([1] & [2]). Si sono scelti alcuni articoli recenti che forniscono dettagliate informazioni riguardo a una notevole casistica di impianti di combustione della legna come ad esempio: caldaie tradizionali a legna (old), moderne caldaie a legna (modern), moderne stufe e caldaia a pellet (pellet) [1] e dati relativi all'utilizzo reale di impianti di combustione comuni in Finlandia come le stufe ad accumulo (moderne - MMH e tradizionali - CMH), le stufe (semplici - S o da sauna - SS) e i forni a legna (BO) [2]. I dati reperiti in letteratura sono presentati come fattore di emissione input-based. La conversione tra mg/MJ e mg/Kg implica la conoscenza del potere calorifico del combustibile; nello studio viene detto che il combustibile utilizzato è abete rosso (spruce) e

betulla (birch). Il potere calorifico delle due tipologie di legname non varia di molto: 18.7 MJ/Kg per la betulla e 18.7 MJ/Kg per l'abete rosso. Nello studio di Johansson et al., [1] sono stati utilizzati diversi combustibili pellet, bricchette e ciocchi di legno.

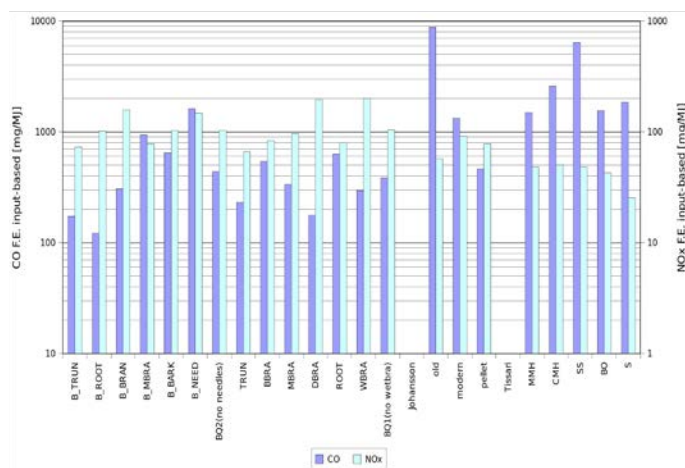


FIGURA 4 - Fattori di emissione di CO e NO_x - confronto progetto BiQuEEn e dati di letteratura scientifica

Generalmente si notano minori emissioni per il campione di tronco senza corteccia probabilmente sia perché questo campione presenta una composizione più omogenea rispetto agli altri campioni sia perché viene privato della corteccia che contiene un maggior percentuale di ceneri. Confrontando i risultati preliminari ottenuti nel progetto BiQuEEn con i dati presenti in letteratura si nota come l'impianto di combustione sia il vero discriminante rispetto al combustibile utilizzato; infatti, la caldaia a doppio stadio utilizzata presenta fattori di emissione simili agli impianti tecnologicamente più evoluti come le caldaie moderne a legna e a pellet. I fattori di emissione di TOC sono disponibili solo nello studio di Johansson et al., [1]; dal confronto si nota come i valori del progetto BiQuEEn si collochino a metà strada tra i fattori di emissione di caldaia moderne e stufe a pellet. L'analisi dei VOC presenta valori minori nei campioni di bricchette rispetto ai campioni tal quale che sono invece confrontabili con i dati di Johansson et al., [1] per quanto riguarda le caldaie moderne e gli impianti a pellet. Anche in questo caso gli studi di Tissari et al., [2] presentano valori maggiori. Nel caso dei fattori di emissione di polveri si nota una differenza anche tra le due ricerche in esame; in particolare sia i valori di PM₁ di Tissari sia quelli di PM₁₀ di Johansson sono dello stesso ordine di grandezza pur appartenendo a classi granulometriche molto diverse tra loro. Questo potrebbe in parte essere giustificato dalle diverse tipologie di combustione. In generale, anche i risultati del progetto BiQuEEn, che sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di una tecnologia avanzata di combustione, presentano fattori di emissione per le polveri molto minori rispetto a quelli reperiti in letteratura.

CONCLUSIONI

Si è notato come l'impianto di combustione sia il vero discriminante rispetto al combustibile utilizzato; infatti, la caldaia a doppio stadio

utilizzata presenta fattori di emissione simili agli impianti tecnologicamente più evoluti come le caldaie moderne a legna e a pellet. Per avere una stima generale della produzione d'inquinanti in relazione alla parte di abete utilizzata come campione per la combustione, si è scelto di costruire una matrice in cui si attribuisce ad ogni campione il valore relativo alla posizione occupata, creando una lista in cui i valori vengono ordinati in maniera crescente, in relazione ai fattori di emissione output-based ricavati per ogni composto analizzato. In una prima analisi si sono esclusi i valori relativi al materiale particolato in quanto sono disponibili solamente i dati ricavati nella seconda campagna di misure, durante la combustione di bricchette. I campioni che presentano emissioni minori sono quelli corrispondenti ai campioni di tronco. Seguono i campioni di bricchette costituiti da rametti e radici, i campioni tal quale di rami grandi, la corteccia in bricchette, i campioni tal quale di rami medi, ramaglie umide e ramaglie secche.

Si ritrovano nelle ultime posizioni della lista i campioni che hanno avuto una combustione più lenta e che quindi presentano fattori di emissione più elevati come le bricchette di rami medi, le radici tal quali e le bricchette di aghi.

Possiamo estendere lo stesso ragionamento includendo i fattori di emissione del materiale particolato suddiviso in due gruppi: PM₁ & PM_{2,5} e PM₁₀ & PM_{tot}. In questo caso i campioni di tronco risultano tra i campioni meno inquinanti, anche se al primo posto si sono posizionati i campioni di rametti secchi che hanno presentato minori valori di emissione di particolato. Il tronco viene seguito dalle radici, dai rami grandi e dalla corteccia.

In conclusione si nota come i campioni di tronco (senza corteccia) presentano in generale fattori di emissione minori rispetto agli altri campioni, indipendentemente dalla conformazione scelta (campioni tal quale o bricchette). Si nota un miglioramento della combustione operando alla bricchettatura dei campioni analizzati. Le parti più inquinanti della pianta risultano la corteccia e gli aghi.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per la collaborazione al progetto BiQuEEn: Negri M., Fellin M., Sandak J., Sandak A. del CNR-IVALSA per la preparazione dei campioni di abete. Avi D., Scotoni M. del Dipartimento di Fisica, Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare dell'Università degli Studi di Trento per i campionamenti di VOC. Boschetti A. della Fondazione Bruno Kessler (FBK) per l'analisi dei composti volatili tramite spettroscopia laser PA e spettrometria PTR-MS.

BIBLIOGRAFIA

- Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A., "Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets". *Atmospheric Environment*, Vol. 38, pp.4183-4195, 2004.
- Tissari J., Lyrranen J., Hytonen K., Sippula O., Tapper U., Frey A., Saarnio K., Pennanen A.S., Hillamo R., Salonen R.O., Hirvonen M.R., Jokiniemi J., "Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater". *Atmospheric Environment*, Vol. 42, pp. 7862-7873, 2008.