



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

CARATTERIZZAZIONE CHIMICA, FISICA ED ENERGETICA DI FOOD PELLET

CHEMICAL, PHYSICAL AND ENERGETIC CHARACTERIZATION OF FOOD PELLET

TIPO TESI: sperimentale

Studente:

ALESSIO SANTARELLI

Relatore:

DOTT. ALESSIO ILARI

Correlatore:

PROF. DANIELE DUCA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

SOMMARIO

Elenco delle Tabelle	4
Elenco delle Figure.....	5
Introduzione e Scopo della tesi	7
Capitolo 1 IL PELLET.....	9
1.1 Normativa e Classificazione del Pellet	9
1.2 Produzione del Pellet.....	11
1.3 Biomasse utilizzate pe la produzione di pellet	12
1.4 Stufe a Pellet.....	14
1.5 Combustione	16
Capitolo 2 IL FOOD PELLET.....	17
2.1 Mercato del Food Pellet e problematiche	17
2.2 Biomasse utilizzate e caratteristiche	18
2.3 Barbecue e smoker a pellet.....	20
Capitolo 3 MATERIALI E METODI	24
3.1 Biocombustibili selezionati per la caratterizzazione	24
3.2 Campionamento	31
3.3 Parametri analitici	31
3.3.1 Origine e sorgente del materiale	31
3.3.2 Diametro e lunghezza	32
3.3.3 Umidità.....	33
3.3.4 Particelle fini e durabilità meccanica	34
3.3.5 Massa volumica	35
3.3.6 Stabilizzazione ed omogenizzazione e preparazione del sotto-campione per le analisi chimico-fisiche	35
3.3.7 Contenuto in ceneri	36
3.3.8 Analisi del contenuto in carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno	38
3.3.9 Analisi del potere calorifico superiore PCS	39
3.3.10 Analisi del contenuto totale di Zolfo e Cloro.....	40
3.3.11 Fusibilità delle ceneri.....	40
3.3.12 Analisi TGA-DTA	41

Capitolo 4 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	43
Capitolo 5 CONCLUSIONI	57
Ringraziamenti.....	59
Bibliografia	60

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Parametri, unità di misura e classificazione del pellet (classi A1, A1, A3)	11
Tabella 4-1: Valori medi diametro dei campioni analizzati e corrispondente classe normativa	43
Tabella 4-2: Valori medi lunghezza dei campioni analizzati e corrispondente classe normativa	43
Tabella 4-3: Valori di umidità espressi in percentuale dei campioni analizzati	44
Tabella 4-4: Valori di particelle fini e durabilità meccanica espressi in percentuale dei campioni analizzati	45
Tabella 4-5: Valori di massa volumica dei campioni analizzati	46
Tabella 4-6: Valori di contenuto in ceneri dei campioni analizzati	46
Tabella 4-7: Risultati dell'analisi elementare dei pellet oggetto di studio	48
Tabella 4-8: Valori di Potere calorifico superiore, Potere calorifico inferiore e Potere calorifico netto	48
Tabella 4-9: Valori dei metalli contenuti nei campioni analizzati	49
Tabella 4.10: Valori dei metalli contenuti nei campioni analizzati	50
Tabella 4-11: Valori di temperature di Restringimento, di deformazione, emisferica e di fusione dei campioni analizzati	51

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Produzione di pellet nei vari continenti dal 2017 al 2021. L'asse y è logaritmica per tener conto della grande variabilità della produzione nei vari continenti	13
Figura 1-2: Stufa a pellet ad uso domestico (www.pelletitalia.org)	14
Figura 2-1: Barbecue alimentato con Food Pellet PitBoss	22
Figura 3-1: sacco originale contenente il pellet da torrefazione (campione H5259)	24
Figura 3-2: sacco originale contenente il pellet di noce americano (campione H5260)	26
Figura 3-3: sacco originale contenente pellet di melo (campione H5261)	27
Figura 3-4: sacco originale contenente pellet di ciliegio (campione H5262)	28
Figura 3-5: sacco originale contenente pellet di noce europeo (campione H2563)	29
Figura 3-6: Stufa utilizzata per la determinazione del contenuto di umidità	32
Figura 3-7: Setaccio per la determinazione delle particelle fini	33
Figura 3-8: Macchinario per l'analisi della durabilità meccanica	34
Figura 3-9: Mulino per macinazione pellet	35
Figura 3-10: Analizzatore elementare con modulo per analisi zolfo (a destra)	37
Figura 3-11: Cromatografo ionico e autocampionatore	39
Figura 3-12: Rappresentazione grafica delle variazioni di forma di un provino di ceneri sottoposto a gradiente termico da sx campione originale, contrazione, deformazione, emisferica e fusione	40
Figura 3-13: Macchinario Leco per analisi TGA-DTA	41
Figura 4-1: Report analitico di fusibilità per il campione H5259	51
Figura 4-2: spettrometro Nicolet iS10 .	52
Figura 4-3: Spettri di assorbanza generati per i diversi campioni nella regione del medio infrarosso	53
Figura 4-4: spettri di assorbimento con evidenziate le lunghezze d'onda in cm-1 relative a picchi caratteristici	54

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Negli ultimi anni il settore agro-energetico sta continuamente assumendo maggior importanza e visibilità per molteplici fattori. Nel contesto di una crescente preoccupazione per l'ambiente e la necessità di trovare fonti di energia sostenibili, le agroenergie stanno guadagnando sempre più attenzione come alternative alle fonti di energia tradizionali. Le agroenergie sono combustibili o forme di energia prodotte utilizzando materie prime agricole o biomasse provenienti dal settore agricolo. Tra le fonti di origine primaria riveste particolare importanza il legname, una fonte di biomassa solida che può essere utilizzata come combustibile per la produzione di calore ed energia elettrica. La produzione di legname per uso energetico può derivare da diverse fonti, come le foreste gestite in modo sostenibile e gli alberi piantati specificamente per questo scopo. Il legname può essere utilizzato come biomassa in vari impianti di cogenerazione, fornendo una fonte di energia rinnovabile e a basse emissioni di carbonio. Inoltre, l'utilizzo del legname come combustibile può contribuire a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e a promuovere la gestione sostenibile delle risorse forestali. La biomassa legnosa è una fonte rinnovabile al 100% e si ricava dall'utilizzo di legno "vergine" oppure dagli scarti dell'industria forestale, come ad esempio trucioli e segatura. Le principali destinazioni di uso riguardano legna da ardere, cippato e pellet; per quanto riguarda il cippato e il pellet vengono realizzati a seguito di lavorazione della biomassa e poi sono utilizzati in impianti moderni e tecnologici che garantiscono alto rendimento, efficienza energetica e basse emissioni: impianti centralizzati a biomassa legnosa, micro e mini-cogenerazione, teleriscaldamento e stufe a pellet. Particolare attenzione va riservata al pellet, negli ultimi anni in ampio sviluppo su scala globale; l'Europa è il leader del mercato mondiale contando quasi il 50% della produzione e oltre il 75% del consumo totale (dati 2018, Cina esclusa). Per quanto riguarda i possibili impieghi del pellet, ogni segmento di mercato ne fa uso per trasformarlo in energia termica. Per valorizzare un certo tipo di biomassa legnosa, sia forestale, sia residuale da potatura, sia eventualmente anche agro-industriale e così via, esistono delle vie alternative che sfruttano sempre gli stessi identici principi dei biocombustibili di qualità. Oggetto di studio di questa tesi è il food pellet, una categoria di pellet destinata all'uso per barbecue e affumicatori. In confronto al pellet tradizionale utilizzato nel riscaldamento domestico, il food pellet è una tipologia di prodotto molto ristretta con un mercato "di nicchia" e con un potenziale sviluppo in crescita. Come il pellet ad uso energetico è un combustibile ecologico e pratico da utilizzare ma, soprattutto, rappresenta una valida alternativa ai tradizionali combustibili, come carbone e legna. La caratteristica peculiare del food pellet è la molteplice diversità di biomasse utilizzate, come faggio, quercia e arboree agricole come ciliegio e melo, singolarmente o in miscela, capaci di conferire aromi caratteristici alle pietanze in base al prodotto utilizzato e alla tipologia di cottura realizzata con i barbecue e gli affumicatori. Scopo di questa tesi è analizzare la conformità e le caratteristiche chimiche, fisiche ed energetiche di alcuni

campioni di food pellet disponibili in un'ampia varietà di mercato. Poiché, come accennato precedentemente, è un mercato in sviluppo e di nicchia, non esiste una normativa di riferimento che stabilisca dei parametri fisici e chimici di riferimento del food pellet. Questa analisi, quindi, viene effettuata confrontando i valori di analisi sui campioni analizzati con i valori stabiliti dalla normativa tecnica UNI EN ISO 17225-2, norma di riferimento per la classificazione del pellet ad uso energetico.

CAPITOLO 1

IL PELLETT

Con il termine pellet si definisce un biocombustibile solido, generalmente in forma cilindrica, ottenuto per densificazione di biomassa di origine vegetale legnosa e/o erbacea. [1]. La biomassa così densificata presenta proprietà chimico-fisiche, geometriche e meccaniche uniformi, che conferiscono una serie di vantaggi. Da una matrice spesso disomogenea e irregolare, infatti, si ottiene un prodotto standard, compatto, asciutto e stabile, pronto all'uso ma anche conservabile e pratico per lo stoccaggio e il trasporto.

1.1 Normativa e Classificazione del Pellet

La natura di prodotto macinato, omogenizzato e densificato rende piuttosto complesso riconoscere e garantire la qualità del pellet; sono quindi necessari dei requisiti fondamentali e delle specifiche tecniche a vari livelli. A livello internazionale la norma UNI EN ISO 17225-2 determina le specifiche e la classificazione del pellet di legno per uso industriale e non industriale. La norma si riferisce solo al pellet di legno ottenuto dalle seguenti materie prime:

1. bosco, piantagioni e altro legno vergine
2. prodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno
3. legno recuperato

Non comprende il legno proveniente dalla demolizione di edifici e strutture di ingegneria civile o il legno trattato termicamente con sistemi di torrefazione (per questa ultima categoria esiste una norma dedicata).

La norma stabilisce i parametri qualitativi di riferimento e le soglie entro le quali un determinato pellet deve rientrare affinché possa ritenersi conforme o meno ad una determinata classe di qualità: A1, A2 e B per pellet commerciali ed I1, I2 ed I3 per pellet industriali. Le classi A1, A2, I1 e I2 rappresentano il legno vergine e i residui di legno non trattati chimicamente. Le classi di proprietà B e I3 consentono l'impiego di sottoprodotti e residui industriali del legno e legno usato non trattato chimicamente.

1.1.1. Parametri e valori di riferimento

- Lunghezza, diametro: parametri geometrico/dimensionali che consentono di regolare componenti degli impianti termici come i sistemi di alimentazione e di movimentazione oltre ad influenzare tutta la logistica.
- Forma: per il pellet è soltanto cilindrica ed è una scelta convenzionale che influenza aspetti logistici e di utilizzo finale.
- Massa volumica: corrisponde a rapporto tra la massa del pellet e il volume occupato dallo stesso. È influenzata dal contenuto di umidità e dalle caratteristiche dimensionali, ed è importante per l'efficienza dei trasporti e dello stoccaggio lungo tutta la filiera produttiva, oltre che per le scelte impiantistiche (spazi dei sistemi di alimentazione e degli impianti).
- Umidità: può essere espressa come rapporto percentuale tra la massa di acqua contenuta nella biomassa, e la massa di quest'ultima. $\text{Umidità \%} = (\text{Massa H}_2\text{O} / \text{Massa Biomassa}) \times 100$. L'umidità è un parametro qualitativo della biomassa molto importante, in quanto può influenzare molteplici aspetti delle biomasse quali: contenuto energetico delle biomasse, stabilità di stoccaggio, comportamento nei processi termochimici, massa volumica, costi di logistica e valore economico.
- Ceneri: sono rappresentate dalla frazione inorganica del biocombustibile, presente come residuo della completa combustione. Esse possono influenzare negativamente alcuni aspetti: non contribuiscono ad aumentare il contenuto energetico della biomassa e non rilasciano calore nel processo di combustione, comportano emissioni di particolato che possono influire negativamente sull'ecosistema e sulla salute umana e generano fenomeni corrosivi sulle superfici degli scambiatori di calore e degli elementi interni dell'impianto.
- Il potere calorifico rappresenta l'energia che un combustibile può liberare durante il processo di combustione. Esso è influenzato fortemente dalla composizione chimica della biomassa ed è uno dei parametri più significativi di un combustibile (fossile o rinnovabile). Ha impatti in termini di valore energetico ed economico del prodotto, sul comportamento nel sistema di utilizzazione, e può influire su alcuni costi indiretti legati al trasporto o allo stoccaggio del materiale. Possiamo distinguere potere calorifico superiore (PCS), inferiore (PCI) ed infine netto (PCN).
- Il PCS descrive il contenuto energetico complessivo potenziale generato dalla completa combustione in condizioni ottimali (le tipiche condizioni analitiche) dove il combustibile è ossidato da ossigeno puro all'interno della bomba calorimetrica.
- Il PCI esprime la quantità di energia disponibile al netto del contributo dell'acqua che si forma durante la combustione, assumendo che questa rimanga tutta nello stato di vapore. Rappresenta il parametro energetico più utilizzato ed è calcolato come differenza tra il PCS e il calore latente di condensazione del vapore acqueo formatosi.

$$PCI = PCS - cev * H2O$$

- Il PCN esprime la reale energia sviluppata dal combustibile, e si ricava dal PCI al netto dell'umidità e può essere impiegato per valutare l'efficienza dell'impianto nella conversione termica.

$$PCN = PCI * (1 - U) - Cev * H2O$$

Tabella 1-1: Parametri, unità di misura e classificazione del pellet (classi A1, A1, A3)

Parametro	Unità di misura	Classe A1	Classe A2	Classe A3
Lunghezza	mm	$3,15 < L \leq 40$	$3,15 < L \leq 40$	$3,15 < L \leq 40$
Diametro	mm	$6 \pm 1 / 8 \pm 1$	$6 \pm 1 / 8 \pm 1$	$6 \pm 1 / 8 \pm 1$
Massa volumica	kg/m ³	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Umidità	%	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Ceneri	%	$\leq 0,7$	$\leq 1,2$	$\leq 2,0$
Potere calorifico netto	MJ/kg tq	≥ 16.5	≥ 16.5	≥ 16.5

