



**Convegno**  
**Le emissioni dalla combustione della legna**  
**in piccoli impianti domestici e la qualità dell'aria**

 **POLITECNICO DI MILANO**

**DIAR**  
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale,  
Infrastrutture Viarie, Rilevamento



 **Rassegna dei fattori di emissione dai  
piccoli impianti a biomassa**  
**Ing. Silvia Galante**



**2**

**Indice**

- La combustione della legna e le tipologie di particolato emesso
- Letteratura scientifica sui fattori di emissione
- Tipo di particolato e tossicità
- Effetto del ciclo di carico
- Range di valori medi
- Possibili obiettivi tecnologici

**POLITECNICO DI MILANO**



## Combustione delle biomasse

3

La combustione della legna è un processo complesso, che consiste essenzialmente in:

- Devolatizzazione** dei composti organici dalla matrice legnosa;
- Combustione dei composti organici in fase gas**;
- Combustione del residuo legnoso**.

-I tre parametri che controllano una buona combustione sono essenzialmente **temperatura, turbolenza** e tempo di residenza. Se temperatura e/o tempo di residenza sono insufficienti parte delle sostanze organiche devolatizzate possono essere emesse

-Data l'eterogeneità del materiale, le condizioni di combustione variano con il tempo ed all'interno della camera di combustione

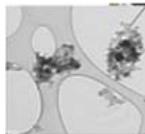
-Le temperature all'interno della camera di combustione non sono elevatissime, e perciò gli ossidi di azoto sono prodotti quasi esclusivamente dall'azoto presente nel combustibile e non dall'azoto dell'aria, come avviene di solito per gli altri combustibili

POLITECNICO DI MILANO

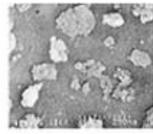


## Tipologie di particolato

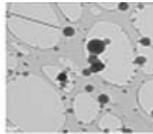
4



Soot



Salt



COC ('Tar')



Il tipo di particolato che si genera dalla combustione della biomassa dipende dalle condizioni di combustione. Prevengono:

**Particelle di carbonio organico (COC)** per combustione incompleta a bassa temperatura

**fuligine** (black carbon), per combustione incompleta (in difetto locale di ossigeno) ad alta temperatura

**Sali** (non particolarmente ricchi di solfati) per combustione completa

Elaborazione da Nussbaumer, 2010

POLITECNICO DI MILANO

### Particle Properties

	Flaming Combustion			Pyrolysis
	lack of O <sub>2</sub> in the flame	- Mix -	T and O <sub>2</sub> good	T low at start or high O <sub>2</sub> O <sub>2</sub> lack gas. or fl. ext.
View				
PM	<b>Soot</b>	Salts + Soot	<b>Salts</b>	<b>COC</b>
Composition	EC / BC chemical / optical C/H > 6..8	↔	CC + Minerals carbonate C + inorg. M	OC = TC-EC-CC C/H < 2
Colour	black	grey	white	brown   none
Health effect		↔	-	 
Climate effect	↑ absorbs light and heats atmosphere*	↔	↓ scatters light and cools surface	→ weakly absorbs and scatters

 **Verenum** \* [T. Bond, Testimony, US House of Repr. 10.18.07]; BC = 2000 x CO<sub>2</sub> for 20 y  
[ICCT, June 2009]. BC responsible of 0.34 Wm<sup>-2</sup> of total 1.6 Wm<sup>-2</sup>

Fonte: Nussbaumer, 2010

**POLITECNICO DI MILANO**

### Particle Properties

PM in g/GJ	Flaming Combustion			Pyrolysis
	<b>Soot</b>	Salts + Soot	<b>Salts</b>	<b>COC</b>
> 1000	Badly operated stoves and boilers			Badly operated stoves and boilers
150 - 1000				
50 - 150				
20 - 50		Pellet stoves and boilers		
10 - 20			stove & boiler at ideal cond. with filter	
< 10			Automatic wood boilers	

