



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi sperimentale di filtri a schiume ceramiche per la rimozione del particolato fine prodotto dalla combustione di biomassa legnosa

Matteo Caldera, Antonio De Sio

ANALISI SPERIMENTALE DI FILTRI A SCHIUME CERAMICHE PER LA RIMOZIONE DEL PARTICOLATO FINE
PRODOTTO DALLA COMBUSTIONE DI BIOMASSA LEGNOSA

Matteo Caldera, Antonio De Sio (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.1 "Bioenergia"

Obiettivo: a "Tecnologie per la produzione diretta di energia elettrica attraverso la combustione di biomasse"

Responsabile del Progetto: Vincenzo Gerardi, ENEA

Gli autori ringraziano gli ing. Giovanni Stoppiello, Cesare Freda e i sig. Sergio Sabbioneda, Alessandro Bodo per la collaborazione nell'allestimento del banco prova e nello svolgimento delle prove sperimentali.

Un particolare ringraziamento va al sig. Enrico Pellegatti per il prezioso supporto nelle misure di laboratorio e nell'analisi dei dati.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 LA FACILITY DI PROVA	7
2.2 METODOLOGIA DI CONDUZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI E DI ANALISI DEI RISULTATI.....	10
2.3 ANALISI DEL PM E DELLE PRINCIPALI SPECIE CHIMICHE PRESENTI NEI FUMI	14
2.4 FILTRO NON CATALITICO A SCHIUME CERAMICHE AD ALTA POROSITÀ	17
2.5 FILTRI NON CATALITICI A SCHIUME CERAMICHE A MEDIA POROSITÀ	19
2.6 CONFRONTO CON I FILTRI CATALITICI WALL FLOW.....	26
3 CONCLUSIONI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	34

Sommario

Il presente report descrive le attività svolte e i risultati ottenuti nell'ambito del Piano di Realizzazione Annuale 2015 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE per la Ricerca sul Sistema Elettrico, con riferimento all'obiettivo "Dispositivi filtranti catalitici per il trattamento dei fumi di combustione delle biomasse", nell'ambito della linea di attività "Tecnologie per la produzione diretta di energia elettrica attraverso la combustione di biomasse" del progetto B.1.1 "Bioenergia".

Vista l'attualità e l'importanza del contenimento delle emissioni di polveri sottili prodotte dalla combustione di biomassa legnosa, nella presente annualità si è inteso analizzare sperimentalmente una nuova tipologia di filtri, con struttura a schiume ceramiche a celle aperte e geometria del flusso radiale, che sfruttano il meccanismo di filtrazione di tipo "deep bed". In particolare, sono stati provati sperimentalmente due classi di filtri con diversa struttura porosimetrica (numero e dimensione dei pori), al fine di individuare quello con il miglior rapporto tra efficienza di filtrazione e perdite di carico, oltre che verificare la durata e il numero dei cicli operativi. I risultati ottenuti per i filtri a schiume ceramiche sono quindi confrontati con quelli ottenuti con un filtro catalitico wall flow che è stato parimenti testato nel corso dell'annualità. I filtri sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno, che ha collaborato nell'ambito della presente attività di ricerca, e sono stati testati presso la Hall Tecnologica THEXAS del CR ENEA di Saluggia.

Il filtro wall flow ha dimostrato elevate efficienze di filtrazione, superiori al 99% come già verificato nella precedente annualità, pur tuttavia ha confermato le principali criticità legate alla durata ciclo limitata e via via decrescente, a cicli di rigenerazione lunghi e energivori, oltre alle elevate perdite di carico, che in condizioni di filtro inserito in-line nella canna fumaria richiederebbero un ventilatore ausiliario di estrazione fumi.

In controtendenza, il filtro a schiume ceramiche ad alta porosità ha mostrato un'efficienza di filtrazione troppo bassa che non lo rende adeguato all'applicazione in esame.

1 Introduzione

Gli odierni generatori di calore alimentati a biomassa legnosa hanno beneficiato di enormi progressi tecnologici in termini di maggiori rendimenti termici e di minori emissioni in atmosfera, tuttavia, vista anche la loro capillare diffusione in molte regioni soprattutto nel nord Italia, sono tuttora responsabili di una rilevante quota di particolato fine ($PM_{2,5}$) in atmosfera [1] – [2].

Al fine di migliorare le loro prestazioni energetiche e ridurre l'impatto ambientale, il Regolamento CE n° 2015/1189 del 28 aprile 2015 di attuazione della Direttiva Ecodesign 2009/125/EC [3], riguardante i requisiti per la progettazione eco-compatibile di caldaie alimentate a combustibili solidi, impone dal 1° gennaio 2020 limiti stagionali di emissioni di PM pari a 40 mg/m^3 e 60 mg/m^3 rispettivamente, per caldaie ad alimentazione automatica e manuale. Si tratta di valori che possono essere ottenuti solo ottimizzando un mix di misure primarie, quali la camera di combustione, l'*air staging* e l'uso di sofisticati sistemi di controllo e regolazione [4]. In assenza di tale ottimizzazione, oppure nel caso in cui il legislatore nazionale o locale imponga vincoli simili ai prodotti esistenti, devono essere valutate misure secondarie quali appunto i sistemi di filtrazione.

Differenti sistemi di filtrazione sono disponibili; alcuni hanno raggiunto la maturità tecnologica mentre altri, seppur promettenti, non hanno ancora dimostrato adeguate caratteristiche per essere ritenuti competitivi. Nella prima classe vi sono i precipitatori elettrostatici, i filtri a maniche e i wet scrubber [5] – [7], che sono soluzioni standard negli impianti medio-grandi. Nella seconda classe vi sono i filtri ceramici [8] che, in linea di massima, possono essere utilizzati sia in nuovi generatori di calore sia nel retrofit di sistemi esistenti, oltre a essere facilmente scalabili in base alla taglia del generatore. Le principali criticità dei filtri ceramici sono legate alla frequenza di rigenerazione oltre che alle perdite di carico, che tendono ad aumentare con il funzionamento e possono in alcuni casi richiedere sistemi ausiliari di estrazione fumi. Questi aspetti possono comportare maggiore complessità impiantistica e frequenti manutenzioni, fattori che incidono sui costi e quindi, in ultima istanza, sulla diffusione commerciale dei filtri.

I risultati ottenuti nelle precedenti annualità sui filtri catalitici di tipo wall flow con matrice in carburo di silicio (SiC) e catalizzatore in ferrite di rame ($CuFe_2O_4$) al 20% in peso, hanno dimostrato efficienze di abbattimento del particolato prossime al 99%. Tuttavia, le elevate perdite di carico e l'esigenza di frequenti rigenerazioni, con tempi ciclo limitati a poche ore, rappresentano importanti criticità per questo tipo di filtri, e comportano elevati costi di gestione legati al consumo energetico in fase di rigenerazione e alla limitata vita operativa dei filtri, oltre alla necessità di intervenire a livello impiantistico con l'aggiunta di un ventilatore di estrazione fumi qualora il filtro sia inserito direttamente in canna fumaria.

Per questo motivo, nella presente annualità si è condotta un'approfondita campagna sperimentale su una differente tipologia di filtri, con struttura a schiume ceramiche a celle aperte, caratterizzati da dimensioni dei pori di gran lunga superiori ai filtri di tipo wall flow (per i quali la porosità è dell'ordine della decina di micron), e con una geometria di flusso dei gas di tipo radiale. Si ritiene che tali caratteristiche possano comportare minori perdite di carico e rigenerazioni meno frequenti; d'altro canto è da valutare l'efficienza di rimozione del particolato.

Le prove sperimentali sono state condotte su prototipi di filtri ceramici a base di SiC non catalizzati, caratterizzati da diversa porosità della matrice ma con forma e dimensioni dei prototipi pressoché analoghe ai filtri wall flow analizzati nelle precedenti annualità. La prima classe di schiume ceramiche è caratterizzata da dimensioni medie dei pori di circa 0,2 mm (elevata porosità), mentre la seconda classe è caratterizzata da 65 ppi (*pores per inch*), ossia da una media porosità. Nel corso della campagna sperimentale sono stati testati n°1 filtro della prima classe, costituito da SiC su base allumina, e n°2 filtri della seconda classe in OBSiC, oltre a n°1 nuovo filtro catalitico wall flow. I filtri sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno, che ha collaborato nell'ambito della presente attività di ricerca.

Le prove sono state svolte presso la Hall Tecnologica TH.EX.A.S. del centro di ricerche ENEA di Saluggia. I fumi sono prodotti da una caldaia a pellet di potenza nominale pari a 30 kW, e le misure sono condotte in condizioni stazionarie dei fumi e dell'acqua di circolazione in caldaia. Rispetto alla precedente annualità, il banco prova è stato adattato al fine di consentire una misura monte – valle del particolato: a monte del filtro

il PM è misurato tramite un impattore gravimetrico multistadio mentre a valle è misurato in continuo da un contaparticelle.

Le prove sul filtro a schiume ceramiche ad alta porosità e sul primo filtro a schiume ceramiche a media porosità hanno valutato un singolo ciclo operativo, mentre le prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità e sul filtro wall flow hanno analizzato più cicli operativi e la dinamica delle fasi di rigenerazione.

La campagna di prove condotta ha avuto lo scopo di ottenere utili indicazioni per una più approfondita conoscenza del comportamento delle diverse tipologie di filtri ceramici per l'abbattimento del particolato fine da biomassa, wall flow e a schiume ceramiche con celle aperte, confrontando le loro prestazioni in termini di efficienza rigenerazione e di abbattimento del particolato fine.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 La facility di prova

Le prove sono condotte presso la Hall Tecnologica TH.EX.A.S. (THERmal EXperimental Area of Saluggia) del centro di ricerche ENEA di Saluggia. Una veduta d'insieme del banco prova è rappresentata in Figura 1.

I fumi sono prodotti da una caldaia a biomassa marca KWB modello Multifire USV di potenza nominale di 30 kW, alimentata a pellet stoccato in un serbatoio con capacità di circa 1 m³.

Il filtro di prova è alloggiato in un portafiltro in acciaio inox di diametro 1"¼, inserito in una linea di derivazione in acciaio inox collegata alla canna fumaria, da cui una pompa volumetrica Zambelli modello ZB1 aspira i fumi tramite un ugello di campionamento collegato alla canna fumaria e avente diametro scelto in funzione del diametro del filtro di prova. A monte e a valle del portafiltro, attorno alla linea di derivazione sono avvolte due fasce scaldanti in silicone con controllo di temperatura integrato, per mantenere la linea a temperature prossime a 160°C evitando la formazione di condensa nei fumi. La parte restante della linea di derivazione è coibentata tramite due strati di lana minerale, Figura 2.

La rigenerazione è ottenuta tramite un riscaldatore elettrico di marca Watlow da 900 W ($T_{max} = 750^{\circ}C$) a fascia ceramica, di diametro interno 42,5 mm e lunghezza 110 mm, avvolto attorno al portafiltro e comandato da un sistema di controllo e regolazione composto da un termoregolatore PID Watlow modello PM Express con logica a microprocessore, che riceve come segnale di controllo la temperatura esterna del portafiltro misurata da una termocoppia di tipo K. L'energia elettrica assorbita dal riscaldatore è monitorata da un contatore di energia di marca Vemer avente risoluzione di 0,1 kWh.

Le concentrazioni delle principali specie gassose nei fumi sono monitorate in continuo a monte e a valle del filtro: anidride carbonica e monossido di carbonio attraverso analizzatori NDIR (*Non Dispersive InfraRed analysers*) mentre l'ossigeno attraverso analizzatori paramagnetici. Nello specifico, sono stati usati analizzatori Fer Enox II e Sick Sidor per la CO (campo di misura 0 – 10'000 ppm) e per la CO₂ (campo di misura 0 – 20%), mentre per l'O₂ si sono usati analizzatori Maihak Oxor e Siemens Oximat nel campo di misura 0 – 25%. I composti organici totali (TOC) sono misurati in canna fumaria a monte del filtro tramite un analizzatore FID a ionizzazione di fiamma di marca Nira TOC Aries (campo di misura 0 – 100 mg/m³).

Il particolato a monte del filtro è misurato in canna fumaria da un impattore multistadio Dekati mod. 10LPM, con le seguenti quattro classi dimensionali: 10 µm, 2.5 µm, 1 µm e < 1 µm. Generalmente nel corso di ciascuna prova sono stati eseguiti due campionamenti di particolato, la mattina e il pomeriggio, della durata compresa tra 30 e 40 minuti. La portata di campionamento dei fumi è ottenuta tramite una pompa volumetrica di marca Zambelli.

Il particolato a valle del filtro è invece monitorato in continuo per mezzo del contaparticelle *Pegasor Particle Sensor (PPS)*, che consente di effettuare misure in tempo reale di PM₁ fino a concentrazioni massime di 300 mg/m³ in differenti condizioni di pressione, velocità e temperatura dei fumi. Si tratta di uno strumento che utilizza un metodo senza accumulo di polveri, basato sulla misura della carica elettrica delle particelle ionizzate da un *corona charger*. I fumi sono aspirati da un sistema a eiettore con aria compressa a 1,5 bar di qualità strumentale.

Le cadute di pressione ai capi del filtro e il tiraggio in canna fumaria sono misurate tramite trasduttori di pressione piezoresistivi, mentre le temperature sono misurate da termocoppie di tipo K.



