



## Ricerca di Sistema elettrico

Sistema dimostrativo STEAM per il recupero energetico da cascami termici a bassa temperatura. Prove cicliche di lunga durata e con cicli parziali

G.L. Guizzi - M. Manno - A. Zaccagnini - M. Salvatori - S. Bellocchi

SISTEMA DIMOSTRATIVO STEAM PER IL RECUPERO ENERGETICO DA CASCAMI TERMICI A BASSA TEMPERATURA.  
PROVE CICLICHE DI LUNGA DURATA E CON CICLI PARZIALI.

G.L. Guizzi - M. Manno - A. Zaccagnini - M. Salvatori - S. Bellocchi  
(Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Roma "Tor Vergata")

Dicembre 2018

#### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Tematica di ricerca: Processi e macchinari industriali

Progetto: D3 Efficienza energetica nel settore industria

Obiettivo: B.1 Materiali innovativi per lo sviluppo di sistemi per il recupero energetico da cascami termici in ambito industriale

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sistema dimostrativo STEAM per il recupero energetico da cascami termici a bassa temperatura. Prove cicliche di lunga durata e con cicli parziali*"

Responsabile scientifico ENEA: Dott.ssa Marzia Pentimalli

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Roma "Tor Vergata": Ing. Michele Manno



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 RISULTATI DELLE PROVE SPERIMENTALI.....	7
2.1 RICHIAMI SULLA METODOLOGIA SVILUPPATA E SULL'APPARTATO STEAM.....	7
2.1.1 <i>Metodologia di recupero dei cascami entalpici</i> .....	7
2.1.2 <i>Apparato sperimentale STEAM</i> .....	8
2.1.3 <i>Modalità di conduzione delle prove sperimentali e dell'analisi dei dati</i> .....	11
2.2 CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL CAU-10-H (AL).....	13
2.3 PROVE CICLICHE CON AL-FUMARATO.....	17
2.3.1 <i>Prove cicliche di lunga durata</i> .....	17
2.3.2 <i>Prove cicliche parziali</i> .....	18
3 CONCLUSIONI E FASI DI SVILUPPO SUCCESSIVO.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	24

## Sommario

Nell'ambito dell'obiettivo B.1 - *“Materiali innovativi per lo sviluppo di sistemi per il recupero energetico da cascami termici in ambito industriale”*, i due gruppi di ricerca dell'Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” (UTV) e dell'Enea coinvolti nella presente attività hanno ideato e sviluppato un intervento di efficientamento energetico dei processi industriali di essiccazione basato su un ciclo termodinamico che prevede l'impiego di materiali adsorbenti avanzati.

Il presente documento intende descrivere i risultati di prove di caratterizzazione sperimentale condotte mediante un apparato dimostratore denominato STEAM - *Sistema Termico per Essiccazione d'Aria mediante Materiali adsorbenti avanzati* (di proprietà dell'Enea e sviluppato presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Industriale di UTV) al fine di approfondire alcuni aspetti del comportamento dei letti di due materiali adsorbenti di tipo MOF (Metal Organic Frameworks), selezionati nel corso delle precedenti attività per lo sviluppo della metodologia proposta.

Dopo una breve introduzione che inquadra il lavoro svolto dal gruppo di ricerca di UTV nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, e brevi richiami agli elementi essenziali della tecnologia applicata al caso della pasta alimentare, vengono presentati i risultati ottenuti nel corso del trimestre del PAR2018 che hanno permesso di selezionare e meglio caratterizzare il materiale adsorbente più promettente per il prosieguo delle attività di sviluppo della tecnologia di efficientamento proposta. Nelle conclusioni vengono quindi fornite indicazioni per le linee di sviluppo future verso l'applicazione industriale della stessa.

## 1 Introduzione

Nel corso del precedente piano triennale 2015-2017 è stato seguito un percorso di ricerca che partendo dalla ideazione di una *metodologia innovativa per il recupero di cascami entalpici a bassa temperatura dai processi di essiccazione industriale nel settore agroalimentare*, ha raggiunto i primi riscontri sperimentali con la realizzazione e validazione dell'apparato dimostratore STEAM — Sistema Termico per Essiccazione d'Aria mediante Materiali adsorbenti avanzati.

Dal punto di vista applicativo l'attenzione è stata focalizzata in particolare sull'*essiccazione della pasta alimentare*, valutata come il processo industrialmente più interessante per lo sviluppo di un sistema di recupero energetico, essendo questo un processo continuo, che non prevede stagionalità, effettuato a temperature sufficientemente alte e largamente diffuso sul territorio nazionale.

La metodologia proposta si basa su un ciclo termodinamico ad adsorbimento di nuova concezione sostanzialmente di tipo aperto, che prevede l'impiego di materiali adsorbenti avanzati ad elevata superficie specifica come zeoliti, materiali organici e ibridi metallorganici di tipo MOF (Metal Organic Frameworks).

Il ciclo è stato completamente caratterizzato dal punto di vista teorico per la specifica applicazione nell'industria pastaria [1] e, in seguito allo studio del gruppo ENEA, sono stati individuati diversi materiali avanzati di tipo MOF utilizzabili per la realizzazione dei letti adsorbenti, che per le loro caratteristiche termofisiche permetterebbero di ottenere *l'integrale recupero dei cascami entalpici* del processo d'essiccazione. Complessivamente si realizza un parziale trasferimento dei consumi termici dell'essiccatore verso quelli elettrici con una riduzione complessiva di circa il 50 % del consumo di energia primaria.

La fase sperimentale, avviata nel secondo anno di ricerca ha riguardato la realizzazione — presso i laboratori di UTV — e la verifica funzionale di un primo apparato a circuito chiuso atto a caratterizzare letti di materiali adsorbenti al variare delle condizioni termogrometriche del flusso di aria umida che li attraversa. Le verifiche preliminari sono state svolte con l'utilizzo di Silica Gel di tipo commerciale e hanno permesso di validare il sistema sulla base di dati e andamenti noti in letteratura.

Nel corso di queste attività è stato necessario implementare numerosi interventi migliorativi sul banco di prova al fine di superare in maniera adeguata le differenti problematiche e criticità riscontrate. L'attività è stata svolta in stretta collaborazione con il gruppo di lavoro dell'ENEA che in parallelo, presso i propri laboratori, ha condotto un'attività sperimentale volta alla caratterizzazione chimico-fisica dei materiali selezionati in precedenza, che ha permesso di individuare nei materiali Al-Fumarato e CAU-10-H (Al) quelli più promettenti per il prosieguo dello sviluppo della tecnologia [2,3].

La terza annualità (PAR 2017) pertanto ha visto l'esecuzione di una prima campagna di prove sperimentali volta a caratterizzare il comportamento di un letto fluido di materiale adsorbente di tipo Al-Fumarato, che ha permesso di riscontrare l'effettiva funzionalità del materiale trattato in condizioni termodinamicamente confrontabili con quelle previste dal sistema di recupero in studio, confermando sostanzialmente i risultati sperimentali ottenuti da ENEA con campioni di laboratorio in termini di uptake, ma con cinetiche di processo sensibilmente migliori.

In particolare la caratterizzazione in bulk del materiale sperimentato ha mostrato risultati tali da poter ritenere il materiale di interesse tecnologico e meritevole di ulteriori investigazioni. Infatti sulla base delle cinetiche registrate si è potuto procedere ad effettuare delle prime stime sugli aspetti di dimensionamento di impianto: considerando un valore medio di potenza termica elaborata in fase di adsorbimento compresa tra 10 e 15 kW/kg<sub>MOF</sub>, la quantità di materiale adsorbente necessario a trattare una tonnellata/ora di pasta secca (tenendo conto dei tempi di ciclo complessivi) sarebbe compresa tra 11 e 16 kg, ovvero sia per un

impianto di grandi dimensioni (dell'ordine delle 20 t/h) sarebbe necessaria una quantità compresa tra i 300 e 400 kg di materiale per far fronte ad un recupero sull'intero ciclo di essiccazione. Il corrispondente volume occupato dal letto MOF, che dovrà essere suddiviso in almeno due sezioni lavoranti in opposizione di fase, sarebbe presumibilmente compreso tra i 4.000 e i 10.000 litri; tale dato è chiaramente approssimativo in quanto molto variabile in funzione del sistema adottato per il confinamento dello stesso MOF, che di per sé occuperebbe tra i 900 e 1.200 litri (volume della polvere in forma libera). In ogni caso le dimensioni dell'impianto sarebbero sostanzialmente confrontabili con quelle degli attuali sistemi di trattamento dell'aria a servizio di un essiccatore di tale taglia.

Sulla base dei buoni risultati ottenuti e di una analisi critica di alcune problematiche di deterioramento precoce dei condotti dell'apparato riscontrate al termine di tale campagna sperimentale, si è valutata l'opportunità di procedere direttamente alla individuazione, progettazione e implementazione di interventi migliorativi del banco prova, prima di effettuare la campagna sperimentale con il secondo materiale, il CAU-10-H (Al). Gli interventi, mirati ad ottenere condizioni di maggior stabilità, accuratezza e flessibilità di utilizzo del sistema in un range più ampio di condizioni operative, hanno richiesto di riconsiderare tutte le scelte progettuali, anche sulla scorta dell'esperienza maturata, arrivando a ridisegnare il circuito e il layout complessivo dell'impianto e le geometrie di alcuni componenti conseguendo un sostanziale upgrade per il banco di prova. A settembre 2018, a seguito dell'ultimazione degli interventi migliorativi presso officina specializzata, il nuovo circuito dell'apparato STEAM completo dei suoi componenti meccanici (condotti, ventilatore centrifugo, scambiatori di calore interni e telaio portante) è tornato nelle disponibilità del laboratorio di Tor Vergata dove si è avviato il suo ripristino per la messa in funzione.

Per quanto sopra, le attività del PAR2018 i cui risultati sono descritti nel presente documento sono state dedicate:

- alla caratterizzazione preliminare del materiale CAU-10-H (Al) per verificare eventuali vantaggi nell'utilizzo di tale materiale alternativo all'Al-Fumarato, e la conseguente scelta definitiva del materiale;
- all'esecuzione di ulteriori sperimentazioni sul materiale selezionato rappresentate da prove cicliche di lunga durata e prove cicliche di adsorbimento/rigenerazione parziali.

Preliminarmente si è proceduto a completare l'approntamento dell'apparato sperimentale, progettando anche un sistema di isolamento termico più efficace.

## 2 Risultati delle prove sperimentali

In questo capitolo verranno presentati i risultati delle prove svolte nel corso del trimestre ottobre-dicembre 2018 (PAR2018) utilizzando l'apparato sperimentale STEAM, che hanno portato alla selezione del materiale più promettente e ad una migliore conoscenza del suo comportamento in processi ciclici.

Per completezza espositiva nel paragrafo 2.1 vengono fatti precedere alcuni richiami agli elementi essenziali della tecnologia proposta per l'efficientamento energetico dei processi di essiccazione della pasta, alle caratteristiche dell'apparato dimostratore e alle connesse modalità di esecuzione delle prove, rimandando per maggiori dettagli ai report [4,5,6] relativi alle attività svolte nel piano triennale 2015-1017.