Fonte: Nussbaumer, 2010

**POLITECNICO DI MILANO**



## Letteratura scientifica sui fattori di emissione

7

Dati di letteratura: **65 diverse fonti bibliografiche** solo per le emissioni di PM da piccoli impianti di combustione (ultimi 10 anni)

**Estrema variabilità dei fattori di emissione** in relazione a:

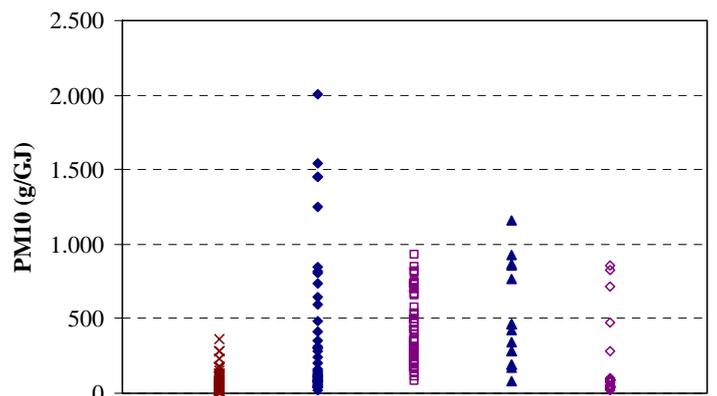
- Sistema di misura (in particolare per il PM: caldo/freddo)
- Ciclo misurato (in laboratorio o in campo; con o senza fase iniziale; ecc.)
- Tipo di legna
- Qualità della legna (in particolare umidità)
- Tipo di apparecchio e sue caratteristiche tecnologiche (i dati relativi a molti apparecchi sono relativamente utilizzati perché si tratta di tipologie specifiche presenti solo nel nord Europa)
- Inquinanti di maggiore rilievo per le emissioni dalla combustione della legna: PM10, COV, IPA, PCDD/F

POLITECNICO DI MILANO



## Review: letteratura fattori di emissione

8



- × Stufa a pellet
- ◆ Stufa a legna
- Camino chiuso
- ▲ Camino aperto
- ◇ Caldaia a legna

Dati da 35 fonti bibliografiche (di 65 consultate) (PM2.5=94.5% PM; PM10=90% PM)

POLITECNICO DI MILANO



### Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from Fireplace Combustion of Woods Grown in the Northeastern United States

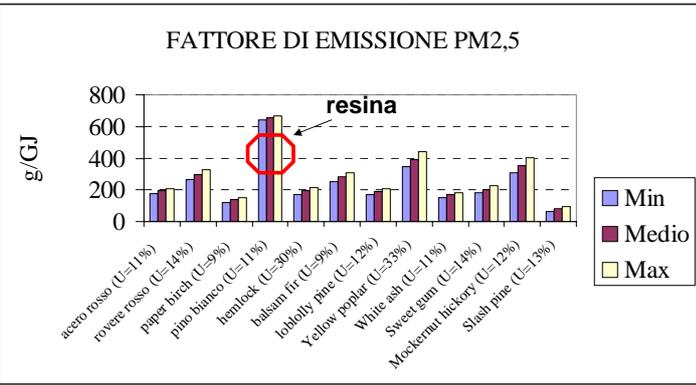
PHILIP M. FINE  
Environmental Engineering Science Department,  
California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

GLEN R. CASS\*  
School of Earth and Atmospheric Sciences,  
Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332

BERND R. T. SIMONEIT  
College of Oceanic and Atmospheric Sciences,  
Oregon State University, Corvallis, Oregon 97331

### Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from the Fireplace Combustion of Woods Grown in the Southern United States

Studio per identificare i traccianti organici specifici delle diverse specie legnose: stesso camino e ciclo, FE diversi!