1.2 Produzione del Pellet

I pellet sono piccoli elementi cilindrici compattati ricavati dalla segatura e dai residui della lavorazione del legno (trucioli e segatura), solitamente prodotti in segherie e falegnamerie. La materia prima viene preselezionata, essiccata, pulita per rimuovere le impurità e poi lavorata per ottenere una certa qualità e una sufficiente umidità residua. Questa preparazione comprende anche la selezione di specie legnose particolari (abete, conifera) e una certa uniformità di qualità e dimensioni. Più accurata è questa preparazione, migliore è la qualità del prodotto finale e minore è il consumo di energia per la produzione. La macinazione fine della biomassa è una operazione necessaria soprattutto quando si devono produrre dei biocombustibili densificati come pellet e bricchette. In questo caso, prima di essere densificato, il materiale deve essere standardizzato riducendo il diametro delle particelle a meno di qualche millimetro. Generalmente si impiegano dei mulini a martelli. Alcuni sistemi sono anche dotati di sistema di aspirazione delle polveri e cicloni per l'abbattimento delle stesse per limitare i problemi ad ambiente ed operatori. La pellettizzazione è un processo di estrusione esercitato da un elemento rotante (rullo pressore interno), contenuto all'interno di un elemento cilindrico (trafila di compressione), che comprime il materiale legnoso immesso e ne determina la fuoriuscita attraverso apposite matrici forate ricavate lungo le pareti della trafilatura. Nel corso di quest'operazione si determina una progressiva densificazione del materiale legnoso che fuoriesce sotto forma di piccoli elementi cilindrici. Coltelli,

posti all'esterno della trafilatura, tagliano il pellet nella lunghezza desiderata (generalmente meno di 40 mm). Le differenti conformazioni delle trafilature e la possibilità di avere rulli pressori folli o rotanti determina diverse soluzioni impiantistiche che sono comunque raggruppabili in sistemi a trafilatura verticale e sistemi a trafilatura orizzontale. Durante la fase di estrusione si raggiungono temperature superiori ai 90°C e pressioni tali da determinare la plastificazione dei costituenti della matrice legnosa, in modo specifico della lignina, un polimero termoplastico, che svolge la funzione di adesivo naturale e conferisce coesione al prodotto finito. La fase finale è quella di raffreddamento, durante la quale avviene un'ulteriore essiccazione del pellet indispensabile per stabilizzare e formare i piccoli cilindri e la separazione delle particelle fini. Al fine di conferire alla materia prima una certa resistenza agli urti, possono essere aggiunte sostanze naturali (amido e farina), che incrementano l'adesività tra gli elementi legnosi e aumentano la resistenza meccanica del pellet. Il prodotto viene inoltre setacciato prima dello stoccaggio per rimuovere polvere e altri residui. I singoli sistemi di pellettizzazione possono avere capacità operative molto diverse, da qualche decina di kg/h a diverse tonnellate/h. I sistemi più piccoli possono essere anche associati a piccole aziende che li usano anche per produrre "agri-pellet" sfruttando propri residui di coltivazione e/o lavorazione e per uso energetico interno. Negli impianti di produzione più grandi, veri e propri siti produttivi dedicati, spesso sono presenti molti sistemi di pellettizzazione che lavorano in parallelo in grado di gestire grandi quantità di materiale simultaneamente. Avere diverse unità produttive permette anche di limitare i danni dovuti al malfunzionamento di una singola unità e facilitano anche la manutenzione ordinaria dell'impianto in quanto si può fare manutenzione su una linea alla volta, senza causare blocchi della produzione.

1.3 Biomasse utilizzate per la produzione di pellet

I pellet possono essere realizzati con diverse biomasse, ognuna con caratteristiche specifiche in termini di prestazioni energetiche. Generalmente il materiale di partenza è rappresentato dal legno di conifere (spesso fusti scortecciati) come pino, abete e larice e dal legno di latifoglie come faggio, quercia e frassino. Le piante di latifoglie e conifere presentano differenze significative in termini di struttura chimica, fisica ed energetica del legno, che influiscono sulla produzione di pellet. Le latifoglie hanno un legno più denso e fibroso, caratterizzato da una maggiore quantità di lignina, cellulosa ed emicellulosa; questo conferirebbe loro un potere calorifico più elevato, rendendole ideali per la produzione di pellet ad alta efficienza energetica. Inoltre, il naturale contenuto di umidità nel legno di latifoglie è generalmente inferiore e ciò implica una minore produzione di fumi e residui durante la combustione. D'altra parte, le conifere hanno un legno più leggero resinoso (resine che come tutti gli estrattivi hanno un elevatissimo potere calorifico), con una struttura cellulare che consente una crescita più rapida. Sebbene il loro potere calorifico sia mediamente inferiore rispetto a quello delle latifoglie

(ma solo se si considera il solo legno), la loro abbondanza e disponibilità rendono i pellet di conifera un'opzione economica e sostenibile. Il legno di conifera risulta essere più utilizzato ed interessante per la produzione di pellet soprattutto per il ridotto contenuto di sostanza inorganica che, nella combustione, genera un quantitativo significativamente ridotto di ceneri rispetto alla maggior parte delle latifoglie. Infatti, a prescindere dalla biomassa utilizzata, un fattore determinante per il pellet e le sue caratteristiche energetiche (positive o negative) è la presenza di corteccia, che porta ad un contenuto di ceneri più elevato e di conseguenza un potere calorifico inferiore, oltre ad una maggiore idrofobicità (dovuta al più alto contenuto di estrattivi idrofobi) e una più alta perdita di sostanze volatili durante l'essiccazione. I pellet di corteccia puri 100% possono causare la sedimentazione dello strato di cenere sulla parete della camera di combustione. Studi recenti hanno rivelato che una qualità di pellet particolarmente alta può essere ottenuta da una miscela del 90% di legno e del 10% di corteccia, determinando un contenuto di ceneri ragionevolmente basso (0,7%) e migliora altre proprietà critiche come l'elevata stabilità dimensionale e l'idrofobicità. Questa miscela inoltre conferisce una buona resistenza del pellet alle fluttuazioni di umidità, insieme a una maggiore stabilità dimensionale e densità dei singoli pellet rispetto a quelli di legno puro. L'alto contenuto di estratti di corteccia (principalmente sostanze fenoliche) fornisce anche protezione antibatterica antimicrobica al materiale, oltre al pellet derivato. In particolare, l'incorporazione di corteccia di alcune specie di latifoglie come il pioppo, la robinia aumentano significativamente il potere calorifico del biocarburante finale. Utilizzando rapporti legno-corteccia appropriati è possibile mantenere un basso contenuto di ceneri, limitando così l'effetto negativo più evidente dell'utilizzo di corteccia come biomassa. [2]. Sebbene l'utilizzo di mix legno-corteccia possa presentarsi come una buona strategia per ridurre l'estrazione forestale di legno vergine (a parità di prodotto finale ottenuto) questo non risolve pienamente la necessità di pellet attuale. In tal senso è da diverso tempo che si tenta di sviluppare produzioni di pellet utile a sostenere l'economia e l'indipendenza energetica delle zone rurali, e per ottenere questo obiettivo è importante trovare materie prime alternative. Negli ultimi anni c'è stato un grande interesse nella produzione di pellet da specie alternative, sia da comparti naturali (settore forestale) che da coltivazioni dedicate, e da altri tipi di residui forestali, come corteccia, coni o materiale da legno di basso diametro, e non forestali come residui di potatura dall'arboricoltura.

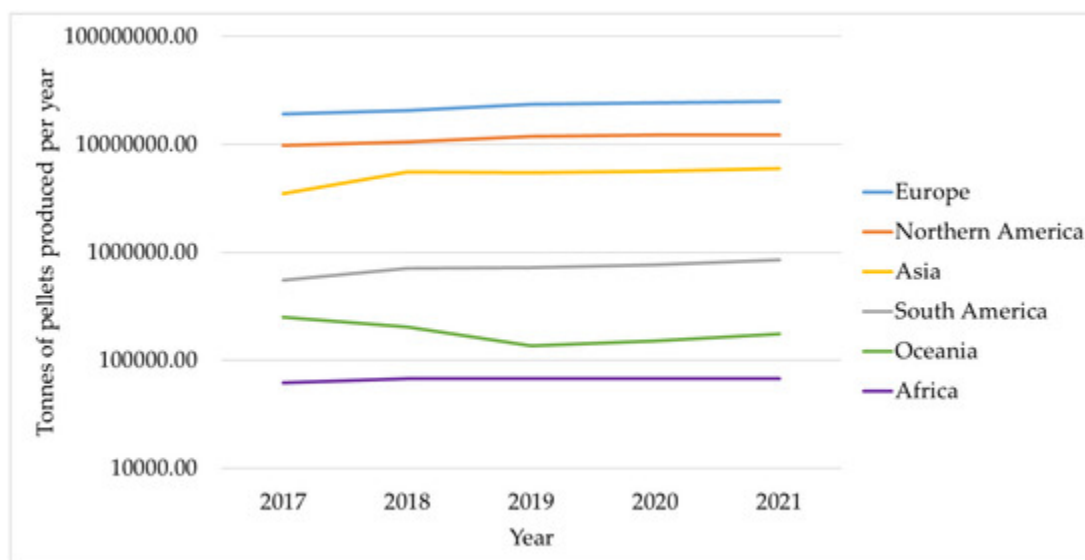


Figura 1-1: Produzione di pellet nei vari continenti dal 2017 al 2021. L'asse y è logaritmica per tener conto della grande variabilità della produzione nei vari continenti.

1.4 Stufe a Pellet

Terminata la produzione, il pellet può essere acquistato dagli operatori ed utilizzato per alimentare i dispositivi di riscaldamento, solitamente stufe a pellet ad uso domestico (più raramente caldaie per riscaldamento di condomini o piccoli comprensori edili). La stufa a pellet, con potenza media dai 3 kW ai 8 kW, ha una struttura simile ad una stufa tradizionale a legna. È costituita da un serbatoio o tramoggia, di solito con carica dall'alto, che contiene il pellet e può avere una capienza che parte da quindici e può arrivare fino a sessanta o più chilogrammi a seconda del modello di stufa. All'interno della stufa è presente una coclea (vite senza fine) che prende il pellet dal serbatoio e lo solleva fino a farlo cadere nella camera di combustione. Il combustibile viene bruciato grazie alla presenza di una resistenza elettrica che, diventando incandescente nella fase di avvio, innesca la fiamma. È inoltre presente un sistema di ventilazione che immette aria al di sotto del braciere (aria primaria), questo flusso ha il compito di fornire ossigeno (in rapporto opportuno con il combustibile) ed allontanare le ceneri dal braciere. Se la stufa (o qualsiasi altro sistema di combustione) deve generare acqua calda o scaldare un liquido vettore, i fumi caldi generati dalla combustione vengono convogliati allo scambiatore dove avviene lo scambio termico tra i fumi caldi e il liquido vettore freddo (il circuito è chiaramente mosso da una pompa). Il calore viene inoltre diffuso per convezione naturale verso l'ambiente circostante, stufe sono ideali per riscaldare rapidamente un singolo ambiente di piccole e medie dimensioni attraverso ulteriori sistemi di movimentazione dell'aria esterna. Le stufe sono normalmente dotate di una centralina elettronica che regola sia il flusso di aria che l'alimentazione al fine di ottimizzare la

combustione (anche utilizzando sonde specifiche a camino). Nonostante ciò, necessita di una pulizia ordinaria del braciere, del cassetto cenere e del vetro ceramico da effettuare con frequenza variabile a seconda dell'utilizzo e del tipo di pellet impiegato. Oltre alle stufe a pellet tradizionali ventilate esistono altre due tipologie: quelle canalizzate, che possono riscaldare più stanze contemporaneamente attraverso dei condotti in cui viene spinta l'aria calda per mezzo di bocchette con più uscite e le termostufe, caldaie collegabili al sistema di riscaldamento con possibilità, inoltre, di fornire l'acqua calda per uso sanitario grazie all'apposito kit idraulico in dotazione e a sistemi di accumulo come boiler e puffer.

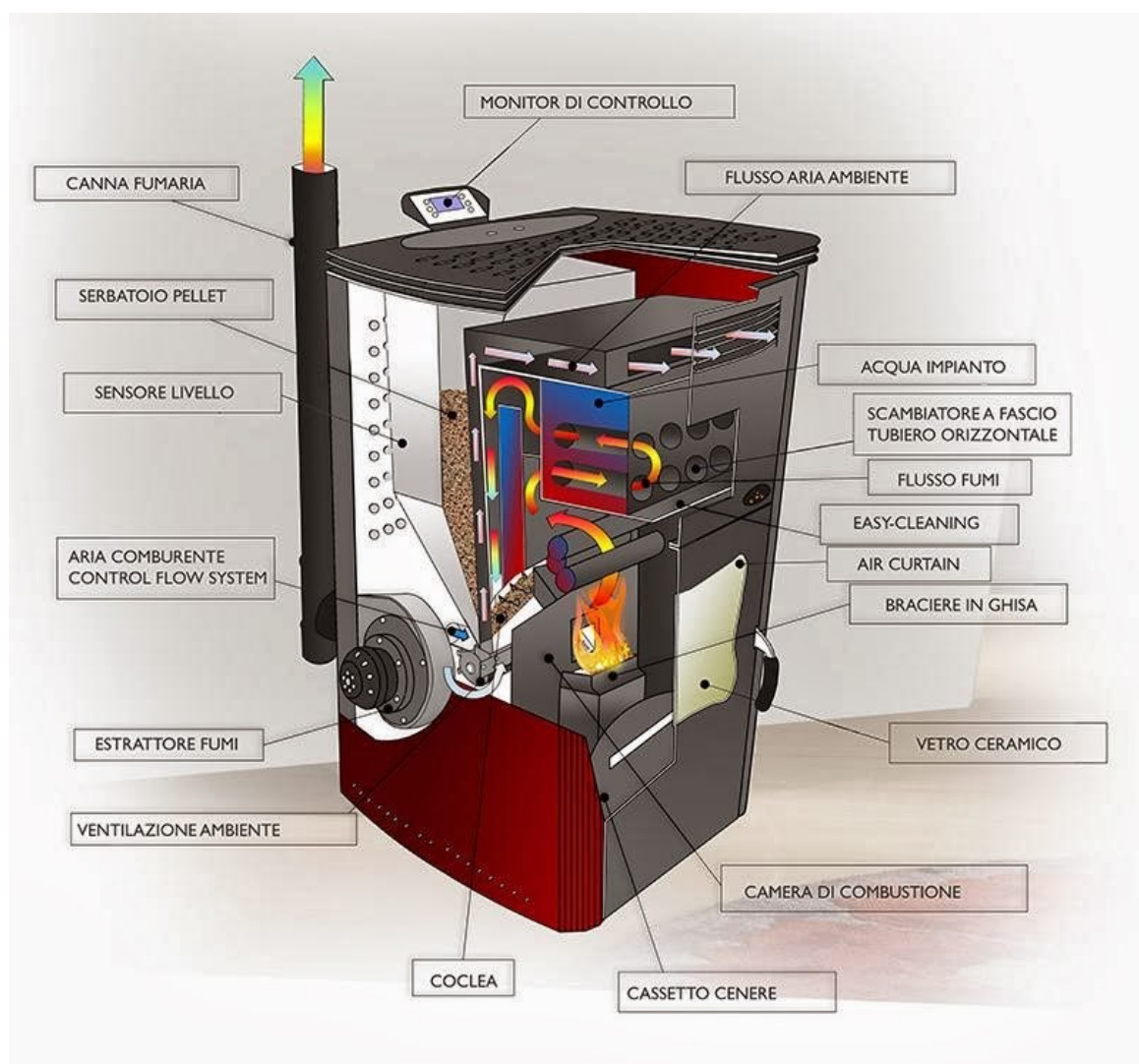


Figura 1-2: Stufa a pellet ad uso domestico (www.pelletitalia.org)

1.5 Combustione

Il processo di combustione consiste in una sequenza di reazioni chimiche esotermiche che avvengono tra un combustibile e un agente ossidante da cui si genera calore e specie chimiche di conversione.

