



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI, DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

EFFETTI DELLA LUNGHEZZA DEL
PELLET DI LEGNO SUI LIVELLI DI
EMISSIONE DI UN IMPIANTO TERMICO
DOMESTICO

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
THOMAS GASPERINI

Relatore:
PROF. GIUSEPPE TOSCANO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Ai miei cari che mi hanno sostenuto
durante tutto il percorso

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	7
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	8
CAPITOLO 1 BIOMASSE, BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI E PELLET.....	10
1.1 Cos'è il pellet.....	11
1.1.1 Processo di pellettizzazione	12
1.2 Normativa, biomasse e pellet.....	13
CAPITOLO 2 IMPIANTI TERMICI DOMESTICI.....	15
2.1 Stufa a pellet	15
2.2 Combustione dei biocombustibili solidi	16
2.3 Emissioni da combustione	18
2.3.1 Limiti delle emissioni	19
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI	20
3.1 Campioni di pellet.....	20
3.2 Analisi dimensionale del pellet.....	20
3.3 Analisi fisiche ed energetiche	22
3.3.1 Contenuto di umidità.....	23
3.3.2 Contenuto in ceneri	23
3.3.3 Potere Calorifico Superiore e Inferiore	23
3.3.4 Proprietà fisiche del pellet.....	23
3.4 Analisi di portata massica	24
3.5 Analisi delle emissioni.....	25
CAPITOLO 4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI	28
4.1 Risultati delle analisi dimensionali	28

4.2 Risultati delle analisi fisiche ed energetiche	31
4.3 Risultati delle analisi di portata massica	32
4.4 Risultati delle analisi delle emissioni.....	33
CONCLUSIONI	36
BIBLIOGRAFIA	38

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 – Confronto dei limiti delle emissioni di monossido di carbonio tra due impianti termici domestici.....	19
Tabella 2 - Analisi di caratterizzazione del pellet, riferimento normativo e strumentazione utilizzata.....	23
Tabella 3 - Risultati delle analisi fisiche ed energetiche.....	31
Tabella 4 – Risultati delle analisi di portata massica	32

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 - Schematizzazione di una trafila orizzontale.....	12
Figura 2 - Schematizzazione di una stufa a pellet (Pizzi, op cit)	16
Figura 3 - Schematizzazione del processo di combustione (Boman, op. cit.).....	17
Figura 4 - A sinistra il box metallico contenente microcomputer, sensore IR e piatto estraibile; a destra il software di elaborazione MetaLab.....	21
Figura 5 - Immagine generata dal sistema hardware-software MetaLab.	22
Figura 6 - A sinistra, lampada alogena per il riscaldamento della termocoppia; a destra, scivolo metallico per l'allontanamento del pellet dal braciere.	25
Figura 7 - Banco di lavoro durante le analisi delle emissioni con analizzatore MRU	26
Figura 8 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G3306.....	28
Figura 9 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G2076.....	29
Figura 10 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G4216.....	30
Figura 11 - Rappresentazione dei risultati delle analisi di portata massica e termica.....	32
Figura 12 - Raccolta dati medi dei principali valori considerati per l'analisi della qualità delle emissioni.....	33
Figura 13 - Rappresentazione grafica dei dati numerici ottenuti dalle analisi delle emissioni durante i tre programmi utilizzati.....	35

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

EN	Normazione Europea
Fig.	Figura
ISO	Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione
PCS	Potere calorifico superiore
PCI	Potere calorifico inferiore
Tab.	Tabella
TGA	Analizzatore termogravimetrico
UNI	Ente nazionale italiano di unificazione

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il pellet di legno, oggetto della presente tesi, è uno dei biocombustibili solidi di maggiore interesse nell'ambito del riscaldamento domestico dove il suo utilizzo è diffuso in modo capillare anche in centri con elevata popolazione. L'Italia è il primo paese a livello europeo per il numero di impianti domestici a pellet, con circa 2,2 milioni di unità installate. Si tratta quasi esclusivamente di stufe, termocamini e caldaie con potenze inferiori a 35 kW. Il consumo di pellet in Italia, che stando ad alcune statistiche ammonta a circa 3,4 milioni di tonnellate, è da attribuirsi quindi soprattutto al settore domestico.

Nel periodo 2010-2018, il peso delle stufe a pellet sul totale dei generatori di calore a biomasse legnose installati in Italia è passato dal 6% al 20%.¹ L'aumentato interesse verso questo tipo di impianto è da attribuirsi all'evoluzione tecnologica che li differenzia da altri impianti tradizionali, come ad esempio camini aperti.

Il costante aumento di utilizzo dei biocombustibili, in particolare del pellet di legno, motivato anche dall'incremento dei prezzi dei combustibili fossili, rende necessario lo sviluppo tecnico dei sistemi utilizzati dal settore e uno studio approfondito delle proprietà di tali prodotti energetici al fine di ottimizzarne l'efficienza energetica nel loro utilizzo e ridurre le emissioni inquinanti in atmosfera.

Questi aspetti sono particolarmente rilevanti nei piccoli impianti domestici, quali stufe a pellet, dove il miglioramento qualitativo della combustione ha comunque raggiunto importanti risultati. L'attenzione per gli elementi ambientali, così come per l'inquinamento atmosferico, è seguito con attenzione dalle autorità pubbliche che chiedono, tramite regolamenti regionali, migliori prestazioni ambientali da parte dei dispositivi termici alimentati a biocombustibili solidi. Inoltre, il livello qualitativo del pellet è fortemente migliorato negli ultimi anni grazie anche alla diffusione dei sistemi di controllo per certificazione o di verifica della conformità alla norma UNI EN ISO 17225-2.

Il moltiplicarsi degli studi ha dato rilievo all'importanza delle proprietà geometriche del pellet, in particolare la lunghezza, parametro da sempre poco considerato da produttori e

¹ D. Rossi, M. Favero, *Speciale Pellet: I consumi in Italia, quanto e dove*, Agriforenergy n. 4, dicembre 2020.

consumatori. La lunghezza del pellet incide sul modo con cui il prodotto occupa lo spazio e quindi condiziona le portate movimentate dalla coclea degli impianti termici domestici. Inoltre, questo parametro condiziona la disposizione spaziale del pellet nel braciere, la quale può incidere sulla corretta miscelazione tra il biocombustibile e l'aria comburente.

L'obiettivo della presente tesi è quindi quello di valutare l'incidenza della lunghezza del pellet sul comportamento di un impianto termico domestico a pellet e sull'andamento delle emissioni gassose.

I test sperimentali sono stati condotti presso il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche, mentre la produzione di lotti di pellet di legno con lunghezze differenti impiegata per le prove di combustione è stata realizzata presso l'azienda Civita Pellet a Morrovalle (MC).

CAPITOLO 1

BIOMASSE, BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI E PELLETTI

Dagli inizi del 2000 ad oggi si è assistito ad una espansione e consolidamento di impiego delle biomasse come fonte di energia negli impianti di riscaldamento domestico.² Ma che cosa si intende con il termine “biomasse” e quali effettivamente sono considerabili per la bioenergia? La Direttiva 2001/77/CE le definisce come “parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.”³

La composizione della biomassa è di fatto altamente eterogenea, e dipende dalla tipologia o dal materiale di origine. Tuttavia, nel caso dei biocombustibili di origine lignocellulosica è possibile distinguerne tre componenti principali: (i) la sostanza organica, componente prevalente, è la frazione coinvolta nei processi di combustione. Costituita da macromolecole complesse quali l’emicellulosa, la cellulosa, la lignina e sostanze quali pectine o estrattivi (resine ed altre sostanze). Contribuisce a generare energia dal processo di combustione. Al variare del tipo di biomassa, e quindi di composizione chimica, l’energia liberata può variare sensibilmente ed incidere quindi sul potere calorifico del prodotto; (ii) la sostanza inorganica, costituita da molecole complesse o sali inorganici, è la frazione che non contribuisce alla combustione, bensì tende a produrre effetti indesiderati ma in parte gestibili, come la produzione di ceneri. Il quantitativo di sostanza inorganica è variabile e dipende dal tipo di materia prima e dalle condizioni ambientali e operative di produzione e gestione della biomassa. Gli elementi che costituiscono la sostanza inorganica sono definiti “macro-elementi”, nel caso del potassio, calcio, magnesio, ecc. o “micro-elementi”, presenti in tracce, come sodio, zinco, alluminio, ferro, ecc.; (iii) l’acqua (umidità), sempre presente in qualsiasi tipo di biomassa lignocellulosica, e che incide in modo importante sul contenuto energetico del

² J.I. Arranz, M.T. Miranda, I. Montero, F.J. Sepúlveda, C.V. Rojas, *Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe*, Fuel 142, 2015.

³ Direttiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, 27 settembre 2001, in GUCE L 283/03, 27.10.2001.

prodotto. Difatti, l'acqua presente nella biomassa, sottrarrà energia in sede di combustione necessaria alla sua evaporazione. L'umidità è un fattore importante anche per altri aspetti, quali la stabilità biologica della biomassa durante lo stoccaggio condizionata dai processi connessi all'attività microbica, che portano alla perdita di sostanza secca e al rischio di fenomeni indesiderati, come la combustione spontanea dei cumuli di biomassa.

Tra le biomasse solide lignocellulosiche più utilizzate per la produzione di energia termica, soprattutto per l'alimentazione degli impianti domestici, vi è il pellet. Si distingue dal resto dei biocombustibili legnosi per il fatto di essere prodotto in impianti industriali e, pertanto, di presentare proprietà particolarmente omogenee.