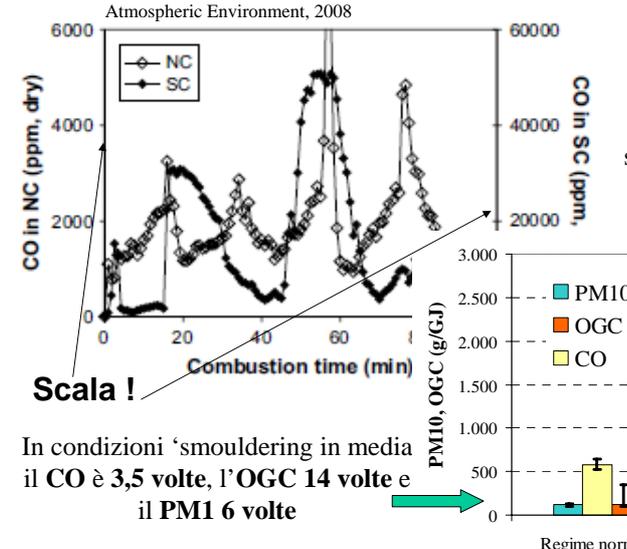


Ciclo di combustione completo in un camino chiuso utilizzando diversi gradi di umidità e le essenze considerate più diffuse nelle diverse aree USA



### Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater

J. Tissari<sup>a,\*</sup>, J. Lyyräinen<sup>b</sup>, K. Hytönen<sup>a</sup>, O. Sippula<sup>a</sup>, U. Tapper<sup>b</sup>, A. Frey<sup>c</sup>, K. Saarnio<sup>c</sup>, A.S. Pennanen<sup>d</sup>, R. Hillamo<sup>e</sup>, R.O. Salonen<sup>d</sup>, M.-R. Hirvonen<sup>d</sup>, J. Jokiniemi<sup>a,b</sup>



Masonry heater (stufa ad accumulo) in condizioni di combustione a regime e 'smouldering' (lieve sovraccarico dell'apparecchio e aria insufficiente)

## PCDD/F, PCB, HxCBz, PAH, and PM Emission Factors for Fireplace and Woodstove Combustion in the San Francisco Bay Region

11

BRIAN K. GULLETT\*

Office of Research and Development,  
National Risk Management Research Laboratory (E305-01),  
U.S. Environmental Protection Agency,  
Research Triangle Park, North Carolina 27711

ABDERRAHMANE TOUATI

ARCADIS Geraghty & Miller, Inc., 4915F Prospectus Drive,  
Durham, North Carolina 27713

MICHAEL D. HAYS

Office of Research and Development,  
National Risk Management Research Laboratory,  
U.S. Environmental Protection Agency,  
Research Triangle Park, North Carolina 27711

13 prove sull'intero ciclo di combustione con  
due diversi apparecchi e tipi di legna.

Forte variabilità tra una prova e l'altra  
soprattutto per PCDD/F (di un fattore 5)

Misurati 34 diversi PAH. PAH variabilità tra  
prove soprattutto per il pino (in relazione alla  
presenza di resina)

Il pino ha meno PAH totali ed è anche meno  
umido

	PCDD (ngTEQ/GJ)	PAH totale (mg/GJ)	Benzo(a) pirene (mg/GJ)	Benzo(bee) fluorantene (mg/GJ)	Benzo(k)flu orantene (mg/GJ)	Indeno(1,2,3) pirene (mg/GJ)
Quercia, stufa	13	1.338	30	20	24	7
Quercia, camino chiuso	18	1.196	31	20	23	16
Pino, camino chiuso	71	391	17	12	15	10