### 2.1 Richiami sulla metodologia sviluppata e sull'apparato STEAM

#### 2.1.1 Metodologia di recupero dei cascami entalpici

La metodologia è stata ideata per realizzare il recupero dei cascami entalpici e idrici associati ad un generico processo di essiccazione della pasta e si basa su un ciclo che può considerarsi derivato dall'unione di un ciclo aperto (generalmente utilizzato per la deumidificazione dell'aria) per il quale il flusso di aria da deumidificare mediante *adsorbimento* è quello generato dall'essiccatore, e da uno chiuso (generalmente utilizzato per la realizzazione di sistemi a pompa di calore) per il quale la *rigenerazione* del materiale adsorbente avviene ad elevata temperatura con contestuale recupero al condensatore del calore a temperatura medio-alta.

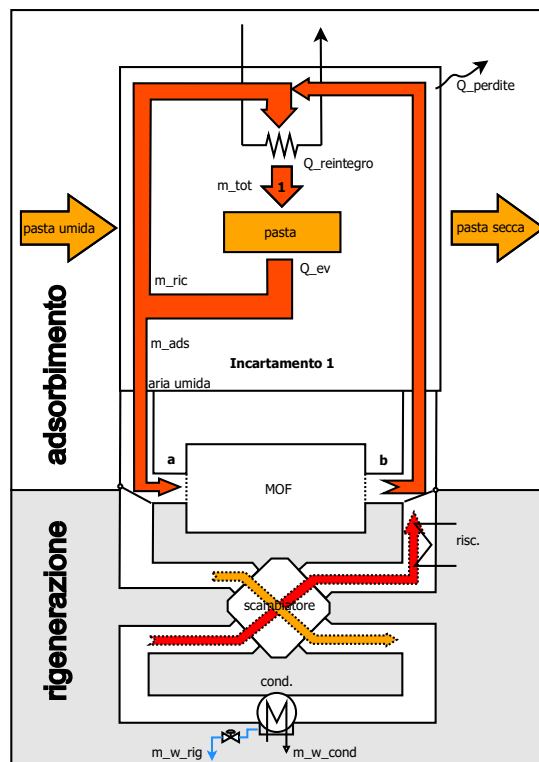


Figura 2.1. Schema rappresentativo dei flussi di calore e di massa per una singola sezione di un essiccatore

Nella **Figura 2.1** viene riportato uno schema rappresentativo del funzionamento di una generica sezione di un impianto di essiccazione della pasta che adotti il sistema di recupero proposto.

Nella fase di *adsorbimento* (parte alta della figura) il letto adsorbente (MOF) viene investito da una portata di aria umida estratta dalla sezione dell'essiccatore che viene pertanto deumidificata e riscaldata dallo stesso calore generato nel processo di adsorbimento; a valle del MOF tale flusso di aria viene quindi reimpresso a monte della pasta da trattare previa miscelazione con il flusso di ricircolo ed eventuale ulteriore riscaldamento.

Nella successiva fase di *rigenerazione* – che viene attivata quando il letto adsorbente è giunto a saturazione e deve pertanto cedere l'umidità precedentemente adsorbita prima di riacquistare la capacità di deumidificare altra aria – le valvole in prossimità delle diramazioni “a” e “b” modificano la loro posizione mettendo il MOF in collegamento con la parte bassa del circuito. In tale condizione di funzionamento il MOF viene investito (in verso opposto al precedente) da aria molto calda e a ridotto contenuto di vapore che pertanto, rigenerando il MOF, viene umidificata e raffreddata; l'aria umida in uscita dal letto adsorbente incontra quindi un recuperatore termico (*scambiatore*) dove cede parte del calore residuo, subendo un ulteriore raffreddamento, poi arriva al *condensatore* dove si verifica la condensazione della quota di vapore acqueo estratto dal MOF; l'aria, ripristinato il contenuto di umidità iniziale, viene preriscaldata ripassando per lo stesso *scambiatore* di calore a flussi incrociati e quindi, passando per la sezione di alimentazione del processo (“risc.” in figura) subisce un riscaldamento ad alta temperatura che la riporta alle condizioni iniziali per essere inviata nuovamente al MOF.

Al condensatore avviene sia il recupero del calore di condensazione (nella forma di calore sensibile associato al flusso  $m_w_{cond}$  che raffredda il condensatore) ad una temperatura sensibilmente inferiore a quella di alimentazione, sia il contestuale recupero del vapore condensato ( $m_w_{rig}$ ).

La funzionalità dello *scambiatore* è quella di operare un recupero termico interno al ciclo, che permette di ridurre il quantitativo di calore richiesto ad alta temperatura in alimentazione che verrebbe quindi recuperato a temperatura inferiore al condensatore; pertanto sebbene la sua presenza risulti indispensabile per la sostenibilità energetica dell'applicazione, esso non ha molta rilevanza ai fini della caratterizzazione dei letti e del ciclo termodinamico.

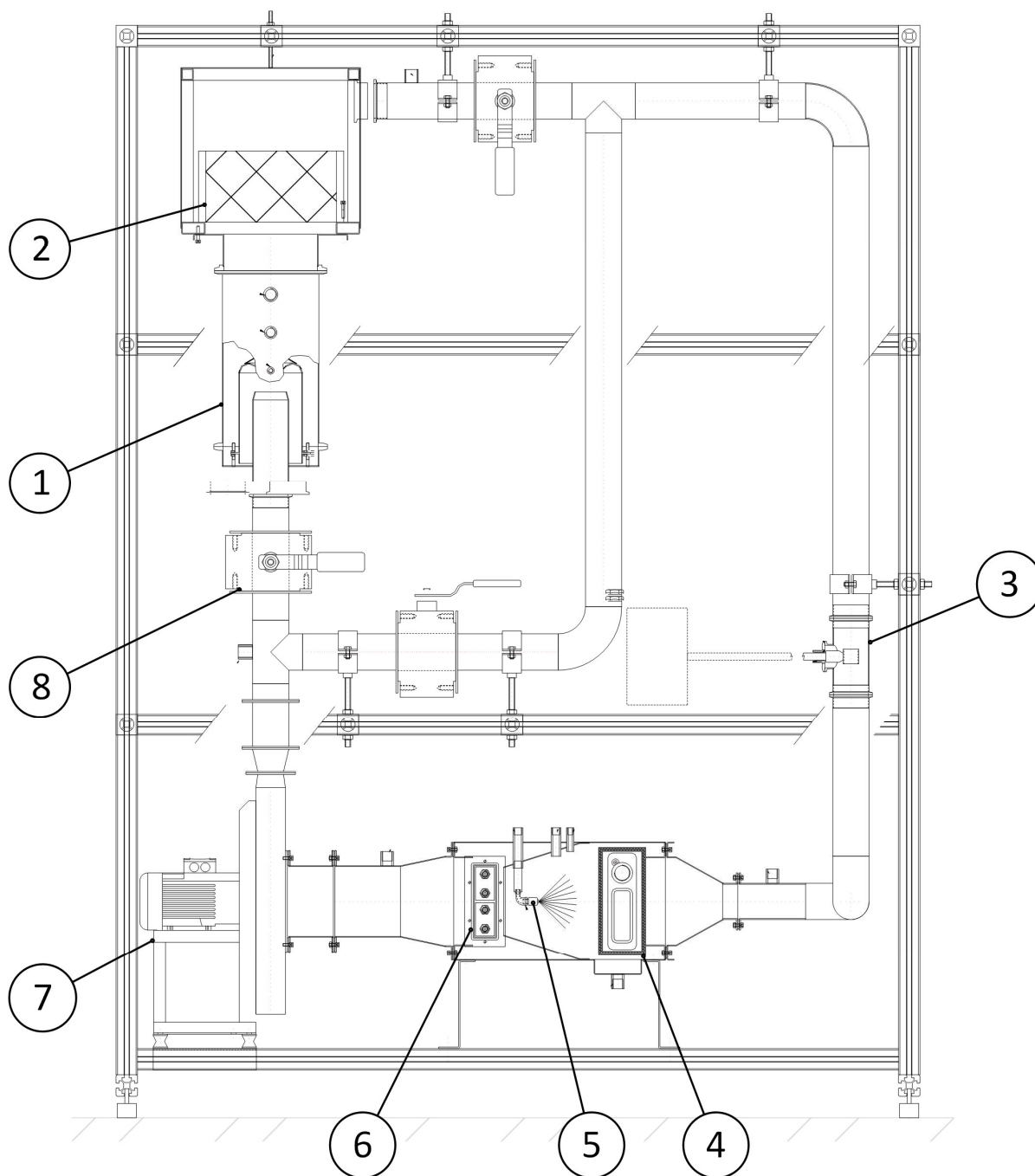
### 2.1.2 Apparato sperimentale STEAM

L'apparato sperimentale STEAM è stato progettato per comprendere tutti i principali componenti strettamente indispensabili ai fini delle attività di ricerca in essere, mentre risultano esclusi quelli non indispensabili (come lo scambiatore per il recupero termico interno al ciclo), che avrebbero esclusivamente introdotto complicazioni impiantistiche e incrementato i costi di realizzazione dell'apparato; per lo stesso motivo anche dal punto di vista funzionale si è adottata una logica di semplificazione del sistema.

Con riferimento all'esigenza di caratterizzare i materiali in bulk si è dimensionato l'apparato in modo da riuscire a processare un quantitativo di MOF superiore di almeno due ordini di grandezza rispetto ai campioni utilizzati da ENEA nelle attività parallele di caratterizzazione dei materiali in laboratorio, così da poter evidenziare possibili effetti di scala.

In **Figura 2.2** viene presentato il layout finale dell'apparato (come risultante dopo l'upgrading) che consiste sostanzialmente in un circuito aerulico chiuso nel quale si succedono le quattro sezioni fondamentali nelle quali si realizzano tutte le trasformazioni termodinamiche previste per il flusso di aria umida. Il circuito è inoltre dotato di un bypass gestito tramite n° 3 valvole, che permette, quando necessario, di escludere il letto di materiale adsorbente dal flusso di aria. Nella sottostante tabella vengono elencati i principali componenti dello stesso apparato.





**Figura 2.2. Layout finale dell'apparato STEAM**

n.	Componente
1	Letto materiale adsorbente (MOF)
2	Filtro Hepa
3	Supporto Flussimetro
4	Scambiatore aria-acqua (sezione di condensazione)
5	Ugello nebulizzatore (sezione di umidificazione)
6	Riscaldatori elettrici (sezione di riscaldamento)
7	Ventilatore centrifugo a tenuta
8	Valvole a sfera a tenuta.

