

STEFANO CAMPEOTTO, VERONICA BARBIERO, ANDREA ARGNANI, STEFANO GRIGOLATO

Misure sull'efficienza energetica di un essiccatore a letto mobile per il miglioramento qualitativo del cippato

Introduzione

Il legno è probabilmente la fonte energetica più antica usata dall'uomo.

In tempi recenti, alla tradizionale legna da ardere si sono affiancati altri biocombustibili legnosi tra cui il pellet ed il cippato. Questi combustibili solidi hanno la particolarità di un pratico utilizzo in impianti a caricamento automatico, essendo di dimensioni ridotte ed in linea di massima standardizzabili in classi dimensionali. Queste caratteristiche permettono sia al cippato che al pellet di essere facilmente movimentabili come un fluido.

Il cippato, combustibile solido legnoso oggetto di questo studio, è definito come legno ridotto in scaglie con sezione definita attraverso un processo meccanico per mezzo di utensili dotati di elementi affilati (coltelli). A seconda delle caratteristiche di origine della biomassa forestale e del legno e a seconda della configurazione e impostazione del sistema di cippatura, il cippato può avere caratteristiche qualitative diverse. Si va dal cippato più scadente utilizzabile solo in appositi impianti di grossa taglia fino a materiale di alta qualità utilizzato solitamente in medio e piccoli impianti civili e domestici. Il tema della qualità del cippato è fondamentale, in quanto determina il prezzo di vendita. La norma tecnica di riferimento adottata a livello nazionale è la UNI EN ISO17225-4, in cui sono prese in considerazione tutta una serie di grandezze misurabili e confrontate con degli standard che definiscono le classi qualitative del biocombustibile. Alcune di queste caratteristiche

sono intrinseche del materiale legnoso di partenza e sono difficilmente migliorabili, altre invece attraverso dei semplici processi fisici possono essere migliorate aumentando la qualità del combustibile stesso.

L'essiccatore a letto mobile

L'essiccatore oggetto dello studio è definito a "letto mobile", poiché il cippato è prelevato dal silo di stoccaggio in uno strato uniforme (letto) e percorre l'essiccatore su un nastro mobile attraversato da un flusso d'aria calda e secca. Tanto più l'aria è calda e secca, tanta più acqua sottoforma di vapore può essere contenuta in essa. L'aria calda e secca attraversando il letto di cippato va di fatto ad estrarre l'acqua in eccesso (Francascato 2014). Uscita dalla macchina l'aria si raffredda ed il vapore in essa contenuto condensa tornando liquido. Una volta abbattuto il contenuto idrico (M) il materiale passa attraverso un vaglio per il miglioramento della pezzatura (P).

Tale impianto nasce per il condizionamento del materiale in ingresso ad un impianto di cogenerazione (elettrica e termica) che sfrutta il fenomeno della gassificazione. Tale processo consiste in una degradazione termochimica del legno che produce un gas, il quale viene utilizzato come combustibile per motori appositamente modificati che attivano un generatore di elettricità. Per il funzionamento efficiente del sistema di cogenerazione il legno deve avere un

contenuto idrico molto basso (al di sotto il 10%) e una pezzatura omogenea (P31.5S o superiore) con una quantità di particelle fini ridotta al minimo. Quando le esigenze di alimentazione del cogeneratore sono soddisfatte, l'impianto di essiccazione e vagliatura produce cippato di qualità differenti, mediante il cambio delle impostazioni di funzionamento, da destinare ad altre utenze, gassificatori o caldaie. Il calore è recuperato dall'impianto di raffreddamento del motore e utilizzato per l'essiccazione del cippato, ottimizzando la resa dell'impianto in un'ottica di economia circolare e migliore impiego delle risorse.

Tutti i processi sono controllati da un sistema computerizzato che permette di monitorare e regolare da remoto molti parametri dell'impianto. Allo stato attuale questo sistema riscuote un forte interesse, ma non è ancora stato analizzato in termini di efficienza energetica in condizioni operative reali. Per tale motivo, l'obbiettivo del presente lavoro è quindi di analizzare, tramite una attività sperimentale, l'efficienza di un impianto di essiccazione a letto mobile utilizzato per il miglioramento qualitativo del cippato.

Materiali e metodi

L'attività di monitoraggio dell'impianto di essiccazione è stata realizzata all'interno dell'attività (3.3) del progetto LogistiCi-Plus, finanziato dalla Misura 16 del PSR della Provincia Autonoma di Trento.