Figura 1. Banco prova



Figura 2. Linea prova filtri con impattore (collegato alla canna fumaria) e contaparticelle PPS (a valle del filtro)

Relativamente al circuito idronico collegato alla caldaia, la portata (prodotta da una pompa a regolazione elettronica di marca Grundfos) e le temperature mandata e ritorno dell'acqua calda sono monitorate in

continuo da termocoppie di tipo K e da un flussimetro di tipo a induzione elettromagnetica di marca ASA. Grazie alle modifiche impiantistiche eseguite nella precedente annualità, con l'aggiunta di un separatore idraulico tra il circuito della caldaia e il circuito idraulico della Hall Tecnologica, è stato possibile ridurre sensibilmente i transitori di avviamento caldaia, aumentando quindi la durata giornaliera delle prove e migliorando la gestione e la conduzione della caldaia, con temperature e portate più stabili sia dell'acqua sia dei fumi.

Il sistema di acquisizione dati è composto da un acquisitore modello SCXI della National Instruments, gestito da un programma software appositamente implementato in ambiente Labview® nel corso della precedente annualità, la cui schermata principale è rappresentata in Figura 3. I dati di funzionamento della caldaia sono acquisiti tramite il software di monitoraggio e gestione KWB Comfort Visio la cui interfaccia grafica è mostrata in Figura 4, mentre i dati del contaparticelle sono raccolti dal software abbinato allo strumento. I dati sono stati quindi elaborati tramite un programma di calcolo appositamente implementato in ambiente Excel®.

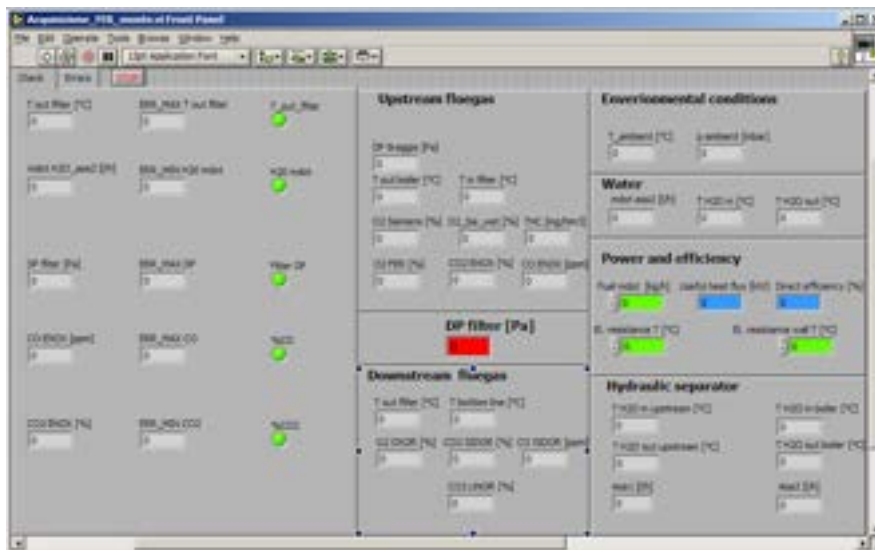


Figura 3. Schermata principale del software di monitoraggio delle prove



Figura 4. Interfaccia grafica del software di monitoraggio della caldaia

2.2 Metodologia di conduzione delle prove sperimentali e di analisi dei risultati

Le prove sono condotte in condizioni stazionarie dei fumi e dell'acqua del circuito idronico, con la caldaia funzionante in condizioni nominali.

Si è utilizzato pellet di abete certificato in classe EN A1 plus, caratterizzato da un diametro medio di 6 mm e una lunghezza massima di circa 21 mm, con la composizione (*ultimate analysis*), il contenuto di umidità e il potere calorifico inferiore riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Composizione del pellet

Elemento	Unità	Valore
C	% wt db	50,85
H	% wt db	5,82
O	% wt db	43,2
S	% wt db	0,01
N	% wt db	0,10
Ceneri	% wt db	0,24
Umidità	% wt ar	6,50
PCI	kJ/kg ar	17437
Densità	kg/m ³	690

La portata del pellet in caldaia è calcolata in continuo sulla base delle caratteristiche geometriche della coclea di alimentazione del combustibile e della velocità di rotazione della stessa, utilizzando la seguente formula tratta dalla normativa tecnica [9]:

$$m_{pellet} = \rho \cdot \phi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) \cdot p \cdot n \cdot 60 \quad \text{Eq. 1}$$

dove m_{pellet} è il consumo di pellet (in kg/h), ρ è la sua densità, ϕ è il fattore di riempimento della coclea, D_e e D_i sono rispettivamente i diametri esterno e interno, p è il passo e n è la velocità di rotazione della coclea, la quale è calcolata sulla base del fattore di combustibile che è un parametro di regolazione della caldaia che viene registrato in continuo dal software KWB Comfort Visio. Tale approccio trascura l'inerzia del sistema e pertanto risulta applicabile con accettabile approssimazione solo per un funzionamento in condizioni stazionarie delle caldaia, come nel corso delle prove sperimentali effettuate. A titolo di esempio, la Figura 5 mostra l'andamento del fattore di carico registrato durante la prima giornata di prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità (descritto al Paragrafo 2.5).

La velocità dei ventilatori dell'aria primaria e secondaria di combustione e la rotazione della coclea di alimentazione del combustibile sono automaticamente controllati dal sistema di gestione della caldaia, sulla base di impostazioni definite nel corso dei test propedeutici, tra cui la concentrazione di ossigeno nei fumi impostata al 9% (controllata dalla sonda lambda), e il tiraggio dei fumi in uscita dalla caldaia fissato a 20 Pa. La Tabella 2 riporta le prestazioni termiche ricavate dall'analisi statistica del funzionamento della caldaia durante il primo giorno di prova sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità, rappresentativo anche delle altre giornate di test. In particolare, per ciascuna grandezza la tabella riporta i valori minimo, massimo, media, mediana, 1° e 3° quartile. Dal punto di vista idronico, in condizioni stazionarie la portata di acqua che circola in caldaia è mediamente pari a 43 L/min, mentre la differenza di temperatura mandata – ritorno è compresa tra 8 – 10 °C, in analogia agli comuni impianti di riscaldamento.

L'andamento della temperatura dell'acqua calda per la stessa prova è riportato in Figura 6, che dimostra come la prova sia stata condotta in condizioni idroniche stazionarie; nella figura sono rappresentate sia le temperature dell'acqua misurate in caldaia (inlet-LWB, outlet-KWB) sia quelle misurate nel circuito idronico, mostrando un'ottima correlazione.

La potenza termica netta e al focolare, oltre al rendimento termico della caldaia, sono invece riportati in Figura 7, dove si nota l'andamento ciclico tipico delle caldaie a biomassa per effetto dell'alimentazione del pellet mediante la coclea (i profili delle potenze termiche sono infatti abbastanza sovrapponibili all'andamento del fattore di carico riportato in Figura 5).

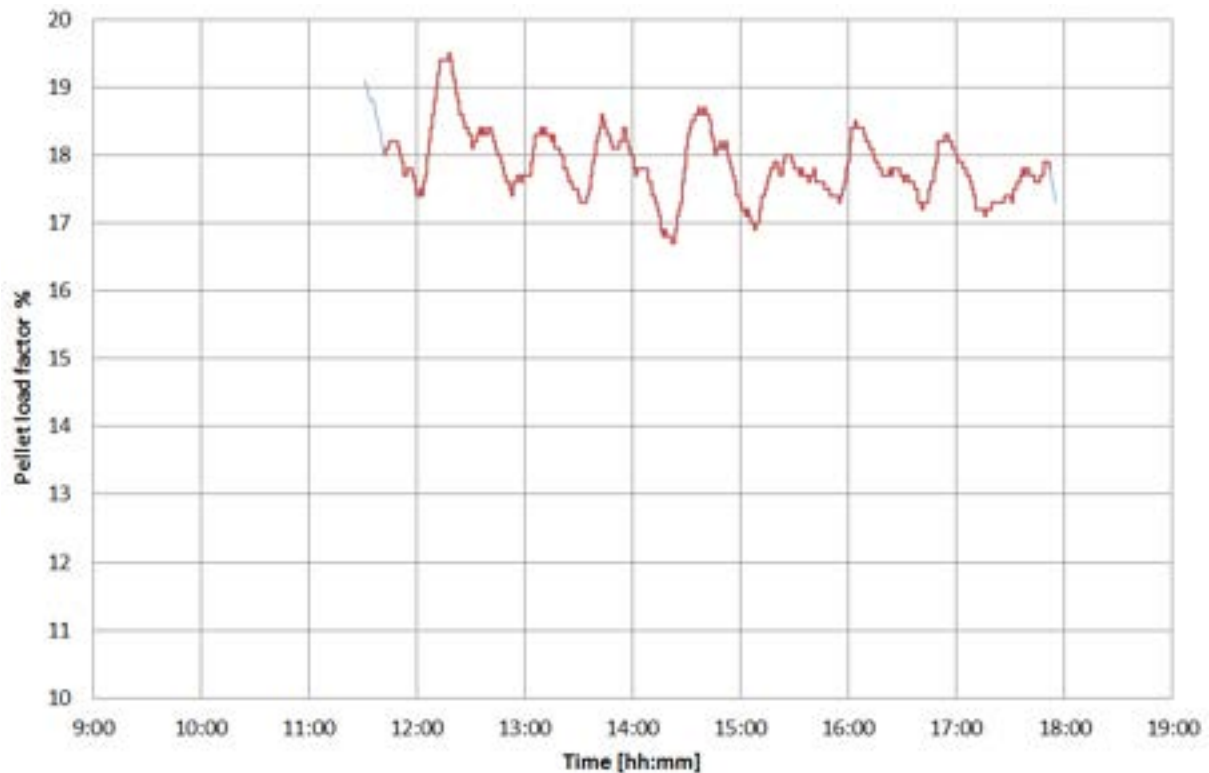


Figura 5. Andamento del fattore di carico della caldaia.
Grafico tratto dalla prima giornata di prove sul filtro a schiume ceramiche a media porosità

Tabella 2. Prestazioni della caldaia

Parametro	Min	1° Q	Media	Mediana	3°Q	Max
Portata d'acqua in caldaia [L/min]	41,0	42,4	43,0	42,5	42,7	44,0
Temperatura dell'acqua di ritorno [°C]	56,3	57,2	57,4	57,4	57,6	59,0
Temperatura dell'acqua di mandata [°C]	65,4	66,0	66,3	66,3	66,6	67,5
Consumo di pellet [kg/h]	5,9	6,2	6,3	6,3	6,4	6,9
Potenza termica netta caldaia [kW]	22,6	25,6	26,3	26,3	27,0	30,8
Rendimento termico caldaia [%]	72,6%	83,9%	86,2%	86,4%	88,7%	98,6%

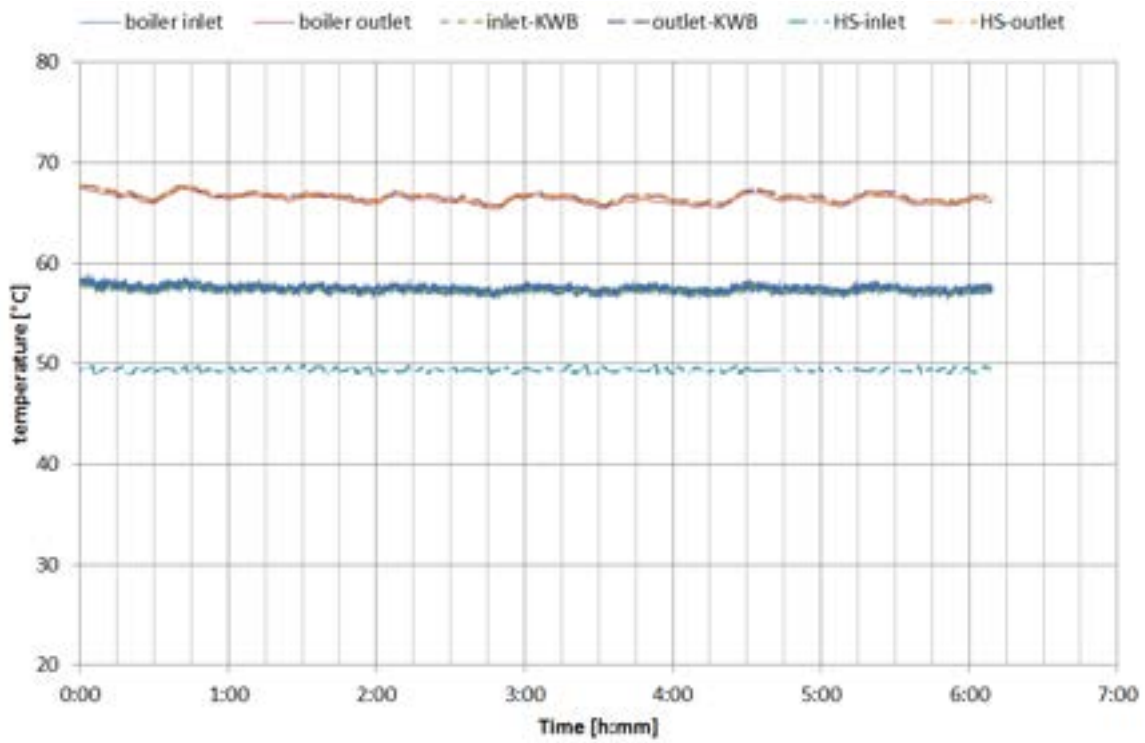


Figura 6. Temperature dell’acqua calda di mandata e ritorno in caldaia e temperature dell’acqua a monte del separatore idraulico di collegamento con il circuito idraulico della Hall tecnologica. In ascissa: tempo, misurato dall’inizio della prova.