La combustione può essere suddivisa in sei fasi, come descritto di seguito:

- 1 Riscaldamento ($T^{\circ} < 100$): fase ridotta in durata, parziale evaporazione di acqua, parziale perdita di energia (processo endotermico) T iniziale $10-25^{\circ}\text{C}$.
- 2 Essiccazione ($100 < T^{\circ}\text{C} < 150$): totale evaporazione acqua, perdita di energia (processo endotermico) autoalimentazione impossibile U superiore 65%, abbassamento temperatura combustione (gestione fusibilità ceneri).
- 3 Pirolisi ($150 < T^{\circ}\text{C} < 230$): scissione componenti a catena lunga, produzione di Tar e Char composti gassosi non ossidati e idrocarburi volatili, fase energeticamente neutra.
- 4 Prima gassificazione ($230 < T^{\circ}\text{C} < 500$): inizio dal punto di ignizione della biomassa, immissione di agraria primaria (ossigeno sotto stechiometrico, parziale ossidazione della biomassa (processo esotermico).
- 5 Seconda gassificazione ($500 < T^{\circ}\text{C} < 700$): fase di gassificazione a carico del Char (residuo carbonioso), parziale ossidazione della biomassa (processo esotermico).
- 6 Ossidazione ($700 < T^{\circ}\text{C} < 1400$): è la fase finale in cui si completa l'ossidazione (processo esotermico 70% calore totale prodotto, immissione di aria secondaria).

CAPITOLO 2

IL FOOD PELLET

La grigliatura e l'affumicatura del cibo hanno una lunga e ricca storia e, sebbene la pratica della preparazione del cibo sia rimasta la stessa, le tecniche culinarie, gli elettrodomestici e i tipi di combustibile utilizzati si sono evoluti. La crescita della popolarità del cibo sano e della cucina all'aperto insieme allo sviluppo energetico e tecnologico ha portato i produttori a creare costantemente nuovi prodotti per competere sul mercato. Negli ultimi anni il pellet di legno solitamente prodotto per il riscaldamento residenziale sta allargando lo scenario di questo prodotto con il Food Pellet: un combustibile ecologico e pratico che permette di ottenere una cottura caratteristica delle pietanze. Come il pellet tradizionale è realizzato con legno essiccato e densificato in piccoli cilindri di dimensioni simili, che possono essere utilizzati come valida alternativa ai tradizionali combustibili, come carbone e legna. Secondo la Hearth, Patio and Barbecue Association negli Stati Uniti (HPBA), la cottura alla griglia con pellet di legno è una delle tendenze più in voga nel settore delle grigliate e lo dimostrano l'aumento, in poco tempo, della produzione di pellet di legno e delle vendite di dispositivi di cottura specifici come barbecue e smoker.

2.1 Mercato del Food Pellet e problematiche

Il mercato del food pellet è completamente diverso e distaccato da quello del pellet da riscaldamento per vari motivi: la destinazione d'uso del prodotto, la quantità di produzione e il prezzo finale. Si tratta di un pellet “di nicchia” prodotto in quantità inferiori rispetto al pellet tradizionale poiché la richiesta di mercato e la quantità utilizzata dal consumatore sono decisamente più basse; si trovano in sacchi di 9/10 kg che alimentano dispositivi con capacità di combustione inferiori alle stufe domestiche. I consumatori possono scegliere tra un'ampia gamma di pellet di legno che consentono innumerevoli opzioni per personalizzare il profilo aromatico desiderato. L'attrattiva dell'uso di questo pellet di solito non deriva dalla qualità superiore di biomassa, ma dall'ampia varietà di aromi (ad esempio, l'aroma delle botti di whisky, il sapore dolce e fruttato del legno di ciliegio o l'affumicatura di hickory, mesquite e quercia) e dalle diverse tipologie di legno, come faggio, ciliegio, melo, quercia, etc, per soddisfare le diverse richieste degli appassionati di barbecue e affumicatura. I siti Web dei prodotti forniscono informazioni sul tipo di biomassa utilizzata e suggerimenti su come abbinare determinati pellet a specifici ingredienti di cottura per creare particolari profili aromatici. I produttori di food pellet affermano di realizzare prodotti di massima qualità e di utilizzare solo legno duro e naturale, in genere melo, ciliegio, mesquite, noce americano, noce pecan, quercia, ontano e acero o le loro miscele. Tuttavia non forniscono informazioni dettagliate sulla qualità e sulle proprietà dei pellet: queste caratteristiche

dovrebbero essere di fondamentale importanza perché il fumo della loro combustione entra direttamente in contatto con il cibo e ha un impatto sia sulla sicurezza umana che sull'ambiente. Sebbene siano stati stabiliti alcuni standard e programmi di accreditamento per la qualità dei pellet di legno, attualmente non esistono standard o protocolli di prova specifici per i food pellet. Non ci sono inoltre requisiti per i produttori di food pellet di sottoporre il loro prodotto a test qualitativi di laboratori prima che entri sul mercato o di etichettare i loro prodotti in modo standardizzato per divulgare un elenco dettagliato degli ingredienti dei pellet di legno e delle proprietà del combustibile. Secondo alcuni dati la grigliatura con food pellet comporta emissioni elevate di particolato, NO₂, SO₂, CO, CO₂ e formaldeide, rispetto ai limiti di esposizione raccomandati. Tuttavia, a causa della ristretta gamma di contenuti di impurità, sono state stabilite solo relazioni limitate tra impurità e livelli di emissione. Ciò suggerisce che le emissioni di combustione sono influenzate da un effetto composto di numerosi fattori, tra cui la diversità e le proprietà dei materiali di origine legnosa utilizzati per la loro produzione, il contenuto di umidità del combustibile e le condizioni di combustione. I risultati del test di grigliatura di 1 ora documentano significative variazioni di emissione, con il particolato (in particolare PM_{2,5}) che rappresenta una preoccupazione importante. Sebbene l'esperimento dimostri che le emissioni variano in base alle quantità di impurità e al tipo di legno del combustibile originale e alla temperatura di grigliatura o affumicatura, sono necessari ulteriori studi per identificare tutti i fattori che controllano le emissioni. [3]. Lo scopo di questo lavoro di ricerca è infatti valutare la qualità di questo particolare pellet ed analizzarne i parametri chimici, fisici ed energetici per comprendere, in futuro, le potenziali implicazioni dell'uso nella preparazione del cibo e per identificare il tipo e la quantità di emissioni che hanno un impatto sulla salute umana e che vengono rilasciate nell'atmosfera.

2.2 Biomasse utilizzate e caratteristiche

Come anticipato nel paragrafo 1.3, le continue ricerche nel settore energetico hanno portato ad analizzare e studiare biomasse alternative per la realizzazione del pellet. In particolar modo, per il food pellet questo discorso potrebbe essere più esteso dal momento che lo scopo finale di questo prodotto è conferire una caratteristica alle pietanze durante la cottura. Questa tipologia di pellet non richiede una biomassa dall'elevato potere calorifico bensì che la biomassa sia in grado di rilasciare aromi caratteristici durante la combustione nei barbecue o negli smoker. In Europa oltre 10 milioni di ettari sono ricoperti da impianti arborei, la maggior parte dei quali si trova nell'area mediterranea. Ciascun impianto necessita di una potatura di gestione periodica, intrapresa ogni uno o ogni tre anni (in relazione a specie e sistema produttivo) e da questa operazione si producono quantità significative di residui, stimate tra 1 e 5 tonnellate per ettaro: in particolare oltre 2600 kt (chilotonnellate) di sostanza secca di biomassa da potatura sono prodotti ogni anno solo da uliveti italiani, [4]. Le pratiche più comuni per lo smaltimento dei residui di potatura sono la pacciamatura e la combustione a cielo aperto: la

pacciamatura ha come benefici la minore erosione del suolo e il minor esaurimento dei nutrienti del suolo, ma aumenta il rischio di trasmissione delle malattie nel terreno; la combustione sul campo invece provoca perdita di risorse ed emissione incontrollata di inquinanti nell'atmosfera. Mentre la disponibilità di biomassa forestale per l'energia in Italia è stata ampiamente studiata e quantificata con lo sviluppo di modelli di gestione consolidati, la biomassa residuale dalle colture agricole, nonostante la sua diffusa disponibilità sembrerebbe non è sufficiente per soddisfare la domanda attuale di biocombustibili. La biomassa da potatura è inoltre più problematica rispetto alla biomassa forestale per la produzione di pellet. Infatti, i residui di potatura sono caratterizzati da un diametro basso, un elevato rapporto corteccia/legno, che abbassa il potere calorifico della biomassa l'eventuale presenza di foglie e talvolta di legno attaccato da agenti patogeni, così come il materiale contaminato dal terreno (quando i residui sono raccolti a terra). Inoltre, la possibilità che la biomassa da potatura possa contenere alti livelli di metalli pesanti come conseguenza della concimazione e della gestione chimica dei parassiti può anche sollevare alcuni importanti problemi ambientali e di salute umana nel loro utilizzo come combustibile. Considerando l'assenza quasi totale in letteratura di studi focalizzati sul pellet ad uso alimentare, di seguito vengono elencati alcuni tipi di pellet, realizzati con biomasse arboree di interesse frutticolo, forestale e agroindustriale, non usualmente riscontrabili nella produzione del pellet tradizionale ma comunque destinati all'uso energetico:

- Pellet di melo: il pellet realizzato in questo studio a partire da residui omogenei di melo può essere utilizzato solo in ambito industriale (I3), soprattutto a causa del suo elevato contenuto di ceneri (2,27%); si è osservato però, che il pellet ottenuto dalla miscela di legno di pino con residui di melo riduce il contenuto di ceneri e aumenta la densità apparente e la densità energetica, migliorando quindi la qualità del prodotto. Considerando i limiti di contenuto di ceneri delle categorie della normativa ISO 17225-2 si osserva: il pellet contenente il 25% di residui di potatura delle mele (Ap25P75) può essere utilizzato in tutte le categorie (A1, A2, B, I1, I2); il pellet contenente il 50% dei residui di potatura delle mele (Ap50P50) si adatta alle classi A2, B, I2, I3; infine, il pellet con il 75% dei residui di potatura delle mele si adattano alle classi B e industriali. [5]
- Pellet noce: in questo studio si è dimostrato come il legno di noce abbia una buona composizione chimica, determinata da un equilibrio tra cellulosa, lignina ed emicellulosa; queste caratteristiche conferiscono al legno durezza, resistenza e, in particolare, danno un buon potenziale energetico, rendendolo adatto per la produzione di pellet di alta qualità. Sulla base di alcuni studi, si è osservato che il pellet può essere realizzato anche a partire da coni di conifere macinati e gusci di noci macinati e dalla miscelazione di queste due biomasse. L'analisi di tutti i parametri ha permesso di concludere che i pellet di migliore qualità in termini di parametri fisici e meccanici si ottengono con miscele contenenti il 50% o più di coni di conifere. [6]

- Pellet olivo e agrumi: considerando l'area mediterranea ed in particolare l'Italia è facilmente deducibile l'ampia disponibilità di biomassa provenienti dalle potature di piante di agrumi e olivo (vista la vocazione produttiva verso queste colture). Questi sistemi culturali possono offrire una valida alternativa alle classiche biomasse forestali e ridurre le emissioni nell'atmosfera, considerandone l'interessante potenziale energetico. A tal proposito, è stato effettuato uno studio su tre diversi pellet realizzati con 100% di olivo, 100% di agrumi e ottenuto da un miscuglio di olivo e agrumi. I risultati indicano che il contenuto in ceneri è più alto nel pellet di agrumi, intermedio nella miscela e più basso nel pellet di olivo; i tre campioni hanno un maggiore contenuto di macro-elementi quali K, Na, Ca, Mg e Fe, tipici della biomassa legnosa e legati alle condizioni di crescita delle piante, caratteristiche del suolo e impiego di prodotti fitosanitari. Gli altri metalli, compresi i metalli pesanti, hanno valori regolari e variazioni non significative, ad eccezione del Cu che è significativamente inferiore nel pellet di agrumi mentre ha valori più alti nel campione 100% olivo in quanto la biomassa è sottoposta a trattamenti a base di rame che hanno funzione protettiva da patologie causate da funghi e batteri. [7]

2.3 Barbecue e smoker a pellet

Il barbecue a pellet è un tipo di barbecue che utilizza pellet di legno come combustibile anziché carbone o legna tradizionale ed è progettato per cucinare alimenti direttamente sopra la fonte di calore, similmente a un grill tradizionale, . Lo smoker a pellet è progettato per cucinare alimenti a bassa temperatura e per un periodo di tempo più lungo, affumicando e cuocendo lentamente il cibo per conferire all'alimento sapori caratteristici e intenerire gli alimenti; a differenza del barbecue che è utilizzato per grigliare i cibi in modo rapido e uniforme. Lo smoker è un dispositivo con struttura solitamente in acciaio, con grandezza e peso variabili, costituita da:

- Tramoggia: contenitore dove viene caricato il pellet; ha una capienza che varia con il modello di barbecue ma può arrivare a circa 10 kg di pellet.
- Coclea: canale che assicura un trasporto continuo di pellet direttamente dalla tramoggia al bruciatore; alla coclea è accoppiato un motoriduttore con forma a spirale che ha il compito di dare movimento rotativo al pellet.
- Braciere: componente dove il pellet viene bruciato per generare calore; estraibile per facilitare la pulizia

- Ventilatore: regola il flusso d'aria all'interno dello smoker per mantenere una temperatura costante.
- Griglia di cottura: luogo dove vengono posizionati gli alimenti da cuocere.
- Termostato: regola la temperatura all'interno dello smoker per garantire una cottura precisa.
- Sonda termica: misura la temperatura degli alimenti durante la cottura; è collegata al pannello di controllo digitale (display) dove sono visibili tutti i parametri durante il funzionamento dello smoker.
- Coperchio: copre lo smoker durante la cottura per trattenere il calore.
- Piastra deflettore: distribuisce uniformemente il calore all'interno dello smoker per una cottura omogenea.
- Cassetto per la cenere: raccoglie le ceneri prodotte durante la combustione del pellet (non sempre presente).
- Rack per affumicatura: permette di aggiungere il fumo per conferire un sapore affumicato agli alimenti.
- Cassetto per i grassi: raccoglie tutti gli oli e i grassi di cottura degli alimenti.
- Pannello di controllo digitale: è un display elettronico dove è possibile impostare la modalità di cottura e monitorare in tempo reale la temperatura del dispositivo; i parametri sono regolabili attraverso una manopola o persino tramite smartphone.