1.1 Cos'è il pellet

Con il termine "pellet" viene indicato quel biocombustibile densificato ricavato dalla trasformazione di legno vergine, di forma cilindrica, con diametro compreso tra 6 mm e 8 mm e lunghezze comprese tra 3,15 mm e 40 mm. La forma tipica di questo biocombustibile, che viene mantenuta prevalentemente grazie all'effetto legante della lignina naturalmente presente nel legno e alle elevate pressioni e temperature in fase di produzione, porta a numerosi vantaggi. Difatti, partendo da una materia prima altamente eterogenea, il processo di pellettizzazione consente di ottenere un prodotto caratterizzato da proprietà chimico-fisico, geometriche e meccaniche omogenee. Altri aspetti vantaggiosi sono riscontrabili nella facilitazione degli aspetti logistici, come trasporto e stoccaggio, nell'elevata densità energetica e nella omogeneità e stabilità del contenuto di umidità (sempre sotto al 10% tal quale) che garantisce un costante e potenzialmente prevedibile valore di portata termica nell'impianto. Infine, l'elevata omogeneità del pellet lo rende un prodotto ad elevata standardizzazione. Il processo produttivo del pellet, che verrà approfondito nel paragrafo successivo, prevede alcune azioni chiave che garantiscono l'elevata efficienza di questo biocombustibile. Un ruolo centrale viene rivestito dalla fase di essiccazione della materia prima, processo che richiede elevati costi economici ed energetici ma che garantisce al pellet valori di umidità inferiori al 10% sul tal quale e, di conseguenza, un'elevata densità energetica. Non meno importante è la fase di pulizia della materia prima, fase che consiste nella rimozione di componenti inermi e di metalli prima che la materia prima venga consegnata all'impianto di pellettizzazione. A queste fasi, qualora il legname non sia stato precedentemente allestito, verrà aggiunta la scortecciatura, diminuendo il contenuto di ceneri del prodotto finale. Infine, vi è la fase di pressatura. L'organo centrale di questa fase è la trafilatura, macchinario dotato di rulli compressori

che pressano il legname, debitamente macinato ed essiccato, all'interno di fessure cilindriche, ottenendo così i tipici cilindri di pellet.

1.1.1 Processo di pellettizzazione

Il processo produttivo del pellet, definito pellettizzazione, può essere caratterizzato da un numero variabile di fasi in base alla materia prima di cui si dispone. Difatti, le vie impiantistiche tradizionali sono due: la prima si basa sull'utilizzo di scarti dell'industria del legno, come ad esempio la segatura, la seconda parte da tronchi vergini. Come è facilmente intuibile, nel secondo caso, il processo di pellettizzazione risulta sicuramente più complesso poiché saranno necessarie fasi preliminari di preparazione della materia prima. Ad esempio, il tronco dovrà essere prima di tutto scortecciato, garantendo così una migliore qualità al prodotto finale (in modo particolare un quantitativo in ceneri minore), e successivamente macinato. In seguito, sarà necessario essiccare e raffinare il prodotto macinato, assicurando così dei valori di umidità tra il 10% ed il 13% ed una dimensione granulometrica massima di 6 mm. A questo punto, la materia prima sarà pronta per essere pellettizzata.

Il macchinario coinvolto nella fase di pellettizzazione è la pressa pellettatrice, alimentata con la materia prima precedentemente essiccata e raffinata. All'interno della pressa vi è la trafila che, congiuntamente ai coltelli esterni alla trafila, rappresenta l'organo adibito alla compressione della segatura e alla conseguente produzione di cilindri di pellet. Esistono due tipi di trafila: quella ad anello verticale con fori lungo la linea radiale dell'anello e quella orizzontale (Fig. 1), piatta e costituita da un disco circolare con fori rivolti verso l'alto.

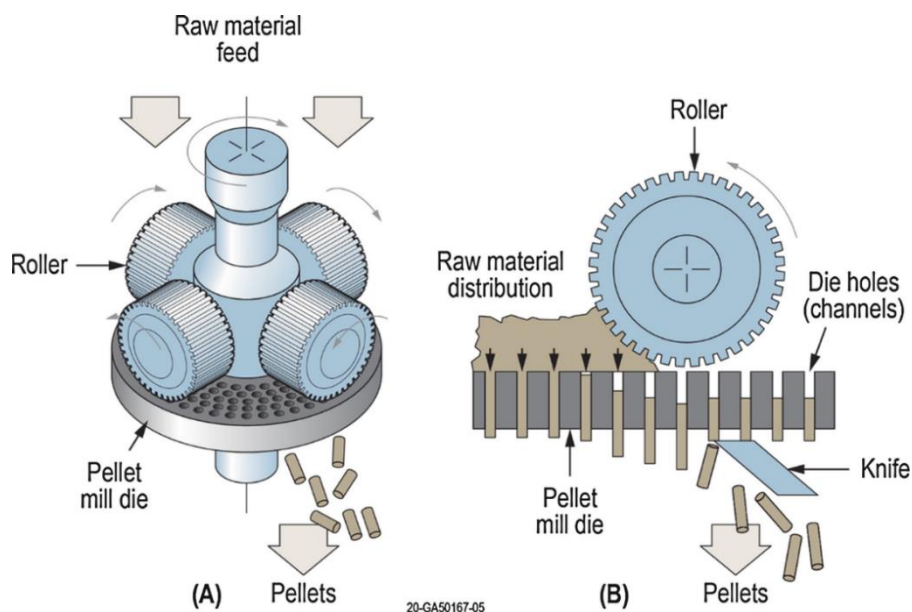


Figura 1 - Schematizzazione di una trafila orizzontale

Ad entrambi i modelli di trafila sono associati dei rulli che hanno il compito di pressare e spingere il materiale all'interno dei fori della trafila. I fori hanno un diametro variabile, maggiore dalla parte rivolta verso i rulli. La spinta impressa dai rulli alla segatura, e il diametro decrescente della trafila, portano la materia prima ad una compattazione e a un innalzamento della temperatura oltre i 100 °C, conseguenza dei fenomeni di attrito tra le particelle di legno. In queste condizioni, le fibre lignocellulosiche che costituiscono la materia prima, subiscono un riarrangiamento, garantendo così la formazione di nuovi legami interni al materiale, favorendo l'aggregazione delle particelle legnose.⁴

Il diametro dei fori della trafila, così come la lunghezza stessa dei fori, sono variabili. Modificando la distanza tra la trafila ed i coltelli, posti al di fuori della trafila, è possibile ottenere pellet di lunghezza variabile.

1.2 Normativa, biomasse e pellet

L'evoluzione del mercato del pellet è stata supportata dall'assetto normativo che concerne le biomasse e dal suo costante aggiornamento.

Per "norma tecnica" si intende nel caso del pellet una specifica tecnica, adottata da un riconosciuto organismo di normazione, per applicazione ripetuta o continua, alla quale non è obbligatorio conformarsi, a meno che non venga richiamata da legge o venga inserita in un contratto.⁵ L'aspetto vincente della normativa tecnica ricade nella standardizzazione dei processi e soglie minime di qualità.

Le biomasse solide ad uso energetico vengono trattate dal pacchetto di norme UNI EN ISO 17225. In particolar modo, la norma dedicata al pellet è la UNI EN ISO 17225-2 .

La norma identifica le soglie di qualità di differenti classi di pellet, sia esso ad uso domestico che ad uso industriale. Più specificatamente, stabilisce tre classi di qualità del pellet ad uso domestico, ovvero le classi A1, A2 e B; e tre classi per pellet ad uso industriale, ovvero I1, I2 e I3. Mentre nelle classi A1, A2, I1 e I2 viene ammesso unicamente l'utilizzo di legno non trattato chimicamente, le classi B e I3 consentono l'utilizzo di legno trattato chimicamente nonché di legno usato non trattato. Tuttavia, è necessario sottolineare che i materiali trattati chimicamente sono ammessi dalla norma purché non contengano metalli pesanti o composti organici alogenati sopra determinati limiti. Inoltre, aspetto più importante, è che la legge di molti Paesi, tra cui l'Italia, identifica i prodotti trattati chimicamente come rifiuti e, quindi

⁴ A. Guercio, G. Toscano, *Il Pellet*, Flaccovio Dario Editore, 2015.

⁵ Regolamento n. 966/2012 del Parlamento Europeo e del Consiglio, 25 ottobre 2012.

ricadono nell'ambito di un quadro normo-legislativo particolare. Di fatto, non è ammesso immettere sul mercato pellet da matrice legnosa trattata chimicamente (es. scarto della lavorazione di pannelli di legno) essendo una biomassa rifiuto.

La distinzione del pellet in classi di qualità risulta quindi fondamentale, soprattutto nel caso del pellet ad uso domestico, dove l'utilizzo di biocombustibili di scarsa qualità in aree residenziali potrebbe generare problematiche dovute alle emissioni in atmosfera.

Al fine di classificare il pellet ad uso domestico e industriale, la norma, oltre a tenere conto dell'origine della materia prima, indica le caratteristiche e proprietà che il biocombustibile deve soddisfare per rientrare all'interno di una determinata classe. Per ogni caratteristica vengono specificati i limiti e le metodologie di analisi. Ad esempio, affinché un biocombustibile densificato possa essere considerato "pellet" deve presentare delle lunghezze comprese tra 3,15mm e 40mm. Il presente elaborato si pone l'obiettivo di analizzare come questo parametro geometrico possa influenzare la qualità della combustione del pellet.

CAPITOLO 2

IMPIANTI TERMICI DOMESTICI

La trasformazione dei biocombustibili solidi in energia termica può avvenire all'interno di differenti tipologie di impianti termici domestici o industriali. Nello specifico, i principali impianti ad uso domestico sono i camini, fissati alla struttura muraria; gli inserti, ovvero focolari installati in vecchie sedi di camini; infine, le stufe, apparecchi svincolati dall'involucro murario e richiedenti l'installazione di una canna fumaria. Tra le forme di biomassa più comunemente utilizzate in ambito domestico vi sono la legna da ardere ed il pellet.

Un aspetto comune a tutti gli impianti termici ad uso domestico è l'assenza di sistemi di abbattimento delle emissioni. Risulta quindi fondamentale il controllo dell'efficienza di combustione e la scelta di biocombustibili di qualità.