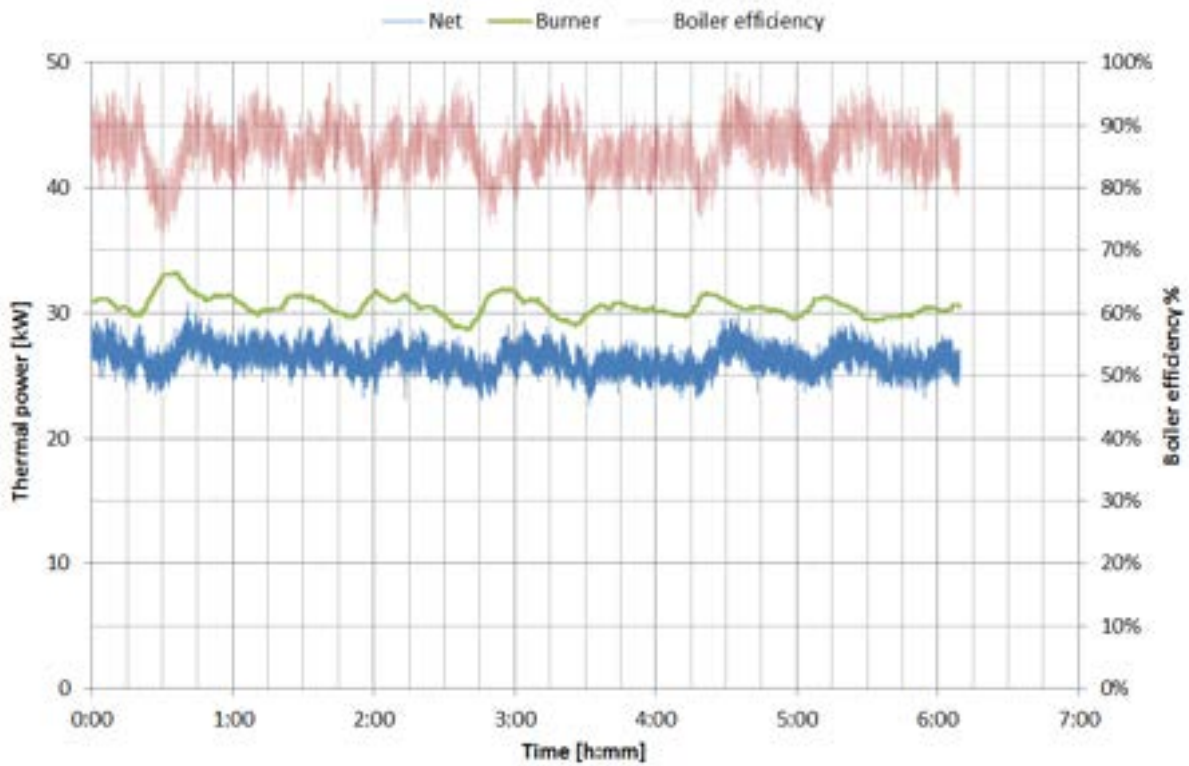


Figura 7. Potenza termica netta (in blu), al focolare (in verde) e rendimento termico della caldaia (in rosso). In ascissa: tempo, misurato dall’inizio della prova

In generale, la strategia di rigenerazione prevede di aumentare la temperatura del riscaldatore a fascia ceramica avvolto intorno al portafiltro da 180°C (a cui è mantenuto nel corso della prova al fine di evitare la condensazione dei fumi) a una temperatura sufficiente a ottenere una rapida riduzione delle perdite di carico nel filtro, compatibilmente con gli aspetti di sicurezza e di corretta operazione del riscaldatore elettrico. I test hanno permesso di selezionare una temperatura di set point pari a 600°C per i filtri wall flow e di 500°C per i filtri a schiume ceramiche. Anche l'altro parametro saliente della rigenerazione, ossia la durata del riscaldamento, è diverso nei due casi: mediamente 20 minuti per il filtro wall flow e 10 minuti per il filtro a schiume ceramiche. Come descritto in dettaglio ai Paragrafi 2.5 e 2.6, il motivo di queste differenze nella temperatura e nei tempi di rigenerazione è essenzialmente dovuto al diverso comportamento dei due tipi di filtri: il filtro a schiume ceramiche è molto più reattivo a rigenerarsi per effetto termico.

L'efficienza di rigenerazione, in termini di riduzione delle perdite di carico del filtro durante la rigenerazione, è calcolata con la seguente formula:

$$\eta_{reg} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta p_1 - \Delta p_i} \cdot 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Dove Δp_i è la perdita di carico del filtro nuovo, mentre Δp_1 and Δp_2 sono le perdite di carico del filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione, rispettivamente, come mostrate in Figura 8. L'efficienza di filtrazione è invece calcolata con la seguente relazione:

$$\eta_{filter} [\%] = 100 - \frac{PM_{valle}}{PM_{monte}} \quad \text{Eq. 3}$$

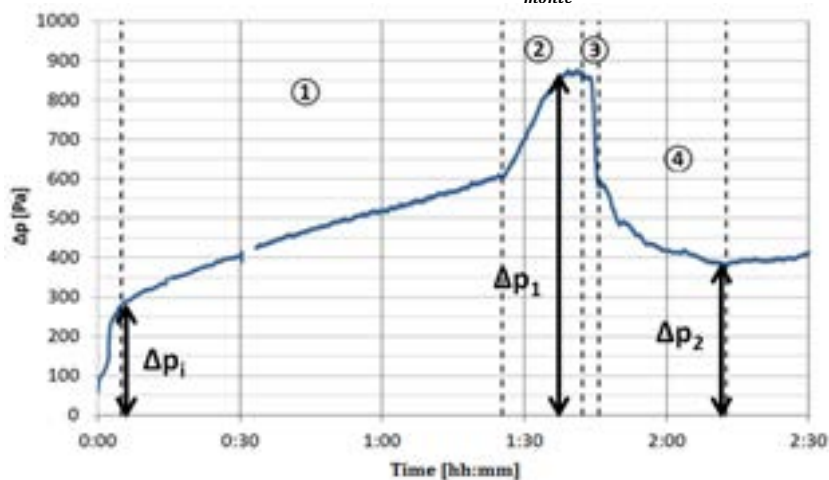


Figura 8. Perdite di carico per il calcolo dell'efficienza di rigenerazione

Dove PM_{monte} e PM_{valle} sono, rispettivamente, il PM misurato a monte del filtro (con l'impattore) e a valle (con il contaparticelle PPS).

Nella maggior parte dei test sono effettuati un paio di campionamenti giornalieri con l'impattore, uno al mattino e l'altro al pomeriggio, contemporaneamente alle misure con il contaparticelle. I valori di PM_{valle} in Eq. 3 corrispondono alle medie delle acquisizioni del PPS durante le misure dell'impattore, in modo da avere diretta corrispondenza delle grandezze per il calcolo dell'efficienza di filtrazione. Ci sono stati alcuni casi nei quali la misura con l'impattore non è avvenuta in contemporanea con quella del PPS; in tali situazioni, il valore di PM_{valle} utilizzato per il calcolo dell'efficienza di filtrazione è la media delle acquisizioni del PPS nell'arco dell'intera giornata di prova.

2.3 Analisi del PM e delle principali specie chimiche presenti nei fumi

Il particolato emesso dalla combustione del pellet è stato misurato da un impattore multistadio, i cui campionamenti hanno mostrato una buona ripetibilità dei risultati, rappresentati a titolo esemplificativo in Figura 9. Come si nota, la tipica distribuzione è PM₁ per più del 90% e PM_{2,5} per il 98%. Tali misure sono confermate da analisi preliminari SEM condotte dall'Università di Salerno nel corso delle precedenti annualità, le quali hanno mostrato che il PM prodotto dalla combustione del pellet ha un diametro medio di circa 50 nm [10].

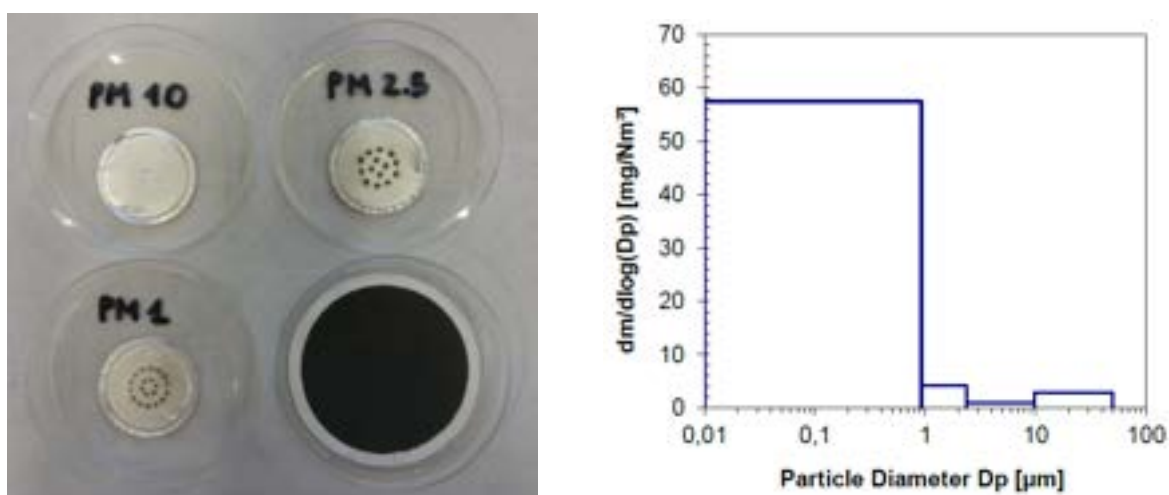


Figura 9. PM misurato dall'impattore (a sinistra) e concentrazione in massa vs. diametro aerodinamico (a destra)

La composizione indicativa dei fumi è riportata in Tabella 3, assieme alle principali temperature (in canna fumaria, a monte e a valle del filtro, a monte del contaparticelle PPS). Nel corso di alcune prove, la temperatura dei fumi a monte del filtro è stata maggiore di quella misurata a valle, anche per via della temperatura impostata manualmente per la fascia riscaldante a monte del filtro. Come precedentemente indicato, il motivo per cui si sono usate le fasce scaldante lungo la linea di derivazione contenente il filtro era legato all'esigenza di evitare la formazione di condensa nei fumi campionati.

Tabella 3. Valori statistici delle temperature dei fumi e delle principali specie gassose e del PM misurate a monte e a valle del filtro. CO e TOC sono riferiti al 13% O₂ db, i valori massici sono calcolati in condizioni normali

Parametro	Min	1° Q	Media	Mediana	3°Q	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	113,9	117,1	118,5	118,5	120	122,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	164,1	184,1	194	200,6	201,4	203,2
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	157,1	168,4	170,5	171,7	172,3	173,1
Temperatura dei fumi a monte PPS [°C]	130,6	161,8	162	162,8	164,1	184,7
O ₂ a monte del filtro [%]	8	9,6	10	10	10,4	11,8
CO ₂ a monte del filtro [%]	9,9	10,4	10,7	10,7	10,9	11,7
CO a monte del filtro [mg/Nm ³] @13% O ₂ d.b.	175,5	404,9	663,6	572,7	817,5	2778,2
TOC a monte del filtro [mg/Nm ³] @13% O ₂ d.b.	0,6	5,6	28,2	15	37,1	147,9
PM medio a monte del filtro [mg/Nm ³]	101					
O ₂ a valle del filtro [%]	5,1	10,2	10,6	10,6	10,9	13,3
CO ₂ a valle del filtro [%]	6,3	9,8	10,2	10,2	10,6	12,1
CO a valle del filtro [mg/Nm ³] @13% O ₂ d.b.	120,1	359,3	621,1	528,6	795,3	2896,4
PM a valle del filtro [mg/Nm ³] @13% O ₂ d.b.	0,2	54,4	68,1	66,9	81,2	138,2
Δp filtro [Pa]	0,2	34,1	64,6	63,2	86,1	132

Le concentrazioni delle principali specie chimiche contenute nei fumi a monte e a valle del filtro sono quindi riportate nelle figure seguenti: l' O₂ in Figura 10 , la CO₂ in Figura 11, il CO in Figura 12 ed i TOC (solo a monte del filtro, misurati in canna fumaria) in Figura 13. Gli andamenti rilevati sperimentalmente nel corso delle

altre prove sono qualitativamente analoghi. Come si può vedere, le concentrazioni a monte e a valle del filtro sono molto simili, in alcuni casi (ad esempio per CO e CO₂) le differenze si spiegano con i diversi tempi di campionamento degli analizzatori.

Un importante aspetto che si è dovuto analizzare nel corso della campagna sperimentale è stato il corretto inserimento del contaparticelle PPS nella linea di derivazione di prova filtri. Infatti, lo strumento aspira i fumi dalla linea di derivazione tramite un sistema ad eiettore con aria compressa a 1,5 bar_g di qualità strumentale. La portata di aria è stata misurata con il contaparticelle installato nel banco prova, ed è stato verificato che è dello stesso ordine di grandezza della portata di fumi aspirati dalla canna fumaria. Il suo contributo va sommato alla portata dei fumi per determinare il flusso complessivo aspirato dalla pompa volumetrica a valle della linea.