Nello specifico le quattro sezioni fondamentali risultano essere:

- *letto MOF (1)*, nel quale l'aria umida viene deumidificata e riscaldata in fase di adsorbimento e umidificata e raffreddata in fase di rigenerazione; il confinamento del materiale adsorbente costituente il letto è realizzato mediante l'inserimento di un sifone a monte e un filtro HEPA a valle del letto stesso.
- *sezione di condensazione (4)*, nella quale in fase di rigenerazione il flusso di aria viene raffreddato fino alla saturazione e successiva condensazione di parte dell'umidità in esso contenuta, con conseguente deumidificazione del flusso stesso; nella medesima sezione avviene anche l'eventuale estrazione del condensato. In fase di adsorbimento il condensatore viene alimentato con acqua calda a temperatura idonea.
- *sezione di umidificazione (5)*, che umidifica e raffredda l'aria nella fase di adsorbimento del MOF simulando il passaggio dell'aria sulla pasta da essiccare.
- *sezione di riscaldamento (6)*, che riscalda l'aria compensando con continuità le dispersioni verso l'esterno al fine di raggiungere e mantenere costante, sui valori impostati per le diverse fasi previste (pre-test, adsorbimento e rigenerazione), la temperatura del flusso umido; inoltre fornisce il calore di alimentazione del processo nella fase di rigenerazione del MOF.

L'impiego del bypass risulta utile, se non indispensabile, nelle fasi di preparazione dei test per portare la miscela di aria e vapore alle condizioni di temperatura e umidità desiderate senza interagire con il materiale adsorbente.

Con riferimento all'impianto, nel trimestre ottobre-dicembre 2018 (PAR2018) si è inizialmente completato il suo approntamento, realizzando un nuovo sistema idraulico termostato per l'alimentazione del condensatore, ripristinando il sistema di monitoraggio (rivisto tramite sostituzione dei due termoigrometri con nuovi sensori caratterizzati da un range di funzionamento adeguato alle nuove condizioni operative) e il sistema di controllo (anch'esso integrato con termocontrollori per le nuove resistenze applicate alle parti esterne dei condotti per la loro termostatazione).

Al fine di completare l'upgrading dell'apparato si è inoltre ritenuto opportuno dotare lo stesso di un adeguato sistema di isolamento termico, capace di limitare in maniera ottimale le dispersioni di calore verso l'esterno attenuando così (in sinergia con le resistenze esterne ai condotti) variazioni indesiderate della temperatura dell'aria umida flussata all'interno del circuito aerulico e soprattutto evitando l'insorgere di fenomeni di condensazione localizzata sulle pareti dei condotti.

In base alle caratteristiche del sistema si è individuata come migliore soluzione applicabile quella dei cuscini termo-isolanti non rigidi confezionati su misura a mezzo dime, facilmente installabili e facilmente removibili grazie a sistemi di chiusura realizzati con fibbie e cinghie o alternativamente strep, arrivando a fissarne anche le specifiche tecniche (strato interno in tessuto in fibra di vetro siliconato con  $T_{max}$  esercizio  $\geq 150$  °C; materassino interno in fibra di vetro agugliato, densità circa  $130 \text{ kg/m}^3$ , spessore complessivo  $\geq 35$  mm, conducibilità termica  $\lambda \leq 0,04 \text{ W/mK}$  @  $150$  °C). Per problemi amministrativi connessi alle tempistiche di fornitura di un siffatto sistema isolante individuato sul mercato, si è però dovuto rimandare il suo acquisto ad un periodo successivo.

Si è quindi optato per un isolamento provvisorio realizzato a mano in laboratorio mediante taglio a misura di pannelli flessibili di lana di roccia con rivestimento in foglio di alluminio, e fissaggio degli stessi tra loro a formare un continuum, tramite nastro adesivo di alluminio. Nei punti del circuito per i quali è richiesta la frequente rimozione dell'isolamento per esigenze operative (plenum filtro HEPA e letto MOF con sifone),

sono stati invece realizzati cuscini rimovibili con lo stesso materiale ma in doppio strato (in modo da avere rivestimento in alluminio sia lato esterno che interno) e fissati con strep. Mediante ispezione termografica è stata infine verificata l'assenza di discontinuità nell'isolamento.

Nella seguente **Figura 2.3** viene riportata un'immagine dell'apparato STEAM completo di coibentazione, sistema idraulico esterno di termostatazione dell'acqua di alimentazione del condensatore e sistema di monitoraggio e controllo.



**Figura 2.3. Foto del nuovo sistema STEAM approntato in laboratorio con coibentazione (SX) e particolare del sistema di termostatazione dell'acqua di alimentazione del condensatore (DX).**

Riacendendo l'apparato si è proceduto dapprima, ad impianto vuoto, ad una nuova taratura di tutto il sistema di monitoraggio, e quindi al posizionamento del filtro HEPA nell'impianto con esecuzione di ripetute prove in bianco per la verifica dell'assenza (ovvero presenza strumentalmente non rilevabile) di polvere residua di Al-Fumarato sullo stesso filtro. Per evitare in futuro contaminazioni tra i due materiali e/o tra campioni dello stesso materiale sono stati inoltre acquistati filtri aggiuntivi.

### 2.1.3 Modalità di conduzione delle prove sperimentali e dell'analisi dei dati

L'esecuzione di prove sperimentali sull'apparato STEAM ha richiesto l'adozione di procedure ben definite, al fine di caratterizzare le fasi di adsorbimento e desorbimento partendo da condizioni certe e fissate del flusso di aria umida circolante nei condotti aerulici che investe il MOF.

Pertanto ogni prova è sempre preceduta da un "lavaggio" del circuito aerulico per l'eliminazione dell'acqua in esso presente in forma di vapore e/o di condensa e/o adsorbita dal MOF; questo processo viene realizzato mediante flussaggio continuo ad alta temperatura e contestuale progressiva diluizione del flusso ottenuta con immissione in un punto del circuito di aria ambiente (secca) ed espulsione in altro punto dell'aria calda

e umida circolante nell'impianto, fino a raggiungere una condizione stabile di bassa umidità relativa, quantomeno inferiore al valore di avvio del processo di adsorbimento del MOF. Come valore di riferimento di fine lavaggio si è assunto quello equivalente al 6% di U.R. a 65 °C.

Una prova completa per la verifica dell'uptake e della cinetica del letto consta nella successione di un processo di carica (adsorbimento) e uno di scarica (desorbimento) del materiale, entrambi preceduti da una fase preparatoria necessaria a portare il sistema in condizioni di inizio processo che richiede l'uso del bypass e dell'umidificatore o del condensatore.

Per i processi ciclici di lunga durata invece, condotti sempre a temperatura costante e senza impiego del bypass, si modifica periodicamente il contenuto di vapore nell'aria umida agendo sulla temperatura dell'acqua di alimentazione del condensatore. A tal fine per realizzare la deumidificazione si invia nello scambiatore aria-acqua direttamente acqua di rete (in genere prossima a 12-15 °C) mentre per l'umidificazione si alimenta lo stesso con l'acqua termostata alla temperatura fissata per la prova (o a temperatura leggermente superiore per facilitare il processo evaporativo). In tali prove l'acqua passa ciclicamente dallo stato di liquido adsorbito sulla superficie del MOF a liquido condensato sulle pareti dello scambiatore. Il contenuto totale di acqua nel circuito aeraulico è definito nel primo ciclo quando partendo da aria secca si procede ad immettere una quantità controllata di acqua mediante il nebulizzatore della sezione di umidificazione.

*Monitoraggio dei parametri operativi.* Durante le diverse fasi delle prove vengono costantemente monitorati tutti i dati acquisiti e i processi di adsorbimento/desorbimento si considerano esauriti quando le due temperature  $T_{in,MOF}$  e  $T_{out,MOF}$ , così come le umidità relative  $RH_{in,MOF}$  e  $RH_{out,MOF}$ , tendono a coincidere e a portarsi a stazionarietà, indicando che il materiale è rispettivamente saturo o completamente rigenerato e in ogni caso in equilibrio con le condizioni termodinamiche dell'aria umida in ingresso nel letto. Per completezza in **Tabella 1** sono riassunte tutte le grandezze misurate e memorizzate tramite il programma di acquisizione di STEAM.

**Tabella 1** Tabella riassuntiva delle grandezze misurate in STEAM

Grandezza	Unità di misura	Descrizione
$T_{a1}$	°C	Temperatura aria in ingresso al riscaldatore
$T_{in,MOF}$	°C	Temperatura aria in ingresso al letto MOF
$T_{out,MOF}$	°C	Temperatura aria uscita dal letto MOF
$T_{a3}$	°C	Temperatura aria in ingresso al condensatore/umidificatore
$T_{a4}$	°C	Temperatura aria in uscita dal condensatore
$T_{w1}$	°C	Temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore
$T_{w2}$	°C	Temperatura dell'acqua in uscita dal condensatore
$RH_{in,MOF}$	%	Umidità relativa dell'aria in ingresso al letto MOF
$RH_{out,MOF}$	%	Umidità relativa dell'aria in uscita dal letto MOF
$FL_a$	m <sup>3</sup> /h	Portata volumetrica di aria umida
$FL_w$	l/min	Portata volumetrica di acqua
$p_{tot,a}$	kPa	Pressione statica dell'aria

*Analisi dei dati.* L'analisi dei dati raccolti viene condotta con l'ausilio di software di elaborazione quali Matlab/Simulink ed Excel, e facendo ricorso all'uso della libreria CoolProp. In particolare in ambiente Simulink è stato implementato un sistema di equazioni atte a risolvere il bilancio di massa tra ingresso e uscita del letto di materiale oggetto di sperimentazione che risulta essere nel caso in esame una misura indiretta, frutto dell'elaborazione dei valori assunti da più grandezze oggetto di una misura diretta [5,6,7].

Da tale calcolo si ricava in particolare la portata di acqua adsorbita/desorbita ( $\dot{m}_{w,ads/des}$ ) e da questa, per integrazione nel tempo imponendo un valore iniziale nullo, la massa totale  $M_w$  che interagisce con il materiale, come rappresentato dalla seguente equazione:

$$M_w(t) = - \int_0^t \dot{m}_{w,ads/des} dt$$

Per definizione la portata di acqua trattata  $\dot{m}_{w,ads/des}$ , è assunta negativa in adsorbimento e positiva in desorbimento, quindi  $M_w$  aumenterà in adsorbimento e diminuirà in desorbimento.

Noti i parametri  $\dot{m}_{w,ads/des}$  e  $M_w$  viene calcolata la quantità percentuale di acqua adsorbita/desorbita e la relativa cinetica conoscendo il quantitativo di materiale contenuto nel letto.

$$\text{uptake: } \theta(t) = \frac{M_w(t)}{M_{MOF}}$$

$$\text{cinetica: } K(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\dot{m}_{w,ads/des}}{M_{MOF}}$$

Nelle equazioni sopra espone il termine  $\theta(t)$ , che rappresenta la quantità di acqua adsorbita o desorbita per unità in peso di materiale adsorbente, che in letteratura viene generalmente denominata "uptake".

La misura della massa di MOF utilizzato viene effettuata prima che questo venga caricato nel circuito STEAM per le prove sperimentali. Tale misura viene effettuata con una bilancia tecnica previa rigenerazione del materiale effettuata in forno a 120 °C per 8 ore.