2.1 Stufa a pellet

La stufa a pellet può essere definita come un bruciatore a letto fisso. La costante alimentazione a pellet consente di mantenere automaticamente la combustione, permettendo di regolare la velocità di ingresso del combustibile.⁶

Tra le componenti fondamentali di una stufa vi sono (Fig. 2): (i) il serbatoio, dove viene riversato il pellet che verrà trasformato in energia termica; (ii) la coclea, una vite senza fine adibita al trasferimento del pellet dal serbatoio al crogiolo di combustione; (iii) la camera di combustione, costituita dal crogiolo di combustione (o braciere) e dagli ingressi per il comburente; (iv) il sistema di scambiatori di calore; (v) i sistemi di espulsione di fumi; (vi) i raccoglitori di ceneri.

L'efficienza di una stufa e la qualità della combustione possono variare notevolmente in base al tipo di pellet utilizzato. Più specificatamente, giocano un ruolo fondamentale i parametri dimensionali del pellet, i quali possono avere un notevole impatto sulla quantità di

⁶ A. Pizzi, *Metodologie per il campionamento di particolato prodotto da apparecchi per la combustione di biomassa solida*, tesi di dottorato, Ancona, anno accademico 2012-2013, Tutor accademico Prof. Giovanni Riva, Coordinatore Prof. Bruno Mezzetti.

pellet trasportato dalla coclea, variandone la portata massica e di conseguenza la portata termica. Inoltre, la variazione dimensionale del pellet può giocare un ruolo fondamentale nella corretta miscelazione tra combustibile e comburente, influenzando la cinetica di combustione.

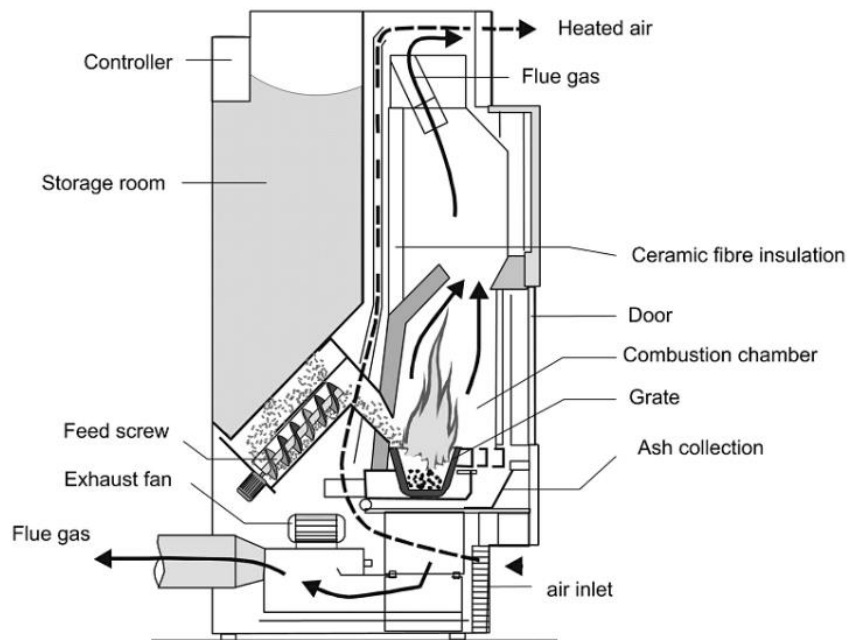


Figura 2 - Schematizzazione di una stufa a pellet (Pizzi, op cit)

2.2 Combustione dei biocombustibili solidi

La combustione è un processo termo-chimico esotermico nel quale il materiale costituente il combustibile (ad esempio, carbonio e idrogeno) va incontro ad ossidazione, formando CO_2 e H_2O . Altri elementi che vengono ossidati, se presenti, sono azoto e zolfo formando NO_x e SO_2 . Affinché avvenga la completa combustione, assumendo l'ossigeno come comburente, è necessario che vengano soddisfatte le seguenti condizioni: (i) sufficiente quantità di comburente da consentire la completa ossidazione del combustibile; (ii) adeguata miscelazione tra combustibile e comburente in modo da evitare condizioni di scarsità di ossigeno in camera di combustione; (iii) temperature generate sufficientemente elevate da garantire e sostenere le reazioni chimiche con una certa cinetica; (iv) tempo di permanenza delle elevate temperature tale da garantire lo scambio termico e l'ossidazione del combustibile.⁷

⁷ C. Boman, *Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion*, Energy Technology and Thermal Process Chemistry, Umeå University, 2005.

Il processo di combustione può essere suddiviso in quattro fasi distinte in base al comportamento termogravimetrico del biocombustibile (Fig. 3):

1. Riscaldamento del biocombustibile/essiccazione: a basse temperature ($<100^{\circ}\text{C}$) la biomassa inizia a perdere umidità, con conseguente riduzione della massa iniziale. L'essiccazione è un processo endotermico che sfrutta l'energia liberata dalla combustione e per questo ne diminuisce l'efficienza termica. Per questo, biomasse con valori di umidità superiori al 60% sul peso tal quale, risultano inutilizzabili per la combustione, poiché richiederebbero al sistema un quantitativo di energia termica tale da impedire alle temperature di raggiungere valori utili per sostenere il processo ossidativo.

2. Pirolisi e gassificazione: in seguito all'innalzamento delle temperature ($160\text{-}250^{\circ}\text{C}$) la biomassa inizia a decomporsi, rilasciando gas e sostanze volatili. Generalmente, le sostanze volatili rappresentano fino all'80% della massa iniziale di un biocombustibile. Il rilascio di sostanze volatili avviene fino a circa 400°C .

3. Combustione dei volatili: la miscela di sostanze volatili formatasi durante la fase di pirolisi viene ossidata, producendo la fiamma attorno al combustibile. Il calore prodotto accelera le cinetiche di combustione.

4. Combustione del residuo carbonioso (char): il residuo carbonioso, non più in grado di rilasciare sostanze gassose, partecipa alla combustione garantendo la completa ossidazione del proprio contenuto di carbonio.⁸

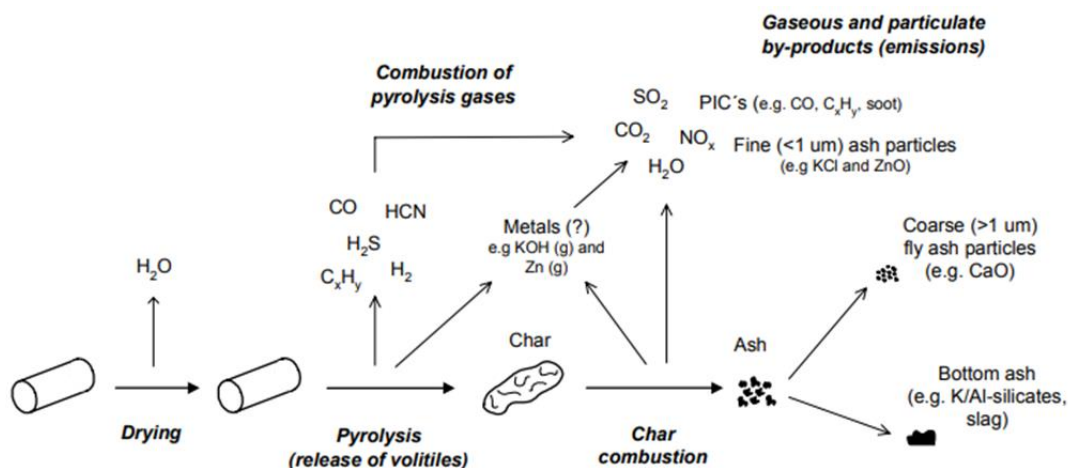


Figura 3 - Schematizzazione del processo di combustione (Boman, op. cit.)

⁸ S. van Loo, J. Koppejan (a cura di), *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, 2008.

Occorre sottolineare che normalmente queste fasi sono difficilmente distinguibili ed avvengono simultaneamente poiché dipendenti da numerosi fattori.

2.3 Emissioni da combustione

Il processo di combustione delle biomasse solide, così come per tutte le altre forme di combustibile, non è perfettamente efficiente da un punto di vista stechiometrico. Difatti, la combustione porta alla formazione ed emissione di numerosi composti, i quali possono essere distinti in due gruppi: emissioni derivanti dalla combustione completa ed emissioni derivanti dalla combustione incompleta.

Tra i principali composti derivanti dalla combustione completa vi sono il diossido di carbonio (CO_2), gli ossidi di azoto (NO_x), derivanti dall'ossidazione dell'azoto presente nel biocombustibile e non dall'azoto atmosferico (cosa che invece accade nel caso dei combustibili fossili), ed infine gli ossidi di zolfo (SO_x). Occorre sottolineare che la CO_2 rilasciata dalla combustione delle biomasse non viene considerato impattante nell'ambito dell'effetto serra, poiché le biomasse sono considerate CO_2 -neutre.

I composti risultanti dalla combustione incompleta possono derivare da differenti fattori, come ad esempio la mancanza di comburente (ossigeno), temperature troppo basse per garantire le giuste cinetiche di combustione o una non corretta miscelazione tra comburente e combustibile. In particolare, quest'ultimo fattore può essere condizionato dalle proprietà geometrico-dimensionali del combustibile.

Uno dei principali composti derivanti dalla combustione incompleta è il monossido di carbonio (CO), il quale si produce quando le condizioni in camera di combustione non garantiscono la completa ossidazione del carbonio in CO_2 . Per questo, la presenza di CO (variabile in quantità), può essere un indicatore della qualità e dell'efficienza della combustione.

Oltre ad indicare una combustione non ottimale, il monossido di carbonio produce effetti negativi anche sulla salute umana. Difatti, l'emoglobina presente nel sangue, la quale normalmente si lega all'ossigeno, in presenza di monossido di carbonio reagisce con quest'ultimo formando un legame altamente stabile, annullando la corretta funzione dell'emoglobina, impedendo il trasporto di ossigeno ad organi e tessuti.⁹

⁹ Ministero della Salute, Direzione generale della prevenzione sanitaria, *Monossido di carbonio (CO)*, 2015 (www.salute.gov.it).