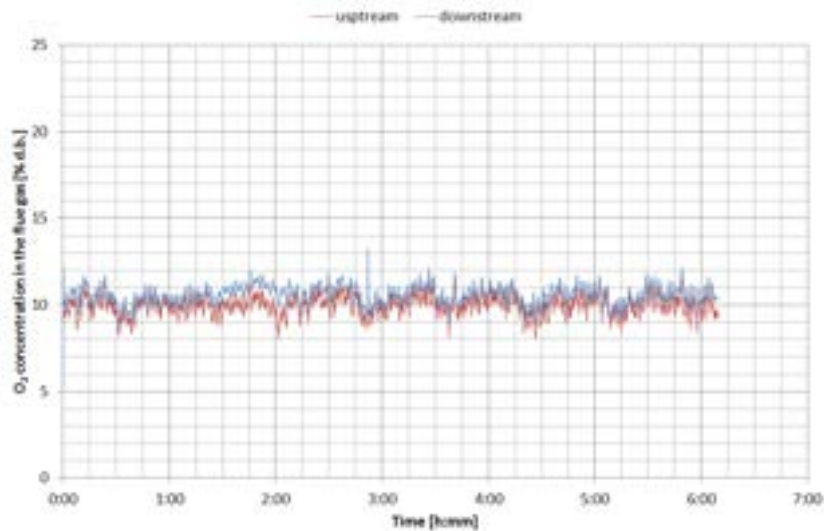


Figura 10. Confronto tra le concentrazioni di O₂ nei fumi misurate a monte e a valle del filtro.
In ascissa: tempo, misurato dall'inizio della prova (prova del 2/8/2016)

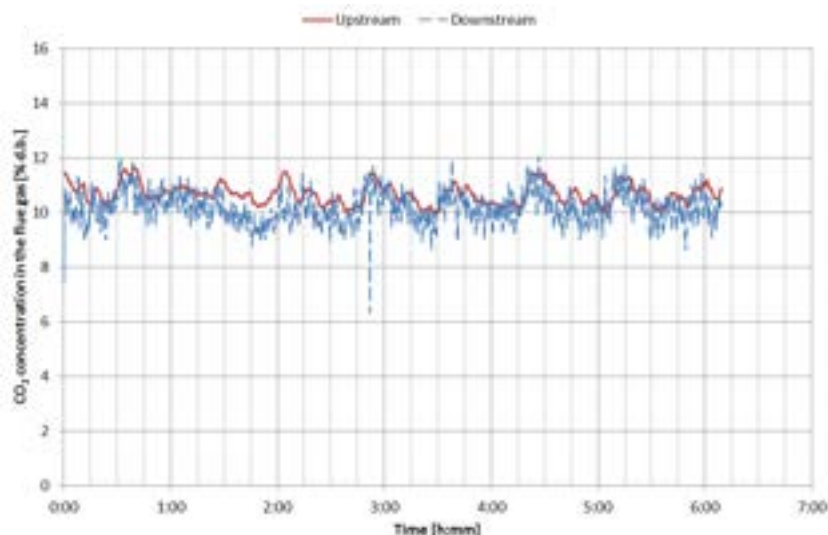


Figura 11. Confronto tra le concentrazioni di CO₂ nei fumi misurate a monte e a valle del filtro.
In ascissa: tempo, misurato dall'inizio della prova (prova del 2/8/2016)

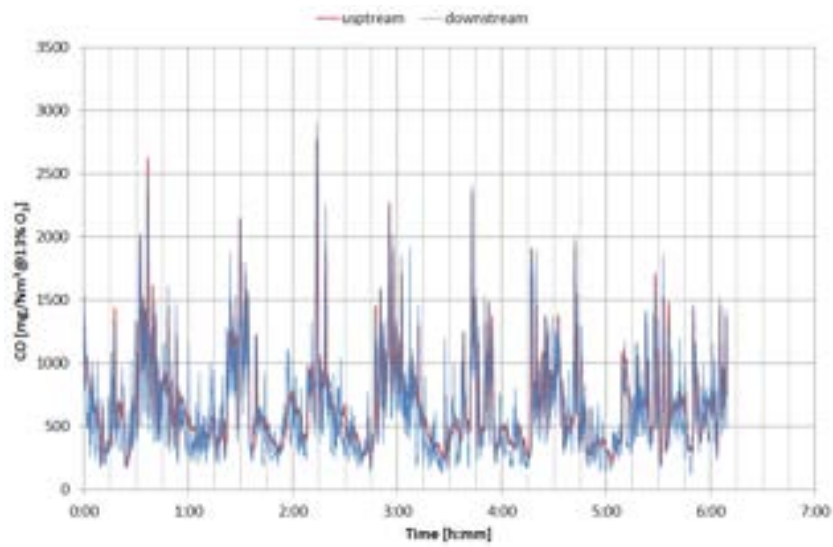


Figura 12. Confronto tra le concentrazioni di CO nei fumi misurate a monte e a valle del filtro. In ascissa: tempo, misurato dall'inizio della prova (prova del 2/8/2016).

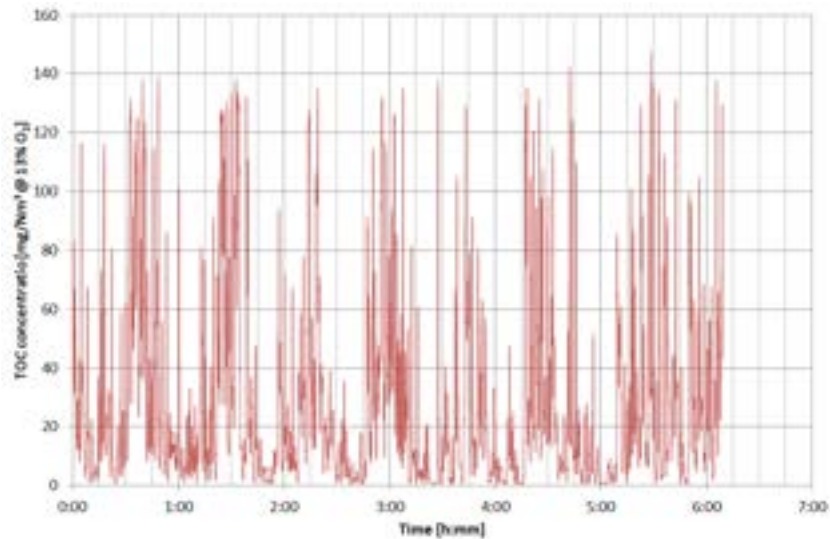


Figura 13. Concentrazioni di TOC nei fumi misurate a monte del filtro. In ascissa: tempo, misurato dall'inizio della prova (prova del 2/8/2016)

2.4 Filtro non catalitico a schiume ceramiche ad alta porosità

L'Università di Salerno ha fornito n°1 prototipo di filtro non catalitico costituito da schiume ceramiche in SiC su allumina in geometria radiale dal diametro di 26 mm e lunghezza di 140 mm. La lunghezza utile di filtrazione è pari a 120 mm (in analogia ai precedenti filtri wall flow testati), mentre i restanti 20 mm sono ricoperti da un rivestimento ceramico che serve per ancorare il filtro nel portafiltro tramite il materassino intumescente Interam. I pori hanno un diametro medio di circa 2 mm e il filtro appare come in Figura 14, che mostra come esso sia composto da elementi cilindrici porosi, collegati tra loro tramite un'apposita pasta ceramica. Uno di questi elementi è rivestito lateralmente dalla pasta ceramica che ha la funzione di supporto per il materassino intumescente.

Il filtro è caratterizzato da una geometria radiale del flusso dei gas, nel senso che i gas entrano lungo le pareti laterali, attraversano il filtro ed escono dal foro inferiore del diametro di 8 mm. L'intercapedine di 8 mm esistente tra la parte interna del portafiltro e il filtro assicura un adeguato flusso dei filtri senza influenzarne le perdite di carico. Il filtro è vincolato al suo alloggiamento tramite un'adeguata battuta inferiore realizzata nel portafiltro e dal materassino intumescente che, una volta trattato in muffola, garantisce il corretto fissaggio e centraggio del filtro. Dal punto di vista della resistenza meccanica, il filtro è sufficientemente robusto per subire diversi cicli termici a temperature prossime a 500°C senza danneggiarsi.

La Figura 15 mostra un confronto tra le perdite di carico e le emissioni di PM fine a valle del filtro misurate nel corso dell'intero ciclo di prove, che si è protratto complessivamente per più di 15 ore (distribuite su 4 giorni). La portata di aspirazione dei fumi nella linea di derivazione è stata mediamente pari a 14 l/min. Come si può vedere, le perdite di carico si sono mantenute costantemente sotto 100 Pa e le oscillazioni non sono tanto dovute all'accumulo del particolato nel filtro, quanto piuttosto alle regolazioni manuali della pompa di aspirazione fumi, dovute all'aumento delle resistenze al moto dei fumi per il progressivo intasamento del filtro di guarda in fibra minerale installato a monte della pompa per evitare l'ingresso di polveri nella pompa. Anche questo aspetto dimostra come quasi la totalità del particolato attraversasse il filtro senza esserne bloccato.



**Figura 14. Filtro a schiume ceramiche ad alta porosità.
Sezione laterale (in alto) e in prospettiva con il foro di uscita dei fumi (in basso)**

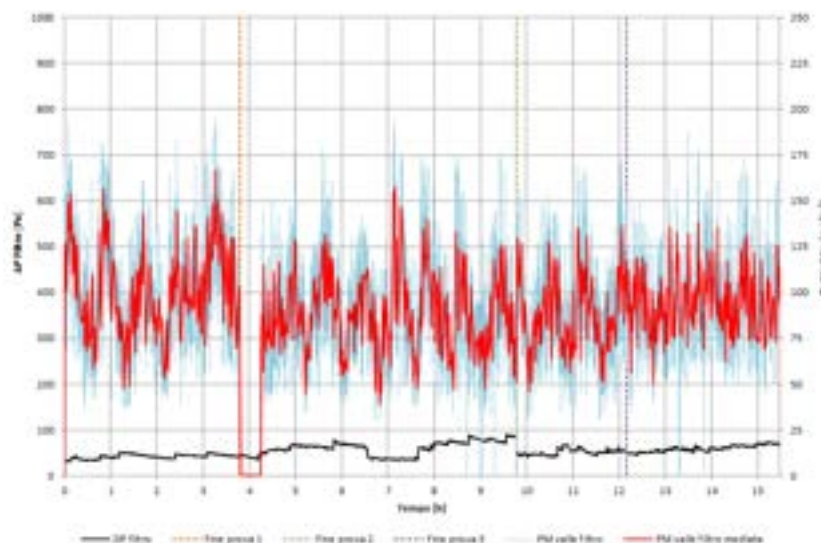


Figura 15. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e le emissioni di PM fine (in azzurro) misurate nelle prove sperimentali sul filtro a schiume ceramiche ad alta porosità. La linea rossa rappresenta le emissioni di PM mediate ogni minuto

L’accentuata variabilità del PM rilevata dal PPS è principalmente dovuta al funzionamento della caldaia. Per agevolare la lettura del grafico con un andamento più regolare, si è plottato un profilo delle emissioni di PM mediato ogni 1 minuto (linea rossa in Figura 15). Il “buco” di dati intorno all’ora 4 in Figura 15 è dovuto al ritardato azionamento del PPS per problemi tecnici poi risolti.

I risultati dettagliati sulle emissioni di PM sono riassunti in Tabella 4, dove sono altresì confrontati con le misure di PM effettuate con l’impattore a monte del filtro e dove è indicata l’efficienza di filtrazione per ogni misura dell’impattore. Una possibile giustificazione dei valori negativi di efficienza di filtrazione è legata all’assenza di contemporaneità della misura dell’impattore rispetto alle rilevazioni del PPS, ad esempio nella prima misura l’impattore è stato fatto campionare 2 ore circa prima delle acquisizioni del PPS. Oltre alla debolissima capacità del filtro in esame di trattenere il particolato, l’efficienza negativa è in buona parte dovuta alla minore produzione di PM da parte della caldaia durante l’acquisizione dell’impattore. Al di là di questo effetto, si riscontra come l’efficienza di filtrazione del filtro a schiume ceramiche di grande porosità sia troppo bassa, sempre inferiore al 6%.

Pertanto, in base ai risultati delle prove sperimentali condotte, questo tipo di filtro non è risultato adeguato per l’applicazione in esame.

Tabella 4. Efficienza di filtrazione del filtro a schiume ceramiche ad alta porosità

N° misura	Durata misura impattore [min]	PM monte [mg/Nm ³]	PM valle [mg/Nm ³]	Efficienza filtrazione %
1	40	108,7	115,1	negativa
2	30	95,5	93,7	1,9%
3	30	99,4	98,0	1,4%
4	30	113,7	107,6	5,3%
5	30	93,3	97,9	negativa

2.5 Filtri non catalitici a schiume ceramiche a media porosità

La seconda classe di filtri a schiume ceramiche forniti dall'Università di Salerno è costituita da prototipi di filtro non catalitico costituiti da una matrice in OBSiC a celle aperte in geometria radiale aventi porosità pari a 65 ppi (*pores per inch*), di forma cilindrica con diametro di 26 mm e lunghezza 135 mm. La lunghezza utile di filtrazione è pari a 120 mm (in analogia ai precedenti filtri analizzati), mentre i restanti 15 mm sono ricoperti da un rivestimento ceramico per ancorare il filtro nel suo alloggiamento, con una soluzione analoga al filtro ad alta porosità descritto al Paragrafo precedente.