La campagna di misurazione ha compreso lo studio dell'efficienza dell'impianto sulla base di dieci lotti di cippato destinati alla essiccazione, ciascuno con un volume di 40 m³, per un totale di 400 m³ essiccati.

Il cippato in ingresso è stato prodotto dalla cippatura di tronchi di abete rosso provenienti da lotti forestali utilizzati nel Trentino occidentale. Il cippato oggetto dei test può essere definito "bianco", perché ricavato dalla lavorazione dei soli tronchi e dunque con basso contenuto di cortecce e senza aghi. Tale materiale, nonostante sia stato ottenuto dalla lavorazione di tronchi rientra

nella cippatura di biomasse forestali di tipo residuale in quanto i tronchi presentavano difetti e quindi una qualità non commerciabile per la segagione. Tuttavia, la qualità del cippato utilizzata nei test sperimentali non era elevata ma rientrava nella classe B1 determinata tramite l'analisi dei parametri indicati nella norma tecnica ISO17225-4. In particolare, la bassa qualità del prodotto è stata determinata dall'alto contenuto idrico (M) che caratterizzava il cippato. Il cippato ottenuto da legname residuale è comunque tra i più indicati per il trattamento di essiccazione per la ottima possibilità di incremento qualitativo in termini di contenuto idrico attraverso tale processo. La stessa considerazione non è invece possibile per altri tipi di cippato (ad esempio cippato da ramaglie o da piante intere o ceppaie), che hanno caratteristiche intrinseche (materiale verde, presenza di terra e sassi) scadenti e la cui qualità è desinata a rimanere sempre bassa anche dopo un eventuale essiccazione soprattutto a causa dell'elevato contenuto di particelle fini e di aghi.

Il cippato lavorato all'imposto o in piazzali nei pressi dei cantieri boschivi è stato trasportato e scaricato nel piazzale adiacente lo stabile in cui è ospitato l'impianto. Qui si sono condotte otto misurazioni del contenuto idrico con un misuratore ad asta, uniformemente distribuite nella massa di biocombustibile, adottando diverse profondità di rilevazione.

L'impianto di essiccazione è stato completamente svuotato per evitare contaminazioni tra il campione studiato ed altro materiale presente in azienda. Il silo con capienza di quarantatre metri cubi è stato caricato con l'ausilio di una pala meccanica telescopica.

L'impianto di essiccazione studiato si presta particolarmente all'attività di ricerca perché attraverso il suo sistema computerizzato, unito ad un'importante dotazione sensoristica, ha la possibilità di monitorare diversi parametri in tempo reale. Tali parametri sono riportati in tabella 1.

Per quanto riguarda i tempi di funzionamento e il consumo termico invece è stata necessaria una rilevazione diretta in loco da parte dell'operatore. Questo ha portato

la necessità di un monitoraggio costante in loco del sistema anche perchè a parità di contenuto idrico del materiale in uscita tali parametri presentano ampia variabilità.

Campione	tempo centesimale	Condizioni meteo	Consumo termico	Contenuto idrico M in ingresso - cippato	Temperature (°C)						Consumo		Contenuto idrico M in uscita - cippato	Umidità relativa U - cippato
					Esterna al locale	Interna al locale	Interno scambiatore	Entrata essiccatoio	Uscita essiccatoio	Impostata ₍₁₎	Motore ₍₂₎	%		
	min		kWh	%								%	%	%
1	22,33	pioggia	3.300	46,6	20,2	32,9	34,9	61,2	38,2	38,0	100,0	7,17	16,57	
2	23,66	pioggia	3.488	45	21,5	31,0	33,4	61,1	35,0	35,0	98,2	16,03	19,47	
3	39,83	Umido-pioggia fine	6.284	40	20,3	31,1	33,4	60,9	45,7	45,4	96,4	2,93	10,37	
4	21,00	Umido/nebbia	3.299	41,5	21,7	36,0	36,3	61,6	41,5	41,9	98,8	5,10	13,10	
5	11,83	sole	2.196	41,7	20,0	37,0	36,5	61,2	36,0	36,0	100,0	14,15	19,13	
6	10,50	sole	1.423	44	25,7	40,2	39,2	63,3	36,1	35,5	100,0	13,43	21,80	
7	15,00	sole	2.033	37	26,3	37,8	39,6	63,1	38,6	38,5	100,0	9,70	14,90	
8	13,00	sole	1.809	46	26,3	36,0	38,0	63,5	38,9	39,2	100,0	9,23	14,90	
9	26,50	sole	3.887	33,3	26,3	37,1	38,6	62,6	44,8	45,0	99,6	4,28	12,98	
10	13,92	Umido/nebbia	2.127	50,3	22,1	34,2	36,5	61,5	34,9	34,8	100,0	14,20	22,23	

Tabella 1 - Valori medi delle misurazioni effettuate sul impianto di essiccazione suddivise per campione.