2.3.1 Limiti delle emissioni

Il decreto n.186 del 7 novembre 2017 emanato dal Ministero dell’Ambiente, approva il “Regolamento recante la disciplina dei requisiti, delle procedure e delle competenze per il rilascio di una certificazione dei generatori di calore alimentati a biomasse combustibili solide”.¹⁰ Tale regolamento introduce un sistema di classificazione a stelle (da 2 a 5) degli impianti termici domestici in base alla loro efficienza in termini di emissioni e rendimenti.

L’obiettivo del decreto è quello di instaurare un sistema che supporti la politica energetica e ambientale, limitando la diffusione di impianti domestici a biomassa più inquinanti.

Il sistema di classificazione viene implementato anche nella politica regionale. Ad esempio, il DGR n. 942 del 26 luglio 2021 della Regione Marche (allegato A) prevede il divieto di accensione di impianti di qualità inferiore alla classe 3 stelle, qualora nell’unità immobiliare sia presente un altro tipo di riscaldamento. Inoltre, qualora la valutazione della qualità dell’aria lo renda necessario, a partire dall’autunno 2022 verrà vietato l’utilizzo di impianti di qualità inferiore alla classe 4 stelle.¹¹

I limiti che determinano l’appartenenza ad una classe piuttosto che ad un’altra, sono differenti per ciascun tipo di impianto termico domestico. Le stufe a pellet sono uno degli impianti termici caratterizzati da limiti più stringenti (Tab. 1).

Risulta evidente l’importanza dell’attuazione di tutte le procedure che garantiscano una migliore efficienza degli impianti termici e della combustione, a partire dalla scelta di un biocombustibile di qualità che, tramite le sue proprietà chimiche-energetiche e dimensionali, garantisca un abbattimento delle emissioni.

Tabella 1 – Confronto dei limiti delle emissioni di monossido di carbonio tra due impianti termici domestici

Classe stelle	Limiti CO (mg/Nm ³)	
	Stufe a pellet	Stufa a legna
5 Stelle	250	650
4 Stelle	250	1250
3 Stelle	364	1500
2 Stelle	500	2000

¹⁰ D.M. 7 novembre 2017 n. 186, in GU n. 294, 18.12.2017.

¹¹ D. G. R. Marche n. 942 del 26 luglio 2021, Allegato A: *MISURE CONTINGENTI 2021/2022 PER LA RIDUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DEGLI INQUINANTI IN ARIA AMBIENTE NEL TERRITORIO DEI COMUNI DELLA ZONA COSTIERA E VALLIVA.*

CAPITOLO 3

MATERIALI E METODI

In questo capitolo vengono esposti i materiali e i metodi utilizzati, nonché le procedure, attuate nelle analisi al fine di valutare l'influenza dei parametri dimensionali del pellet sulla qualità della combustione e delle emissioni.

3.1 Campioni di pellet

Il pellet utilizzato è stato fornito dall'azienda Civita Pellet, ubicata a Morrovalle (MC). Nell'ambito di tre giornate lavorative sono stati prodotti in tutto circa 45 sacchi di pellet di puro abete italiano tramite l'utilizzo di una pellettatrice a trafilatura orizzontale. In ciascuna giornata lavorativa è stata modificata la distanza dei coltelli dalla trafilatura al fine di ottenere sacchi di pellet di lunghezze differenti.

Al termine delle tre giornate lavorative sono stati prodotti circa:

- 15 sacchi di pellet con coltelli distanti 20 mm dalla trafilatura (campione G3306);
- 15 sacchi di pellet con coltelli distanti 30 mm dalla trafilatura (campione G2076);
- 15 sacchi di pellet con coltelli distanti 45 mm dalla trafilatura (campione G4216).

Parte dei sacchi delle tre suddette tipologie di pellet è stata ridotta e resa omogenea tramite l'ausilio di un Riffle Box. Questo ha consentito di svolgere analisi propedeutiche alla valutazione degli effetti dimensionali sulla qualità di combustione di campioni più rappresentativi possibili.

Per ciascuna delle tre suddette tipologie di pellet la determinazione della lunghezza media, così come la distribuzione in classi dimensionali, è stata svolta tramite l'utilizzo del sistema prototipale hardware e software MetaLab, approfondito nel paragrafo successivo.

3.2 Analisi dimensionale del pellet

L'analisi dimensionale del pellet è stata svolta su campioni ridotti e rappresentativi di ciascuna delle tre tipologie di pellet (campioni G3306; G2076; G4216). L'analisi è stata attuata

tramite l'utilizzo del MetaLab (Fig.4) che consente di determinare i parametri dimensionali del pellet (quali lunghezza e diametro) tramite l'ausilio di un doppio sensore IR-RGB.

Il sistema MetaLab è costituito da un Box metallico (400x400x220mm) contenente i seguenti elementi:

- Microcomputer Raspberry Pi 4;
- Doppio Sensore: Raspberry Pi 4 Camera IR; camera RGB;
- Piatto 297x210mm estraibile per il posizionamento dei pellet sui quali effettuare l'elaborazione;
- Software di elaborazione necessario per l'acquisizione delle immagini e dei dati.



Figura 4 - A sinistra il box metallico contenente microcomputer, sensore IR e piatto estraibile; a destra il software di elaborazione MetaLab.

Per ciascuna delle tre tipologie di pellet, derivanti dalla riduzione dei sacchi di pellet ottenuti con coltelli distanti 20/30/45 mm dalla trafila (campioni G3306; G2076; G4216), sono state svolte tre analisi. Ciascuna analisi prevede il posizionamento di un quantitativo variabile di pellet (circa 30-50g) sul piatto estraibile, avendo cura di lasciare spazio tra un pellet e l'altro per facilitarne la misurazione da parte del sensore. Dopo aver posizionato il pellet correttamente, il piatto estraibile viene riposto all'interno del box metallico. A questo punto, si prosegue all'inserimento dati nel software (quali la massa in grammi di pellet inserito, la tipologia di pellet, e altri) e si procede alla cattura dell'immagine. Si ottiene così una immagine

in scala di grigi rielaborata tramite il filtro Gaussiano Blur per la riduzione dei “rumori” dell’immagine (Fig. 5).

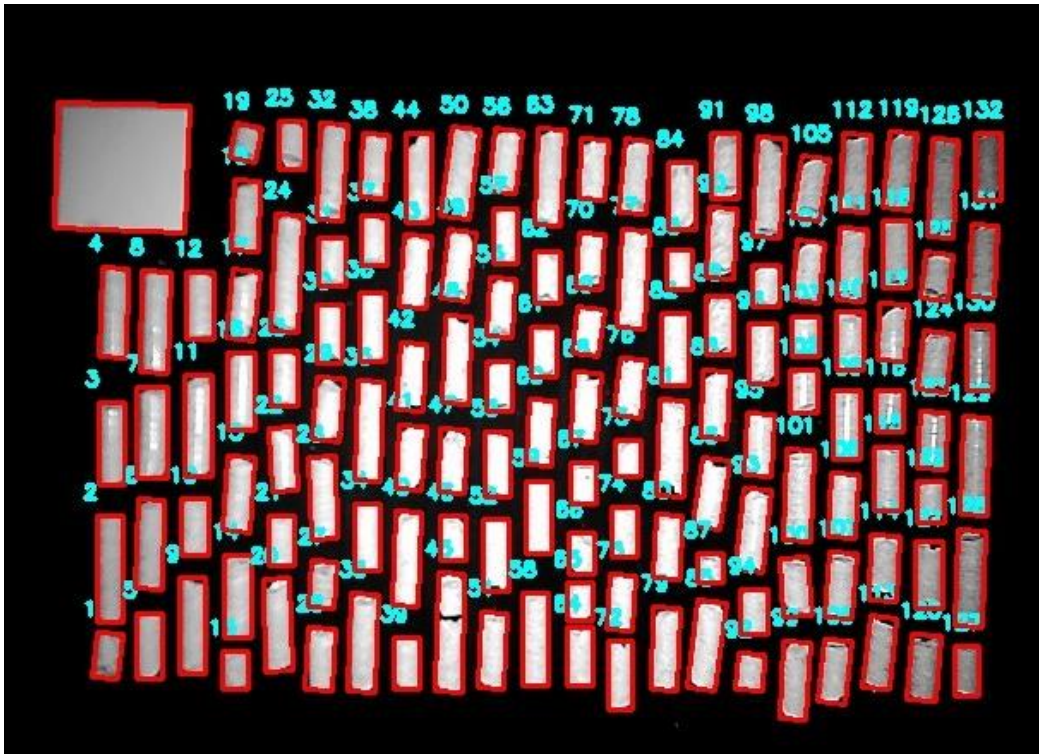


Figura 5 - Immagine generata dal sistema hardware-software MetaLab.

Congiuntamente all’immagine, il software genera un foglio di calcolo contenente il numero progressivo di pellet individuati all’interno dell’immagine e le relative dimensioni in millimetri.

Quindi, per ciascuna delle tre tipologie di pellet sono stati prodotti 3 fogli di calcolo contenenti le dimensioni del pellet.

I valori ottenuti dai 3 fogli di calcolo sono stati poi inseriti in un ulteriore foglio al fine di calcolare il valore medio dei parametri dimensionali per ogni tipologia di pellet prodotto dall’azienda Civita Pellet.

3.3 Analisi fisiche ed energetiche

Le proprietà fisiche ed energetiche del pellet, utilizzato nella valutazione dell’influenza dei parametri dimensionali del pellet sulla qualità della combustione e delle emissioni, sono state caratterizzate secondo le attuali normative europee. In tabella 2 vengono riassunte tipologia di analisi, riferimento normativo e strumentazione utilizzata per le analisi e, a seguire, una breve descrizione delle metodologie adottate.

Tabella 2 - Analisi di caratterizzazione del pellet, riferimento normativo e strumentazione utilizzata.