La Figura 16 mostra la struttura dei filtri nuovi: essi sono composti da 9 elementi cilindrici, uniti da una pasta ceramica, di cui quello all'estremità inferiore rivestito lateralmente da un materiale ceramico al fine di garantire l'alloggiamento nel portafiltro come sopra indicato. Data la geometria radiale del flusso gassoso, i fumi entrano lungo le pareti laterali porose ed escono dal foro realizzato alla base del filtro e caratterizzato da un diametro di 8 mm.

Si è riscontrato che una delle principali criticità di questo tipo di filtri è legato alla loro elevata fragilità strutturale, in quanto il materiale costituente la matrice e l'elevato numero di pori richiedono grande cura per evitare sbriciolamenti e fratture. Inoltre, si nota come il profilo assiale del filtro non sia rettilineo, tuttavia questa caratteristica non pregiudica il funzionamento.



Figura 16. Filtro a schiume ceramiche a media porosità nuovo. Vista con il foro di uscita dei fumi (a sinistra) e ingrandimento delle pareti porose (a destra)

Sono stati testati n°2 filtri di tale tipologia: il primo per un solo ciclo, che si è concluso una volta raggiunta una perdita di carico pari a 1000 Pa, e il secondo per n°7 cicli. Le prove sul primo filtro sono state propedeutiche per le prove sul secondo filtro della stessa tipologia. La portata di aspirazione dei fumi è stata mediamente pari a 13 l/min.

In Figura 17 sono rappresentate le perdite di carico e le emissioni di particolato fine all'uscita del primo filtro. La linea rossa rappresenta le emissioni di PM mediate ogni 2 minuti, al fine di ottenere un andamento più regolare delle acquisizioni originali con un time step di 1 secondo. Nella medesima figura è altresì rappresentata la linea di tendenza che meglio approssima i dati sperimentali. Si tratta di una curva con andamento esponenziale descritta dalla seguente formula:

$$\Delta p_{interp} = 12,267 \cdot e^{0,3436 \cdot \tau} \quad \text{Eq. 4}$$

Dove τ è il tempo durante la prova espresso in ore. La curva esponenziale interpola bene il primo tratto, caratterizzato da perdite di carico inferiori a 80 Pa, e il tratto finale, per Δp comprese tra 500 Pa e 900 Pa, e complessivamente l'indice di correlazione è del 99%.

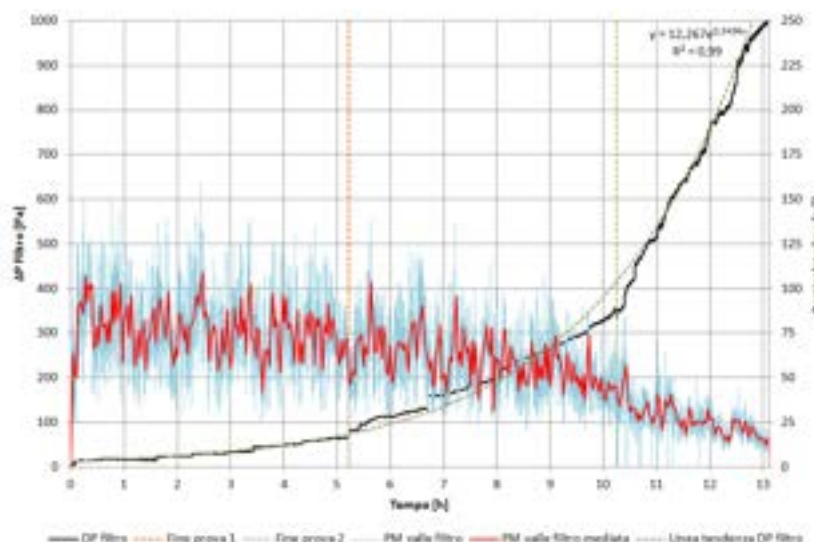


Figura 17. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e le emissioni di PM fine (in azzurro) misurate nelle prove sul primo filtro a schiume ceramiche a media porosità. La linea rossa rappresenta le emissioni di PM mediate ogni 2 minuti, mentre la linea esponenziale è calcolata per interpolazione delle perdite di carico

Anche in questo caso, le oscillazioni sono principalmente dovute ai meccanismi di combustione della biomassa, tuttavia, a differenza del filtro ad alta porosità, tendono a ridursi all'aumentare delle perdite di carico le quali aumentano con il tempo ad indicare che il filtro è in grado di trattenere il particolato. L'aumento dell'efficienza di filtrazione agisce non solo in termini di maggiore abbattimento del PM, bensì anche in termini di minori oscillazioni. Queste dinamiche sono ben descritte dall'efficienza di filtrazione, che da poco più del 7% iniziale supera il 61% quando il filtro raggiunge una perdita di carico pari a 1000 Pa, come riportato in Tabella 5.

Tabella 5. Efficienza di filtrazione del primo filtro a schiume ceramiche a media porosità

N° misura	Durata misura impattore [min]	PM monte [mg/Nm ³]	PM valle [mg/Nm ³]	Efficienza filtrazione %
1	30	103,9	96,3	7,3%
2	30	103,8	85,0	18,1%
3	30	98,6	71,9	27,1%
4	30	85,0	38,8	54,3%
5	30	85,8	32,9	61,7%

Sulla base dei risultati ottenuti con il primo filtro a media porosità, si è avviato un nuovo ciclo di prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità. Il ciclo di prove è complessivamente durato 38 ore, suddivise in 6 giorni. La portata dei fumi nel filtro è stata mediamente pari a 14 L/min.

In questo caso, si è voluto analizzare il comportamento del filtro nel corso ai cicli di rigenerazione, la quale era indotta aumentando la temperatura di set point del riscaldatore da 180°C a 500°C e mantenendo questo valore in media per 10 minuti. Il risultato è riportato in Figura 18: il secondo filtro OBSiC a schiume ceramiche a media porosità è stato sottoposto a 7 cicli di rigenerazione, con profili delle perdite di carico complementari rispetto alle emissioni di PM. Le prove hanno evidenziato altri due risultati: la durata dei cicli tende a ridursi col tempo, e la prima parte della rigenerazione, caratterizzata dalla brusca riduzione delle perdite di carico,

avviene rapidamente e con elevate efficienze, dato che le perdite di carico si riportano a valori prossimi a quelli iniziali.

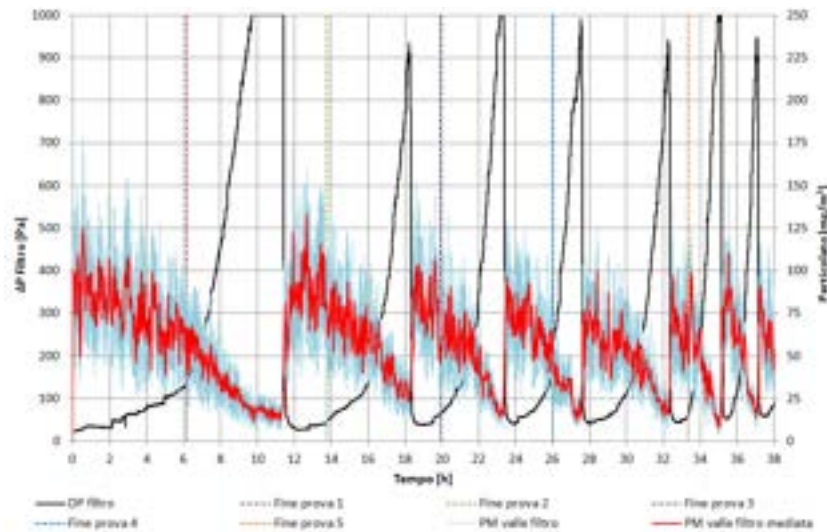


Figura 18. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e le emissioni di PM fine (in azzurro) misurate nelle prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità. La linea rossa rappresenta le emissioni di PM mediate ogni 2 minuti

Per maggiore completezza di esposizione dei risultati, la Figura 19 riporta un confronto tra le perdite di carico del filtro e le temperature dei fumi in uscita dal filtro e della superficie esterna del portafiltro, mentre la Figura 20 mostra il confronto tra le suddette temperature e l'emissione di PM a valle del filtro, da cui si nota la complementarietà tra le perdite di carico e le temperature, e la diretta correlazione tra le temperature e le perdite di carico durante la rigenerazione.

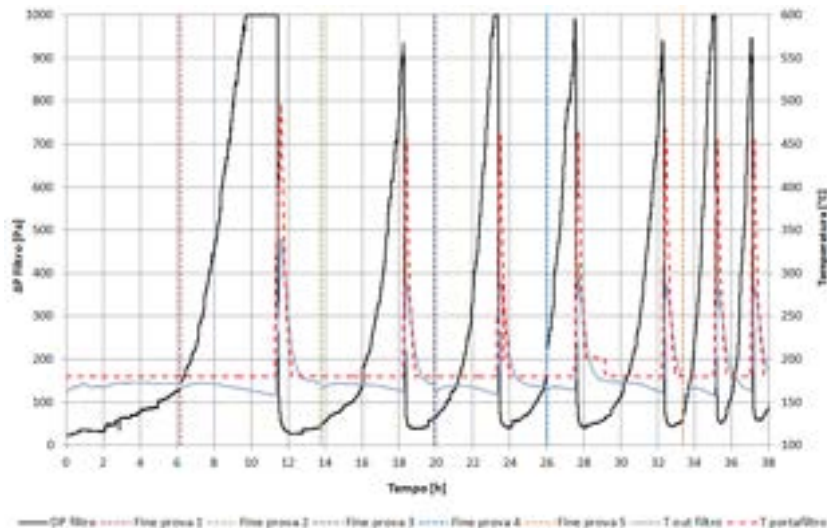


Figura 19. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e le principali temperature misurate nelle prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità

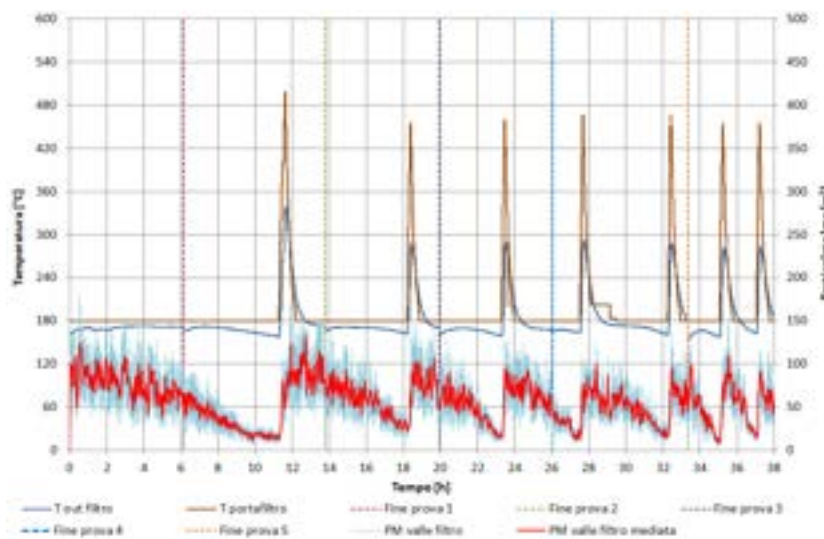


Figura 20. Confronto tra l’emissione di particolato a valle del filtro e le principali temperature misurate nelle prove sul secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità

Le prestazioni in termini di emissione di PM sono sintetizzate in Tabella 6.

Tabella 6. Efficienza di filtrazione del secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità

N° misura	Durata misura impattore [min]	PM monte [mg/Nm ³]	PM valle [mg/Nm ³]	Efficienza filtrazione %
1	30	105,5	103,4	2,0%
2	30	96,5	84,6	12,3%
3	30	95,7	18,2	81,0%
4	30	105,0	86,2	17,9%
5	30	96,1	41,5	56,8%
6	30	92,1	72,5	21,3%
7	30	119,9	68,4	42,9%
8	40	96,9	35,1	63,8%
9	40	91,3	40,8	55,3%
10	30	119,6	61,7	48,4%
11	30	109,6	63,9	41,7%

A parte la misura 3, nella quale si è raggiunta un’efficienza di rigenerazione dell’81% poiché per quasi 2 ore si è lasciato lavorare il filtro oltre i 1000 Pa (limite di acquisizione del trasduttore di pressione in dotazione nel banco prova), in tutti gli altri casi la massima efficienza di filtrazione è compresa tra il 55% e il 65% (si è avviato il riscaldatore quando le perdite di carico superavano i 900 Pa). Un altro aspetto riguarda la riduzione nel tempo della differenza dell’efficienza di rigenerazione all’inizio e alla fine del ciclo. Infatti, se nel primo ciclo l’efficienza iniziale si attestava intorno al 2% (valore molto basso), nei cicli successivi saliva dal 17% fino 30%, mentre l’efficienza di filtrazione a fine ciclo si riduceva dall’81% al 50% circa, a dimostrazione che il filtro tendeva a degradare le proprie prestazioni.