POLITECNICO DI MILANO

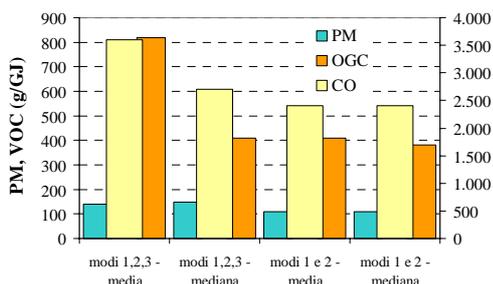
Energy Fuels 2011, 25, 315-323 · DOI:10.1021/ef1007787  
Published on Web 01/05/2011

energyfuels  
article

12

## Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 2: Wood Stove

Esbjörn Pettersson,<sup>†,‡</sup> Christoffer Boman,<sup>\*§</sup> Roger Westerholm,<sup>§</sup> Dan Boström,<sup>§</sup> and Anders Nordin<sup>§</sup>



mg/GJ	modi 1,2,3 media	modi 1,2,3 mediana	modi 1 e 2 - media	modi 1 e 2 - mediana
B(a)P	610	71	88	40
B(b)F	680	140	150	70
B(k)F	250	45	51	22
I(1,2,3-cd)P	35	7	8	4

Modo 1 = funzionamento normale

Modo 2 = funzionamento a basso carico

Modo 3 = funzionamento ad alto carico (difetto d'aria)

PAH: dominano fenantrene,fluorene  
pirene; retene nel caso di legna da  
conifere

Simulazione delle condizioni reali di combustione in una tipica stufa svedese.

Le misure escludono la fase di accensione

Critico il funzionamento ad alto carico!

POLITECNICO DI MILANO

13



PERGAMON Atmospheric Environment 36 (2002) 4823–4837  
www.elsevier.com/locate/atmosenv

### ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove

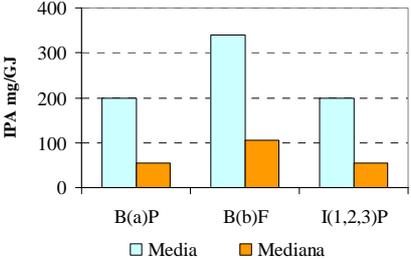
Emma Hedberg<sup>a</sup>, Adam Kristensson<sup>b</sup>, Michael Ohlsson<sup>c</sup>, Christer Johansson<sup>a,d</sup>, Per-Åke Johansson<sup>d</sup>, Erik Swietlicki<sup>b</sup>, Vaclav Vesely<sup>a</sup>, Ulla Wideqvist<sup>a</sup>, Roger Westerholm<sup>e,\*</sup>

Emissioni di PAH (45 composti): media 15.000 mg/GJ.

Composti più presenti: fluorene, fenantrene, antracene, fluorantene e pirene (più del 70% del totale).

Se si valuta la cancerogenicità il maggior contributo è del benzo(a)pirene; il fluorantene ha una potenzialità importante (pari al 40% del B(a)P; il risultato però dipende dal valore di tossicità equivalente adottato, maggiore di quello EPA)

### Stufa a legna – intero ciclo di combustione escluso il primo minuto



Compound	Media	Mediana
B(a)P	~200	~50
B(b)F	~340	~110
I(1,2,3)P	~200	~50

POLITECNICO DI MILANO

14



## Survey 2008 IEA

### Particulate Emissions from Biomass Combustion in IEA Countries

Survey on Measurements and Emission Factors

Thomas Nussbaumer<sup>1,2</sup>, Claudia Czasch<sup>1</sup>, Norbert Klippel<sup>1</sup>, Linda Johansson<sup>3</sup>, Claes Tullin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Verenum, CH-8006 Switzerland, www.verenum.ch  
<sup>2</sup> University of Applied Sciences Lucerne, CH-6048 Horw, www.hslu.ch  
<sup>3</sup> SP Technical Research Institute of Sweden, SE-50115 Borås, www.sp.se



On behalf of  
International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32  
Swiss Federal Office of Energy (SFOE)  
Download [www.ieabcc.nl](http://www.ieabcc.nl) or [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch)