Analisi	Normativa	Strumentazione
<i>Umidità</i>	ISO 18134-2	Stufa ventilata e bilancia
<i>Ceneri</i>	ISO 18122	Analizzatore termogravimetrico (TGA) Lecos
<i>Potere calorifico (PCS e PCI)</i>	ISO 18125	
<i>Massa volumica</i>	ISO 17828	Contenitore cilindro e bilancia
<i>Durabilità meccanica</i>	ISO 17831-1	Macchina della durabilità e setaccio

3.3.1 *Contenuto di umidità*

Il contenuto di umidità del pellet è stato determinato ponendo un vassoio contenente circa 400 g di pellet all'interno di una stufa termo-ventilata a 105 °C per 8 ore. La variazione di peso del campione rispetto alla massa iniziale, dopo il trattamento termico, ha consentito di determinare il contenuto percentuale di umidità del campione.

Per ciascun campione (G2076; G3306; G4216) l'analisi è stata ripetuta due volte, e dai risultati delle due prove si è ottenuto il valore medio di umidità di ciascun campione.

3.3.2 *Contenuto in ceneri*

Il contenuto in ceneri del pellet è stato determinato tramite l'ossidazione di circa 1 g di pellet opportunamente macinato, stabilizzato e posto all'interno di un crogiolo. Questo, una volta inserito nell'analizzatore termogravimetrico (TGA), viene sottoposto a temperature crescenti fino a 550 °C fino a costanza di peso. Il quantitativo di residuo inorganico al termine dell'ossidazione consente di determinare il contenuto in ceneri del campione.

3.3.3 *Potere Calorifico Superiore e Inferiore*

La determinazione del potere calorifico superiore (PCS) e inferiore (PCI) dei campioni di pellet avviene tramite la combustione completa di circa 1 g di campione in un sistema chiuso e in presenza di ossigeno. L'energia termica è determinata dall'innalzamento termico di una quantità di acqua nota all'interno del sistema chiuso. Il PCI viene determinato escludendo dal PCS l'energia contenuta nell'acqua di combustione.

3.3.4 *Proprietà fisiche del pellet*

Ai fini di una caratterizzazione più dettagliata del pellet analizzato, sono state misurate sia la massa volumica sia la durabilità dei campioni di pellet.

La massa volumica indica la massa di pellet (espressa in kg) che può essere contenuta all'interno di un cilindro metallico a volume noto (espresso in m³). L'analisi prevede il versamento del pellet all'interno di un cilindro metallico dalla capacità di 5 litri; questo viene successivamente 'sbattuto' tre volte per eliminare gli spazi vuoti al proprio interno. Poiché la procedura comporta la fuoriuscita di parte del pellet, è necessario reinserirne una quantità tale da riempire il cilindro e poi livellarlo. Infine, il cilindro viene pesato per determinare il contenuto netto di pellet.

Si procede poi alla determinazione della durabilità del pellet, ovvero la resistenza meccanica agli urti e alle sollecitazioni. L'analisi prevede l'inserimento di circa 500 g di pellet depolverizzato all'interno della macchina della durabilità, la quale effettua 500 giri in 10 minuti. Durante la rotazione si verifica la rottura di alcuni cilindri di pellet; al termine della rotazione si preleva il pellet, lo si setaccia per rimuovere il residuo polveroso e lo si pesa. La differenza tra la massa iniziale e la massa finale consente di determinare la durabilità meccanica del pellet.

Per ciascun campione (G2076; G3306; G4216) l'analisi è stata ripetuta due volte, e dai risultati delle due prove si è ottenuto il valore medio di massa volumica e durabilità meccanica di ciascun campione.

3.4 Analisi di portata massica

La portata massica è la quantità di pellet movimentato dalla coclea ed è espressa in kg/h. L'analisi della portata massica è stata svolta con la medesima velocità di coclea utilizzata nell'analisi delle emissioni (vedi paragrafo 3.5).

È stata svolta una analisi per ciascuna lunghezza di pellet (campioni G2076; G3306; G4216).

L'analisi ha previsto l'utilizzo della seguente strumentazione: (i) stufa a pellet Montegrappa collocata su una bilancia dotata di monitor "mostra peso"; (ii) scivolo metallico per impedire al pellet di cadere nel braciere e per portarlo al di fuori del sistema stufa-bilancia, garantendo così la corretta registrazione di variazione di peso nel corso della movimentazione di pellet da parte della coclea (Fig. 6).

Per permettere il passaggio della stufa dalla fase di accensione alla fase di programma, data l'assenza di pellet nel braciere e quindi la mancata combustione, è stato necessario riscaldare la termocoppia della stufa tramite una lampada alogena. Ciò ha consentito di ottenere la medesima velocità di coclea utilizzata nell'analisi delle emissioni, senza che avvenisse l'effettiva combustione del pellet.

L'analisi di ciascun campione di pellet è durata 20 minuti, con registrazione delle pesate ogni 5 minuti.

I dati ottenuti sono stati rielaborati su un foglio di calcolo al fine di ottenere una stima della portata massica media dei campioni di pellet con lunghezze differenti.



Figura 6 - A sinistra, lampada alogena per il riscaldamento della termocoppia; a destra, scivolo metallico per l'allontanamento del pellet dal braciere.

3.5 Analisi delle emissioni

Al fine di valutare l'influenza dei parametri dimensionali del pellet sulla qualità della combustione e delle emissioni, sono stati svolti 5 test di combustione per tipologia di pellet, ovvero 5 test sul campione G3306 ottenuto con coltelli distanti 20 mm dalla trafilatura; 5 test sul campione G2076 ottenuto con coltelli distanti 30 mm dalla trafilatura; 5 test sul campione G4216 ottenuto con coltelli distanti 45 mm dalla trafilatura.

I test di combustione sono stati svolti utilizzando: (i) una stufa a pellet Montegrappa con potenza termica nominale minima di 3 kW e massima di 10 kW; (ii) un analizzatore di emissioni MRU portatile con frequenza di acquisizione dati ogni 10 secondi. I dati di maggiore interesse nella valutazione dell'influenza dei parametri dimensionali del pellet sulla qualità

della combustione e delle emissioni riguardano la temperatura dei gas, l'efficienza stechiometrica (λ) e la quantità di CO presente nei fumi (Fig. 7). In particolare, all'aumentare dei valori di CO e di λ corrisponde una ridotta efficienza di combustione.



Figura 7 - Banco di lavoro durante le analisi delle emissioni con analizzatore MRU

Ciascun test è stato svolto utilizzando la medesima velocità della coclea e portata massica (potenza stufa P3). È stata unicamente modificata la quantità d'ingresso d'aria all'interno della stufa (potenza di estrazione dei fumi), passando dal programma 6, con maggiore potenza di estrazione dei fumi, al programma 5 e infine al 4, programma con minore potenza di estrazione di fumi.

Ogni test di combustione ha seguito la medesima procedura:

- 1 ora di riscaldamento della stufa con ingresso d'aria ed estrazione dei fumi massime con programma 6 (dati esclusi dall'analisi);
- mantenendo le stesse condizioni di estrazione dei fumi (programma 6), vengono acquisiti dati per la durata di 1 ora;
- seguono 20 minuti di stabilizzazione con programma 5, ovvero con ingresso d'aria ed estrazione dei fumi ridotte (dati esclusi dall'analisi);

- mantenendo le stesse condizioni di estrazione dei fumi (programma 5), vengono acquisiti dati per la durata di 1 ora;
- seguono nuovamente 20 minuti di stabilizzazione con programma 4, ovvero con ingresso d'aria ed estrazione dei fumi ulteriormente ridotte (dati esclusi dall'analisi);
- mantenendo le stesse condizioni di estrazione dei fumi (programma 4), vengono acquisiti dati per la durata di 1 ora.

I dati raccolti da ciascun programma durante ogni test di combustione sono stati successivamente riportati in rispettivi fogli di calcolo al fine di ottenere i valori medi e la deviazione standard dei dati raccolti.

Capitolo 4

RISULTATI E CONSIDERAZIONI

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dai test svolti secondo specifiche condizioni di laboratorio e con i materiali e i metodi descritti nel capitolo 3. I risultati ottenuti attraverso i test sono da ritenersi ripetibili tramite l'uso di metodologie standard e sistemi alternativi.

4.1 Risultati delle analisi dimensionali

L'analisi svolta tramite il MetaLab ha permesso di identificare la distribuzione del pellet in classi di lunghezza (distribuzione espressa in percentuale su massa totale e su distribuzione numerica) dei campioni G3306, G2076, G4216 ottenuti variando la distanza tra i coltelli e la trafila in fase di produzione (Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10).