Figura 2-1: Barbecue alimentato con Food Pellet PitBoss

Il funzionamento dello smoker è abbastanza semplice: il pellet viene caricato nella tramoggia inserita posteriormente o lateralmente al dispositivo. A differenza delle stufe, dove il pellet dal basso del serbatoio viene trasportato verso la parte alta della stufa e lasciato cadere all'interno di un canale che lo deposita all'interno del braciere, nello smoker il percorso del pellet si può definire diretto. Dalla base della tramoggia il pellet scorre nella coclea di trasmissione avviata da un motoriduttore, un sistema automatico che regola la velocità di trasmissione in base alle necessità di cottura. Con la coclea inserita all'interno del cilindro il pellet attraversa il canale di alimentazione in modo uniforme e costante garantendo una costante alimentazione al braciere. Tali regolazioni di velocità sono abbastanza precise per garantire una combustione opportuna e mantenere la temperatura desiderata durante la cottura. Negli smoker, essendo i motori relativamente poco potenti, le caratteristiche dimensionali del pellet sono cruciali, infatti, se questi non sono di buona qualità o se sono di dimensioni errate possono dare problemi

bloccando lo scorrimento nella coclea o variando imprevedibilmente l'alimentazione di combustibile. È importante utilizzare pellet di alta qualità e di dimensioni uniformi per evitare blocchi e garantire un funzionamento ottimale dello smoker. Nel braciere avviene la combustione lenta e costante del pellet; a differenza del barbecue tradizionale dove la fiamma è diretta, la cottura in questo dispositivo avviene in modo indiretto, grazie alla presenza di una camera di combustione separata dal piano dove vengono posizionati gli alimenti. Le sonde di temperatura, collegate direttamente al pannello di controllo digitale, monitorano costantemente la temperatura all'interno della camera di combustione (fino a 300/350°C) e si autoregolano automaticamente per garantire una distribuzione uniforme del calore ed evitare che gli alimenti si brucino o si secchino. Differenziandosi dai tradizionali barbecue a carbone, gli smoker a pellet sono progettati per garantire una cottura uniforme e controllata dei cibi, con la possibilità di regolare la temperatura e il flusso di fumo.

In estrema sintesi, stando a tutte le caratteristiche considerate positive o alle condizioni negative legate ai biocombustibili densificati che alimentano gli smoker a pellet risulta essenziale conoscere nel dettaglio le caratteristiche chimiche, fisiche, energetiche e tecniche che caratterizzano tali biocombustibili. Questa conoscenza è ancora più dirimente vista la carenza di studi in materia e l'attuale espansione del mercato dei pellet alimentari.

CAPITOLO 3

MATERIALI E METODI

3.1 Biocombustibili selezionati per la caratterizzazione

Dal punto di vista tecnico i biocombustibili selezionati nel presente lavoro di tesi sono 5. Tutti possono essere genericamente classificati come pellet di legno vergine o usato, termotrattato o semplicemente densificato. Tutti e cinque i pellet (da qui in poi Campioni) sono stati selezionati in relazione all'essenza legnosa dichiarata con l'obiettivo di rappresentare legni di specie arboree di interesse frutticolo, forestale e agroindustriale. Come già accennato nel paragrafo 2.1, Sebbene i campioni siano pellet apparentemente standard, i produttori non fanno minima menzione alla norma tecnica di riferimento UNI EN ISO 17225-2 in quanto il suddetto pellet non è destinato a dispositivi per la generazione di calore o acqua calda sanitaria (stufe, termostufe o caldaie) ma bensì è destinato al settore alimentare come combustibile da utilizzarsi in forni, griglie o affumicatori. In virtù di questo “destino” non è fatto obbligo al produttore di dichiarare alcunché rispetto alle caratteristiche del pellet e ciò appare strano vista l'attenzione sul tema della salubrità degli alimenti. Per i pellet alimentari (tra cui anche i campioni oggetto di studio) la biomassa utilizzata è rappresentata da materiale legnoso appartenente al gruppo delle latifoglie. Rispetto al pellet convenzionale che predilige le conifere (tranne poche eccezioni) visto il bassissimo contenuto in ceneri, per il pellet alimentare il target di maggiore interesse è dato dagli “aromi” che il fumo può trasferire all'alimento in cottura, per tale motivo vengono di solito escluse specie resinose poiché queste in cottura sviluppano fumo definito “amaro”. I campioni oggetto di analisi (con relativi codici identificativi) vengono elencati e descritti di seguito con il maggior dettaglio possibile.



Figura 3-1: sacco originale contenente il pellet da torrefazione (campione H5259)

Pellet alimentare costituito dalla torrefazione di legno di quercia spp.; la biomassa di partenza non è vergine ma bensì si tratta di legno usato, più precisamente legno di botti utilizzato per l'invecchiamento di Whiskey (Jack Daniel's Tennessee Whiskey Old n°7). La torrefazione è un pretrattamento termico condotto a temperature comprese tra 200°C e 300°C in atmosfera inerte. È costituita da quattro fasi:

- Pre-essiccazione: avviene a 100°C con rimozione dell'acqua superficiale presente sulla biomassa;
- Post-essiccazione: varia tra 100°C e 200°C ed è caratterizzata dall'eliminazione dell'umidità legata e di alcuni idrocarburi leggeri;

- Riscaldamento isothermico di torrefazione: inizia a 200°C e porta alla volatilizzazione e carbonizzazione dell'emicellulosa, alla volatilizzazione e depolimerizzazione della lignina e della cellulosa;
- Raffreddamento. [8]

Insieme alla densificazione, la torrefazione è un'importante tecnica moderna ed efficiente per valorizzare le biomasse, anche residuali. Questo trattamento ha effetti altamente positivi sulla biomassa in quanto migliora la resistenza all'attacco microbico, la densità energetica, l'accensione, l'efficienza della combustione, la macinabilità, l'idrofobicità, l'omogeneità, nonché i rapporti C/O e C/H. Secondo alcuni studi, infatti, il pretrattamento con la torrefazione potrebbe ridurre il contenuto di emicellulosa ed aumentare il contenuto di cellulosa e lignina. In particolare, in uno studio di torrefazione condotto da Zheng et al. nel 2012, l'emicellulosa è diminuita bruscamente al 7,60% a 250°C e non è più stata rilevabile intorno ai 300°C; la cellulosa ha iniziato a decomporsi a 280°C; la lignina si è dimostrata più stabile termicamente, con decomposizione termica verificatasi in un ampio intervallo di temperature. In considerazione di ciò, l'indagine sulle caratteristiche di base ha rivelato che il rapporto O/C è diminuito, la densità energetica è aumentata e il carbonio è fissato. Sulla base di queste situazioni, la densità e la resistenza dei pellet realizzati sono aumentate da 1,17 g/cm³ e 5,09 N/mm² a 1,25 g/cm³ e 15,12 N/mm², rispettivamente. Inoltre, l'eliminazione dell'emicellulosa idrofila ha prodotto pellet con una migliore resistenza all'acqua. Inoltre, l'indice di combustione completo è stato migliorato di oltre il 10%, indicando migliori prestazioni di combustione dopo il pretrattamento di torrefazione. [9]

Per il suddetto pellet preso in analisi non si conoscono né gli esatti parametri del processo di torrefazione né il processo stesso applicato. Il campione è stato scelto per rappresentare una biomassa potenzialmente disponibile in Europa e Italia ovvero quella del legno di latifoglia utilizzato per l'invecchiamento del vino. Ovviamente in questo caso soltanto il legno vergine di origine è simile mentre ogni altra caratteristica è peculiare.

H5260



Figura 3-2: sacco originale contenente il pellet di noce americano (campione H5260)

H5260: Pellet alimentare ottenuto da una miscela non precisamente nota di legno di noce (genere *Carya*) proveniente dal Nord America. Il prodotto è realizzato nell'azienda Pit Boss con sede a Phoenix, Arizona, USA.

H5261



Figura 3-3: sacco originale contenente pellet di melo (campione H5261)

H5261: Pellet alimentare costituito da una miscela di legno di quercia e legno di melo in percentuali non note. Il prodotto è realizzato presso la BBQ Delight ad Hutchinson, Kansas, USA. Non si hanno ulteriori informazioni riguardo la provenienza e la lavorazione del legno per la produzione del pellet.

H5262



Figura 3-4: sacco originale contenente pellet di ciliegio (campione H5262)

H5262: Pellet alimentare costituito da una miscela di legno di quercia e legno di ciliegio in percentuali non note. Il prodotto è realizzato presso la BBQ Delight ad Hutchinson, Kansas, USA. Non si hanno ulteriori informazioni riguardo la provenienza e la lavorazione del legno per la produzione del pellet.

H5263



Figura 3-5: sacco originale contenente pellet di noce europeo (campione H2563)

H5263: Pellet alimentare realizzato al 100% con legno di noce europeo. Il prodotto è realizzato a Torino e quindi è presumibile che una parte della biomassa sia di origine italiana.

3.2 Campionamento

Il materiale oggetto di studio, trattandosi di pellet, è stato acquisito in forma di sacchi da 9 o 10 kg direttamente dal mercato (in particolare da un distributore nazionale con sede operativa nella provincia di Torino). I singoli sacchi costituiscono a tutti gli effetti ognuno un campione sul quale verranno effettuate direttamente delle analisi o dal quale verranno derivati degli incrementi con masse inferiori per altre analisi. Le analisi condotte fanno riferimento alla norma tecnica ISO 17225 2021 che regola la qualità dei biocombustibili solidi, in particolare la parte 2 riguardante pellet di legno. Le analisi per ciascun campione sono state tutte svolte presso il Laboratorio Biomasse dell'università Politecnica delle Marche ed i risultati sono stati riportati all'interno di un report (file Excel avanzato) inserito nelle normali procedure di tracciabilità e controllo qualità del laboratorio stesso.

3.3 Parametri analitici

Sebbene i pellet oggetto di studio non siano assoggettati alla definizione di qualità secondo lo standard ISO 17225-2 sia perché lo stesso standard ha carattere volontario sia perché l'uso di tali pellet non è energetico, nel presente lavoro di tesi sono stati utilizzati sia limiti che parametri analitici indicati nella norma per caratterizzare i campioni e determinarne la qualità (in assenza di standard specifici). Secondo la norma tecnica devono essere determinate:

- Analisi sul tal quale: origine e sorgente del materiale, diametro e lunghezza, umidità, durabilità meccanica, particelle fini, massa volumica.
- Analisi su sostanza secca: ceneri, additivi, potere calorifico (superiore, inferiore e netto), azoto, zolfo, cloro, arsenico, cadmio, cromo, rame, piombo, mercurio, nichel, zinco e fusibilità delle ceneri.

A queste analisi se ne aggiungono altre a carattere puramente di ricerca relative all'acquisizione di spettri di assorbanza nel medio infrarosso.

3.3.1 Origine e sorgente del materiale

L'origine del materiale è un argomento di cui si hanno scarse informazioni e di cui si può ampliare il discorso nella discussione dei risultati ottenuti dalle analisi dei campioni in laboratorio. Nel caso del pellet torrefatto del campione H5259, trattandosi di un legno caratteristico, è ipotizzabile che la produzione del pellet venga fatta in una zona vicina agli stabilimenti di invecchiamento del whiskey e che il materiale sia costituito dalle botti in quercia utilizzate per l'invecchiamento ormai non

più produttive. Per le altre quattro categorie di pellet sono noti solamente i tipi di legno da cui sono formati ma non le esatte percentuali né tanto meno la provenienza. Sapendo dove sono situate le sedi produttive, è presumibile che il legno per realizzare questi pellet provenga da zone geografiche non lontane dalle stesse sedi. In particolare, per il pellet dei campioni H5260, H5261 e H5262 si ipotizza un utilizzo, rispettivamente, di legno di noce appartenente al genere *Carya*, di melo e di ciliegio dagli USA, mentre per il campione H5263 si ipotizza l'uso di noce europeo, tra cui italiano, essendo il pellet prodotto in Italia. Questa ipotesi deriva da una questione logistica e dal fatto che il produttore, ricevendo una biomassa legnosa che in partenza ha un valore economico presumibilmente basso e che è tipicamente concentrata in distretti produttivi (zone vocate alla coltivazione). Non si può stabilire con certezza se i legni di melo, ciliegio, noce pecan/*Carya* e noce europeo provengano da scarti di potatura o da impianti realizzati appositamente per ottenere biomassa vergine destinata alla produzione di pellet. In seguito, però, con i risultati ottenuti dalle analisi presso il Laboratorio di Biomasse sarà possibile formulare delle ipotesi in tal senso.

3.3.2 Diametro e lunghezza

Il materiale già stoccato è stato a me consegnato in 10 vaschette di alluminio (2 per ciascuna delle 5 categorie di pellet) contenente dei mucchi consistenti di pellet di varie dimensioni. L'analisi segue la norma tecnica ISO 17829:2015 e consiste nel misurare attraverso un calibro (indifferentemente analogico o digitale) il diametro di almeno 10 pellet e la lunghezza di almeno 50 pellet al fine di determinare valori medi e di deviazione standard dei due parametri. Dal punto di vista tecnico l'analisi prevede di prelevare con assoluta casualità una aliquota di pellet tal quali direttamente dal sacco (precisamente 50 per ciascuna categoria di materiale) e misurando in maniera altrettanto casuale diametro e lunghezza progressivamente fino a raggiungere il numero di misurazioni sufficienti. Per tali parametri la norma di riferimento stabilisce, per il pellet domestico, due classi valide per tutti e tre i livelli qualitativi (pellet classe A1, A2 e B) ovvero D06 e D08 ovvero pellet con diametro di 6 millimetri o 8 millimetri rientrano in tali categorie pellet con una misura rispettivamente di 6 ± 1 mm e 8 ± 1 mm. Per il pellet industriale (classi qualitative I1, I2 e I3) ai suddetti parametri si aggiungono il D10 (10 ± 1 mm per la classe I2 e I3) e il pellet D12 (12 ± 1 mm per la sola classe I3). Per quanto riguarda la lunghezza il parametro presenta un range ammissibile per tutte le classi compreso tra 3.15 e 40 mm se il valore medio rientra in questo range il pellet è potenzialmente conforme a tutte le classi (domestiche o industriali).