Zürich, January 2008 ISBN 3-908705-18-5

L'International Energy Agency (agenzia indipendente che opera in ambito OCSE) ha realizzato una rassegna dei fattori di emissione

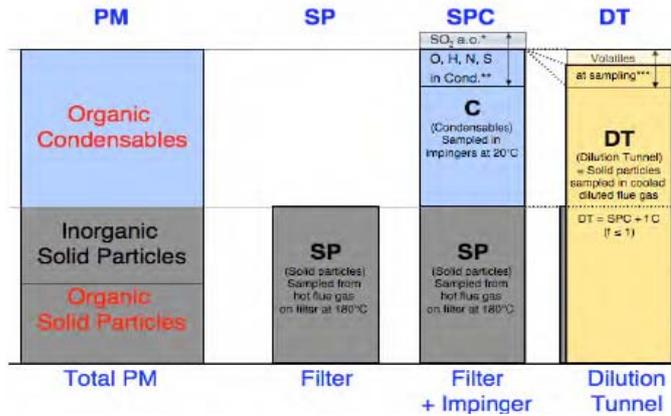
Coinvolte 17 istituzioni di 7 paesi (Austria, Danimarca, Germania, Norvegia, Olanda, Svezia, Finlandia)

POLITECNICO DI MILANO



## PM: elementi di variabilità FE – metodi di misura

15



Source: Nussbaumer et al. – Particulate Emissions from biomass combustion in IEA countries, 2008

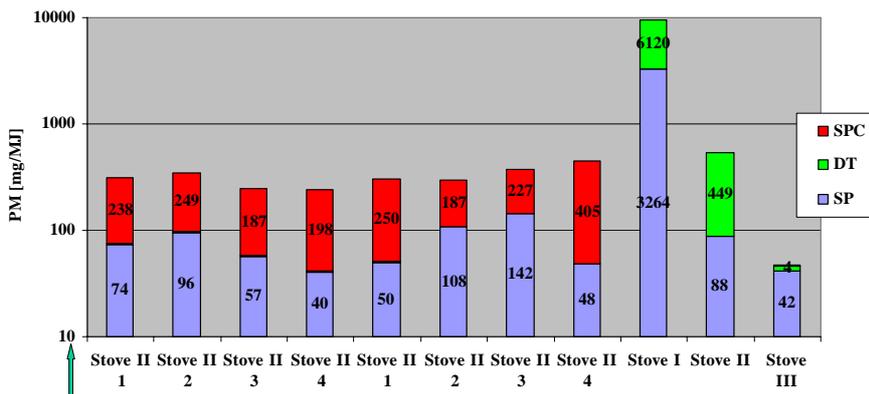
**Il materiale organico condensabile è misurato solo da alcuni metodi di misura!**

POLITECNICO DI MILANO



## Influenza del metodo di misura per il PM – un esempio

16



**scala logaritmica !**

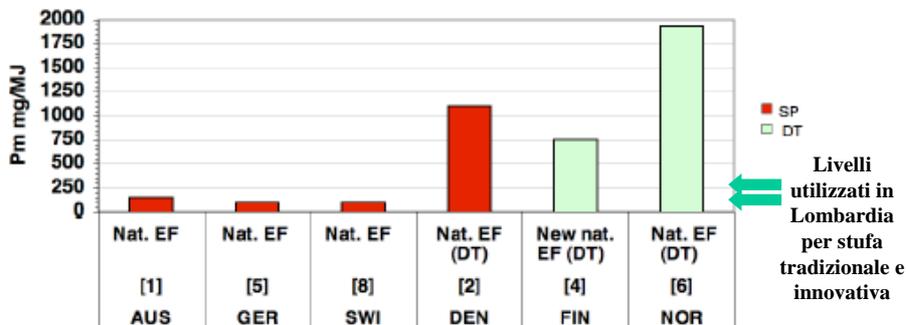
Comparazione dei fattori di emissione per particolato solido (SP), particolato in tunnel di diluizione (DT) e particolato solido più particelle condensabili campionate con un gorgogliatore