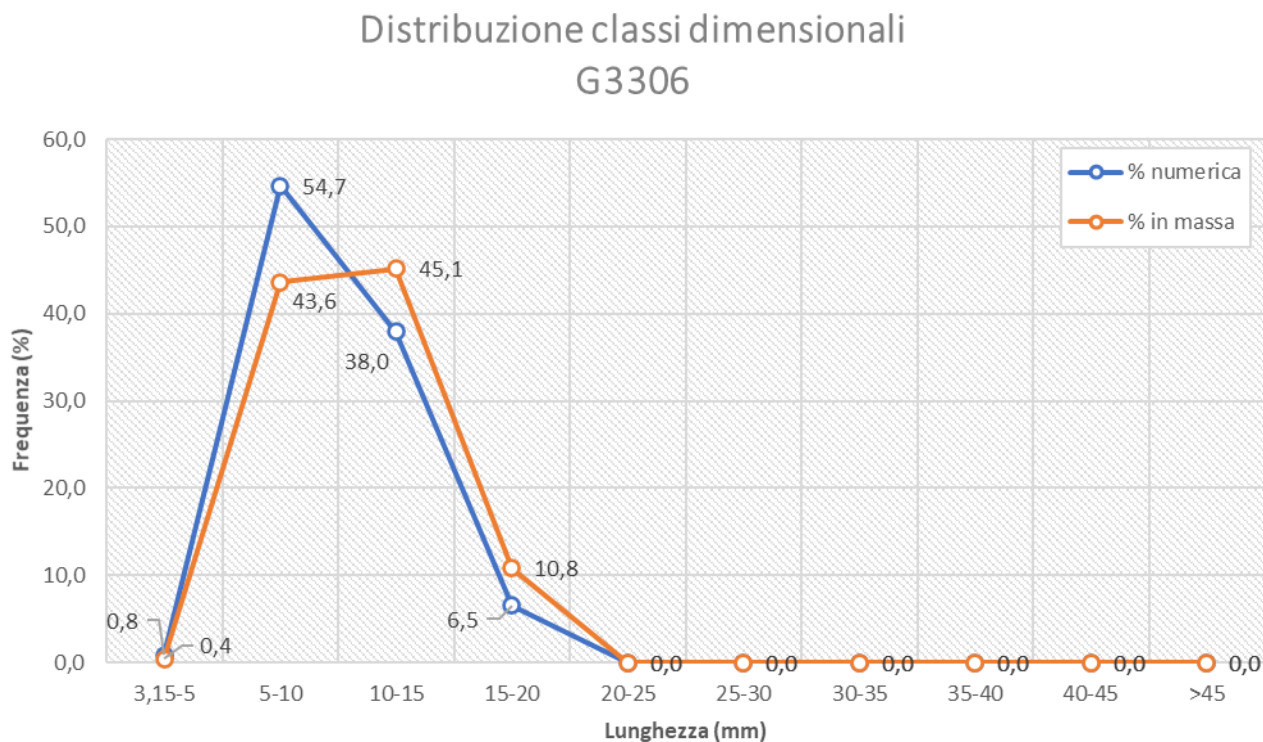


Figura 8 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G3306

L'analisi svolta sul campione G3306 (Fig. 8), ottenuto con coltelli distanti 20 mm dalla trafila, ha mostrato che il 45,1% del pellet (percentuale riferita alla massa totale analizzata) ha una lunghezza compresa tra 10-15 mm, mentre gran parte del restante pellet (43,6% sulla massa totale) appartiene alla classe compresa tra 5-10 mm. Tramite l'elaborazione del foglio di calcolo generato dal MetaLab, contenente il numero progressivo di pellet individuati all'interno dell'immagine e le relative dimensioni in millimetri, è stata individuata la lunghezza media del campione G3306, pari a 10,1 mm.

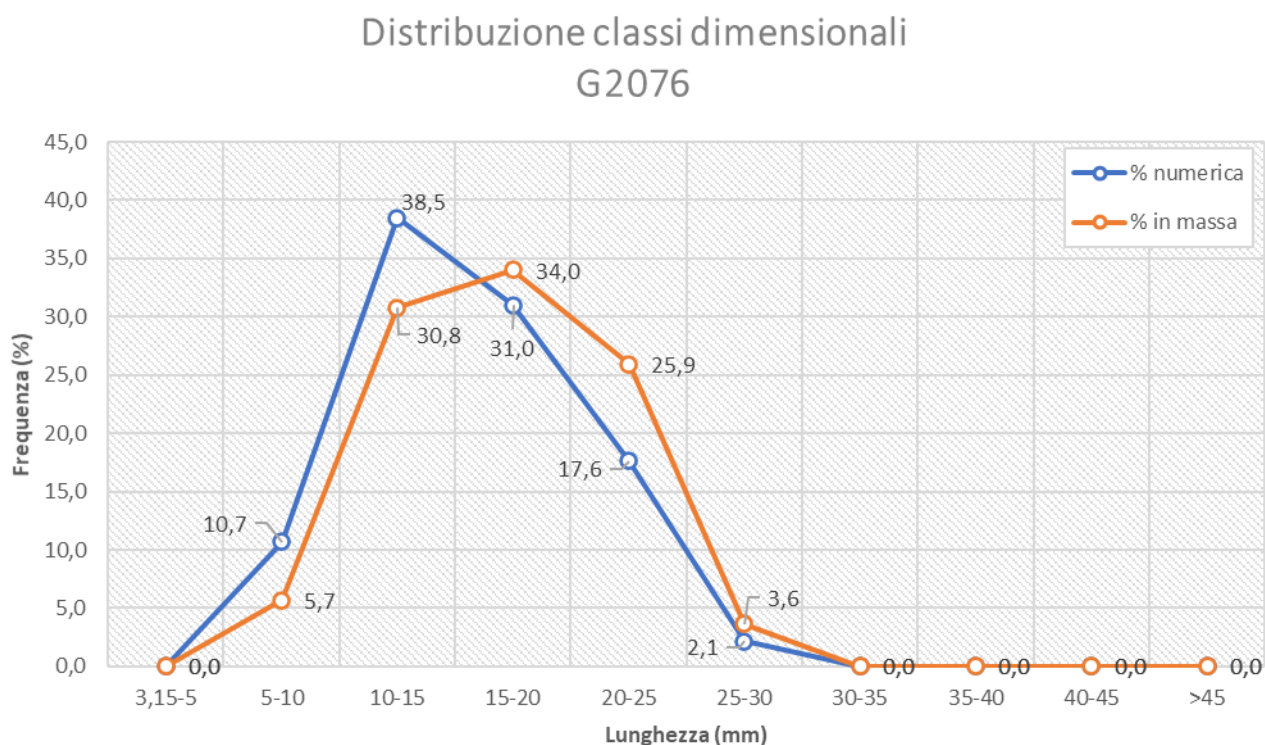


Figura 9 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G2076

Passando all'analisi del campione G2076 (Fig. 9), ottenuto con coltelli distanti 30 mm dalla trafila, la distribuzione delle classi di lunghezza è più omogenea, con il 34% del pellet (percentuale riferita alla massa totale analizzata) caratterizzato da lunghezza compresa tra 15-20 mm. La lunghezza media del campione G2076 è pari a 15,4 mm.

Distribuzione classi dimensionali G4216

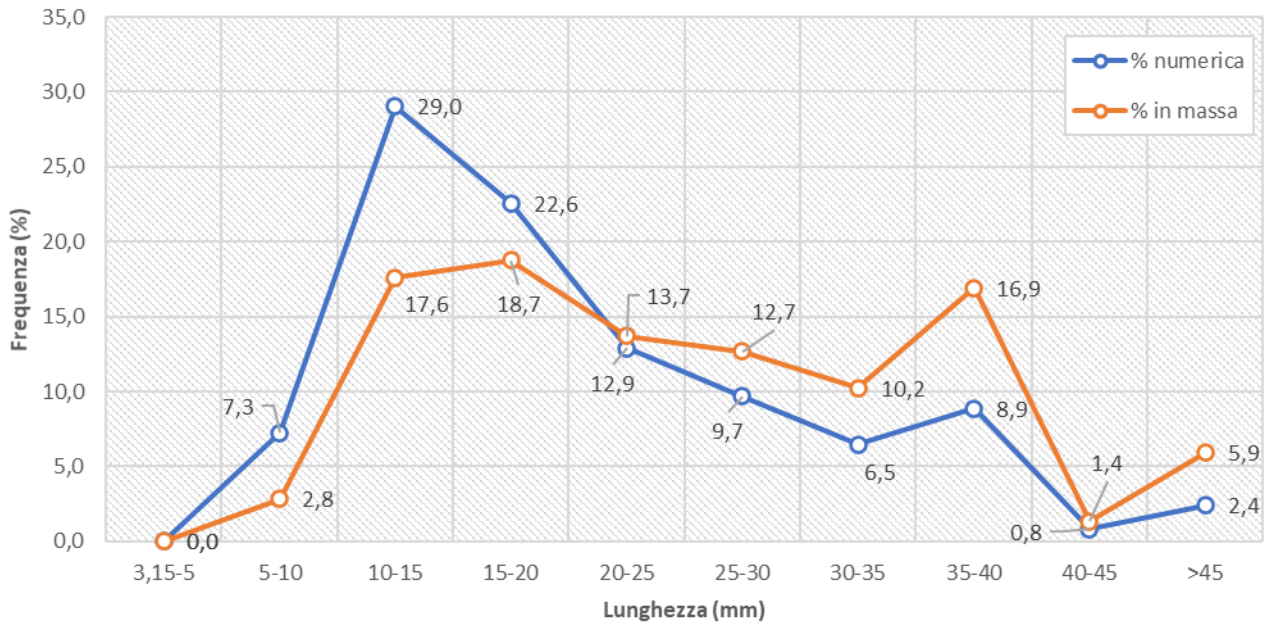


Figura 10 - Distribuzione percentuale delle classi di lunghezza del campione G4216

Infine, l'analisi svolta sul campione G4216 (Fig. 10), ottenuto con coltelli distanti 45 mm dalla trafila, ha mostrato una distribuzione più eterogenea delle classi di lunghezza rispetto ai campioni precedenti. Le classi di lunghezza maggiormente rappresentate sono la classe di 15-20 mm (18,7% sulla massa totale) e la classe di 35-40 mm (16,9% sulla massa totale). La lunghezza media del campione G4216 è pari a 20,7 mm.

Nel grafico del campione G3306 (Fig. 8) le curve evidenziano come, ponendo i coltelli a distanze ridotte dalla trafila, si ottenga pellet di lunghezze omogenee.

Nel grafico del campione G2076 (Fig. 9) si nota che, aumentando la distanza dei coltelli dalla trafila di 10 mm, si ottiene pellet di lunghezze maggiori e con distribuzione in classi di lunghezza più ampia, seppure omogenea.

Il grafico del campione G4216 (Fig. 10) evidenzia come distanze eccessive dei coltelli dalla trafila producono pellet di classi di lunghezza disomogenee. Questo potrebbe essere causato dalla precoce rottura del pellet che fuoriesce dalla trafila ancor prima che incontri i coltelli, o dalla rottura dei pellet eccessivamente lunghi che in quanto tali risultano più fragili. A supporto di quanto emerso, anche lo studio di Wohler et al. evidenzia come, all'aumentare della

lunghezza del pellet corrisponda una distribuzione in classi di lunghezza più disomogenea, imputabile alla maggiore fragilità del pellet.¹²

4.2 Risultati delle analisi fisiche ed energetiche

I risultati delle analisi fisiche ed energetiche svolte secondo le metodologie riportate nel paragrafo 3.3 sono illustrati nella seguente tabella (Tab. 3).