3.3.3 Umidità

La determinazione del contenuto di umidità si basa sullo standard ISO 18134-2:2015 che permette di misurare la quantità di acqua libera presente all'interno di una biomassa. L'analisi, nel caso specifico avviene per via gravimetrica esponendo il campione in stufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 2$ della marca INSTRUMENTS s.r.l. modelli 250/400-VF. A livello operativo si utilizza, in duplicato, un vassoio di alluminio di peso noto, all'interno del quale viene inserito un quantitativo di campione non inferiore ai 300g. Il vassoio ed il campione vengono quindi pesati (peso lordo) e posti in stufa a 105°C fino a costanza di peso, in genere per 24 ore. Al termine di questo intervallo di tempo il vassoio contenente il materiale essiccato viene estratto facendo attenzione a non far cadere nulla, e ne viene misurato nuovamente il peso. Una volta raccolti i dati per la determinazione del contenuto di umidità viene utilizzata la formula riportata in normativa:

$$M = ((m_2 - m_3) / (m_2 - m_1)) * 100$$

Dove: m_1 = massa del vassoio vuoto;

m_2 = massa del campione e del vassoio prima dell'ingresso in stufa;

m_3 = massa del vassoio e del campione dopo 24 ore essiccato

dal punto di vista della normativa tecnica l'umidità massima ammissibile per tutte le classi qualitative (per pellet domestico o industriale indifferentemente) è del 10% su tal quale.



Figura 3-6: Stufa utilizzata per la determinazione del contenuto di umidità

3.3.4 Particelle fini e durabilità meccanica

L'analisi delle particelle fini viene effettuata non su un campione ma sull'intero sacco di pellet. Il sacco è inizialmente pesato, dopodiché vengono prelevate delle aliquote di pellet ed inserite su un setaccio che è fatto ruotare con movimenti circolari (solitamente 5 per ciascun verso) delicati per setacciare le frazioni di materiale inferiori a 3,15 mm senza creare ulteriori particelle. Alla fine della procedura viene pesata la quantità di materiale al di sotto del setaccio.



Figura 3-7: Setaccio per la determinazione delle particelle fini

L'analisi della durabilità meccanica simula la movimentazione nel trasporto del materiale e viene effettuata su un dispositivo a trasmissione a vite continua che fa ruotare contemporaneamente due assi, a cui sono collegati due contenitori per inserire il materiale. All'interno dei due contenitori vengono inseriti 0,5 kg circa di pellet precedentemente setacciato. Nell'analisi il dispositivo avvia una lenta e continua rotazione (non centrifugazione) del pellet simulante urti su superfici rigide e tra pellet e pellet. Terminata l'analisi viene estratto il materiale, nuovamente setacciato e si pesa ciò che resta sopra al vaglio di 3,15 mm; la differenza con la massa iniziale espressa in percentuale indica la durabilità meccanica del materiale.



Figura 3-8: Macchinario per l'analisi della durabilità meccanica

3.3.5 Massa volumica

Questo parametro viene misurato su un contenitore metallico utilizzato come tara dal volume di 5 litri. Il contenitore viene riempito con materiale versato direttamente dal sacco ad una distanza di 20 cm dal bordo del contenitore; dopodiché viene lasciato cadere il contenitore metallico per 3 volte da un'altezza di 20 cm al fine di omogenizzare la distribuzione del pellet. Nel caso in cui sono presenti dei buchi sulla superficie viene inserito altro pellet dal secco ed infine livellato il contenitore con una bacchetta in legno. A questo punto viene pesato il contenuto di pellet nel contenitore e calcolata la massa volumica. La normativa prevede un valore di massa volumica $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ e $\leq 750 \text{ kg/m}^3$

3.3.6 Stabilizzazione ed omogenizzazione e preparazione del sotto-campione per le analisi chimico-fisiche

Per la determinazione dei parametri presi in considerazione nei paragrafi seguenti è necessario prelevare un'aliquota del campione originario, sottoponendo il materiale in esame a stabilizzazione ed omogenizzazione.

Parallelamente all'analisi del contenuto di umidità per la maggior parte delle biomasse viene prodotto un terzo vassoio con circa 400g di materiale che viene posto in stufa termoventilata a 40°C per otto ore. Con stabilizzazione si intende una riduzione di umidità fino a valori inferiori al 20% ma non nulli; questa fase è essenziale per materiali molto umidi per permettere la successiva operazione di

omogenizzazione. Nel seguente caso il pellet di legno per sua specifica natura (umidità < 10%) non ha bisogno di questa operazione. Successivamente alla stabilizzazione o, nel caso del pellet e dei densificati, parallelamente all'analisi dell'umidità una parte del campione deve essere preparato per le successive analisi. L'operazione di omogenizzazione ha un duplice scopo; il primo è quello di uniformare le caratteristiche del materiale rendendo meno probabile l'errore di segregazione dovuto alla riduzione del campione che si viene a verificare su ogni analisi chimica, energetica o fisica su materiale stabilizzato; il secondo è quello di ridurre la granulometria (fino ad un massimo di 1 mm) per rendere il campione analizzabile da diversi dispositivi (come calorimetri, analizzatori elementari, analizzatori termogravimetrici etc. L'omogenizzazione avviene utilizzando circa 400-500g di campione stabilizzato macinandolo attraverso mulini a denti e battenti in materiale metallico senza rilascio di elementi. La macinazione prevede di ridurre il campione prima ad una granulometria inferiore a 5 mm e successivamente inferiore a 1 mm. Il materiale omogenizzato viene quindi successivamente campionato in maniera casuale fino a riempire una provetta Falcon® da 50 ml (equivalenti a circa 15g di campione macinato a 1 mm) su questo materiale verranno poi effettuate tutte le successive analisi ad eccezione di quelle condotte su materiale tal quale (esempio durabilità meccanica, particelle fini e massa volumica).



Figura 3-9: Mulino per macinazione pellet

3.3.7 Contenuto in ceneri

L'analisi segue la norma ISO 18122:2015 la quale definisce procedure e dispositivi per la determinazione del contenuto in ceneri delle biomasse/biocombustibili. Per ceneri si intendono i residui

solidi (ossidi di vario genere) che risultano dal processo di combustione controllata. In termini tecnici l'analisi determina il valore espresso in percentuale su sostanza secca del residuo della combustione a 550°C di una massa nota di materiale combustibile. L'analisi viene comunemente svolta utilizzando delle muffole, dei crogioli in ceramica, bilance di precisione ed essiccatori. L'analisi è del tutto analoga a quella dell'umidità ovvero si devono determinare le masse del crogiolo (tara) del crogiolo e del campione prima dell'incenerimento e dopo l'incenerimento a 550°C con uno step a 250°C per favorire l'allontanamento dei composti volatili e prevenire quindi l'incendiamento. Il campione incenerito caldo va conservato in essiccatore prima della pesata finale per prevenire l'effetto igroscopico delle ceneri e evitare errori di pesata dovuti alle elevate temperature.

La formula per il calcolo è identica a quella per il calcolo dell'umidità

$$A=((m_2-m_3)/(m_2-m_1))*100$$

Dove:

m1= massa del crogiolo vuoto;

m2= massa del campione e del crogiolo prima dell'ingresso in muffola;

m3= massa del crogiolo e del campione incenerito

Dal punto di vista operativo l'analisi delle ceneri (e anche l'umidità) è il primo vero collo di bottiglia nel processo analitico viste le lunghe tempistiche circa (1,5 giorni), quindi si tende ad applicare procedure che non sono perfettamente in linea con la norma ma sono riconosciute valide a livello internazionale e applicate in quanto riescono a gestire più campioni contemporaneamente. Nel dettaglio l'analisi applicata nel presente caso è un'analisi termogravimetrica (TGA) utilizzando un analizzatore termogravimetrico della LECO modello TGA701. Lo strumento è di fatto una muffola con bilancia di precisione integrata che, attraverso un carosello rotante, riesce ad analizzare contemporaneamente 19 campioni (9 campioni con analisi in duplicato) il carosello è dotato di 20 crogioli dei quali 18 sono dedicati alle biomasse da analizzare, 1 alloggia uno standard per umidità di correzione e ceneri e 1 viene lasciato vuoto per definire le fluttuazioni nelle misure di peso dovute all'ambiente riscaldato. Ogni crogiolo può ospitare circa 1,2 grammi di biomassa omogenizzata a 1 mm. L'analisi può essere programmata sia come temperature che come rampe di incremento della stessa; ogni campione viene pesato ripetutamente impiegando circa 5-10 secondi. Nel caso specifico l'analisi è stata condotta utilizzando una rampa di incremento della temperatura costante di 7 °C/min e considerando tre step di temperatura:

- 105°C: step per la determinazione dell'umidità di correzione ovvero del residuo di umidità del campione stabilizzato in stufa a 40°C che viene normalmente impiegato per le analisi chimiche,

energetiche e fisiche su campione non tal quale. Lo step è completo quando i campioni mostrano costanza di peso (con variazione entro il 10% dell'ultima pesata).

- 250°C: step per allontanamento della componente volatile della sostanza organica. Questa fase ha lo stesso scopo della procedura standard ovvero prevenire fenomeni di combustione violenta che proietterebbero materiale fuori dal crogiolo falsando così l'analisi. Lo step termina dopo 1 ora al raggiungimento della temperatura impostata.
- 550°C: step finale di incenerimento nel quale tutta la sostanza organica residua viene ossidata l'analisi determina il quantitativo di sostanza inorganica (ceneri). Lo step si considera completato al raggiungimento della costanza di peso come nel caso dell'analisi dell'umidità di correzione.

Dal punto di vista normativo, rispetto al contenuto in ceneri, lo standard ISO 17225-2 identifica per il pellet domestico in classe A1 un limite di ceneri dello 0.7% su sostanza secca, per la classe A2 1.2%, mentre per la classe B 2%; per il pellet industriale invece i limiti sono 1%, 1.5% e 3% rispettivamente per le classi I1, I2 e I3.

3.3.8 Analisi del contenuto in carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno

La determinazione del contenuto di carbonio, idrogeno e azoto all'interno dei biocombustibili fornisce indicazioni sulla qualità energetica del materiale. Dai risultati ottenuti si possono trarre delle indicazioni utili circa l'attitudine di un biocombustibile alla combustione, ma ci consente di calcolare il PCI (a partire dal contenuto di idrogeno e ossigeno) e fare delle valutazioni in merito alle emissioni inquinanti (NOx). L'analisi è stata svolta con un analizzatore elementare marca Leco caratterizzato dalla presenza di tre colonne. Il campione (4,5-3,5 mg) viene bruciato all'interno della prima colonna definita di combustione (ossidazione) caratterizzata dalla presenza di ossigeno e alla temperatura di 925°C, formando dei gas ossidati come CO₂, H e NOx. Questi composti vengono successivamente fatti passare all'interno di una seconda colonna per la determinazione del carbonio e dell'idrogeno, dove è presente una fase stazionaria in grado di adsorbire le molecole di CO₂ e H al loro passaggio, le quali saranno poi rilasciate con tempi diversi, in modo che proseguano la loro corsa verso il detector a termo-conducibilità permettendone così la rilevazione quantitativa. L'ultima colonna (di riduzione) alla temperatura di 640°C, è necessaria per ridurre gli NOx a N₂, e permettere l'analisi dell'azoto.



Figura 3-10: Analizzatore elementare con modulo per analisi zolfo (a destra)

3.3.9 Analisi del potere calorifico superiore PCS

La misura del potere calorifico si basa sulla determinazione dell'energia liberatasi dalla combustione completa di un combustibile, in presenza di elevata concentrazione di ossigeno. È possibile risalire all'energia liberata espressa in Joule/grammo, mediante la misura dell'incremento di temperatura di una massa nota di acqua a temperatura definita. L'analisi viene effettuata utilizzando un calorimetro C2000 Basic IKA. A livello operativo si possono distinguere una prima fase in cui vengono introdotti in cicli differenziati un campione di biodiesel (per la pulizia della bomba calorimetrica) ed una o più pastiglie di acido benzoico di potere calorifico noto (standard analitico). Nel caso in cui lo strumento fornisca un risultato diverso rispetto a quello atteso per la pastiglia di acido benzoico ($24460 \pm 100 \text{ J/g}$) si dovrà procedere alla ricalibrazione dello strumento utilizzando nuovamente una pastiglia di acido benzoico. Nella seconda fase il campione viene pesato (circa 0,7g), pressato al fine di ottenere una pasticca di materiale compatto, e posizionato all'interno del crogiuolo della bomba di Mahler. In seguito, viene preparato l'innesco rappresentato da un filo di cotone a potere calorifico noto (viene sottratto direttamente dal software dello strumento) legato ad un archetto di tungsteno (trasmette scarica elettrica), facendo ben attenzione che le estremità libere del filo siano all'interno del crogiuolo e ben a contatto con il campione. Una volta preparato l'innesco, la bomba calorimetrica viene posta all'interno di un quantitativo di acqua noto alla temperatura di 18°C . Lo strumento è in grado per mezzo di un termometro di rilevare la variazione di temperatura (Temperatura Finale-Temperatura iniziale) generatasi a seguito del calore liberato durante il processo di combustione e trasmesso all'acqua circostante. È bene evidenziare che la bomba calorimetrica è un contenitore chiuso con volume costante dove tutta l'acqua prodotta durante la combustione ricondensa cedendo la stessa quantità di calore sottratto per evaporare. Nella realtà impiantistica la combustione avviene invece a pressione costante

(atmosferica) e il vapore non può essere trattenuto con conseguente sottrazione di calore al processo. Il risultato ottenuto (J/g di s.s.) rappresenta in realtà la misura dell'energia totale contenuta dal combustibile, dunque il valore del PCS. Dal PCS per sottrazione del calore latente di condensazione è possibile ricavare il PCI. Da quest'ultimo, tenendo in considerazione il contenuto di umidità della biomassa tal quale, è possibile risalire al PCN.

3.3.10 Analisi del contenuto totale di Zolfo e Cloro

La conoscenza del contenuto in Cl e S delle biomasse impiegate nella produzione di energia termica ci consente di valutare sia le emissioni inquinanti, sia prestazioni in impianto. La determinazione del contenuto di Cl e S prevede nella fase preliminare la bruciatura del campione nella bomba di Mahler, all'interno della quale si forma una soluzione che viene recuperata con una provetta. Anche l'acqua ultra-pura impiegata per il lavaggio della bomba deve essere introdotta all'interno della provetta, la quale viene poi portata a volume noto sempre mediante acqua ultra-pura. La soluzione è stata poi filtrata e analizzata grazie ad un cromatografo ionico dotato di auto-campionatore. I risultati ottenuti in mg/L sono stati trasformati in valore percentuale su sostanza secca.



Figura 3-11: Cromatografo ionico e autocampionatore

3.3.11 Fusibilità delle ceneri

La conoscenza del comportamento termico ad elevate temperature delle ceneri permette di studiare le prestazioni del biocombustibile all'interno dell'impianto impiegato. L'analisi viene svolta per mezzo di una muffola con fotocamera (Sylab IRF 1600F) collegata ad un computer, che permettono la

determinazione di quattro temperature caratteristiche mediante la registrazione fotografica automatica delle variazioni di forma di un provino di cenere sottoposto ad un gradiente di temperatura crescente. Le temperature individuate sono:

- Temperatura di contrazione (diminuzione del volume senza modifiche della forma del provino);
- Temperatura di deformazione (il provino subisce un arrotondamento degli angoli superiori);
- Temperatura emisferica (il provino assume una forma emisferica);
- Temperatura di fusione (completa fluidificazione del provino).