A riprova di tale andamento, la durata del ciclo si riduce dalle 12 ore iniziali (anche se sarebbe più corretto rimodularle a 10 ore, in quanto come indicato nel primo ciclo le perdite di carico hanno superato la soglia dei 1000 Pa per quasi due ore), alle 2 ore del 7° ciclo, e le perdite di carico a inizio ciclo sono progressivamente aumentate da 27 Pa (alla fine del 1° ciclo) a 58 Pa (alla fine del 7° ciclo).

Questi e altri risultati, quali la durata di azionamento del riscaldatore elettrico, la durata della rigenerazione, le perdite di carico a inizio e fine rigenerazione, le temperature dei fumi in uscita del filtro a inizio riscaldamento e a inizio rigenerazione, sono riportati in Tabella 7. In particolare, la temperatura dei fumi a inizio rigenerazione si discosta di pochi gradi dalla temperatura di inizio riscaldamento, a dimostrazione della

rapidità con cui la rigenerazione si innesca, a differenza dei filtri wall flow (vd. Paragrafo 2.6). Fa eccezione il primo ciclo, però in questo caso il motivo può essere legato al fatto che il filtro stava lavorando ben oltre 1000 Pa, e la maggiore quantità di particolato accumulatosi potrebbe aver richiesto maggiore energia per la rigenerazione.

Tabella 7. Prestazioni del secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità durante la rigenerazione

Tipo filtro	Schiume ceramiche a celle aperte a media porosità non catalizzato						
	1	2	3	4	5	6	7
N° rigenerazione							
Durata ciclo [hh:mm:ss]	12:12:36	06:40:08	05:04:07	04:08:23	04:43:27	02:38:12	02:03:52
Durata azionamento riscaldatore [hh:mm:ss]	00:20:34	00:10:22	00:09:58	00:10:00	00:10:00	00:09:49	00:10:06
Durata rigenerazione [hh:mm:ss]	00:42:19	00:37:02	00:35:56	00:32:57	00:25:59	00:18:26	00:26:16
Tempo azionamento riscaldatore / tempo ciclo	2,8%	2,6%	3,3%	4,0%	3,5%	6,2%	8,2%
Tempo rigenerazione / tempo ciclo	5,8%	9,3%	11,8%	13,3%	9,2%	11,7%	21,2%
ΔP iniziale filtro [Pa]	23	23	23	23	23	23	23
ΔP inizio riscaldamento [Pa]	>1000	913	>1000	952	914	>1000	908
ΔP inizio rigenerazione [Pa]	>1000	935	>1000	991	942	>1000	947
ΔP fine rigenerazione [Pa]	27	38	40	40	44	52	58
Riduzione ΔP durante la rigenerazione [Pa]	>1000	897	>1000	951	898	>1000	889
Efficienza di rigenerazione	99,6%	98,4%	98,3%	98,2%	97,7%	97,0%	96,2%
T fumi uscita filtro a inizio riscaldamento [°C]	158	163	159	164	161	158	163
T fumi uscita filtro a inizio rigenerazione [°C]	201	163	164	163	161	163	165
T max fumi all'uscita filtro [°C]	339	287	288	292	287	282	283

In tutti i cicli, la massima temperatura dei fumi all'uscita del filtro è stata prossima a 300°C, ad eccezione del primo ciclo dove è salita a 340°C per i motivi sopra indicati. A dispetto della sensibile riduzione nel tempo ciclo, l'efficienza di rigenerazione si è mantenuta su valori molto elevati, superiori al 99% nel primo ciclo e al 96% nel 7° ciclo. Il confronto tra l'efficienza di rigenerazione e la durata dei cicli è riportato in Figura 21.

Al termine delle prove, il filtro si presentava come mostrato in Figura 22 nell'alloggiamento all'interno del portafiltro. Interessante è il confronto visivo i due filtri a media porosità estratti dal portafiltro al termine dei rispetti cicli di prove: il primo filtro, Figura 23, aveva raggiunto la soglia impostata di perdite di carico (1000 Pa, limite di misura del trasduttore di pressione utilizzato), mentre il secondo filtro, Figura 24, era a circa metà del ciclo e quindi con $\Delta p < 1000$ Pa. Come mostrano le due figure, nel primo caso il carico di particolato depositato è ben maggiore, inoltre nel secondo caso il deposito più evidente si riscontra nella parte superiore del filtro (con sezione trasversale occlusa dal rivestimento ceramico di colore bianco). In entrambi i casi, i filtri si sono rotti durante l'estrazione dal portafiltro, a dimostrazione della loro fragilità.

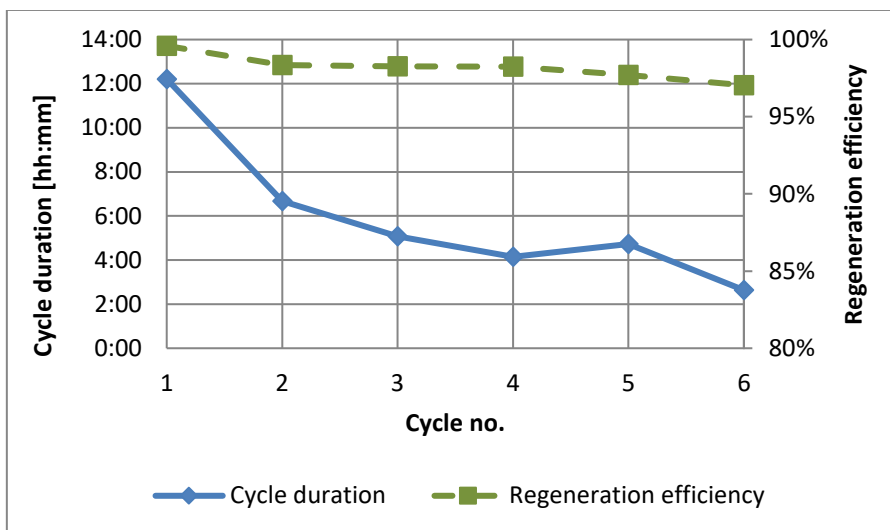


Figura 21. Durata del ciclo (linea continua) ed efficienza di rigenerazione (linea tratteggiata) per il secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità

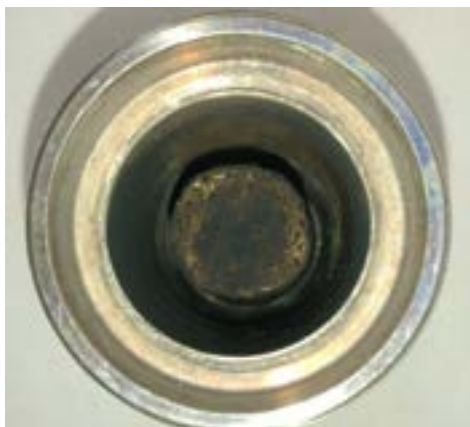


Figura 22. Vista dall'alto del secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità nel suo alloggiamento al termine delle prove sperimentali



Figura 23. Primo filtro a schiume ceramiche a media porosità al termine delle prove



Figura 24. Secondo filtro a schiume ceramiche a media porosità al termine delle prove

2.6 Confronto con i filtri catalitici wall flow

Nel corso della presente annualità è stato provato un ulteriore prototipo di filtro wall flow catalitico, analogo a quelli già analizzati durante il precedente PAR. Il filtro ha forma cilindrica di diametro 30 mm e lunghezza 125 mm, ed è costituito da una matrice in SiC ricavata da un monolite commerciale di produzione Pirelli Ecotechnology. Su tale base i ricercatori dell'Università di Salerno hanno aumentato la porosità iniziale tramite processi chimici e successivamente hanno depositato il catalizzatore CuFe_2O_4 , che ha portato a una porosità finale di circa $17 \mu\text{m}$. La concentrazione in massa del catalizzatore al 20% è risultata un buon compromesso tra le prestazioni di filtrazione e le caratteristiche meccaniche nel corso delle precedenti annualità [11 - 12].

Il filtro wall flow è stato inserito nel portafiltro dopo essere stato avvolto dal materassino intumescente Interam®, come mostrato in Figura 25. Il dispositivo così assemblato è stato poi trattato in muffola per consentire l'espansione del materassino al fine di ottenere la tenuta ai fumi tra il filtro e il portafiltro prima del suo inserimento nel banco prova.



Figura 25. Filtro wall flow (a sinistra), portafiltro e materassino intumescente (in centro) e vista dall'alto del filtro inserito nel portafiltro (a destra)

Il tipico andamento delle perdite di carico dei filtri wall flow è riportato in Figura 26.

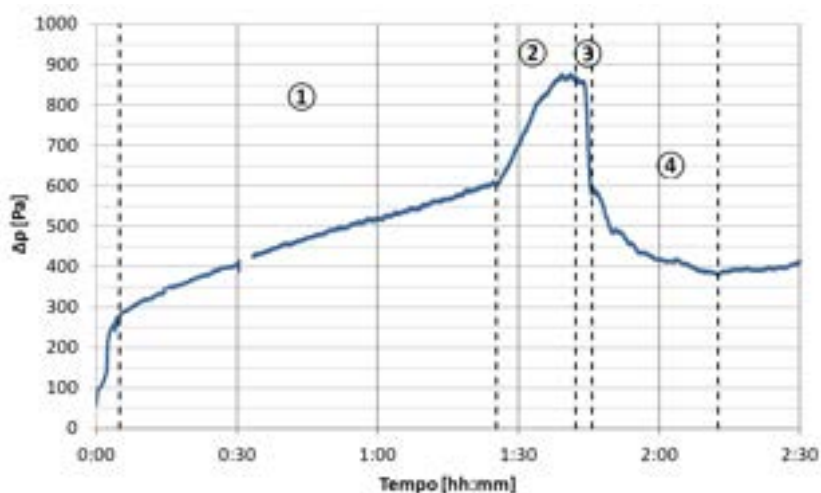


Figura 26. Tipico andamento delle perdite di carico nei filtri wall flow

Nei primi minuti di prova, le perdite di carico rispecchiano la resistenza al moto caratteristica della struttura del filtro, che è principalmente legata alle dimensioni dei pori. Le perdite di carico tendono quindi a crescere gradualmente per effetto della progressiva deposizione del particolato (*depth filtration*, fase 1 del diagramma di Figura 26). Raggiunto un valore critico di Δp , si ha un rapido cambio di pendenza nel diagramma delle

perdite di carico in quanto lo stesso particolato depositato contribuisce alla rimozione del PM entrante (*cake filtration*, fase 2 del diagramma di Figura 26). La rigenerazione del filtro comporta un brusco calo delle perdite di carico (fase 3), cui segue una fase in cui i Δp decrescono più lentamente prima dell'inizio di un nuovo ciclo. Questa fase (fase 4, assimilabile alla fase 1) è in parte dovuta alle minori temperature e quindi alle minori velocità dei fumi e tende ad accorciarsi all'aumentare delle rigenerazioni [13].

Nella trattazione che segue, il confronto è fatto tra il filtro wall flow e il filtro a schiume ceramiche a media porosità in quanto, come si è visto nel Paragrafo 2.4, il filtro ad elevata porosità ha mostrato prestazioni inadeguate in termini di capacità di abbattimento del PM.

Il ciclo di prove sul filtro wall flow ha analizzato 6 rigenerazioni ed ha avuto durata complessiva pari a 16^h30' suddivisi in 4 giorni, la metà circa rispetto alle quasi 35 ore corrispondenti a 6 cicli con il filtro a schiume ceramiche a media porosità descritto nel Paragrafo precedente.

Le perdite di carico sono confrontate con le emissioni di PM in Figura 27, e in Figura 28 con le temperature dei fumi all'ingresso e all'uscita del filtro e la temperatura della parete esterna del portafiltro. Queste temperature sono inoltre confrontate in Figura 29 con la concentrazione di PM. La portata di fumi aspirata dalla canna fumaria e entrante nel filtro è mediamente pari a 15 L/min.