Nota (1): La temperatura impostata in uscita dall'essiccatoio è un parametro regolabile che influisce direttamente sulla capacità di estrazione di acqua dal cippato. Salvo malfunzionamenti dovrebbe scostarsi di poco da quella misurata in uscita.

Nota (2): Il motore elettrico della macchina ha una potenza di 11kW e ha un'alimentazione variabile in base ai parametri d'essiccazione impostati. Il sistema computerizzato rileva istantaneamente i consumi in percentuale al consumo massimo.

Risultati

L'elaborazione dei dati ha l'obiettivo di rilevare l'efficienza del sistema ed in particolare di capire se l'incremento di potere calorifico del biocombustibile, dovuto alla riduzione del contenuto idrico, è sufficiente a compensare la spesa energetica di calore ed elettricità dovuta al processo di essiccazione forzata. Prima di eseguire il rapporto è stato necessario esprimere tutti i valori in grandezze comparabili e per questo si è deciso di riportare tutti i valori in grandezze energetiche (unità scelta: MWh). Per questo è stato necessario calcolare il potere calorifico del biocombustibile in ingresso e in uscita e la densità sterica del materiale. I parametri per la conversione sono stati ricavati da uno studio di una serie di cento misurazioni condotte in capo nell'ambito del progetto stesso. Poi è stata conteggiata la riduzione volumetrica dovuta al processo di essiccazione, utilizzando dei dati in letteratura (HELLRIGL 2006), per simulare con i calcoli in modo più veritiero possibile i fenomeni fisici all'interno della macchina (tab. 2). Nella maggioranza dei casi studiati il valore di efficienza, calcolata come rapporto tra l'energia del materiale in uscita su quello in

ingresso, sommando a quest'ultimo la spesa energetica di essiccazione, è sotto l'unità. Dunque l'energia per l'essiccazione non viene completamente compensata dall'incremento di potere calorifico del materiale in uscita all'impianto.

Un altro modo per capire la qualità del processo di essiccazione è quello di calcolare l'energia occorrente per evaporare un chilogrammo d'acqua dal cippato (FRANCESCATO 2014). In questo caso si sono ottenuti esiti alterni, con dati registrati all'interno della forbice 0,94 MJ/kg e 3,61 MJ/kg attorno al dato medio di letteratura di 2,44 MJ/kg. In entrambe le elaborazioni la variabilità dei risultati è molto grande, apparentemente non descrivibile attraverso una relazione semplice tra i fattori considerati (tab. 3). Infine, si sono confrontati i valori economici del cippato in ingresso ed in uscita, utilizzando la rubrica prezzi di Aiel, uno degli strumenti più autorevoli nel settore (tab. 4). Confrontando la massa dei campioni, moltiplicati al prezzo a tonnellata si è ottenuto l'incremento di valore del campione grazie al trattamento di essiccazione.

Volume campione in entrata	Massa campione in entrata - cippato	Densità sterica BD - cippato in entrata	Contenuto idrico M in entrata - cippato	Potere calorifico inferiore in entrata - cippato	Energia materiale in entrata ⁽¹⁾	Consumo termico	Consumo elettrico	Volume campione in uscita - cippato	Massa campione in uscita - cippato	Densità sterica BD - cippato in uscita	Contenuto idrico M in uscita - cippato	Potere calorifico in uscita - cippato	Energia materiale in uscita ⁽¹⁾
mst	kg	kg/mst	%	MWh/t	MWh	kWh	kWh	mst	kg	kg/mst	%	MWh/t	MWh
40	13.319	333	46,6	2,43	32,34	3.300	246	36,6	6.810	186	7,17	4,72	32,16
40	13.081	327	45,0	2,52	32,98	3.488	255	38,3	8.395	219	16,03	4,21	35,31
40	12.337	308	40,0	2,81	34,69	6.284	421	35,7	6.092	171	2,93	4,97	30,27
40	12.560	314	41,5	2,72	34,23	3.299	228	36,1	6.456	179	5,1	4,84	31,26
40	12.588	315	41,7	2,71	34,17	2.196	130	37,9	8.049	212	14,15	4,32	34,74
40	12.914	323	43,9	2,59	33,41	1.423	116	37,8	7.918	210	13,43	4,36	34,50
40	11.937	298	37,3	2,97	35,44	2.033	165	37,0	7.251	196	9,7	4,57	33,17
40	13.211	330	46	2,47	32,64	1.809	143	38,1	8.186	215	14,9	4,27	34,97
40	11.333	283	33,3	3,20	36,32	3.887	290	37,7	7.837	208	12,98	4,38	34,35
40	13.872	347	50,3	2,21	30,69	2.127	153	37,9	8.058	212	14,2	4,31	34,75