A livello operativo è necessario preparare un provino cilindrico a partire dalla cenere ottenuta trattando il campione macinato in muffola. La cenere viene poi schiacciata con un mortaio in modo da renderla uniforme, ed aggiungendo alcol etilico è possibile ottenere un composto che potrà essere posto in un apposito stampo per la formazione del provino di forma cilindrica. Il campione o eventualmente i campioni da processare possono essere inseriti così all'interno della muffola e dopo aver posizionato correttamente la telecamera in modo che metta a fuoco il campione è possibile avviare l'analisi.

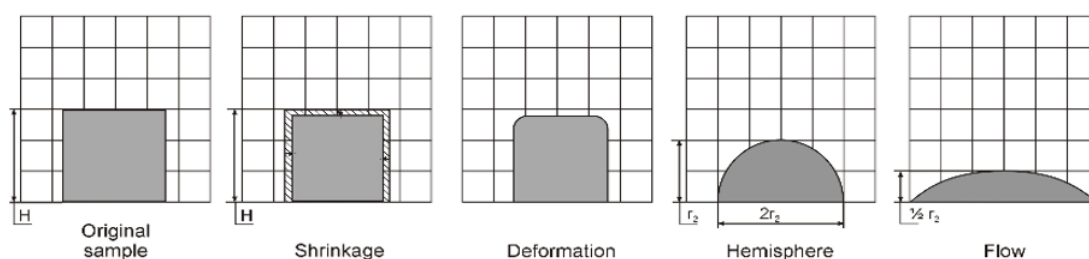


Figura 3-12: Rappresentazione grafica delle variazioni di forma di un provino di cenere sottoposto a gradiente termico da sx campione originale, contrazione, deformazione, emisferica e fusione

3.3.12 Analisi TGA-DTA

L'analisi termogravimetrica-differenziale (TGA-DTA) è un metodo impiegato per esaminare le variazioni di massa e temperatura di un campione in relazione al tempo e alla temperatura. Questo approccio unisce due tecniche di analisi termica: la TGA e la DTA. Durante l'analisi termogravimetrica (TGA) il campione viene gradualmente riscaldato in un ambiente controllato, mentre la sua massa viene costantemente misurata. Durante il processo di riscaldamento, il campione manifesta fluttuazioni di massa dovute a fenomeni come la perdita di umidità, la decomposizione termica, l'ossidazione o altre reazioni chimiche. Queste variazioni sono registrate sotto forma di curve termogravimetriche.

Durante l'analisi Termica Differenziale (DTA) sia il campione che un materiale di riferimento (noto anche come materiale inerte) vengono entrambi riscaldati alla stessa velocità, mentre le temperature dei due vengono misurate simultaneamente. La differenza di temperatura tra il campione e il materiale di riferimento viene annotata come una curva differenziale della temperatura rispetto alla temperatura.

Durante l'analisi combinata TGA-DTA, di solito i risultati delle due tecniche vengono rappresentati su grafici separati, ma è anche possibile sovrapporli per ottenere una visione più dettagliata della trasformazione termica del campione. Ad esempio, si può collegare la variazione di peso rilevata dalla TGA ai picchi di temperatura o energia rilevati dalla DTA per individuare le reazioni termiche che avvengono durante il riscaldamento del campione. L'analisi del contenuto di sostanze volatili viene effettuata mediante un analizzatore termo-gravimetrico (LecoTGA 701) trattando il campione in muffola a 900°C in atmosfera di azoto, e consente di determinare la frazione del combustibile che brucia in forma gassosa. Una volta pesato il campione precedentemente macinato (circa 1-1,2g), viene posto all'interno di un crogiuolo pulito per poi avviare l'analisi. A termine di questa il risultato è espresso in percentuale su sostanza secca.



Figura 3-13: Macchinario Leco per analisi TGA-DTA

CAPITOLO 4

RISULTATI E DISCUSSIONE

Questo lavoro di tesi si concentra sulla caratterizzazione chimica, fisica ed energetica dei campioni di food pellet analizzati al fine di valutarne le caratteristiche per l'impiego negli smoker e barbecue per il suo scopo finale, ossia la preparazione di pietanze. Seppure non esista una specifica normativa di riferimento per il food pellet, i risultati ottenuti sono stati confrontati con gli standard della normativa ENI ISO 17225-2:2021, riguardante il pellet ad uso domestico al fine di analizzare i parametri, valutarne la conformità ed eventualmente esporre soluzioni tecnologiche volte a garantire il miglioramento della qualità del materiale, oppure a esporre in maniera critica l'applicazione dello standard tecnico per il pellet legnoso di qualità ai Food pellet. Di seguito sono riportati in tabelle i valori delle analisi dei parametri descritte nel capitolo materiali e metodi.

Diametro e Lunghezza

Le due tabelle 4.1 e 4.2 riportano separatamente i valori medi e deviazione standard di incrementi conformi alla norma dei campioni analizzati per diametro e lunghezza rispettivamente.

Tabella 4-1: Valori medi diametro dei campioni analizzati e corrispondente classe normativa

Campione	Diametro (mm)	Deviazione Standard	Classe
H5259	6,41	0,13	A1
H5260	6,62	0,06	A1
H5261	6,46	0,05	A1
H5262	6,42	0,09	A1
H5263	6,26	0,19	A1

Tabella 4-2: Valori medi lunghezza dei campioni analizzati e corrispondente classe normativa

Campione	Lunghezza (mm)	Deviazione Standard	Classe
H5259	17,19	6,74	A1
H5260	18,22	6,67	A1
H5261	19,61	7,35	A1
H5262	17,68	5,73	A1
H5263	18,75	8,83	A1

Osservando la tabella 4.1 è possibile notare che i campioni rientrano nella classe D06 per il diametro, ossia pellet con misura 6 ± 1 mm, mentre nella tabella 4.2 si può osservare che tutti i campioni hanno una lunghezza tra 3,15 e 40 mm; i valori di entrambi i parametri, diametro e lunghezza, rientrano in quelli elencati nella normativa tecnica 17829:2015 la quale definisce lo standard all'interno della UNI EN ISO 17225-2 per la determinazione di questi parametri dimensionali. La scelta, da parte del produttore, di un diametro di 6 mm piuttosto che di 8 mm può essere riconducibile ad una logistica più facile del biocombustibile ed al fatto che i dispositivi per un pellet di diametro maggiore hanno bisogno di adattamenti specifici (numerose componenti vanno ingrandite). Poiché i barbecue sono sistemi ideati per utilizzare pellet da 6 mm di diametro, alimentarli con pellet da 8 mm potrebbe generare una combustione disomogenea ed incompleta ed anche malfunzionamenti dei sistemi di alimentazione. Inoltre, i barbecue a pellet essendo “varianti” delle normali stufe a pellet impiegano probabilmente componenti commerciali per le stufe standard di tipo domestico e quindi sono vincolati a tali soluzioni ingegneristiche. Il pellet dei campioni H5261 e H5262 è realizzato dallo stesso produttore (BBQ Delight) mentre gli altri tre da produttori diversi; si può comunque osservare come i valori di lunghezza media dei pellet siano tutti compresi tra 17 mm e 20 mm. Per avere una maggiore validità statistica andrebbero analizzati molti più campioni, provenienti da più produttori, ma questa uniformità dei valori di lunghezza è probabilmente dettata dal fatto che questi pellet vengono utilizzati su dispositivi con caratteristiche simili.

Umidità

In tabella 4.3 sono riportati i risultati medi di caratterizzazione dell'umidità dei campioni analizzati.

Tabella 4-3: Valori di umidità espressi in percentuale dei campioni analizzati

Campione	Umidità (% sul tal quale)	Classe
H5259	4,4	A1
H5260	5,0	A1
H5261	3,9	A1
H5262	5,2	A1
H5263	6,6	A1

In base ai rapporti analitici si nota che l'umidità dei campioni è inferiore al valore limite del 10%, misurato secondo la norma ISO 18134-2:2015. In particolare, i valori riportati nella tabella 4.3 evidenziano un largo margine di differenza dal limite normativo del 10%, con il valore più alto registrato del 6.6% per il campione H5263 (esclusivamente legno di noce); leggermente inferiori ma comunque intermedi sono i valori dei campioni H5260 (legno noce americano) e H5262 (legno di quercia e ciliegio).

Per quanto riguarda il campione H5259 è prevedibile riscontrare un valore basso come 4,4% poiché il pellet in questione è realizzato a partire da legno torrefatto: come già descritto nell'elenco dei biocombustibili, il processo di torrefazione permette al materiale di diventare idrofobico, motivo per cui si ha un valore di umidità così basso. Nel caso del campione H5261, pur essendo positivo, appare strano un valore di umidità del 3,9%, molto al di sotto della normalità. Il pellet in questione è una miscela di legno di quercia e di melo in percentuali non note. Non avendo informazioni riguardo la biomassa di origine, si può ipotizzare che un valore di umidità così basso sia dovuto al processo che ha subito il materiale prima o durante la pellettizzazione.

Particelle fini e Durabilità meccanica

In tabella 4.4 sono elencati i risultati, espressi in percentuale su prodotto tal quale, per i parametri tecnici di durabilità meccanica e particelle fini. Parametri essenziali per i pellet ed in particolare per i pellet ad uso alimentare.

Tabella 4-4: Valori di particelle fini e durabilità meccanica espressi in percentuale dei campioni analizzati

Campione	Particelle fini (% sul tal quale)	Durabilità meccanica (% sul tal quale)	Classe
H5259	0,5	99	A1
H5260	0,1	99,1	A1
H5261	0,4	98,1	A1
H5262	0,2	98,8	A1
H5263	0,3	98,0	A1

Mettendo a confronto i valori nella tabella 4.4 con la normativa tecnica, si osserva che tutti i tipi di pellet rientrano nella classe A1 anche per l'analisi sulle particelle fini $\leq 1\%$ e sulla durabilità meccanica $\geq 97,5\%$. Soprattutto per la durabilità meccanica è preferibile ed indicato avere valori così elevati come nei campioni analizzati in quanto la maggior parte dei food pellet provengono dagli USA e vengono quindi molto sollecitati nei lunghi trasporti per arrivare in Europa; essendo dei prodotti ad elevato costo, è quasi indispensabile che la loro condizione nei sacchi al momento dell'acquisto del consumatore sia pressoché identica a quella al termine della produzione. Inoltre, un altro fattore per cui è richiesto il più alto valore possibile di durabilità meccanica, è che questo tipo di pellet, avendo un utilizzo in termini di tempo e quantità notevolmente inferiori rispetto al pellet ad uso domestico da riscaldamento, può andare incontro a periodi di stoccaggio molto lunghi che potrebbero affliggere negativamente tali caratteristiche. Valori elevati di durabilità e bassi di particelle fini (inferiori a 3,15 mm) sono indice di

un buon processo di densificazione che con ogni probabilità è di tipo industriale simile a quello impiegato per il pellet ad uso energetico.

Massa Volumica

In tabella 4.5 sono evidenziati i valori di massa volumica, espressi come kg/m³ del pellet analizzato.

Tabella 4-5: Valori di massa volumica dei campioni analizzati

Campione	Massa Volumica (kg/m³)	Classe
H5259	678,8	A1
H5260	661,1	A1
H5261	676,6	A1
H5262	664,9	A1
H5263	566,5	-

Nell'analisi della massa volumica si può osservare nella tabella 4.5 che i primi quattro campioni, ossia H5259, H5260, H5261, H5262 rientrano nella normativa tecnica con valori nettamente superiori a 600 kg/m³ (limite minimo di norma), mentre il campione H5263 ha un valore più basso di quello limite richiesto nella norma. La massa volumica è un parametro correlato a più fattori: le dimensioni del pellet, l'umidità in esso contenuta, le caratteristiche della biomassa e il processo produttivo per la densificazione del pellet. In base a quanto riportato nelle tabelle 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 i valori di lunghezza, diametro ed umidità sono omogenei e differiscono per variazioni minime. I differenti risultati per la massa volumica ed in particolare il valore eccessivamente basso del campione H5263 potrebbero essere dovuti alle biomasse utilizzate, di cui non conosciamo le caratteristiche e le percentuali di legno utilizzato, ed al processo produttivo, di cui non si hanno altresì informazioni (esempio di parametri sono la pressione utilizzata ed il tipo di trafilatura orizzontale o verticale). Anche ammettendo una certa variabilità nell'analisi del parametro, il campione H5263 è costituito da solo legno di noce con elementi piuttosto grossolani mentre tutti gli altri hanno una certa percentuale di legni molto densi come la quercia e sembrano essere costituiti da segature o trucioli a granulometria fine. La minore densità del legno di noce rispetto alla quercia e la maggiore granulometria degli elementi densificati potrebbero in parte giustificare le differenze rilevanti nella massa volumica.

Contenuto in ceneri

In tabella 4.6 sono riportati i parametri di ceneri analizzati per i pellet con rispettivo confronto rispetto alla classe da norma UNI EN ISO 17225-2.

Tabella 4-6: Valori di contenuto in ceneri dei campioni analizzati

Campione	Ceneri	Classe
H5259	0,82	A2
H5260	1,12	A2
H5261	1,25	B
H5262	0,67	A1
H5263	2,39	-

Il parametro delle ceneri riporta, come visibile in tabella 4.6, variazioni notevoli nei campioni: H5259 e H5260, con rispettivamente 0,82% e 1,12%, rientrano nella classe A2 essendo $\leq 1,2\%$; H5261 con 1,25% rientra nella classe B, costituita dai pellet con ceneri $> 1,2\%$ e $\leq 2,0\%$; H5262 ha un contenuto di ceneri 0,67% e rientra nella classe A1 per pellet con ceneri $\leq 0,7\%$; infine H5263 supera il limite massimo 2,0% per cui non rientra nella normativa tecnica per questo parametro. La differenza dei valori di cenere delle cinque tipologie di pellet si può ricondurre alla biomassa di origine. Il legno vergine utilizzato per produrre questi food pellet è di latifoglie, piante tendenzialmente con un contenuto in cenere più alto delle conifere, tanto che queste ultime sono preferite per la realizzazione di pellet ad uso domestico; in particolare, quando è scortecciato il legno di latifolia può vedere abbassato notevolmente il suo contenuto in ceneri. Osservando i valori del campione H5262, che ha il contenuto in ceneri più basso, si potrebbe ipotizzare che il pellet, realizzato con una miscela non nota di ciliegio e quercia, sia formato esclusivamente da legno scortecciato e che questo legno non sia ricavato da residui di potatura ma da interi tronchi di alberi oppure che il cippato sia stato setacciato prima della densificazione. A seguito di ciò si potrebbe pensare che il legno per realizzare questo pellet deriva da una coltivazione destinata a questo preciso indirizzo o direttamente da legno vergine estratto dalle foreste. Pur avendo valori più alti lo stesso discorso può essere fatto anche per il pellet dei campioni H5260 e H5261 che quindi si presuppone provengano da legno scortecciato di latifolia di grosso diametro. Un'altra considerazione possibile riguarda il fatto che i costituenti principali delle ceneri sono i metalli e gli ossidi relativi ai principali elementi, come fosforo, potassio, ecc.; se si riscontrasse un valore basso di metalli (analisi dettagliata in seguito) anche il contenuto di ceneri sarà più basso. È possibili, quindi, ipotizzare che il legno di partenza per realizzare il pellet non è un legno usato né tantomeno un legno residuale da attività agricola/frutticola; se così fosse la probabilità di un contenuto più alto di metalli dovuto ad applicazione di trattamenti fitosanitari in campo sarebbe più alta. Un discorso a parte deve essere dedicato al campione H5259 il quale, essendo costituito da legno torrefatto proveniente da botti di invecchiamento di Whiskey americano, dovrebbe mostrare un tenore in ceneri più alto di quello riscontrato. Questa affermazione deriva dall'effetto di concentrazione della componente inorganica del legno nei processi di trattamento termico, i quali degradando la componente organica più volatile tendono ad incrementare la percentuale di ceneri (che a livello assoluto è invariata). Valori di ceneri

basse del torrefatto indicano valori ancora più bassi della biomassa grezza che, nel caso del legno di botte, potrebbe essere giustificato da un effetto di lisciviazione/estrazione della componente inorganica da parte del liquido alcolico contenuto.