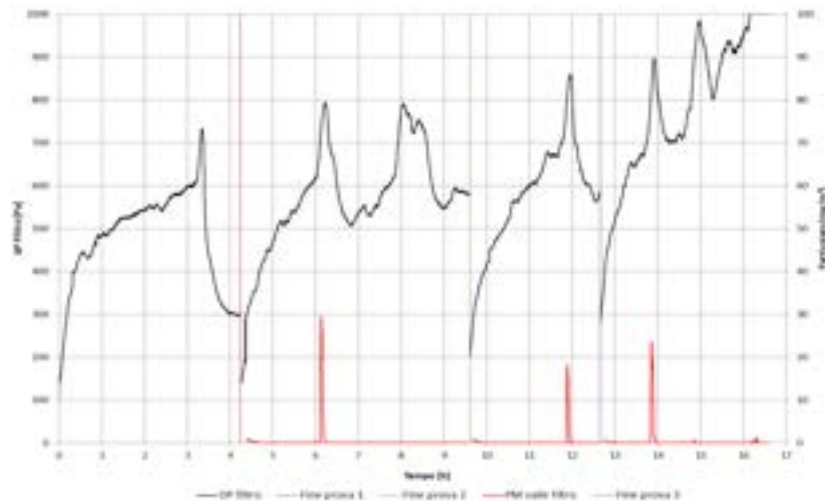


Figura 27. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e delle emissioni di PM fine (in rosso) misurate nelle prove sperimentali sul filtro catalitico wall flow

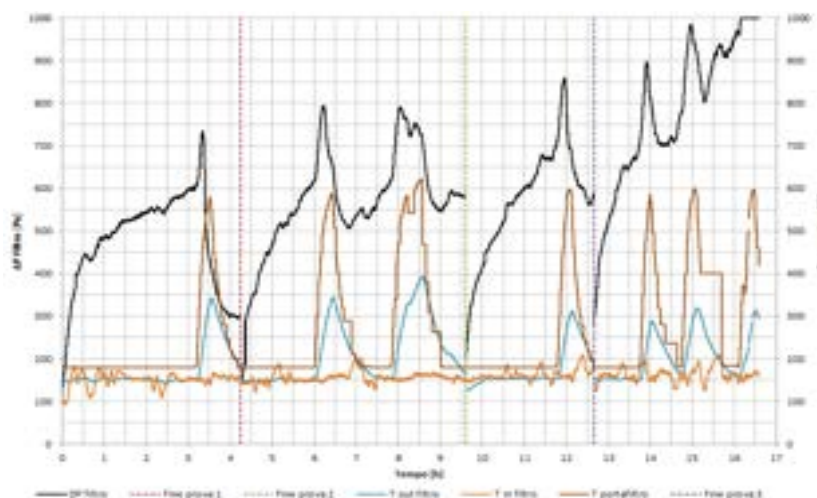


Figura 28. Confronto tra le perdite di carico (in nero) e le principali temperature misurate nelle prove sul filtro catalitico wall flow

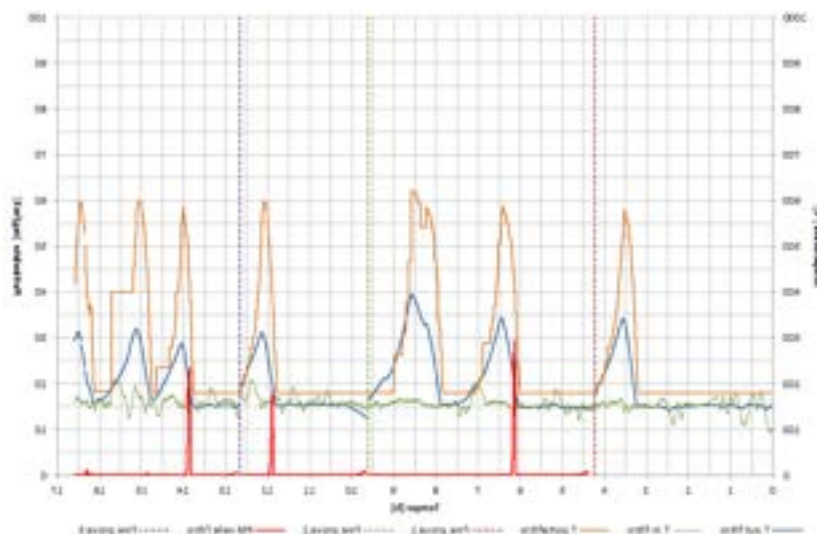


Figura 29. Confronto tra l’emissione di particolato a valle del filtro (in rosso) e le principali temperature misurate nelle prove sul filtro catalitico wall flow

La rigenerazione è ottenuta aumentando la temperatura di set point del riscaldatore da 180°C (valore di soglia mantenuto in modo da prevenire la condensa dei fumi) a 600°C, a differenza dei 500°C usati per il filtro a schiume ceramiche di media porosità. Mentre per il filtro a schiume ceramiche il Δp in corrispondenza del quale si aumentava il riscaldamento era superiore a 900, nel caso del filtro wall flow si procedeva al riscaldamento in corrispondenza della transizione da depth filtration a cake filtration, che generalmente avveniva per Δp compresi tra 600 Pa e 770 Pa (il valore minore era caratteristico dei primi cicli e andava progressivamente aumentando all’aumentare dei cicli). La differenza è legata al fatto che nel filtro a schiume ceramiche la rigenerazione è più rapida e con efficienze maggiori, per cui si è ritenuto di operare il filtro a pressioni maggiori allungando la durata del ciclo.

Nelle prove con il filtro wall flow, il riscaldatore era mantenuto ad alta temperatura per una durata media di circa 20 minuti (ad eccezione del 3° ciclo nel quale è rimasto attivo per 45 minuti), con un consumo medio per ciclo pari a 0,3 kWh, che corrisponde a un assorbimento elettrico specifico per unità di volume del filtro pari a 4,5 kWh/dm³. Ben minore è risultato l’assorbimento elettrico durante la rigenerazione nel caso del filtro a schiume ceramiche, pari a circa 0,1 kWh, in buona parte perché il riscaldamento era limitato a 10 minuti (ad eccezione del primo ciclo quando il riscaldatore è rimasto attivo per 20 minuti circa) e la temperatura di set point era ridotta a 500°C.

La rigenerazione nel filtro wall flow generalmente iniziava a temperature dei fumi in uscita dal filtro comprese tra 230°C e 265°C (valore medio circa 250°C), cioè 75 – 110°C superiori rispetto a quando il set point del riscaldatore veniva aumentato. E’ da notare che tali temperature sono state misurate da una termocoppia installata in un pozzetto a circa 13 cm dalla sezione di uscita del filtro e quindi inevitabilmente inferiori di qualche grado Celsius alla temperatura di fumi nella sezione di uscita del filtro, sebbene questo tratto sia stato coibentato con due strati di lana minerale, come si vede in Figura 2. Si nota anche come la temperatura dei fumi sia sfasata per effetto dell’inerzia del sistema, in particolare del portafiltro in acciaio. In confronto, con il filtro a schiume ceramiche le temperature di uscita dei fumi a inizio rigenerazione sono molto inferiori, intorno a 158 – 164°C, ossia meno di 5°C superiori rispetto a quando si è alzato il set point del riscaldatore. Anche questo aspetto è legato alla maggiore rapidità con cui i filtri a schiume ceramiche raggiungono la rigenerazione. In termini di emissioni, le concentrazioni del PM fine a valle del filtro wall flow sono risultate molto basse, dell’ordine di qualche decina di microgrammi per metro cubo di gas, ad eccezione delle fasi di rigenerazione in cui si verificava un picco, in quanto il particolato carbonioso accumulato era in parte ossidato e in parte trasportato via dal flusso di gas.

Le prove hanno dimostrato una variabilità nella durata e nell’ampiezza di tali picchi, generalmente decrescenti all’aumentare del numero di cicli. L’andamento della concentrazione di PM fine a valle del filtro

nel corso del secondo ciclo è rappresentata in Figura 30, ed è confrontata con le perdite di carico ai capi del filtro, con la temperatura dei fumi in uscita dal filtro e con la temperatura di set point del riscaldatore.

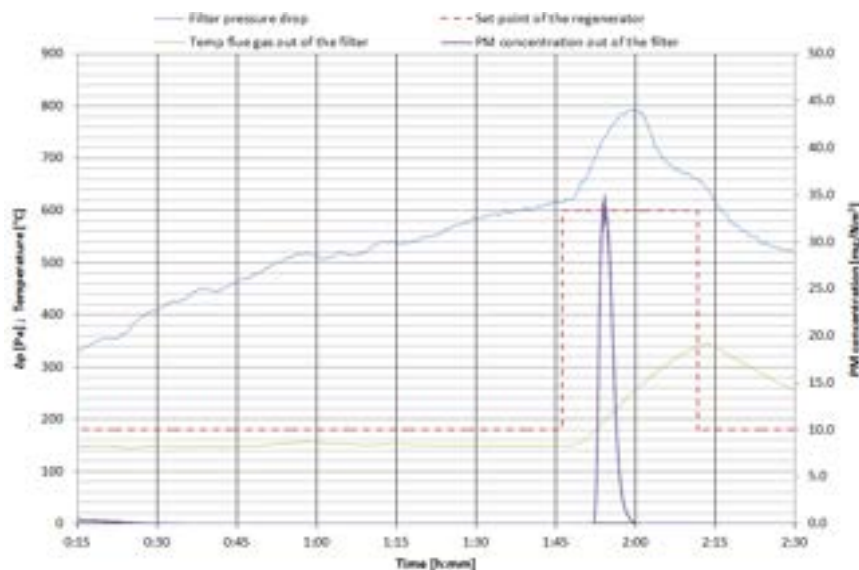


Figura 30. Andamento della concentrazione di PM rilevata dal contaparticelle PPS a valle del filtro (in viola) confrontato con le perdite di carico nel filtro (in blu), con la temperatura dei fumi all'uscita del filtro (in verde) e con la temperatura di set point del riscaldatore (linea rossa tratteggiata)

I picchi di emissione del PM si sono generalmente verificati in leggero anticipo rispetto alla riduzione delle perdite di carico. In accordo alle prove condotte nelle precedenti annualità [13], si confermano efficienze di filtrazione superiori al 99%, come riportato in Tabella 8, nella quale l'assenza di alcuni valori è giustificata dal fatto che durante la prima giornata di prove il contaparticelle PPS non è stato utilizzato, mentre in altre due occasioni non sono state effettuate le misure a monte del filtro con l'impattore per problemi tecnici.

Tabella 8. Efficienza di filtrazione del filtro catalitico wall flow

N° misura	Durata misura impattore [min]	PM monte [mg/Nm ³]	PM valle [mg/Nm ³]	Efficienza filtrazione %
1	40	133	n.d.	n.d.
2	40	185	0,05	99,97%
3	n.d.	n.d.	0,5	n,d,
4	n.d.	n.d.	0,4	n,d,
5	40	150	0,01	99,99%
6	40	121	0,02	99,98%
7	40	118	0,58	99,51%

Inoltre, i valori di PM a valle del filtro riportati in Tabella 8 sono calcolati sulla media delle acquisizioni dell'intera giornata, in quanto il campionamento con l'impattore era effettuato prima dell'inizio delle acquisizioni del PPS e pertanto un confronto monte-valle in contemporanea non è stato possibile. Sul piano delle emissioni, quindi, il confronto è favorevole al filtro wall flow, giacché con il filtro a schiume ceramiche non si riescono mai a raggiungere efficienze altrettanto elevate. Inoltre l'andamento dell'efficienza di filtrazione nel filtro a schiume ceramiche a media porosità è fortemente influenzato dal grado di accumulo del particolato, con valori minori all'inizio del ciclo (basso livello di PM accumulato) e maggiori prima della rigenerazione (alto livello di accumulo del PM nel filtro, con conseguente riduzione della sezione di passaggio dei gas nei pori e quindi maggiore capacità di filtrazione).

All’inizio della rigenerazione, le perdite di carico nel filtro wall flow erano comprese tra 733 Pa e 985 Pa (valore medio circa 870 Pa), con i valori minori caratteristici dei primi cicli. All’aumentare dei cicli, l’efficacia di rigenerazione tendeva a diminuire in quanto i Δp aumentavano, portando a un graduale deterioramento delle prestazioni, anche in termini di minore durata dei cicli successivi. Infatti l’efficienza di rigenerazione, come definita dalla Eq. 2, tendeva a ridursi passando dal 74% a circa il 22%, parallelamente la durata dei cicli diminuiva da 4^h:12’ nel 1° ciclo a circa 1^h al 6° ciclo, come evidenziato in Figura 31.

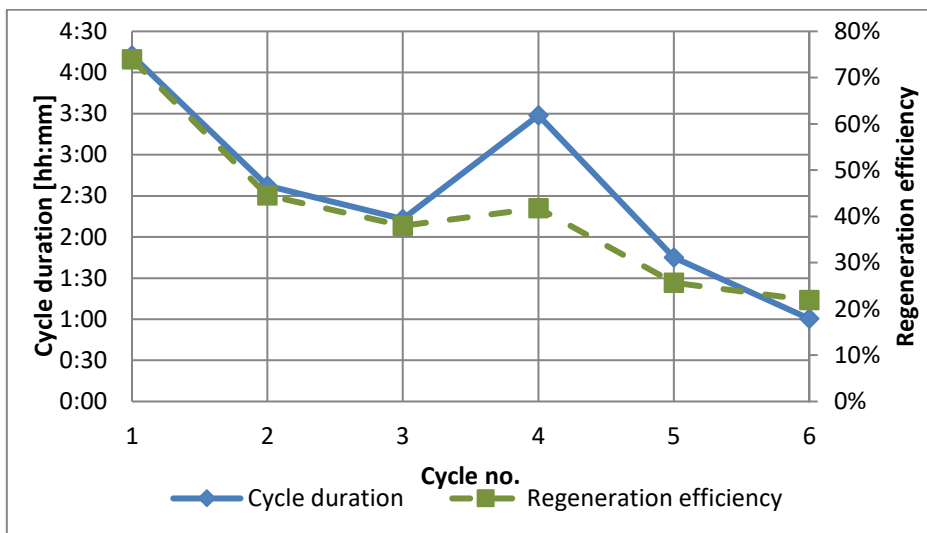


Figura 31. Durata del ciclo (linea continua) ed efficienza di rigenerazione (linea tratteggiata) per il filtro wall flow

Ben diverso è il comportamento riscontrato nel filtro a schiume ceramiche, in quanto il brusco calo delle perdite di carico, che si manifestava poco dopo l’attivazione del riscaldatore alla temperatura di high set point, portava a Δp di fine ciclo molto prossime alla Δp iniziale (pari a 23 Pa), con conseguenti elevate efficienze di rigenerazione, anche se con una normale tendenza a diminuire all’aumentare dei cicli (dal 99,6% nel 1° ciclo al 96,2% nel 7° e ultimo ciclo, Tabella 7). Un andamento analogo caratterizza la durata dei cicli, che tende a scendere anche con il filtro a schiume ceramiche, tuttavia il 6° ciclo è caratterizzato da una durata più che doppia rispetto al filtro wall flow, Tabella 7 e Figura 21.