Tabella 3 - Risultati delle analisi fisiche ed energetiche.

Campione	Lunghezza media mm	Umidità % t.q.	Ceneri % s.s.	PCI J/g t.q.	PCS J/g s.s.	PCI J/g s.s.	Massa Volumica kg/m ³	Durabilità %
G3306	10,1	9,6	0,5	16837	20214	18894	617,3	96,4
G2076	15,4	8,1	0,5	16882	19911	18589	649,1	98,6
G4216	20,7	10,3	0,8	16564	20034	18744	614,6	92,7

Osservando i risultati è possibile notare come i campioni di pellet, nonostante siano stati prodotti dalla medesima materia prima (segatura di abete proveniente dalla stessa azienda), presentano valori di umidità sul tal quale differenti. Questo è dovuto al fatto che la produzione del pellet è avvenuta in periodi e condizioni atmosferiche differenti e dal fatto che la materia prima non ha subito un trattamento di essiccazione. Di conseguenza, a differenti valori di umidità corrispondono differenti valori di potere calorifico.

Passando alla massa volumica si può notare che il campione con il valore più elevato è il G2076 (649,1 kg/m³). Questo potrebbe essere dato dalla distribuzione più omogenea in classi di lunghezza (Fig. 9) rispetto ai campioni G3306 e G4216, che quindi permette un riempimento ottimale degli spazi vuoti in fase di analisi.

Passando ai valori di durabilità, a parità di massa analizzata (500 g), un campione di pellet di dimensioni minori è composto da più cilindri di pellet e ciò comporta una maggiore probabilità di urti tra cilindri. Questo potrebbe spiegare la differente durabilità tra il campione G3306 (96,4%) ed il campione G2076 (98,6%). Inoltre, si nota che vi è un rapporto inversamente proporzionale tra durabilità e umidità. Difatti, questa potrebbe aver influenzato negativamente la coesione delle particelle in fase di produzione del pellet, soprattutto nel caso

¹² M. Wöhler, D. Jaeger, G. Reichert, C. Schmidl, S. K. Pelz, *Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions*, Renewable Energy 105, 2017.

del campione G4216, caratterizzato da valori di umidità elevati (10,3 %) e scarsa durabilità (92,7%) .

4.3 Risultati delle analisi di portata massica

I risultati delle analisi di portata massica vengono riportati in tabella 4 e schematizzati in figura 11. Avendo a disposizione i valori di PCI (J/g sul t.q.) è stato possibile ricavare anche i valori di portata termica.

Tabella 4 – Risultati delle analisi di portata massica

Campione	Lunghezza media <i>mm</i>	Portata massica <i>kg/h</i>	Portata termica <i>MJ/h</i>
G3306	10,1	1,710	28,8
G2076	15,4	1,590	26,8
G4216	20,7	1,320	21,9

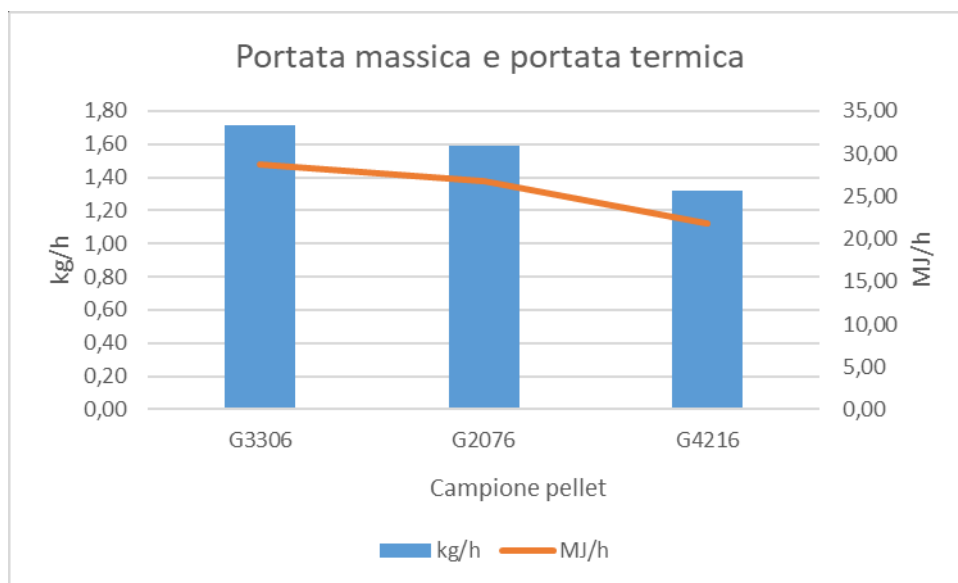


Figura 11 - Rappresentazione dei risultati delle analisi di portata massica e termica

Osservando il grafico è possibile notare che, a parità di velocità della coclea in fase di analisi, il campione che presenta il valore di portata massica più elevato è il G3306 (1,71 kg/h). Questo dipende dal fatto che le dimensioni ridotte del pellet ne facilitano il trasporto da parte della coclea. Allo stesso modo, il campione G4216, caratterizzato da lunghezza maggiore (20,7 mm), presenta il valore di portata massica inferiore (1,32 kg/h).

I differenti valori di portata termica sono legati anche a diverse condizioni della materia prima, precisamente a valori di umidità che influenzano il valore di PCI (J/g sul t.q.).

4.4 Risultati delle analisi delle emissioni

I risultati numerici medi delle analisi della qualità di combustione e delle emissioni, ottenuti con i diversi programmi di estrazione fumi (programmi 6, 5, 4), sono riportati in figura (Fig. 12).

La lettura dei dati viene facilitata da scale di colori. La temperatura dei gas viene evidenziata con una colorazione graduata su scala di rossi. A valori di temperature maggiori corrisponde una colorazione più intensa.

Similmente, ai valori di CO viene abbinata una colorazione graduata dove la colorazione tende dal verde al giallo, poi al rosso con l'aumentare dei valori di CO, mentre ai valori di portata termica viene associata una colorazione che tende dal rosso al giallo.

Programma 6					
Camp.	L media mm	Tgas	Lambda	CO	Qe
		°C		mg/Nm3/O2	(MJ/h)
G3306	10,1	179,0	4,4	498,9	28,8
G2076	15,4	174,9	4,8	572,7	26,8
G4216	20,7	169,8	5,6	1040,6	21,9

Programma 5					
Camp.	L media mm	Tgas	Lambda	CO	Qe
		°C		mg/Nm3/O2	(MJ/h)
G3306	10,1	173,6	3,7	390,4	28,8
G2076	15,4	168,9	4,0	417,2	26,8
G4216	20,7	165,5	4,8	839,7	21,9

Programma 4					
Camp.	L media mm	Tgas	Lambda	CO	Qe
		°C		mg/Nm3/O2	(MJ/h)
G3306	10,1	165,1	3,2	323,1	28,8
G2076	15,4	161,5	3,5	369,8	26,8
G4216	20,7	159,7	4,0	644,3	21,9

Figura 12 - Raccolta dati medi dei principali valori considerati per l'analisi della qualità delle emissioni

Analizzando i dati dei tre programmi utilizzati è possibile notare la medesima tendenza, ovvero che i valori di CO e di lambda aumentano all'aumentare della lunghezza del pellet. Lo stesso trend è evidenziato dallo studio di Wohler et al.¹³. Inoltre, è possibile notare che le temperature dei gas più elevate si registrano con il campione G3306, caratterizzato da una lunghezza inferiore (10,1 mm) rispetto ai campioni G2076 (15,4 mm) e G4216 (20,7 mm). Queste tendenze possono dipendere sia dai valori di portata massica e portata termica, sia dal numero e dalla disposizione spaziale del pellet in camera di combustione, influenzata dalle proprietà geometriche del pellet, dalla quale potrebbe dipendere l'efficiente miscelazione tra comburente e combustibile, abbattendo i valori di CO.¹⁴

Confrontando tra loro i dati dei tre programmi caratterizzati da differente potenza di estrazione dei fumi (e quindi differenti quantità di aria in ingresso), si nota che nel programma 6, programma con maggiore potenza di estrazione dei fumi, si registrano i valori di CO e di lambda più elevati rispetto agli altri programmi a prescindere dal tipo di pellet utilizzato. Questo può essere causato dalla minore efficienza di reazione in camera di combustione, dovuta alla maggiore quantità di aria in ingresso, la quale tende a raffreddare il sistema. Tuttavia, parallelamente alla minore efficienza di combustione, nel programma 6 si registrano valori di temperature dei gas superiori agli altri programmi, a prescindere dal tipo di pellet utilizzato. Questo potrebbe dipendere da una maggiore dispersione di calore in canna fumaria (luogo dove avviene la registrazione delle temperature), causata dalla maggiore potenza di aspirazione dei fumi.

Analizzando i dati del programma 4, programma con minore potenza di estrazione dei fumi, si nota la migliore efficienza di combustione (valori di CO e di lambda più bassi) per tutti i tipi di pellet. Tuttavia, le temperature dei gas risultano essere più basse rispetto agli altri programmi. Ciò potrebbe dipendere dalla minore potenza di estrazione dei fumi che causa una minore dispersione di energia termica in canna fumaria.

Per valutare in modo più accurato il comportamento termico in fase di combustione di pellet di lunghezze differenti, potrebbe essere utile svolgere ulteriori analisi registrando le temperature direttamente in camera di combustione, piuttosto che in canna fumaria.

Di seguito viene riportata una rappresentazione grafica (Fig. 13) dei risultati numerici sopra indicati.

¹³ *Ibidem*, p. 71.