Contenuto Carbonio, Idrogeno, Azoto e Ossigeno

In tabella 4.7 si riportano i valori di caratterizzazione tramite analisi elementare di carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno (quest'ultimo determinato per differenza) al netto delle ceneri.

Tabella 4-7: Risultati dell'analisi elementare dei pellet oggetto di studio

Campione	C (%ss)	H (%ss)	N (%ss)	O (%ss)
H5259	50.3	4.7	<0.1	44.3
H5260	48.9	5.8	<0.1	44.3
H5261	48.3	5.6	<0.1	44.9
H5262	48.7	6.0	<0.1	44.8
H5263	49.3	5.5	<0.1	42.7

Le analisi di composizione elementare riportate in tabella 4.7 mostrano alcuni tipici fenomeni riconducibili ai processi produttivi per alcuni dei campioni analizzati. Ad esempio, il campione H5259 mostra un contenuto di carbonio relativamente elevato ed un contenuto di idrogeno più basso degli altri campioni il che risulta in linea con il processo di torrefazione a cui è stata sottoposta la biomassa di origine. Di tutti gli altri campioni soltanto il campione H5263 (legno di noce) risulta avere un tenore in carbonio leggermente più elevato, probabilmente per un maggior livello di lignificazione della biomassa. Per quanto concerne l'azoto i valori sono tutti al di sotto della soglia di rilevabilità, questo supporta in maniera forte l'ipotesi che il legno utilizzato come materia prima sia vergine, maturo e non trattato (almeno non trattato con colle).

Potere Calorifico

In tabella 4.8 sono riportati i valori di contenuto energetico per i pellet analizzati.

Tabella 4-8: Valori di Potere calorifico superiore, Potere calorifico inferiore e Potere calorifico netto

Campione	Potere Calorifico Superiore (kJ/kg _{ss})	Potere Calorifico Inferiore (kWh/kg _{ss})	Potere Calorifico Netto (kWh/kg _{td})	Classe
H5259	18.916	17.885	16.992	A1
H5260	17.982	16.665	15.709	-
H5261	19.109	17.876	17.074	A1
H5262	19.736	18.435	17.358	A1
H5263	18.646	17.446	16.133	-

La normativa tecnica ISO 18125 fa riferimento al Net Calorific Value, ossia il Potere Calorifico Netto (PCN) o Inferiore (PCItq) espresso su prodotto tal quale, mentre i valori riportati in tabella si riferiscono anche al Potere Calorifico Superiore (PCS) e al PCI espresso su sostanza secca. La differenza riguarda il fatto che il PCS tiene conto anche del calore latente di condensazione dell'acqua generata durante la combustione e non sottrae il calore latente di evaporazione dell'umidità, mentre il PCItq o il PCN considerano l'energia generata dall'ossidazione completa di un combustibile, escludendo l'energia rilasciata/restituita dall'acqua di combustione (nel processo di condensazione) e il calore latente di evaporazione dell'umidità contenuta. La % di umidità dei campioni in oggetto, come riportato nella tabella 4.3, è molto bassa ed è prevedibile una differenza di valori tra PCS e PCItq/PCN piuttosto limitata.

Considerando i valori sul Potere Calorifico Superiore, è possibile dire che tutti i pellet hanno un discreto potere calorifico in quanto ampiamente oltre i 17.000 kJ/kg. Tuttavia, per il PCN i campioni H5260 e H5263 non superano la soglia di 16.5 MJ/kg imposta dalla norma tecnica e non possono quindi essere classificati come Pellet secondo norma. Il campione H5259 ha un valore di potere calorifico praticamente identico a quelli di H5261 e H5262. Trattandosi di un pellet originato da legno termotrattato, sarebbe stato prevedibile un valore più alto dal momento che lo scopo della torrefazione è aumentare la densità energetica del materiale. Essendo il pellet un biocombustibile solido con una certa quantità di umidità sarebbe sempre opportuno riferirsi al PCN il quale da tabella mostra un andamento pressoché identico a quello del PCS (l'umidità è molto simile tra i vari campioni).

Contenuto Metalli

In tabella 4.9 si riportano i risultati di caratterizzazione per il contenuto in metalli ed elementi maggiori espressi come mg/kg di campione secco.

Tabella 4-9: Valori dei metalli contenuti nei campioni analizzati

Metalli (mg/kg)	H5259	H5260	H5261	H5262	H5263	Valori limite normativa (mg/kg)
Arsenico	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9	≤ 1
Cadmio	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	≤ 0,5
Cromo	3,0	0,9	1,9	0,9	1,9	≤ 10
Rame	9,4	3,5	8,1	3,1	3,8	≤ 10
Mercurio	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	≤ 0,1
Manganese	2,2	76,9	67,2	53,3	105,5	
Nichel	1,0	1,1	1,8	1,1	1,3	≤ 10
Piombo	5,0	0,9	1,0	0,9	0,9	≤ 10
Zinco	64,7	9,5	6,3	4,7	4,7	≤ 100
Alluminio	28,5	26,0	98,9	25,2	53,4	
Calcio	1620,0	2336,8	2324,6	1384,6	5781,2	
Ferro	77,0	55,1	97,0	56,5	153,2	
Magnesio	107,0	201,4	229,6	97,7	274,6	
Sodio	175,0	54,9	98,0	159,3	59,1	
Fosforo	42,7	94,0	118,1	41,0	168,1	
Silicio	173,0	194,7	478,4	173,6	354,9	
Potassio	508,0	864,4	1143,1	560,5	1382,3	

Le analisi di tenore in metalli pesanti e macroelementi mostrano valori in linea o inferiori con i limiti definiti dalla UNI EN ISO 17225-2 in particolare, a risultare maggiormente critici sono i tenori di arsenico per tutti i campioni, le concentrazioni di rame e mercurio nel caso del campione H5259. Per tutti gli altri parametri i campioni mostrano valori bassi e ampiamente al di sotto dei limiti da standard tecnico. Le differenze macroscopiche, le uniche evidenziabili oltre ai limiti normativi, riguardano le maggiori concentrazioni di alcuni composti nel pellet derivato da torrefatto (H5259); queste sono prevedibili per effetto della concentrazione indotta dal trattamento e in alcuni casi potrebbero configurare rischi di salute come nel caso di cromo, mercurio, piombo etc...i quali presentano concentrazioni 50 volte superiori agli altri campioni (piombo) pur rimanendo entro i limiti da norma. Altro parametro interessante è il contenuto di manganese sempre per il campione H5259 che risulta 25-50 volte inferiore rispetto agli altri pellet; in assenza di ulteriori informazioni sul processo produttivo,

tuttavia, risulta complesso formulare delle ipotesi per giustificare il risultato ottenuto. Dal punto di vista specifico la valutazione sui metalli risulta cruciale in quanto il pellet alimentare viene utilizzato nei processi di cottura/affumicatura. Nei barbecue i fumi generati dalla combustione e presumibilmente anche parte delle ceneri o di incombusti potrebbero entrare a contatto con il cibo configurando un potenziale rischio. Per tali ragioni l'analisi dei metalli è essenziale non solo per cercare di comprendere fenomeni legati all'origine della biomassa utilizzata o ai processi di trasformazione ma anche per mettere in evidenza criticità rilevanti visto l'ambito di utilizzo.

Cloro e Zolfo

In tabella 4.10 sono riportati i risultati di caratterizzazione al cromatografo ionico di cloro e zolfo espressi come percentuale su sostanza secca.

Tabella 4.10: Valori dei metalli contenuti nei campioni analizzati

Campione	Cloro (%ss)	Zolfo (%ss)	Classe
H5259	<0.01	0.04	A1
H5260	<0.01	0.04	A1
H5261	<0.01	0.02	A1
H5262	<0.01	0.03	A1
H5263	<0.01	0.03	A1

I parametri di cloro e zolfo definiti ricadono tutti nei limiti di norma, nel caso del cloro sono addirittura ben al di sotto del limite. Tali risultati fanno immaginare che le biomasse utilizzate per la pellettizzazione sono dedicate e non residui di processi agricoli o agroforestali come, ad esempio, residui di potatura di fruttiferi. Questa ipotesi è anche in parte supportata anche dai risultati della concentrazione di metalli come zinco.

Fusibilità delle ceneri

In tabella 4.11 sono riportati i valori di temperatura di deformazione (DT), temperatura emisferica (HT) e di fusione (FT) che permettono di descrivere il comportamento termico delle ceneri ad elevate temperature.

Tabella 4-11: Valori di temperature di Restringimento, di deformazione, emisferica e di fusione dei campioni analizzati

Campione	Restringimento (°C)	deformazione, emisferica e fusione (°C)
H5259	736	>1479
H5260	1367	>1479
H5261	784	>1479
H5262	742	>1479
H5263	796	>1479

L'analisi di fusibilità delle ceneri (riportata solo come esempio in figura 4-1) ha fatto registrare per tutti i campioni valori di temperatura di deformazione, emisferica e fusione sopra al limite massimo analitico di 1479°C solo la temperatura di restringimento (relativa alla volatilizzazione di alcune ceneri ha fatto registrare valori specifici (tabella) ma sempre in linea con ceneri legnose con l'unica eccezione del

campione H5260 con una temperatura di restringimento di 1367°C indice di altissima stabilità termica della frazione inorganica.

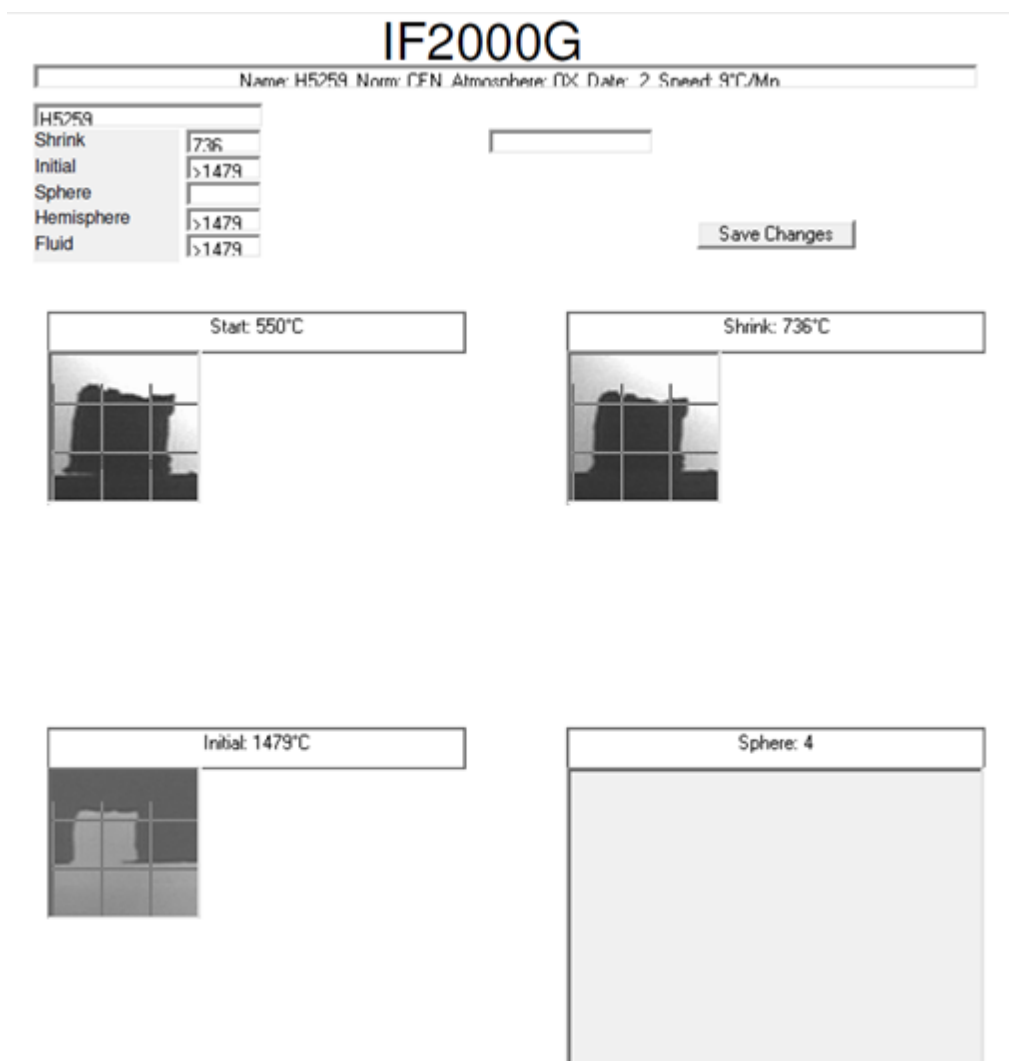


Figura 4-1: Report analitico di fusibilità per il campione H5259

Analisi MIR (medio infrarosso)

Le analisi di laboratorio sono un metodo efficace per valutare la qualità dei biocarburanti; tuttavia, sono sia costosi che dispendiosi in termini di tempo. Pertanto, sarebbe auspicabile sviluppare e validare sistemi rapidi e innovativi per consentire il rilevamento delle caratteristiche dei pellet non adatti alla combustione domestica. Tra le tecnologie innovative utilizzate nel campo delle biomasse, la spettroscopia è una delle più ampiamente applicate. Diversi studi hanno esaminato l'uso della spettroscopia infrarossa (IR) per valutare la qualità complessiva dei pellet. La compattezza fisica e l'omogeneità dei materiali densificati comportano l'impossibilità di identificare i materiali di origine,

facilitando l'aggiunta illegale di rifiuti e materiali dannosi per l'ambiente, come il legno trattato con colla. La spettroscopia nel vicino infrarosso (NIR) potrebbe essere considerata una valida alternativa alle analisi standard per la valutazione qualitativa dei biocarburanti solidi, essendo efficiente in termini di tempo, non distruttiva e conveniente. Inoltre, l'applicazione di metodi chemiometrici e di classificazione (PLS-DA) potrebbe supportare le analisi NIR nella determinazione dell'origine dei componenti legnosi, consentendo il rilevamento di biocarburanti fraudolenti. Ad esempio, lo studio di Lixourgioti et al. propone un modello ottenuto tramite analisi di spettroscopia nel vicino infrarosso e metodi chemiometrici, come la classificazione, per valutare rapidamente se i pellet sono composti da legno vergine o trattato chimicamente. Il risultato suggerisce l'efficacia dei NIR per il rilevamento di pellet non vergini con una precisione superiore al 99%. Inoltre, il modello è apparso accurato nella valutazione sia dei pellet macinati che di quelli intatti, il che lo rende un potenziale strumento in linea per le valutazioni della qualità dei pellet [10]. L'analisi riguarda l'acquisizione di spettri elettromagnetici continui di assorbanza utilizzando aliquote dei campioni macinati ad 1 mm. Nel dettaglio l'analisi, condotta con uno spettrometro Nicolet iS10 della Thermo Fisher Scientific Inc. (figura 4-2), consiste nel posizionare al di sopra della fonte luminosa (laser) il campione e lasciare che lo strumento acquisisca la risposta di assorbanza attraverso un rivelatore ottico. Lo spettro acquisito è su lunghezze d'onda tra 500 e 4000 cm^{-1} .