POLITECNICO DI MILANO



## IEA – confronto fattori di emissione nazionali

17



Fattori di emissione utilizzate negli inventari nazionali per le stufe a legna: da 94 g/GJ (Germania) a 1.932 g/GJ (Norvegia)

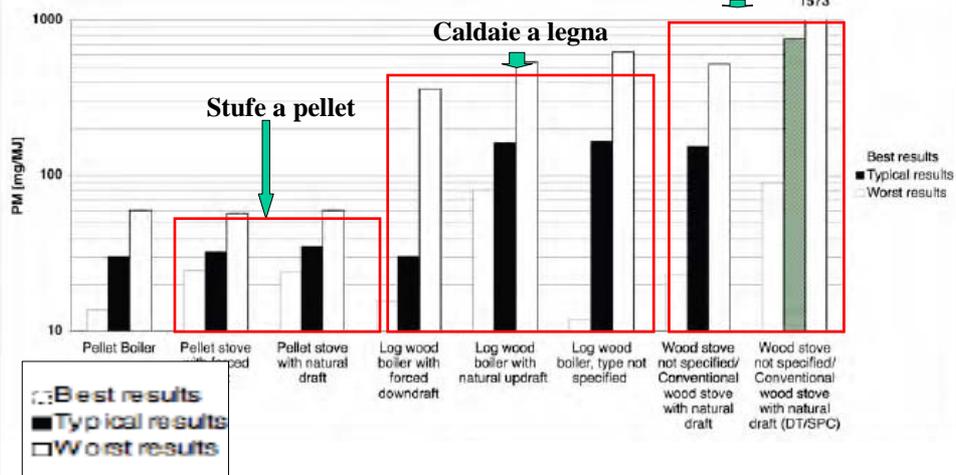
POLITECNICO DI MILANO



## IEA – emissioni medie, tipiche e peggiori

18

Stufe a legna (con o senza DT)



Dove c'è comparazione tra campionamento a caldo e DT le emissioni crescono di circa 4 volte. La differenza tra condizioni migliori e peggiori è minore per i pellet.

Non ci sono valori medi per i camini (pochi dati)

POLITECNICO DI MILANO



## Tipo di particolato e tossicità

19

Spherical organic carbon particles



Soot (elemental carbon aggregates)



Inorganic ash particles



Le diverse tipologie di particolato differiscono per dimensioni e composizione chimica: di conseguenza sono diverse anche le caratteristiche tossicologiche.

E' noto che le particelle di minore dimensione sono più tossiche; ci sono però altre caratteristiche rilevanti: in particolare contenuti di IPA e metalli, ma anche altri composti organici (aldeidi, cetoni, acidi organici, composti organici clorurati).

I COC sono costituiti da composti organici, compresi gli aromatici.

Nel 'soot' sono presenti composti organici derivanti dalla devolatilizzazione, che al crescere della temperatura tendono a trasformarsi in composti aromatici

Kochbach Bolling, A., Pagels, J., Yttri, K.E., Barregard, L., Sallsten, G., Schwarze, P.E., Boman, C., 2009. Health effects of residential wood smoke particles: The importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. Particle and fibre toxicology 6, 29.