## 2.2 Caratterizzazione sperimentale del CAU-10-H (Al)

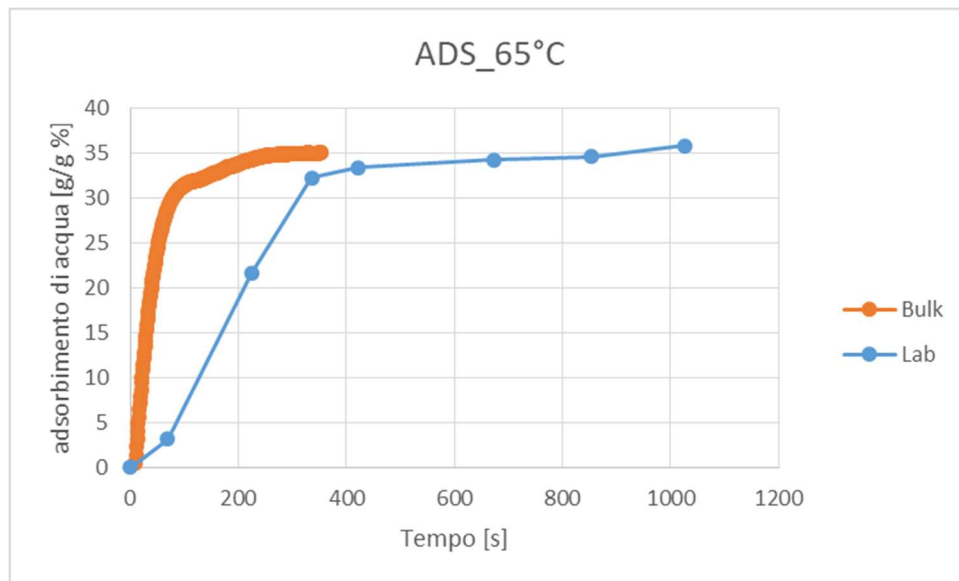
Le sperimentazioni, come programmato, sono state inizialmente condotte al fine di caratterizzare le fasi di adsorbimento e desorbimento di un letto fluido di materiale assorbente costituito da 50 g di polvere di CAU-10-H (Al), prodotto dalla MOF Technologies.

Le prove sono state condotte sostanzialmente con le stesse finalità e modalità adottate in precedenza nella caratterizzazione dell'Al-Fumarato [6] e anche in questo caso si è potuto registrare un buon riscontro in termini di uptake e cinetiche sensibilmente migliori rispetto ai dati forniti da ENEA [3] ed ottenuti con campioni di laboratorio del medesimo materiale.

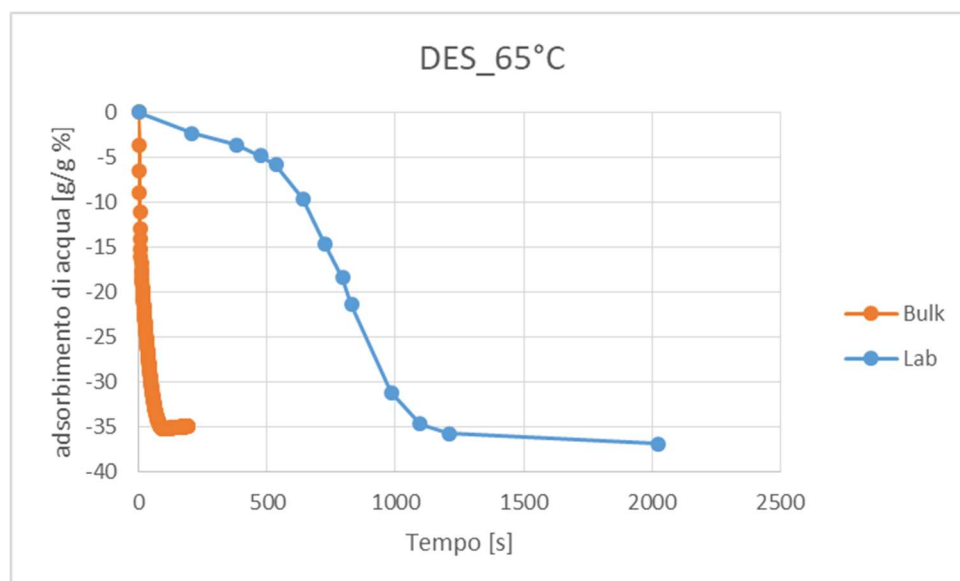
In particolare non si sono manifestati quegli effetti di scala potenzialmente riscontrabili nei materiali adsorbenti in condizioni di *bulk* che, come riportato in letteratura [8], determinano scostamenti a volte significativi rispetto a quanto atteso sulla base delle caratteristiche fisico-chimiche dei materiali stessi.

I seguenti grafici riassumono i risultati ottenuti riportando un confronto tra i dati ricavati da ENEA in condizioni di laboratorio su bilancia termo-gravimetrica ed i dati ricavati in bulk con l'apparato STEAM, dai quali si evince quanto sopra anticipato.

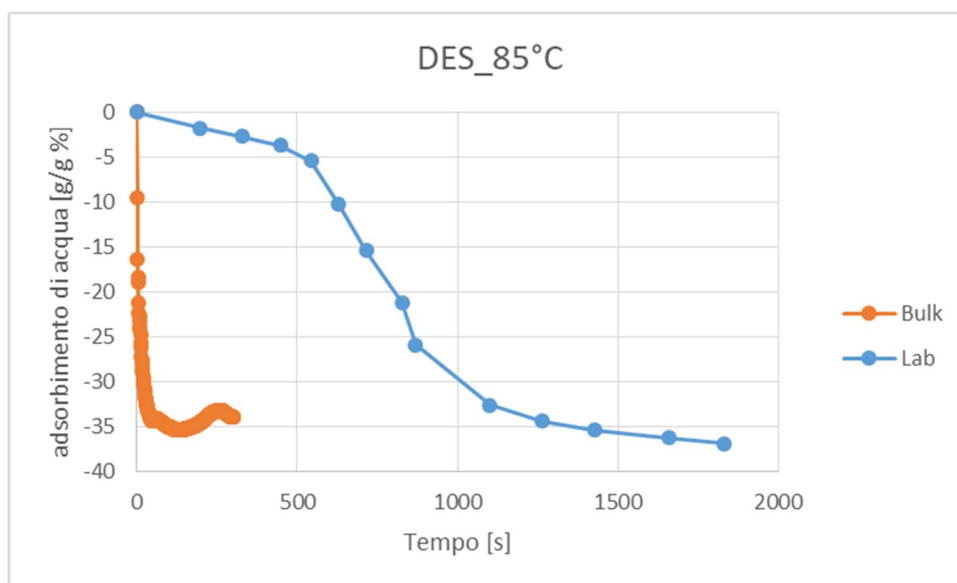
Nello specifico in [Figura 2.4](#), [Figura 2.5](#) e [Figura 2.6](#) sono mostrati gli andamenti nel tempo dell'adsorbimento e del desorbimento (adsorbimento negativo) di acqua nel CAU-10-H (Al) per alcune temperature di riferimento, sia nelle condizioni di laboratorio (prove effettuate da ENEA) che nelle condizioni di bulk del letto presente nell'impianto STEAM. La leggera discrepanza che si osserva tra i valori massimi di acqua adsorbita/desorbita nei due casi risulta sostanzialmente riconducibile alle differenti modalità di misura delle grandezze termofisiche di interesse, pertanto i risultati ottenuti possono essere considerati sufficientemente allineati.



**Figura 2.4. Andamento nel tempo dell'adsorbimento percentuale di acqua misurato per il MOF CAU-10-H (Al) @ 65 °C. Confronto tra le prove in bulk (su impianto STEAM) e le prove di laboratorio condotte da ENEA.**



**Figura 2.5. Andamento nel tempo del desorbimento percentuale di acqua misurato per il MOF CAU-10-H (Al) @ 65 °C. Confronto tra le prove in bulk (su impianto STEAM) e le prove di laboratorio condotte da ENEA.**



**Figura 2.6. Andamento nel tempo del desorbimento percentuale di acqua misurato per il MOF CAU-10-H (Al) @ 85 °C. Confronto tra le prove in bulk (su impianto STEAM) e le prove di laboratorio condotte da ENEA.**

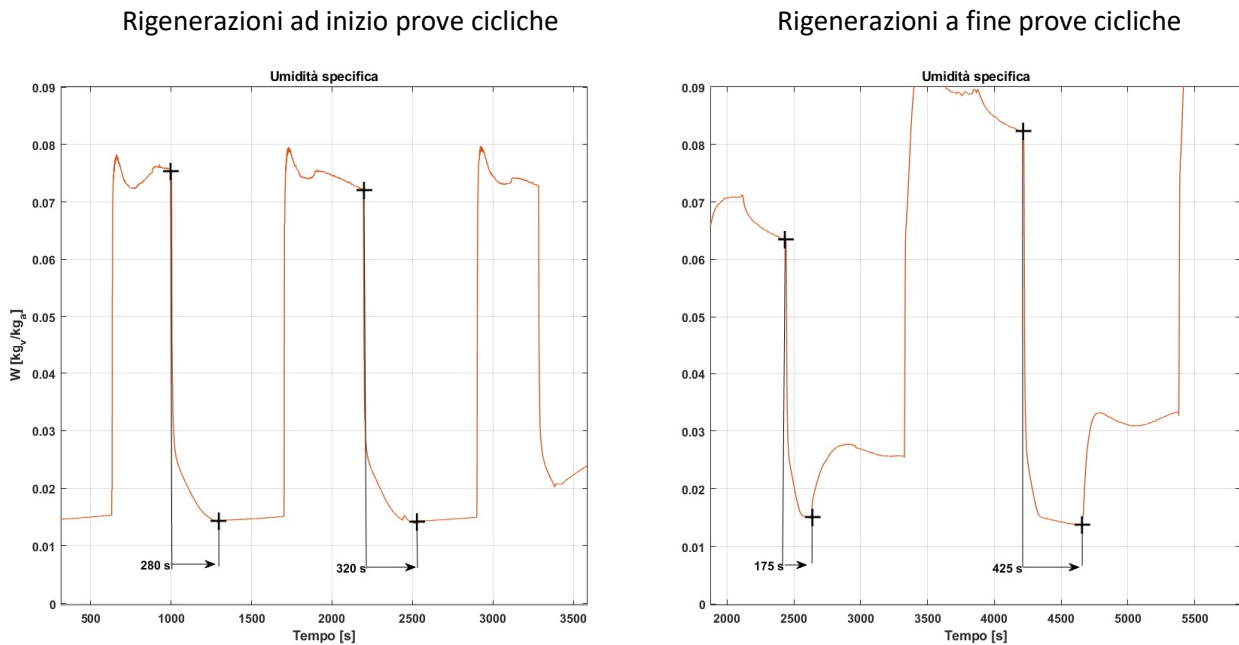
Dal confronto delle cinetiche si può invece notare in entrambe le tipologie di prove una differenza più marcata. Come già argomentato in [6] in relazione ai medesimi risultati osservati nel caso dell' Al-Fumarato, tale comportamento si può imputare alle diverse condizioni di scambio termico e di massa con cui sono state svolte le prove. In particolare, nelle prove in laboratorio il materiale è stato posto in una termobilancia nella quale il materiale stesso veniva lambito da un flusso di azoto secco, nel caso di prove cinetiche in desorbimento, e quasi saturo (umidità relativa superiore a 80%) nelle prove cinetiche in adsorbimento. Nel caso delle prove in bulk nell'apparato STEAM, invece, il materiale viene flussato in maniera uniforme evitando l'insorgenza di eventuali gradienti e aumentando notevolmente l'efficienza di scambio, quindi favorendo il processo stesso.