¹⁴ *Ibidem*, p. 72.

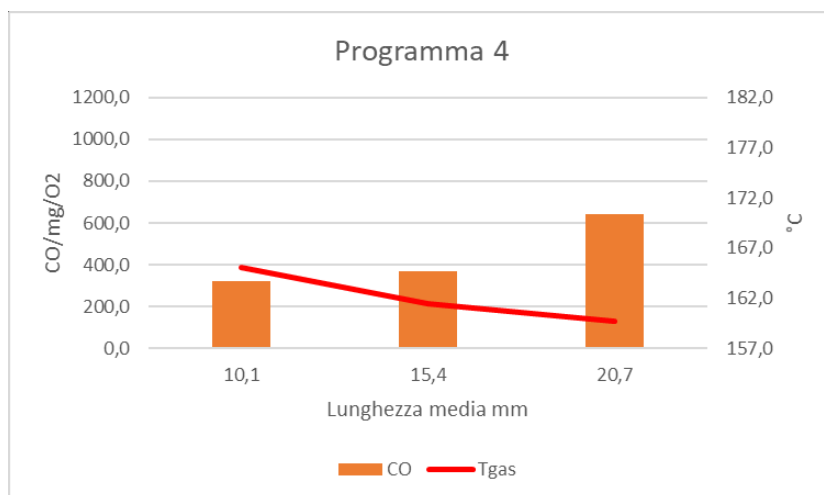
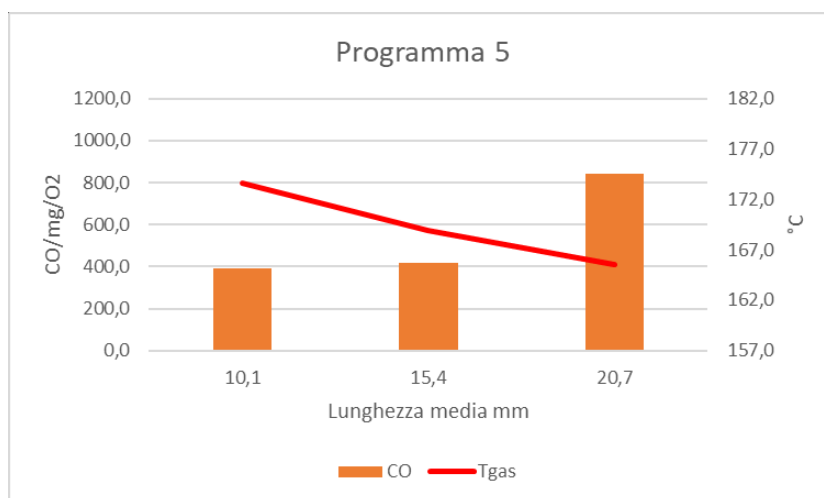
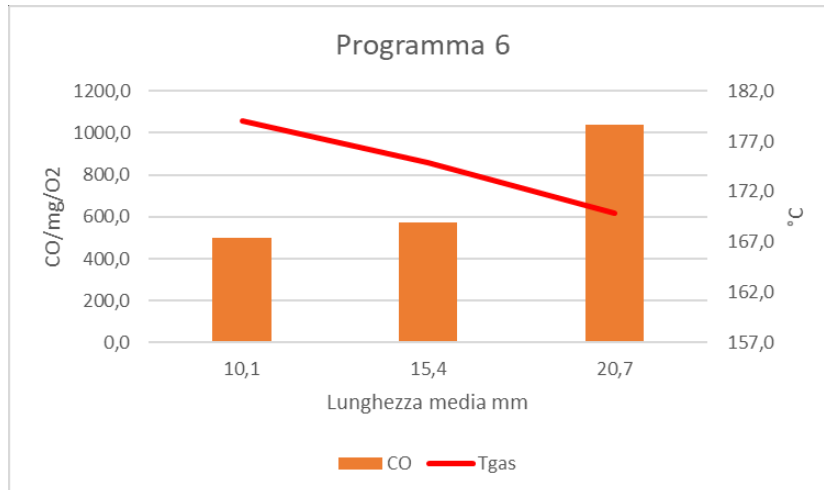


Figura 13 - Rappresentazione grafica dei dati numerici ottenuti dalle analisi delle emissioni durante i tre programmi utilizzati

CONCLUSIONI

Il presente elaborato ha permesso di evidenziare il ruolo dei parametri geometrici del pellet sull'efficienza di combustione. In particolare, è stato possibile osservare che la lunghezza del pellet influenza:

- la portata massica e conseguentemente la portata termica. Soprattutto, è stato osservato che tra il campione G3306 (con lunghezza media di 10,1 mm), il campione G2076 (con lunghezza media di 15,4 mm) ed il campione G4216 (con lunghezza media di 20,7 mm) è avvenuta una riduzione della portata termica del 6,9% tra i campioni G3306 e G2076 (da 28,8 MJ/h a 26,8 MJ/h), ed una riduzione del 18,2% tra i campioni G2076 e G4216 (da 26,8 MJ/h a 21,9 MJ/h).
- la quantità di CO prodotto a parità di potenza di aspirazione dei fumi e quindi a parità di aria in ingresso in camera di combustione. In particolare:
 - con maggiore potenza di aspirazione dei fumi (programma 6), si è registrato un incremento dell'emissione media di CO del 14,7% tra il campione G3306 e G2076 (da 498,9 a 572,7 CO/mg/O₂) e del 81,7% tra il campione G2076 e G4216 (da 572,7 a 1040,6 CO/mg/O₂);
 - con potenza di aspirazione dei fumi intermedia (programma 5), si è registrato un incremento dell'emissione media di CO del 6,8% tra il campione G3306 e G2076 (da 390,4 a 417,2 CO/mg/O₂) e del 101,2% tra il campione G2076 e G4216 (da 417,2 a 839,7 CO/mg/O₂);
 - con minore potenza di aspirazione dei fumi (programma 4), si è registrato un incremento dell'emissione media di CO del 14,4% tra il campione G3306 e G2076 (da 323,1 a 369,8 CO/mg/O₂) e del 74,2% tra il campione G2076 e G4216 (da 369,8 a 644,3 CO/mg/O₂).

Inoltre, è stato osservato come la stessa tipologia di pellet, sottoposto a programmi differenti, mostra efficienze differenti. In particolare, diminuendo la quantità di aria in ingresso in camera di combustione:

- il campione G3306 incrementa l'efficienza di combustione, diminuendo la quantità di CO prodotto del 21,7% passando dal programma 6 al 5 (da 498,9 a 390,4

CO/mg/O₂), e del 17,2% passando dal programma 5 al 4 (da 390,4 a 323,1 CO/mg/O₂).

- il campione G2076 incrementa l'efficienza di combustione, diminuendo la quantità di CO prodotto del 27,1% passando dal programma 6 al 5 (da 572,7 a 417,2 CO/mg/O₂), e del 11,3% passando dal programma 5 al 4 (da 417,2 a 369,8 CO/mg/O₂).
- il campione G4216 incrementa l'efficienza di combustione, diminuendo la quantità di CO prodotto del 19,3% passando dal programma 6 al 5 (da 1040,6 a 839,7 CO/mg/O₂), e del 23,2% passando dal programma 5 al 4 (da 839,7 a 644,3 CO/mg/O₂).

Si può concludere che: (i) i parametri geometrici, in particolar modo la lunghezza, hanno un ruolo fondamentale nell'efficienza di combustione e nella quantità di emissioni, pertanto è auspicabile tenere in considerazione la rilevanza della lunghezza del pellet in fase di produzione e soprattutto lungo la filiera di trasporto e consegna all'utente finale dove possono verificarsi variazioni di lunghezza per rotture; (ii) l'utente può influenzare la qualità di combustione del pellet tramite la scelta del programma, variando la quantità di aria in ingresso la quale potrebbe essere causa di raffreddamento della camera di combustione, risultante in una minore efficienza di combustione.

BIBLIOGRAFIA

PUBBLICAZIONI E TESTI

C. Boman, *Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion*, Energy Technology and Thermal Process Chemistry, Umeå University, 2005.

S. van Loo, J. Koppejan (a cura di), *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, 2008.

A. Pizzi, *Metodologie per il campionamento di particolato prodotto da apparecchi per la combustione di biomassa solida*, tesi di dottorato, Ancona, anno accademico 2012-2013, Tutor accademico Prof. Giovanni Riva, Coordinatore Prof. Bruno Mezzetti.

J.I. Arranz, M.T. Miranda, I. Montero, F.J. Sepúlveda, C.V. Rojas, *Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe*, Fuel 142, 2015.

A. Guercio, G. Toscano, *Il Pellet*, Flaccovio Dario Editore, 2015.

Ministero della Salute, Direzione generale della prevenzione sanitaria, *Monossido di carbonio (CO)*, 2015 (www.salute.gov.it).

M. Wöhler, D. Jaeger, G. Reichert, C. Schmidl, S. K. Pelz, *Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions*, Renewable Energy 105, 2017.

J. S. Tumuluru, *Binding Mechanism, Densification Systems, Process Variables, and Quality Attributes*, Biomass Densification, 2020 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-62888-8_2).

D. Rossi, M. Favero, *Speciale Pellet: I consumi in Italia, quanto e dove*, Agriforenergy n. 4, dicembre 2020.

NORMATIVA

Direttiva 2001/77/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, 27 settembre 2001, in GUCE L 283/33, 27.10.2001.

Regolamento n. 966/2012 del Parlamento Europeo e del Consiglio, 25 ottobre 2012, in GUCE L 298/1, 26.10.2012.

D.M. 7 novembre 2017 n. 186, in GU n. 294, 18.12.2017.

D. G. R. Marche n. 942 del 26 luglio 2021, Allegato A: *MISURE CONTINGENTI 2021/2022 PER LA RIDUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DEGLI INQUINANTI IN ARIA AMBIENTE NEL TERRITORIO DEI COMUNI DELLA ZONA COSTIERA E VALLIVA.*