POLITECNICO DI MILANO



## HEALTH RELEVANCE OF PARTICLES FROM WOOD COMBUSTION IN COMPARISON TO DIESEL SOOT

0

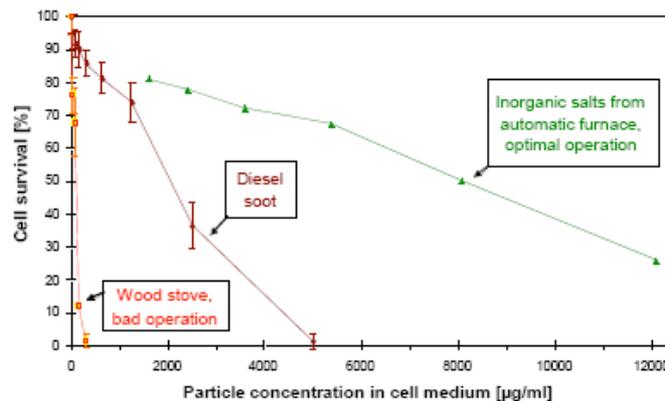
N. Klippel<sup>1</sup> and T. Nussbaumer<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Verenum, Langmauerstrasse 109, CH-8006 Zurich (Switzerland), www.verenum.ch

<sup>2</sup>Hochschule für Technik + Architektur (HTA) Luzern, CH-6048 Horw, (Switzerland), www.hta.fhz.ch

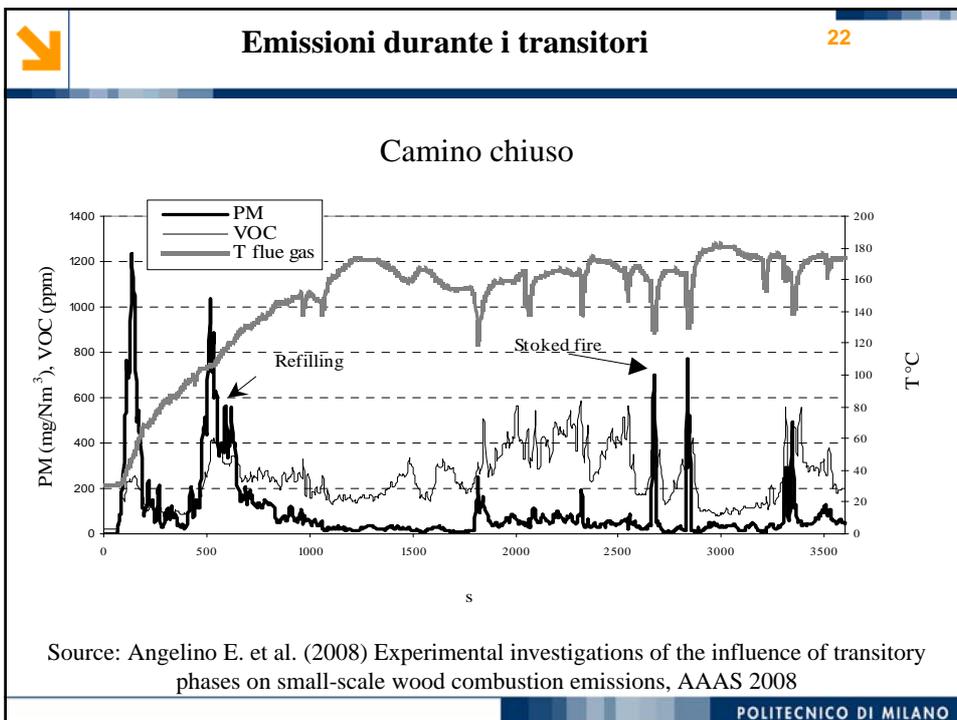
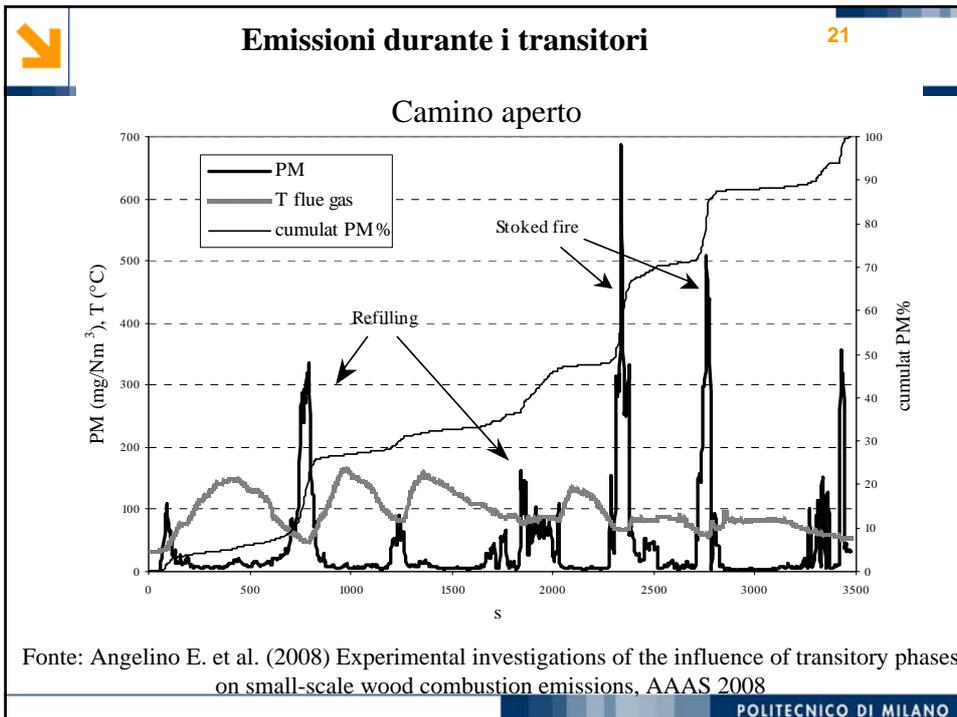
A confronto PM da diesel, da combustione completa ed incompleta della legna