Per gli approfondimenti sullo studio della cinetica di adsorbimento e desorbimento del MOF si rimanda all'analisi svolta sulla base del modello comportamentale proposto dagli scriventi sempre in [6], basato sui modelli matematici introdotti dai più recenti studi presenti in letteratura inerenti la cinetica di materiali di tipo MOF [9,10,11]. La caratterizzazione cinetica di tali materiali è infatti di fondamentale importanza soprattutto al fine di colmare la sostanziale carenza di informazioni in letteratura (riscontrata nell'analisi bibliografica condotta nella corso della prima annualità [2,12,13,14]), particolarmente significativa in relazione ai parametri che regolano le cinetiche delle reazioni di adsorbimento e desorbimento.

Per avere maggiori elementi di valutazione ai fini della scelta del miglior materiale da impiegare per sviluppi futuri, si è quindi deciso di svolgere le previste prove cicliche di lunga durata, finalizzate ad una prima valutazione del comportamento durante cicli ripetuti di adsorbimento e rigenerazione (desorbimento), partendo proprio dal CAU-10-H (Al) già presente nell'impianto.

L'esecuzione di tali prove ha però evidenziato un'importante criticità del materiale, che dopo alcuni cicli a temperatura costante e prossima ai 60 °C e umidità relativa periodicamente variabile da circa 10% a saturazione, ha fatto registrare nella fase di rigenerazione una progressiva perdita della capacità del materiale di rilasciare il vapore adsorbito, e conseguente minore adsorbimento nella fase successiva, fino ad arrivare ad un sostanziale annullamento della risposta del letto alle variazioni repentine di umidità relativa. Al termine della prova si è pertanto tentata una rigenerazione spinta di lunga durata ad alta temperatura con aria secca, ottenendo la completa rigenerazione del materiale solo dopo 30 minuti.

A titolo esemplificativo in **Figura 2.7** viene riportato un confronto tra il diverso comportamento osservato in fase di rigenerazione ad inizio delle prove cicliche e alla fine. Si nota in particolare che il materiale dopo numerosi cicli (curve di destra in figura) ha subito un'alterazione significativa della cinetica evidenziata dall'andamento dell'umidità specifica nel plenum "letto-filtro" registrata a seguito della chiusura di tale volume per fine rigenerazione; infatti il letto di materiale pur avendo apparentemente raggiunto l'equilibrio con il flusso che lo investe (andamento con tangente circa orizzontale), una volta isolato continua a desorbire portandosi in equilibrio con l'aria presente in quel tratto di circuito, mentre nei cicli iniziali tale effetto non risulta apprezzabile in tempi brevi a riprova che la rigenerazione era in quel caso effettivamente completa.



**Figura 2.7. Prove cicliche di lunga durata con CAU-10-H –Umidità specifica a valle del letto (out-MOF). Confronto del diverso comportamento tra due rigenerazioni successive ad inizio prova (SX) e due rigenerazioni successive a fine prova (DX). Le crocette indicano i punti di inizio e fine desorbimento; i tempi indicano la relativa durata della fase di rigenerazione.**

La successiva ispezione visiva del letto ha mostrato (v. **Figura 2.8.** ) che buona parte del materiale si era agglomerato in granuli mediamente da circa 1 mm di diametro (con punte fino a 4 mm), e di discreta resistenza meccanica. Inoltre si è verificato un comportamento sostanzialmente fragile di tali agglomerati, con rottura per pressione che porta alla frantumazione in granuli di minore dimensione ma di pari consistenza.

È pertanto ragionevole dedurre che la bassa reattività fatta registrare dal materiale al termine della prova ciclica sia riconducibile alla significativa riduzione della superficie utile di scambio.

Il materiale è stato quindi rigenerato meccanicamente mediante ball milling, per riportarlo ad una granulometria prossima a quella iniziale, e riposizionato nell'impianto unitamente ad ulteriori 25 g di materiale ancora a disposizione, portando il peso totale del letto a 75 g. Le nuove prove di adsorbimento e rigenerazione hanno fatto registrare valori di uptake e cinetiche allineate con quelle delle prove iniziali, e anche le successive prove cicliche hanno mostrato una sostanziale stabilità del materiale e l'assenza di segnali di riduzione della reattività nel tempo. Alla successiva rimozione del materiale dall'impianto si è verificato che solo una piccola parte di questo aveva nuovamente dato luogo ad agglomerazione, mentre la maggior parte risultava confinata nel filtro in forma di polvere fine.





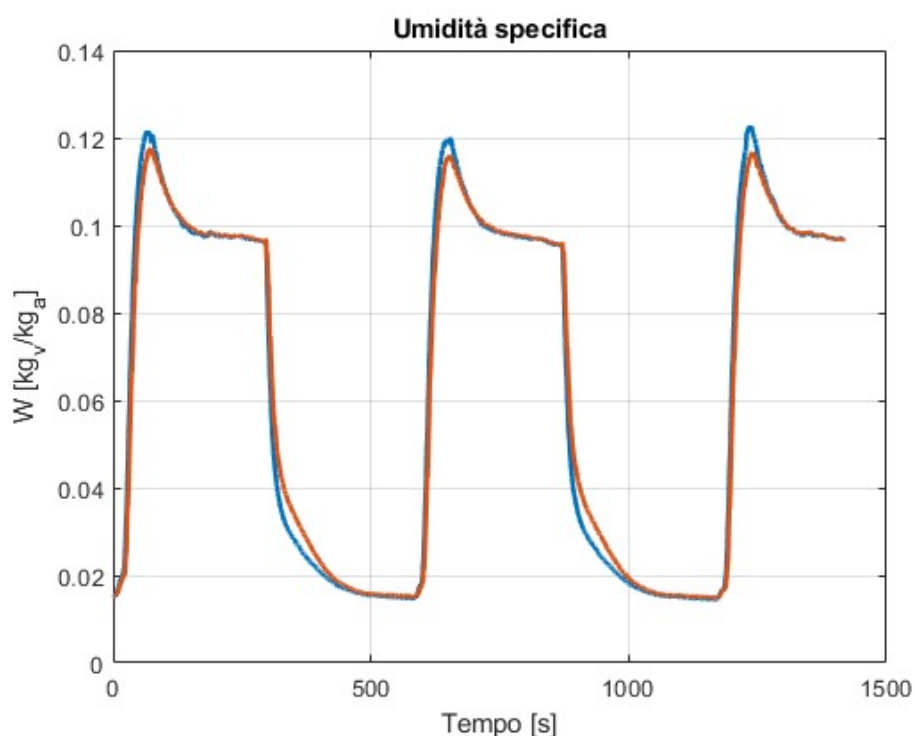
**Figura 2.8.** Immagine del CAU-10-H (Al) dopo primo trattamento ciclico. È visibile la formazione di agglomerati.

### 2.3 Prove cicliche con Al-Fumarato

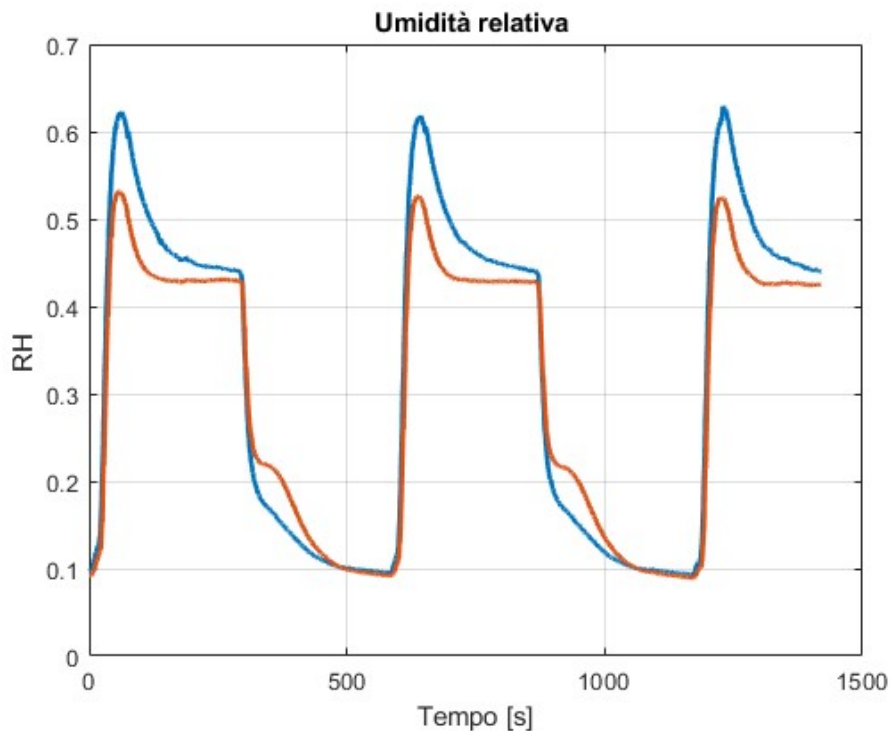
Tutte le prove cicliche sull'Al-Fumarato sono state condotte su un campione di 50 g sostituendo preventivamente il filtro HEPA con un nuovo filtro ed eseguendo nuovamente prove in bianco al fine di verificare l'assenza di residui di CAU-10-H nell'impianto.

#### 2.3.1 Prove cicliche di lunga durata

Le prove cicliche di lunga durata sull'Al-Fumarato hanno evidenziato la sostanziale stabilità del materiale in termini di uptake, cinetiche di processo e pressioni parziali di riferimento di inizio/fine delle fasi di adsorbimento e rigenerazione, come mostrato a titolo esemplificativo nei seguenti due grafici di **Figura 2.10**.



**Figura 2.9.** Cicli completi in prove di lunga durata con Al-Fumarato.  
Umidità specifica: curva blu in-MOF, curva rossa out-MOF (flusso aria umida @ 96,5 Nm<sup>3</sup>/h, T @ 65°C)



**Figura 2.10. Cicli completi in prove di lunga durata con Al-Fumarato.**

**Umidità relativa: curva blu  $RH_{in-MOF}$ , curva rossa  $RH_{out-MOF}$  (flusso aria umida @ 96,5 Nm<sup>3</sup>/h, T @ 65°C)**

Nello specifico i due grafici mostrano l'andamento nel tempo rispettivamente dell'umidità specifica (calcolata) e di quella relativa (misurata) a monte (curva blu, in-MOF) e a valle (curva rossa, out-MOF) del letto in due cicli generici successivi a fine prove. Come anticipato tali test sono stati condotti con flusso continuo senza mai ricorrere all'impiego del bypass e sollecitando in maniera continua il letto con variazioni cicliche dell'umidità controllate variando la temperatura dell'acqua di alimentazione del condensatore. Al termine delle prove, l'ispezione visiva non ha evidenziato significativi fenomeni di agglomerazione del MOF, come d'altronde non erano stati osservati nelle prove condotte nella precedente annualità (PAR2017).