Figura 4-2: spettrometro Nicolet iS10

L'analisi ha rivelato degli spettri in linea con quelli caratteristici delle biomasse legnose (figura 4-3), tuttavia alcune regioni particolari hanno evidenziato per alcuni pellet dei picchi di assorbanza riportati in evidenza in figura 4-4.

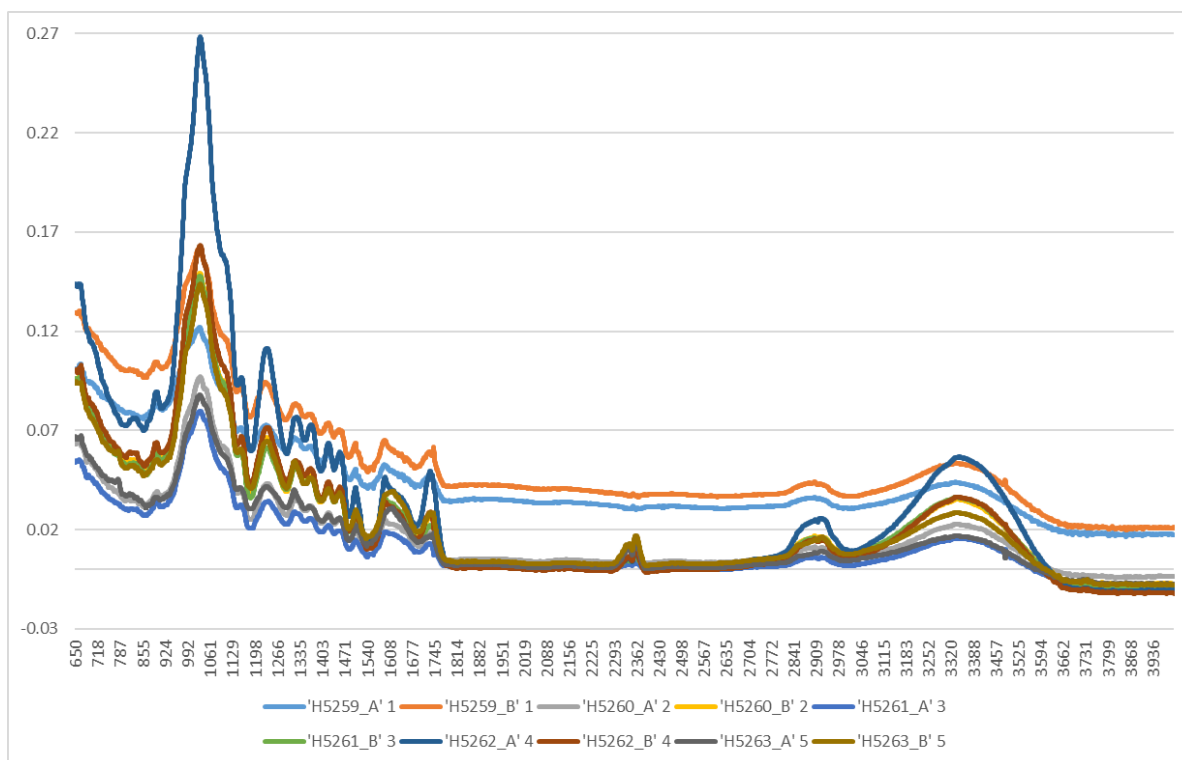


Figura 4-3: Spettri di assorbanza generati per i diversi campioni nella regione del medio infrarosso

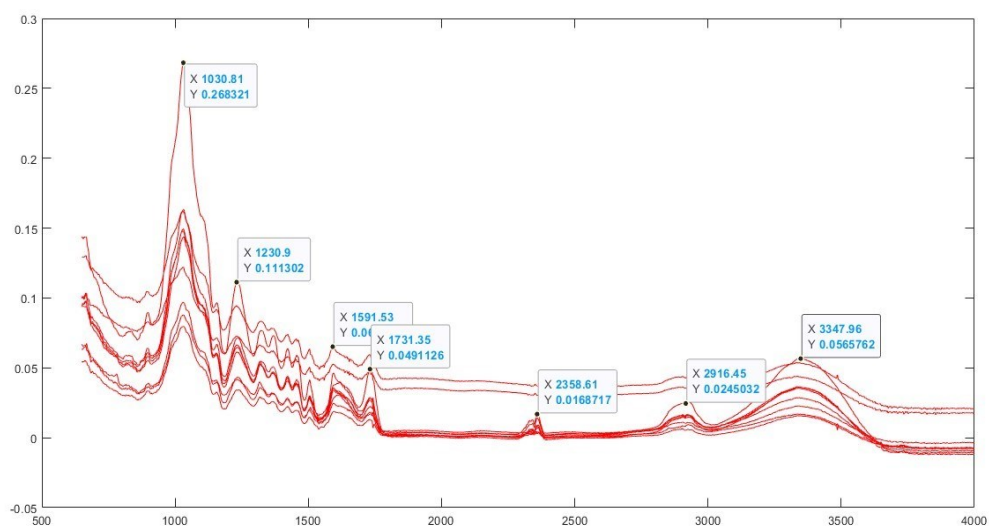


Figura 4-4: spettri di assorbimento con evidenziate le lunghezze d'onda in cm^{-1} relative a picchi caratteristici

Come è possibile osservare per uno degli spettri relativi al campione H5261 sono presenti picchi evidenti a 1030.81 cm^{-1} e 3347.96 cm^{-1} queste regioni si associano a legami C-C C-O C-N e legami

C-H N-H rispettivamente. Nel caso dei legami C-C C-O C-N questi sono sia di tipo stretching che bending e si dovrebbero associare ad un maggior contenuto di carbonio e degli altri elementi con cui questo forma legami; tuttavia, dalle analisi elementari non emergono differenze sostanziali. Per quanto riguarda i legami C-H N-H evidenziati nel secondo picco questi sono solo di tipo stretching e anche qui non si evidenziano connessioni forti con le analisi elementari. Quanto detto lascia intendere che i picchi evidenziati dipendano esclusivamente da un disturbo durante l'analisi MIR piuttosto che a caratteristiche peculiari della biomassa.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

In base ai risultati ottenuti dalla caratterizzazione dei campioni analizzati è emerso che i Food Pellet, pur non essendo una tipologia di pellet convenzionale, presentano caratteristiche chimiche, fisiche ed energetiche conformi a quanto riportato dalla normativa UNI EN ISO 17225-2. Dal punto di vista fisico, i campioni dei pellet analizzati rientrano nella classe A1 per quanto riguarda i parametri tecnici di diametro, lunghezza, umidità, particelle fini, durabilità meccanica e massa volumica. Valori di elevata qualità sono richiesti per i parametri di diametro e lunghezza per non creare problemi di funzionamento del dispositivo, a meno che in futuro non si realizzino barbecue “industriali” per produzioni maggiori. Anche la durabilità meccanica e le particelle fini, richiedono una particolare attenzione per il fatto che, trattandosi di un mercato di nicchia, dove si ricercano pellet con specifiche caratteristiche tecniche e aromatiche peculiari in determinati areali, il materiale è soggetto a lunghi trasporti per fini commerciali e deve quindi mantenere il più possibile un’elevata qualità. Dal punto di vista chimico, invece, i risultati ottenuti dalle analisi rilevate in laboratorio evidenziano variabilità di valori nei parametri, in particolar modo per quanto riguarda le ceneri ed il contenuto di metalli. Dal punto di vista delle ceneri, pur riscontrando soltanto un campione in classe A1 (H5262), non si considerano valori elevati come limitanti. A differenza delle stufe per riscaldamento, il barbecue o lo smoker a pellet sono dispositivi di limitate dimensioni e potenza che restano accessi per alcune ore in base al tipo di cottura e non dispongono di un sistema di recupero/allontanamento delle ceneri. La composizione delle ceneri e in particolare i metalli riguarda invece la composizione chimica della biomassa, in termini di macroelementi e microelementi. In generale entrambi questi gruppi si collegano alla provenienza della biomassa (non necessariamente legno forestale), che in alcuni casi impone un monitoraggio attento (ad esempio per i residui di potatura). Come ultima considerazione è doveroso specificare che analizzando ulteriori campioni di altri Food Pellet disponibili in mercato, si otterrebbero ulteriori risultati che permetterebbero di aver un quadro più preciso della materia. Bisogna infatti ricordare che l’utilizzo di questo pellet richiede qualità elevata della biomassa grezza poiché questa influenza la combustione ma soprattutto le emissioni negli smoker e nei barbecue a pellet. Sarebbe, inoltre, auspicabile che i diversi attori delle filiere legno-energia interagiscano per definire degli standard qualitativi minimi per preservare la salute umana e il valore di mercato dei prodotti. Questo oltre ad una maggiore garanzia getterebbe le basi per permettere alle filiere legno-pellet di nascere e fiorire anche in ambienti dove il legno di conifera è scarsamente disponibile, fattore che fino ad ora ha concentrato la produzione di pellet nelle aree del centro e nord Europa ed oltreoceano in Canada e Stati Uniti. In questo modo ci sarebbe una valorizzazione delle latifoglie ed un significativo cambiamento di prospettiva nel mercato di questo pellet. L’area mediterranea ed in particolare l’Italia costituirebbero le principali zone da cui

ottenere nuove biomasse con cui realizzare svariati mix con aromi caratteristici di ciascun areale e specie arborea. La biodiversità forestale, arborea ed erbacea che contraddistingue la nostra penisola potrebbe promuovere nuove ed esclusive biomasse ed essere un interessante trampolino di lancio nel mercato del Food Pellet.

RINGRAZIAMENTI

In questa sede, desidero esprimere il mio più sincero ringraziamento a tutte le persone che mi hanno supportato e guidato durante questo lungo percorso di ricerca e scrittura della mia tesi.

Un particolare ringraziamento va al mio relatore, il Prof. Alessio Ilari per avermi guidato con estrema disponibilità, cordialità ed attenzione durante tutte le fasi di realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio anche il Prof. Daniele Duca per la sua disponibilità e le sue osservazioni che hanno arricchito la realizzazione dell'elaborato.

Grazie anche ai ricercatori del Laboratorio Biomasse che si sono sempre dimostrati disponibili a chiarire ogni dubbio.

Un pensiero speciale va ai miei genitori e a mia sorella che hanno creduto in me e mi hanno sostenuto con pazienza e affetto in ogni momento di questo percorso. Una dedica particolare va ai miei nonni con i quali purtroppo non posso celebrare questo traguardo ma so che sarebbero orgogliosi di me.

Ringrazio i miei amici per avermi supportato e supportato in questi anni di università, soprattutto nei momenti difficili quando la strada era in piena salita e ogni giorno che passava sembrava impossibile raggiungere la cima.

Affrontare questo percorso mi ha aiutato a crescere sotto molti aspetti e ad avere una maggiore consapevolezza di me stesso. Spero che questo traguardo non rappresenti solo la fine di un ciclo, ma piuttosto l'inizio di nuove opportunità e sfide che mi porteranno a proseguire il mio cammino verso la realizzazione dei miei obiettivi futuri.

Chiedo scusa a tutti per il ritardo, ma alla fine ce l'abbiamo fatta anzi... ce l'ho fatta!!!

“MUCHAS GRACIAS AFICION, ESTO ES PARA VOSOTROS...
SIUUUMMM”

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Solid biofuels-Fuel specifications and classes-Part 2: Graded wood pellets Biocombustibles solides-Classes et spécifications des combustibles-Partie 2: Classes de granulés de bois,” 2014. [Online]. Available: www.iso.org
- [2] P. Terzopoulou, V. Kamperidou, and C. Lykidis, “Cypress Wood and Bark Residues Chemical Characterization and Utilization as Fuel Pellets Feedstock,” *Forests*, vol. 13, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.3390/f13081303.
- [3] R. Picchio *et al.*, “Pellet Production from Pruning and Alternative Forest Biomass: A Review of the Most Recent Research Findings,” Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ma16134689.
- [4] Z. Jelonek, A. Drobniak, M. Mastalerz, and I. Jelonek, “Emissions during grilling with wood pellets and chips,” *Atmos Environ X*, vol. 12, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.aeaoa.2021.100140.
- [5] M. A. Brand and R. C. Jacinto, “Apple pruning residues: Potential for burning in boiler systems and pellet production,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 458–466, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.037.
- [6] A. Gendek *et al.*, “Physico-mechanical and energy properties of pellets made from ground walnut shells, coniferous tree cones and their mixtures,” *Renew Energy*, vol. 211, pp. 248–258, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.122.
- [7] A. Palma *et al.*, “Experimental Study of the Combustion of and Emissions from Olive and Citrus Pellets in a Small Boiler,” *Fire*, vol. 6, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/fire6080288.
- [8] J. Eling, D. K. Okot, E. Menya, and M. R. Atim, “Densification of raw and torrefied biomass: A review,” May 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107210.
- [9] J. Liu, X. Jiang, T. Liu, T. Li, and Z. Li, “Upgrading densified pellet via torrefaction pretreatment: Insight into linkage between components and properties,” *Ind Crops Prod*, vol. 221, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.119394.
- [10] E. Leoni, T. Gasperini, N. Di Marzio, R. Picchio, G. Toscano, and D. Duca, “Application of Near Infrared Spectroscopy for the Detection of Chemically Treated Pellets Unsuitable for Combustion,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 4, Feb. 2024, doi: 10.3390/en17040825.