Tabella 2 - Elaborazione dei dati con confronto tra pre e post processo di essiccazione dei campioni

Nota (1) L'energia del materiale sia in entrata che in uscita si ottiene come moltiplicazione del potere calorifico inferiore per la massa del campione

Campione	Efficienza del processo di essiccazione ⁽¹⁾	Energia di evaporazione per unità idrica valore medio 2,44 MJ/kg ⁽²⁾	Incremento di valore cippato in base alla rubrica di AIEL ⁽³⁾
		MJ/kg	€
1	0,896	1,83	327,12
2	0,962	2,68	346,90
3	0,731	3,62	273,21
4	0,828	1,95	313,20
5	0,952	1,74	330,49
6	0,987	1,03	300,71
7	0,881	1,56	451,53
8	1,011	1,30	317,35
9	0,848	4,00	-32,43
10	1,054	1,32	272,49

Tabella 3 - Risultati dello studio tecnico-economico sulla qualità del processo di essiccazione

Nota (1): Efficienza calcolata come il rapporto tra l'energia contenuta nel campione in uscita su l'energia del campione in entrata e la spesa energetica del processo di essiccazione

Nota (2): L'energia di evaporazione è il rapporto tra l'energia termica utilizzata per il processo di essiccazione su la differenza di peso del campione prima e dopo il trattamento

Nota (3): L'incremento di valore è calcolato come la differenza del valore del campione dopo e prima il trattamento di essiccazione

Classe qualitativa del cippato secondo norma ISO17225-4	Valore di mercato
	€/t
A1+	138
A1	113
A2	81
B1	46

Tabella 4 - Estratto dalla Rubrica Mercato&Prezzi da Agriforenergy

Conclusioni

Il lavoro presentato deve essere considerato come un primo passo di un percorso che porterà in futuro a conoscere meglio l'efficienza del processo di essiccazione tramite essiccatoi a letto mobile per il miglioramento qualitativo del cippato, nonché dare indicazioni pratiche per la regolazione del processo di essiccazione in relazione alle caratteristiche del cippato stesso. L'attività sperimentale di questo lavoro non è sufficiente allo stato attuale in termini di lotti analizzati (n°10) per l'impostazione e la validazione di un modello per l'analisi dei processi fisici che avvengono nel procedimento di essiccazione forzata. L'attività sperimentale rappresenta comunque un primo passaggio e ne indica un protocollo per replicare le analisi con impianti simili eventualmente in altre zone del Trentino o dell'Italia nord-orientale.

In più sarà necessario limitare le variabili di funzionamento per poter semplificare l'elaborazione dei dati e la comprensione dei risultati ottenuti.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei dati direttamente rilevati in campo, come per esempio nel caso del calcolo della densità

sterica, sebbene il campione fosse abbastanza numeroso, la rilevazione dei dati di contenuto idrico è stata svolta con un misuratore ad asta su principio dielettrico, molto pratico, ma che a valori elevati di contenuto idrico (oltre il 40%) può non essere accurato ($\pm 10\%$) (NEGRIN E BERNO, 2016).

La valutazione dell'incremento del valore economico del combustibile sembra premiare le grandi variazioni di contenuto idrico e dunque i grandi salti di classe qualitativa del materiale. L'unico campione con valore d'incremento di prezzo negativo presenta infatti una differenza di contenuto idrico trattato più limitata rispetto agli altri, insufficiente per avere un grande miglioramento qualitativo. Sarebbe ottimale in futuro considerare affianco a questo parametro anche il costo reale del processo in modo da poter completare il quadro economico.