### 2.3.2 Prove cicliche parziali

Le prove cicliche di adsorbimento/rigenerazione parziali sono state definite tenendo conto delle potenzialità operative dell'impianto in termini di controllo e rilevazione dei parametri di processo. Dopo alcuni test esplorativi condotti per verificare la fattibilità di diverse metodologie sperimentali per le indagini di interesse, è stato definito il protocollo di esecuzione delle prove di seguito descritto:

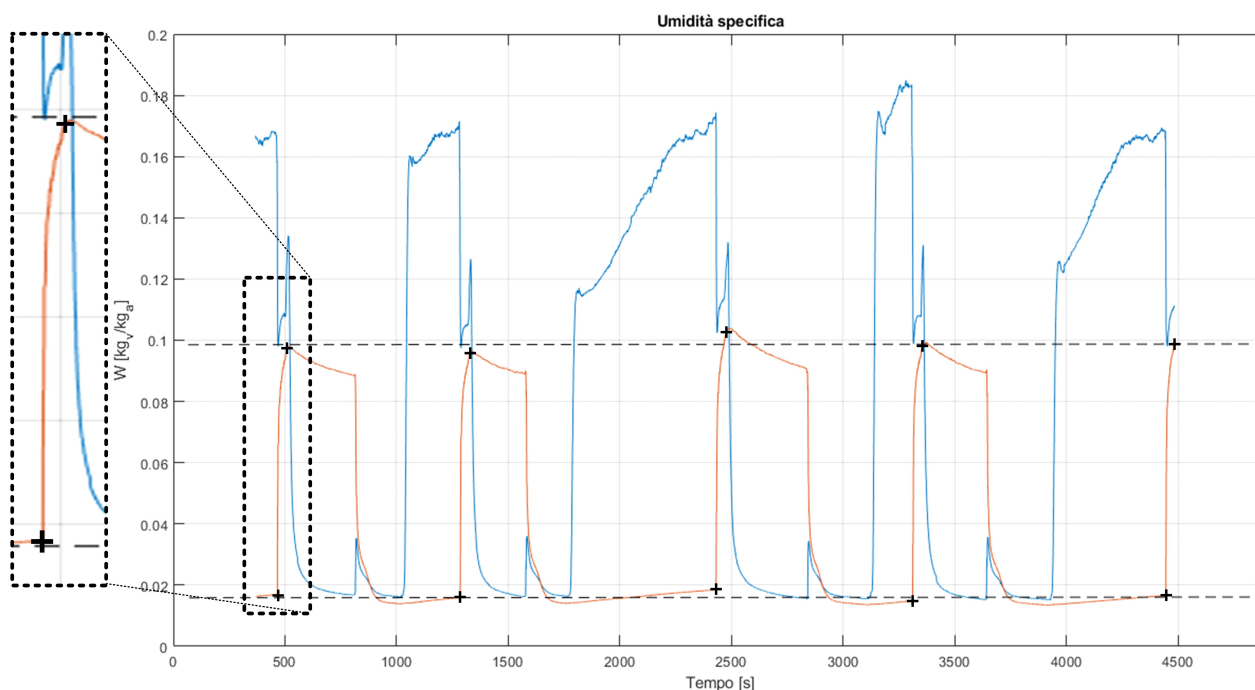
- *Prove cicliche di adsorbimento parziale con MOF completamente rigenerato.* La preparazione dell'impianto viene eseguita mediante bypass, come in una normale prova di adsorbimento, ma la fase utile viene mantenuta solo per un tempo fissato (comunque inferiore a quello di completamento del processo) trascorso il quale la fase viene interrotta mediante chiusura delle valvole del letto; la successiva rigenerazione del MOF, preceduta da idonea predisposizione dell'impianto mediante bypass, viene invece mantenuta fino all'equilibrio del processo, in modo che i cicli possano ripartire sempre dalle stesse condizioni di equilibrio.

- *Prove cicliche di desorbimento (rigenerazione) parziale con MOF saturo.* Similmente al precedente caso la preparazione dell'impianto viene eseguita mediante bypass, come in una normale prova di rigenerazione, ma la fase utile di desorbimento viene mantenuta solo per un tempo fissato (comunque inferiore a quello di completamento del processo) trascorso il quale la fase viene interrotta mediante chiusura delle valvole del letto; la successiva fase di adsorbimento (sempre preceduta da idonea predisposizione dell'impianto mediante bypass) viene mantenuta fino all'equilibrio del processo, in modo che i cicli possano ripartire sempre dalle stesse condizioni di saturazione del MOF.

Dall'analisi delle seguenti figure, che riportano gli andamenti delle umidità relativa e specifica (con le stesse notazioni già illustrate) registrati nelle due tipologie di prove sopra descritte, non si evidenziano effetti "memoria" significativi, né l'accentuazione dell'isteresi naturale del materiale, già osservata in laboratorio dal ENEA [3] e nel corso delle prove cicliche.

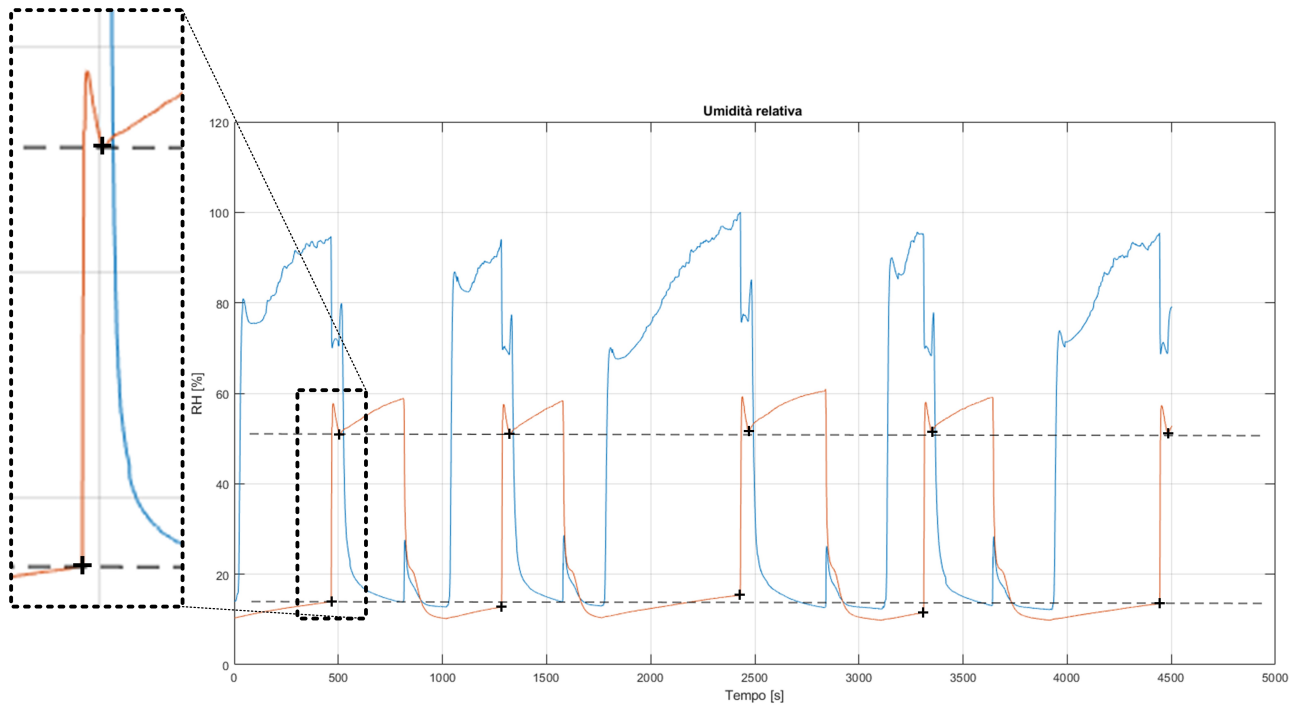
Come indicato nei riquadri di dettaglio riportati a lato di ogni grafico, i marker indicano gli istanti di inizio e fine fase utile che per tutte le prove è stata fissata di durata pari a 40 secondi. Ragionevolmente tali prove cicliche parziali possono pertanto essere considerate come prove di adsorbimento/desorbimento comprese tra il 40 e il 60%.

Si segnala che le piccole differenze che si possono osservare tra un ciclo e l'altro sono riconducibili al fatto che il sistema (eccetto che per la termostatazione che è automatica) viene gestito manualmente e pertanto non sempre si riescono a riprodurre esattamente le medesime condizioni di inizio fase utile.



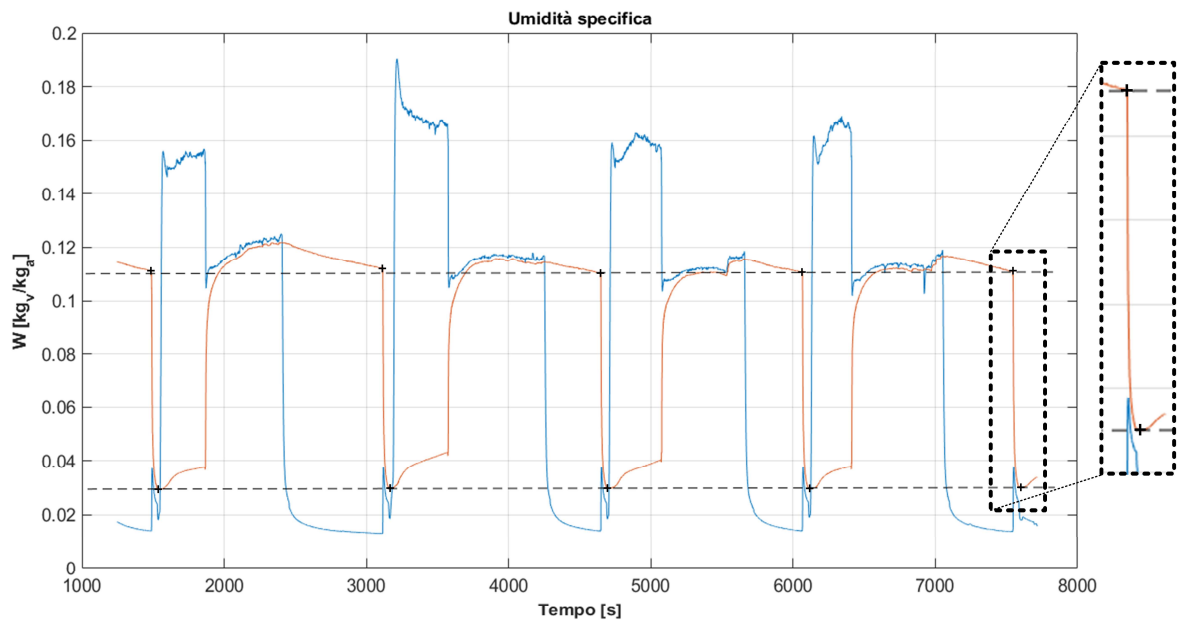
**Figura 2.11. Cicli parziali di adsorbimento con Al-Fumarato.**