Figura 32. Confronto tra le tipologie di filtri al termine delle prove sperimentali

La Figura 32 mostra le tipologie di filtri testati, al termine delle rispettive prove: filtro wall flow, filtro a schiume ceramiche ad elevata porosità e primo filtro a schiume ceramiche a media porosità (si ricorda che

per quest'ultimo le prove siano terminate al primo ciclo una volta raggiunta la perdita di carico di 1000 Pa, e non sia stato sottoposto a rigenerazione). E' evidente il diverso grado di accumulo del particolato, che è massimo nel caso del filtro a schiume ceramiche a media porosità e assai limitato nel filtro a schiume ad alta porosità. Per quanto riguarda il filtro wall flow, l'accumulo di particolato è limitato dalla porosità della matrice, che è di soli 17 μm .

In conclusione, i filtri wall flow hanno dimostrato elevate efficienze di filtrazione durante l'intera vita operativa, pur tuttavia la loro principale criticità è legata alle prestazioni meccaniche, caratterizzate da elevate perdite di carico, dell'ordine di qualche centinaio di Pa e tendenti a superare 1000 Pa nell'arco di poche ore di funzionamento, oltre a un'incompleta e lunga rigenerazione, che ha comportato la progressiva riduzione della durata dei cicli di lavoro ed elevati consumi di energia per la rigenerazione.

Quale alternativa alla rigenerazione di tipo termico, sarebbe interessante valutare il comportamento del filtro con un sistema di rigenerazione ad aria compressa. Questa soluzione da un lato richiederebbe modifiche impiantistiche al banco prova, con l'aggiunta di un compressore e di un adeguato sistema di raccolta delle polveri a valle del filtro, però potrebbe portare a rigenerazioni più rapide, efficienti e con minori consumi di energia.

Tabella 9. Prestazioni del filtro wall flow durante le fasi di rigenerazione

Tipo filtro	Wall flow con matrice SiC e catalizzatore CuFe_2O_4					
	1	2	3	4	5	6
N° rigenerazione						
Durata ciclo [hh:mm:ss]	04:12:24	02:37:25	02:13:01	03:28:39	01:45:10	01:00:23
Durata azionamento riscaldatore [hh:mm:ss]	00:19:53	00:25:33	00:45:22	00:19:57	00:14:43	00:20:20
Durata rigenerazione [hh:mm:ss]	00:51:18	00:37:33	01:01:19	00:34:22	00:22:46	00:19:26
Tempo azionamento riscaldatore / tempo ciclo	7,9%	16,2%	34,1%	9,6%	14,0%	33,7%
Tempo rigenerazione / tempo ciclo	20,3%	23,9%	46,1%	16,5%	21,6%	32,2%
ΔP iniziale filtro [Pa]	145	145	145	145	145	145
ΔP inizio riscaldamento [Pa]	610	615	618	702	703	778
ΔP inizio rigenerazione [Pa]	733	794	790	860	897	985
ΔP fine rigenerazione [Pa]	298	505	545	561	704	801
Riduzione ΔP durante la rigenerazione [Pa]	435	289	245	299	193	184
Efficienza di rigenerazione	74,0%	44,5%	38,0%	41,8%	25,7%	21,9%
T fumi uscita filtro a inizio riscaldamento [°C]	150	149	152	153	149	167
T fumi uscita filtro a inizio rigenerazione [°C]	229	249	265	236	223	260
T max fumi all'uscita filtro [°C]	343	344	394	312	288	320

3 Conclusioni

Le principali attività condotte nella presente annualità sono di seguito elencate:

- ✓ Adeguamento del banco prova per la misura monte – valle del PM contenuto nei fumi prodotti dalla caldaia a biomassa, con l’inserimento a monte dell’impattore multistadio e a valle del conta-particelle PPS;
- ✓ Taratura dei principali settaggi del banco prova aggiornato;
- ✓ Prima serie di prove sperimentali su un filtro catalitico wall flow, con matrice in carburo di silicio e catalizzatore a base di ferrite di rame caricato al 20% in peso;
- ✓ Seconda serie di prove sperimentali su un filtro a schiume ceramiche non catalizzato ad alta porosità, a base di carburo di silicio e allumina;
- ✓ Terza serie di prove sperimentali su un filtro a schiume ceramiche non catalizzato a media porosità, a base di OBSiC, della durata di un singolo ciclo;
- ✓ Quarta serie di prove sperimentali su un filtro a schiume ceramiche non catalizzato a media porosità, a base di OBSiC, per più cicli di funzionamento;
- ✓ Analisi comparativa dei dati sperimentali raccolti.

Nel corso della campagna sperimentale si sono analizzate le prestazioni delle diverse tipologie di filtri forniti dal Dipartimento di Ingegneria industriale dell’Università di Salerno, in termini sia meccanici (perdite di carico, efficienza di rigenerazione, numero e durata dei cicli), sia emissivi (efficienza di rimozione del particolato fine).

Le prove, effettuate presso la Hall Tecnologica TH.EX.A.S. del centro di ricerche ENEA di Saluggia, sono state condotte in condizioni stazionarie dei fumi (prodotti da una caldaia a pellet da 30 kW) e dell’acqua di circolazione in caldaia. La misura in continuo del PM a valle del filtro ha consentito di studiare la dinamica di rilascio del particolato da parte dei filtri, e quindi di valutare l’adeguatezza del filtro ai fumi prodotti dalla caldaia a pellets.

Il filtro wall flow ha dimostrato elevate efficienze di filtrazione, in analogia ai risultati ottenuti nella precedente annualità, pur tuttavia ha confermato le principali criticità legate alla limitata durata dei cicli, a lunghi ed energivori cicli di rigenerazione, ed alle elevate perdite di carico, che in condizioni di filtro inserito in-line nella canna fumaria richiederebbero un ventilatore ausiliario di estrazione fumi. Per mitigare alcune di queste criticità, si potrebbe valutare la rigenerazione con sistema ad aria compressa in alternativa alla rigenerazione di tipo termico.

In controtendenza, i test effettuati sul filtro non catalitico a schiume ceramiche ad alta porosità hanno dimostrato una debolissima attitudine a trattenere il PM fine, in quanto le perdite di carico si sono mantenute al di sotto di 100 Pa dopo più di 15 ore di funzionamento a regime, e l’efficienza di filtrazione non ha superato il 6%. Tale filtro non è quindi risultato di adeguato all’applicazione in esame.

Per quanto riguarda i due filtri a schiume ceramiche a media porosità che sono stati sottoposti a test, le prove sul primo filtro si sono focalizzate sul primo ciclo, per una durata superiore alle 13 ore, e si è misurata un’efficienza di filtrazione crescente col tempo dal 7% iniziale al 61%.

Le prove sul secondo filtro a schiume ceramiche sono durate complessivamente 38 ore per 7 cicli di rigenerazione. Il confronto tra il filtro wall flow e il filtro a schiume ceramiche a media porosità ha portato a risultati pressoché opposti. Le prove sul filtro wall flow sono state portate avanti per 4 giorni e complessive 16^h30’, durante i quali sono avvenuti n°6 cicli di rigenerazione, la metà del durata rispetto alle quasi 35 ore corrispondenti a 6 cicli con il filtro a schiume ceramiche a media porosità. La rigenerazione nel filtro wall flow generalmente iniziava con temperature dei fumi all’uscita comprese tra 230°C e 265°C (valore medio circa 250°C), cioè 75 – 110°C superiori rispetto a quando il set point del riscaldatore veniva aumentato. In confronto, le temperature di uscita dei fumi a inizio rigenerazione con il filtro a schiume ceramiche sono state inferiori, intorno a 158 – 164°C, ossia circa 5°C superiori rispetto a quando il set point del riscaldatore era alzato. All’inizio della rigenerazione del filtro wall flow, le perdite di carico erano comprese tra 733 Pa e 985

Pa (valore medio circa 870 Pa), dove i valori minori erano tipici dei primi cicli. All'aumentare dei cicli, l'efficacia di rigenerazione tendeva a diminuire in quanto Δp aumentavano, portando a un graduale deterioramento delle prestazioni, anche in termini di minore durata dei cicli successivi. Infatti l'efficienza di rigenerazione tendeva a ridursi passando dal 74% a circa il 22%, parallelamente la durata dei cicli diminuiva da 4^h:12' nel 1° ciclo a circa 1^h al 6° ciclo. Ben diverso è stato il comportamento del filtro a schiume ceramiche, in quanto il brusco calo delle perdite di carico, che si manifestava rapidamente dopo l'aumentato del set point del riscaldatore, portava a Δp di fine ciclo prossime al Δp iniziale (pari a 23 Pa), con conseguenti elevate efficienze di rigenerazione anche se con una normale tendenza a diminuire all'aumentare dei cicli (dal 99,6% nel 1° ciclo al 96,2% nel 7° e ultimo ciclo).

In termini di emissioni, le concentrazioni del PM fine a valle del filtro wall flow sono risultate molto basse, dell'ordine di qualche decina di microgrammi per metro cubo di gas, ad eccezione delle fasi di rigenerazione in cui si verificava un picco. Le prove hanno dimostrato una variabilità nella durata e nell'ampiezza di tali picchi, generalmente decrescenti all'aumentare del numero di cicli. In accordo alle prove condotte nelle precedenti annualità, si confermano le elevate efficienze di filtrazione, superiori al 99%. Sul piano delle emissioni, quindi, il confronto è favorevole al filtro wall flow, giacché con il filtro a schiume ceramiche a media porosità si sono ottenute efficienze limitate mediamente al 40 – 50%.

Una delle principali criticità dei filtro a schiume ceramiche a media porosità è l'elevata fragilità strutturale: il materiale costituente la matrice e l'elevato numero di pori richiedono grande cura per evitare fratture.

I risultati ottenuti nella presente attività di ricerca sono stati presentati in un paio di convegni internazionali, i cui dettagli delle memorie sono riportati in [10] e [15].

4 Riferimenti bibliografici

1. C. Boman, E. Pettersson, R. Westerholm, D. Bostrom, A. Nordin, "Stove performance and emission characteristics in residential wood log and pellet combustion - Part 1: pellet stoves", *Energy and Fuels*, Vol. 25 (2011), pp. 307-314.
2. T. Nussbaumer, C. Czasch, N. Klippel, L. Johansson, C. Tullin, "Particulate emissions from biomass combustion in IEA Countries – Survey on measurements and emission factors", IEA Report, 2008, http://www.ieabcc.nl/publications/Nussbaumer_et_al_IEA_Report_PM10_Jan_2008.pdf (ultimo accesso: maggio 2016).
3. Regolamento UE 2015/1189 della Commissione del 28 aprile 2015 recante modalità di applicazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile delle caldaie a combustibile solido, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 193 (2015), pp. 100-114.
4. J. B. Illerup, B.B. Hansen, W. Lin, J. Nickelsen, K. Dam-Johansen, "Intelligent heat system – High-energy efficient wood stoves with low emissions of gases and particles", *Proc. 23rd European Biomass Conference and Exhibition*, 1-4 giugno 2015 Vienna, 2015, pp. 448-451.
5. S. Van Loo, J. Koppejan, "The handbook of biomass combustion and co-firing", Capitolo 9 (2008), pp. 318-333, Earthscan Ed.
6. Amec, "Biomass and CHP emission standards", Report for Greater London Authority, (2013).
7. G. Migliavacca, C. Morreale, F. Hugony, I. Tombolato, G. Pession, "Reduction of PM emissions from biomass combustion appliances: evaluation of efficiency of electrostatic precipitators", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 37 (2014), pp. 25-30.
8. G. Qiu, "Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions", *Renewable Energy*, Vol. 50 (2013), pp. 94-102.
9. UNI 10468, "Estrattori a vite (coclee estrattrici - dosatrici). Prescrizioni tecniche e dimensioni di riferimento", norma UNI (1995).
10. M. Caldera, et al., "Tests on catalytic wall flow filters for PM abatement from biomass boilers", *Proc. 24rd European Biomass Conference and Exhibition*, 6-9 giugno 2016 Amsterdam, 2016, pp. 399-405.
11. G. Stoppiello, "Filtri catalitici di tipo wall flow per la riduzione delle emissioni inquinanti nei fumi di combustione di biomassa solida", Report RdS/PAR2013/239, (2014).
12. V. Palma, E. Meloni, "Sviluppo di sistemi filtranti catalitici per l'abbattimento del particolato fine e l'ossidazione del CO", Report RdS/PAR2013/238, (2014).
13. M. Caldera, D. Lipari, A. De Sio, R. Roberto, "Analisi sperimentale della rigenerazione di filtri catalitici wall-flow per la riduzione del particolato fine prodotto dalla combustione di biomassa legnosa", Report RdS/PAR2014/163, (2015).
14. G. Stoppiello, V. Palma, F. Hugony, E. Meloni, M. Gualtieri, "Catalytic wall flow filters for the reduction of biomass boilers emissions", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 37, (2014), pp. 19-24.
15. V. Palma, E. Meloni, M. Caldera, D. Lipari, V. Pignatelli, V. Gerardi, "Catalytic wall flow filters for soot abatement from biomass boilers", *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 50 (2016), pp. 253-258.