Dal punto di vista tecnico invece i vantaggi sono evidenti. Da un cippato di qualità scadente utilizzabile in soli grossi impianti, si ottiene un combustibile con ben altre caratteristiche, ottimale per le utenze medie e piccole dei paesi di montagna, che ben si presta al mercato locale e alla cogenerazione.



Figura 1 - Rilevazione parametri da sistema computerizzato in primo piano, uscita del cippato essiccato e vagliato (nella parte sinistra)

Ringraziamenti

Ringraziamo l'azienda Trentino Rinnovabili srl per la piena disponibilità dei mezzi, dell'impianto e del personale.

BIBLIOGRAFIA

FRANCESCATO V., PANIZ A., NEGRIN M., BAÙ L., BERNO F., 2014 – *Biocombustibili agroforestali Produzione Specifiche Tecniche Compravendita*. Aiel Associazione Italiana Energie Agroforestali. Legnaro(PD)

HELLRIGL B., 2006 – *Elementi di xiloenergetica, definizioni formule tabelle*. Aiel Associazione Italiana Energie Agroforestali. Legnaro (PD)

NEGRIN M. BERNO F., 2016 - *Confronto tra misuratori di contenuto idrico*. Aiel Associazione Italiana Energie Agroforestali. Rapporto interno

RUBRICA MERCATO&PREZZI, 2020 – *Rivista Agriforen-gy*. Aiel Associazione Italiana Energie Agroforestali. Legnaro(PD)

UNI EN ISO 17225-4: 2014: *Biocombustibili solidi - Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 4: Definizione delle classi di cippato di legno*. UNI - Ente Italiano di Normazione.

SITOGRAFIA: <https://www.holz-kraft.com/it/>

Stefano Campeotto

Libero Professionista
stefano.campeotto@gmail.com

Veronica Barbiero

Tecnerga srl
veronica.barbiero@tecnerga.com

Andrea Argnani

Associazione Italiana Energie Agroforestali
argnani.aiel@cia.it

Stefano Grigolato

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali,
Università degli Studi di Padova
stefano.grigolato@unipd.it;

PAROLE CHIAVE: *Cippato, essiccatore a letto mobile, efficienza energetica*

RIASSUNTO

Il contenuto idrico dei biocombustibili legnosi è un parametro fondamentale per determinarne la qualità. Per le aziende produttrici diventa sempre più importante avere un prodotto con caratteristiche standardizzate e costanti, idoneo alle diverse esigenze dei clienti. Per questo motivo, soprattutto nel segmento di mercato del cippato, gli essiccatori stanno riscuotendo un forte interesse. Tuttavia, sono scarse le analisi in termini di efficienza energetica in condizioni operative reali di queste macchine. L'obiettivo del presente lavoro è quindi di analizzare, tramite una attività sperimentale, l'efficienza di un impianto di essiccazione a letto mobile utilizzato per il miglioramento qualitativo del cippato. Dai risultati emerge che nella maggioranza dei casi l'energia per l'essiccazione non viene completamente compensata dall'incremento di potere calorifico del materiale in uscita all'impianto. Dal punto di vista economico invece il trattamento ha comportato un aumento del valore del cippato essiccato. L'attività sperimentale di questo lavoro non è sufficiente allo stato attuale in termini di lotti analizzati (n°10) per l'impostazione e la validazione di un modello per l'analisi dei processi fisici che avvengono nel procedimento di essiccazione forzata. L'attività sperimentale rappresenta comunque un primo passaggio e ne indica un protocollo per replicare le analisi con impianti simili.

KEY WORDS: *Wood chips, walking floor dryer, energetic efficiency*

ABSTRACT

The moisture (M%) of woody biofuels is a very important parameter crucial to determine their quality. The importance for the producing companies to provide a product that have standardized and constant characteristics is gaining importance in order to satisfy the different demands of their customers. For this reason, with a specific importance for the wood chips sector, dryers are obtaining more and more success. However, there a few the analysis in terms of energetic efficiency under operating conditions of these machines. Hence, the objective of this given study is to analyse, throughout experimental activity, the efficiency of a drying system with walking floors used to enhance the quality of the wood chips. The results highlight that in most of the cases the increment of net calorific value of the output doesn't always compensate the energy input for the drying process. On the economic side instead, the treatment resulted in an increase of the economic value of the desiccated wood chips. The experimental activity of this given study isn't sufficient, at the given situation of only 10 batches, to create and validate a model for the analysis of the physical processes that occur during the forced desiccation process. Anyway, the experimental activity represents one of the first steps and it creates a protocol to replicate the analysis in similar plants.