**Umidità specifica: curva blu in-MOF, curva rossa out-MOF (flusso aria umida @ 96,5 Nm<sup>3</sup>/h, T @ 65°C)**



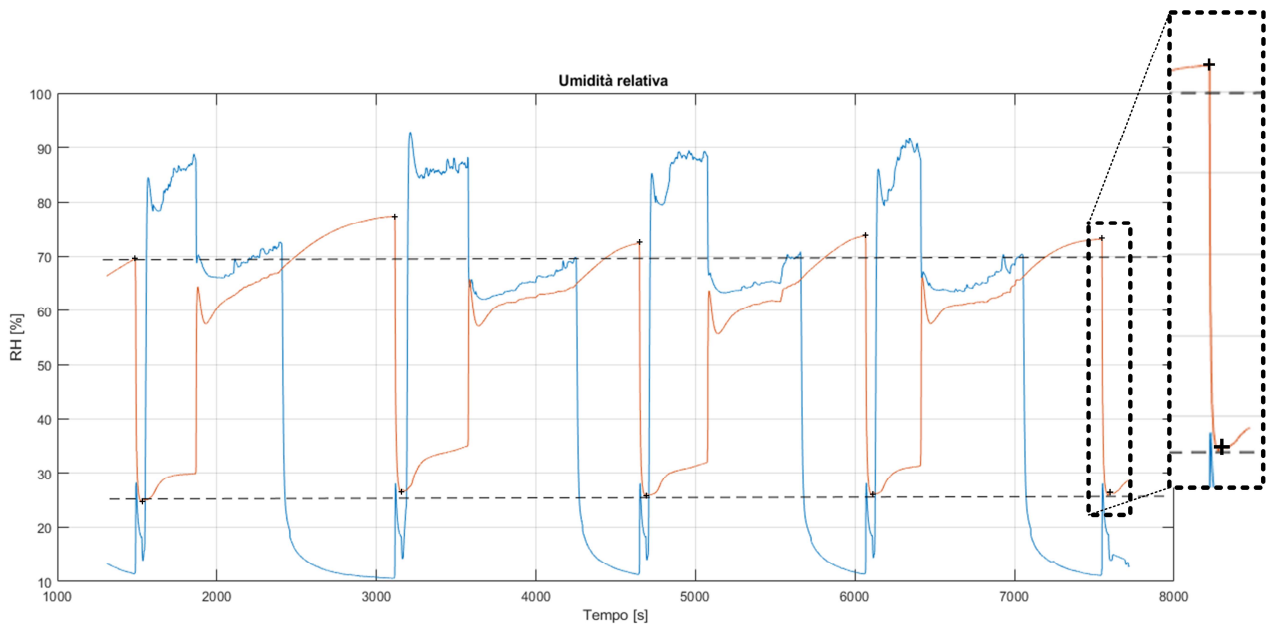
**Figura 2.12. Cicli parziali di adsorbimento con Al-Fumarato.**

**Umidità relativa: curva blu  $RH_{in-MOF}$ , curva rossa  $RH_{out-MOF}$  (flusso aria umida @  $96,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,  $T @ 65^\circ\text{C}$ )**



**Figura 2.13. Cicli parziali di desorbimento con Al-Fumarato.**

**Umidità specifica: curva blu in-MOF, curva rossa out-MOF (flusso aria umida @  $96,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,  $T @ 65^\circ\text{C}$ )**



**Figura 2.14. Cicli parziali di desorbimento con Al-Fumarato.**

**Umidità relativa: curva blu  $RH_{in-MOF}$ , curva rossa  $RH_{out-MOF}$  (flusso aria umida @ 96,5 Nm<sup>3</sup>/h, T @ 65°C)**

### 3 Conclusioni e fasi di sviluppo successivo

Le attività di ricerca svolte dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UTV) nell'ambito del trimestre di estensione PAR2018 dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, sono state indirizzate alla scelta definitiva del materiale adsorbente e ad una sua caratterizzazione in prove cicliche di lunga durata e con cicli parziali per evidenziare eventuali criticità di utilizzo a livello impiantistico connesse ad isteresi ed effetto memoria.

La scelta del materiale ha richiesto preliminarmente la caratterizzazione in bulk del materiale CAU-10-H (Al) per avere dati di confronto con quelli già disponibili dal PAR2017 relativamente al comportamento del letto di Al-Fumarato.

Le prove sono state condotte sostanzialmente con le stesse modalità adottate in precedenza per l'Al-Fumarato e anche in questo caso si è potuto registrare un buon riscontro in termini di uptake e cinetiche sensibilmente migliori rispetto ai dati forniti da ENEA ed ottenuti con campioni di laboratorio del medesimo materiale. Tale risultato sulla cinetica sembra confermare l'interpretazione della discordanza di comportamento osservata tra bulk e campione che era già stata formulata in precedenza, ovvero che le sperimentazioni condotte in laboratorio realizzano di fatto uno scambio peggiore rispetto alle prove in bulk nelle quali il materiale viene flussato in maniera uniforme.

Come più volte osservato una cinetica elevata è molto importante dal punto di vista dell'applicabilità industriale, perché vuol dire che tendenzialmente si possono avere cicli molto rapidi, ovvero è possibile realizzare impianti caratterizzati da una elevata densità di potenza. Sulla base delle risultanze sperimentali ottenute per i due MOF, che in entrambi i casi al variare delle condizioni operative forniscono tempi tra i 50 e i 100 secondi per completare l'adsorbimento e compresi tra i 70 e i 200 secondi per il completo desorbimento, non è quindi stato possibile effettuare la definitiva selezione del materiale.

Si è pertanto deciso di svolgere le previste prove cicliche di lunga durata, finalizzate ad una prima valutazione del comportamento durante cicli ripetuti di adsorbimento e rigenerazione (desorbimento), con entrambi i materiali, partendo proprio dal CAU-10-H (Al) già presente nell'impianto.

L'esecuzione di tali prove ha però evidenziato un'importante criticità per questo materiale MOF, che dopo alcuni cicli ha mostrato la tendenza ad agglomerarsi in granuli mediamente di circa 1 mm di diametro e di discreta resistenza meccanica con conseguente progressiva perdita, nella fase di rigenerazione, della capacità di rilasciare il vapore adsorbito, fino ad arrivare ad un sostanziale annullamento della risposta del letto alle variazioni repentine di umidità relativa. Applicando un trattamento meccanico (tecnica del ball milling) per riportarlo ad una granulometria prossima a quella iniziale (stato di polvere fine) si è comunque verificato che il processo è reversibile e che quindi il materiale può essere rigenerato.

La suddetta criticità di comportamento manifestata dal CAU-10-H (Al) e mai riscontrata con l'Al-Fumarato nel corso delle prove condotte nel PAR2017, richiederebbe quindi uno studio di approfondimento per analizzarne le cause, caratterizzando il fenomeno anche con prove di laboratorio.

In ogni caso si è ritenuto che tale elemento di distinzione tra i due MOF fosse sufficiente per selezionare l'Al-Fumarato come materiale di riferimento per proseguire nello sviluppo della tecnologia.

Sono state quindi eseguite le previste prove cicliche di lunga durata su tale materiale (sostituendo preventivamente il filtro HEPA), che hanno evidenziato la sostanziale stabilità del materiale in termini di

uptake, cinetiche di processo e pressioni parziali di riferimento di inizio/fine delle fasi di adsorbimento e rigenerazione.

Si è proceduto poi a definire ed eseguire prove cicliche di adsorbimento/rigenerazione parziali, che hanno permesso di verificare l'assenza di effetti "memoria" significativi, nonché di confermare il comportamento del materiale in termini di isteresi, che è risultata coerente con quanto era stato già osservato in laboratorio e nel corso delle prove cicliche.

In conclusione i risultati ottenuti nel corso del PAR2018 dall'Università di Tor Vergata, unitamente ai quelli ricavati parallelamente da ENEA nelle prove di fissaggio del materiale attivo mediante lo sviluppo di compositi a matrice polimerica ad alto caricamento di MOF [15], che hanno dato risultati pessimi per il CAU-10-H (Al) e ottimi per l'Al-Fumarato, fanno apparire quest'ultimo *significativamente più vantaggioso rispetto al primo e sicuramente idoneo allo sviluppo della tecnologia a livello industriale.*

A tal fine l'apparato STEAM rappresenta un importante output delle attività svolte che potrà essere utilizzato in diverse fasi future di sviluppo. Il primo passo sarà rappresentato dal significativo incremento del quantitativo di materiale utilizzato per le sperimentazioni, che dovrà passare dagli attuali 50–100 g ad almeno 400–500 g per avere informazioni più direttamente applicabili a livello impiantistico. Il MOF potrà essere utilizzato sia nella forma di letto fluido tal quale confinato tramite filtro HEPA, sia (preferibilmente) inglobato nel composito sviluppato da ENEA che ricorre al PVDF (polivinilidene fluoruro) come matrice polimerica di supporto.

Tali attività permetterebbero di definire al meglio tutti gli elementi necessari per poter procedere, in futuro ma in tempi possibilmente rapidi, alla progettazione, realizzazione e sperimentazione in campo di un impianto pilota, da realizzare preferibilmente in collaborazione con uno o più soggetti industriali, quali produttori di essiccatori per pasta, produttori di pasta secca e possibilmente con il produttore del materiale MOF selezionato, che ha già dimostrato un particolare interesse per l'iniziativa.

Va ricordato che la tecnologia, sebbene fino ad oggi sia stata sviluppata principalmente per il recupero dei cascami entalpici ed idrici dei processi di produzione della pasta secca alimentare, è potenzialmente applicabile alla maggior parte dei processi produttivi che includono fasi significative di essiccazione termica, sia in ambito agroalimentare che in altri settori. In ogni caso la metodologia in questione richiede un leggero incremento dei consumi elettrici complessivi di impianto, ma comporta una significativa riduzione del consumo complessivo di energia primaria conseguita grazie al recupero completo di tutti i cascami entalpici generati, che risultano disponibili ad un livello di temperatura (prossimo ai 100 °C) idoneo all'impiego interno nello stesso processo di essiccazione.

L'aspetto più critico rimane pertanto quello dei costi di produzione dei MOF, oggi elevato in quanto tali materiali sono attualmente disponibili solo con produzioni in scala laboratorio. Al riguardo si evidenzia, come già osservato in precedenza, che i precursori dei composti metallorganici di interesse per l'applicazione sono materiali comuni a priori non pregiati; pertanto, non essendovi un costo di partenza elevato che vincoli il costo di produzione su grande scala, è possibile attendersi lo sviluppo di processi produttivi industriali a basso costo nel momento in cui si formerà un'idonea domanda sul mercato.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. L. Milatovich, G.Mondelli, *La Tecnologia della Pasta Alimentare*, 1990, Chiriotti Editore, Pinerolo, ISBN 88-85022-30-8.
2. M. Pentimalli, C. Alvani, M. Bellusci, A. La Barbera, F. Padella, F.Varsano, *Materiali adsorbenti innovativi per l'efficientamento energetico di processi nell'industria agroalimentare*, Report RDS/PAR2015/057.
3. M. Pentimalli, C. Alvani, M. Bellusci, A. La Barbera, F. Padella, F.Varsano, *"Analisi sperimentale delle caratteristiche chimico-fisiche e delle proprietà di adsorbimento dell'acqua di materiali innovativi per l'essiccamento industriale"*. (Report RDS/PAR2016/101).
4. G.L. Guizzi, M. Manno, A. Zaccagnini, M. Salvatori, *Metodologie innovative per il recupero di cascami termici a bassa temperatura nel settore agroalimentare mediante materiali adsorbenti avanzati*, Report RDS/PAR2015/058.
5. G.L. Guizzi, M. Manno, A. Zaccagnini, M. Salvatori, S. Bellocchi, *"Apparato sperimentale per la caratterizzazione di letti adsorbenti innovativi in cicli aperti per il recupero di cascami termici in processi di essiccamento industriale"* (Report RDS/PAR2016/102).
6. G.L. Guizzi, M. Manno, A. Zaccagnini, M. Salvatori, S. Bellocchi, *"Caratterizzazione sperimentale di letti di materiali adsorbenti innovativi in cicli aperti e upgrading dell'apparato dimostratore sperimentale"* (Report RDS/PAR2017/008).
7. S. Bellocchi, G.L. Guizzi, M. Manno, M. Pentimalli, M. Salvatori, A. Zaccagnini, *Adsorbent materials for low-grade waste heat recovery: Application to industrial pasta drying processes*, *Energy* 140 (2017), 729-745.
8. S.P. Malysenko, S.V. Mitrokhin, I.A. Romanov, *Effects of scaling in metal hydride materials for hydrogen storage and compression*, *Journal of Alloys and Compounds*, 645 (2015), S84-S88.
9. How Wei Benjamin Teo, Anutosh Chakraborty, Yuji Kitagawa, Sibnath Kayal, *Experimental study of isotherms and kinetics for adsorption of water on Aluminium Fumarate*, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 114 (2017) 621-627.
10. Anutosh Chakraborty, Baichuan Sun, *An adsorption isotherm equation for multi-types adsorption with thermodynamic correctness*, *Applied Thermal Engineering* 72 (2014) 190e199.
11. How Wei Benjamin Teo, Anutosh Chakraborty, Sibnath Kayal, *Post synthetic modification of MIL-101(Cr) for S-shaped isotherms and fast kinetics with water adsorption*, *Applied Thermal Engineering* 120 (2017) 453-462.
12. S.K. Henninger, F. Jeremias, J. Ehrenmann, C. Janiak, *Potential of PCPs/MOFs for the use in Adsorption heat pump processes*, *International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC11)*, 6-8 Aprile 2011 Padova, IIR/AICARR 2011, 415-424.
13. M.F. de Lange, K.J. F. M. Verouden, T.J.H. Vlugt, J. Gascon, F. Kapteijn, *Adsorption-Driven Heat Pumps: The Potential of Metal-Organic Frameworks*, *Chemical Reviews*, 115 (2015), 12205-12250.
14. X. Zheng, T.S. Ge, R.Z. Wang, *Recent progress on desiccant materials for solid desiccant cooling systems*, *Energy* 74 (2014) 280-294.
15. M. Pentimalli, A. Aliboni, M. Bellusci, A. La Barbera, F. Padella, L. Pilloni, F.Varsano, *"Sviluppo di un composito a matrice polimerica ad alto caricamento di MOF. Prove di fattibilità e valutazioni esplorative."*. (Report RDS/PAR2018/077).



## CV breve del gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

### Giuseppe Leo Guizzi

Professore Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", attualmente Coordinatore del Corso di Studi in Ingegneria Energetica (carica ricoperta fin dal 2000), già Presidente del Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica nel periodo 1986-1989. Membro della Giunta nazionale dei Professori di Macchine nel triennio 2002/2005.

Già membro della commissione istruttoria del Ministero dell'Industria per le iniziative di risparmio energetico, dei gruppi di lavoro del C.T.I. sulla "Combustione in Letto Fluidico" e sugli "Impianti a ciclo combinato".

Consulente scientifico del MIUR per i progetti di ricerca applicata nel settore dell'Ingegneria meccanica. Esperto dell'Autorità dell'Energia e del CCSE per la verifica degli impianti incentivati ai sensi del CIP 6. Consulente di numerose Aziende per iniziative nel settore dell'energia.

Coordinatore di progetti di ricerca Europei sull'idrogeno. Autore di oltre 70 lavori scientifici riguardanti: macchine idrauliche, impianti di potenza, cogenerazione e "repowering", soluzioni innovative per cicli a vapore (rigeneratore barometrico) e cicli misti gas-vapore (*Gas Injection Steam Cycle*), monitoraggio e diagnostica di impianti termoelettrici.

### Michele Manno

Posizione attuale: si è laureato con lode in Ingegneria Meccanica nel 2000 presso il Politecnico di Torino, e nello stesso Ateneo ha conseguito il titolo di dottore di ricerca in Energetica nel 2004; attualmente in servizio come Ricercatore Confermato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", settore scientifico-disciplinare "Sistemi per l'Energia e l'Ambiente" (ING-IND/09).

Attività di ricerca: ha collaborato a numerosi progetti di ricerca nell'ambito del gruppo di lavoro coordinato dal prof. G.L. Guizzi (Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"), alcuni dei quali finanziati su bandi di ricerca nazionali o internazionali, aventi ad oggetto la modellazione e lo sviluppo di sistemi energetici avanzati finalizzati alla riduzione del consumo di energia primaria e di emissioni inquinanti e climalteranti.

Principali attività di ricerca:

- Progetto MECCANO: studio, sviluppo e sperimentazione di un sistema di climatizzazione a basso consumo per veicoli elettrici o ibridi. Progetto coordinato dal CRF (Centro Ricerche FIAT) e finanziato sul Bando Industria 2015 "Mobilità sostenibile" del Ministero per lo Sviluppo Economico.
- Progetto HP-ACS: studio, sviluppo e sperimentazione di un impianto frigorifero basato su pompa di calore a idruri metallici per veicolo adibito al trasporto di alimenti refrigerati. Il gruppo di ricerca dell'Università di Roma "Tor Vergata" non figura tra i partecipanti al progetto (finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, ambito Capacities - Research for the benefit of SMEs) ma ha collaborato alle attività del progetto svolte da Labor srl, coordinatore del progetto.
- Progetto SEAKERS: studio, sviluppo e sperimentazione di un sistema di recupero di energia dai moti di sollevamento, beccheggio e rollio di imbarcazioni a vela. Progetto coordinato da Labor srl e finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, ambito Capacities - Research for the benefit of SMEs.
- Progetto ATHENA: collaborazione con Labor srl allo studio e sviluppo di un sistema di generazione portatile basato su celle a combustibile PEM e stoccaggio di idrogeno in idruri chimici (boroidruro di sodio).

- Progetto FEMAG-C: studio e sviluppo di un sistema di propulsione ibrido per autotrazione con motore elettrico e celle a combustibile alimentate a idrogeno, per uso cittadino e affino. Progetto coordinato da Labor srl e finanziato dalla regione Lazio (L. 598/94).

- Progetto ECOCED: collaborazione con Metasystem spa per la valutazione dei consumi energetici derivanti dalla gestione di moderni Centri di Elaborazione Dati (CED) e studio di sistemi energetici (nell'ambito della generazione distribuita) volti alla riduzione di consumi, emissioni e costi derivanti dalla gestione dei CED.

- Progetti FEMAG, DEMAG, ENFUGEN, finanziati nell'ambito del 6° Programma Quadro EU, finalizzati allo studio di sistemi ibridi di generazione basati su celle a combustibile e supercondensatori, con stoccaggio di idrogeno in idruri metallici, per applicazioni sia mobili sia stazionarie.

Attività didattica: è titolare dall'A.A. 2011/12 del corso di Complementi di Macchine (6 CFU, insegnamento obbligatorio per il Corso di Laurea triennale in Ingegneria Energetica presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata") e dall'A.A. 2014/15 del corso di Energy Systems (6 CFU, corso di Laurea triennale in Engineering Sciences).

È inoltre coordinatore Erasmus per il Corso di Laurea triennale e Magistrale in Ingegneria Energetica.

### **Alessandro Zaccagnini**

Attualmente assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", ha conseguito la Laurea triennale in Ingegneria Meccanica e la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso il medesimo Ateneo.

Ha partecipato a numerosi progetti di ricerca finanziati a livello europeo, nazionale e regionale, aventi ad oggetto temi legati al risparmio energetico e allo sviluppo di sistemi energetici avanzati.

Autore di 8 articoli presentati a convegni (nazionali e internazionali) e di 1 brevetto.

### **Marco Salvatori**

Laureato in Ingegneria Energetica, titolare di assegno di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" nel periodo 2013-2015, partecipando in particolare alle attività del progetto SEAKERS, finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, avente ad oggetto lo studio di un sistema di recupero di energia dai moti di sollevamento, beccheggio e rollio di imbarcazioni a vela, nonché al progetto MECCANO, coordinato dal CRF (Centro Ricerche FIAT) e finanziato sul Bando Industria 2015 "Mobilità sostenibile" del MiSE, riguardante lo studio di un sistema di climatizzazione a basso consumo per veicoli elettrici o ibridi. Progetto.

Nel periodo 2013/2015 presso la Labor srl ha partecipato al progetto UP-THERM, finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro EU, sullo sviluppo di un micro-cogeneratore in ambito domestico.

Autore di 3 articoli scientifici su rivista di rilevanza internazionale e di 1 contributo a convegno internazionale.

### **Sara Bellocchi**

Laureata in Ingegneria Energetica, titolare di assegno di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" nel periodo 2016-2017, svolge attualmente il Dottorato di ricerca presso il medesimo dipartimento occupandosi prevalentemente di modellazione e analisi di scenari per la mobilità sostenibile. Ha svolto attività di ricerca in ambito di efficienza energetica, accumulo di energia, "green infrastructure", analisi di sistemi energetici, modellazione e simulazione di sistemi integrati. Ha inoltre conseguito un diploma post-laurea in Ingegneria Mineraria presso Curtin University WASM, Australia, Perth. Autrice di 3 articoli scientifici su rivista di rilevanza internazionale e di 2 contributi a convegno internazionale.