Test biologici su tossicità cellulare e aberrazioni cromosomiche



Risultati: il PM da combustione completa ha un effetto tossicologico 5 volte inferiore al PM diesel. Il PM da combustione incompleta ha una tossicità 15 volte superiore al PM da diesel ed un contenuto di IPA 20 volte superiore

POLITECNICO DI MILANO

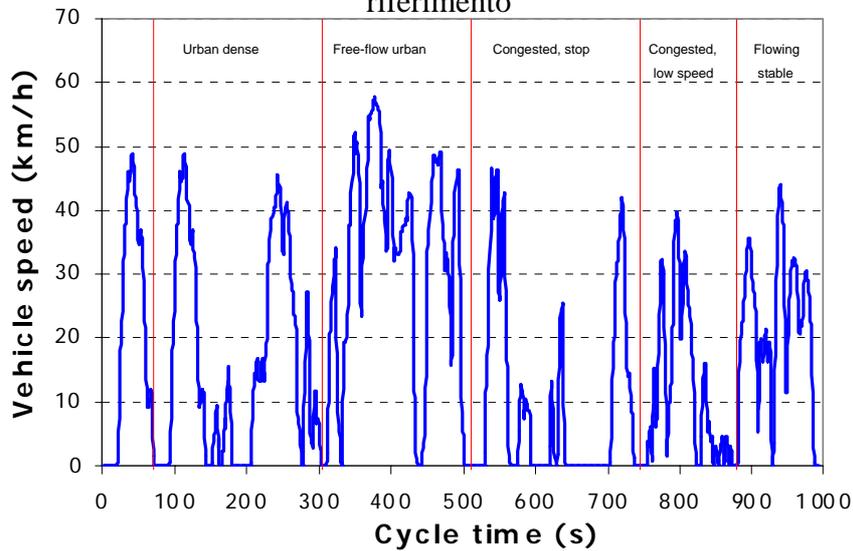




## Influenza del ciclo di carico

23

Per determinare i fattori di emissione dei veicoli si usano cicli di riferimento



## Ciclo di combustione in condizioni reali

24



Le misure di emissione eseguite nel corso delle procedure di certificazione degli apparecchi sono riferite alla combustione a regime

Per gli apparecchi ad alimentazione manuale le condizioni a regime vengono difficilmente raggiunte

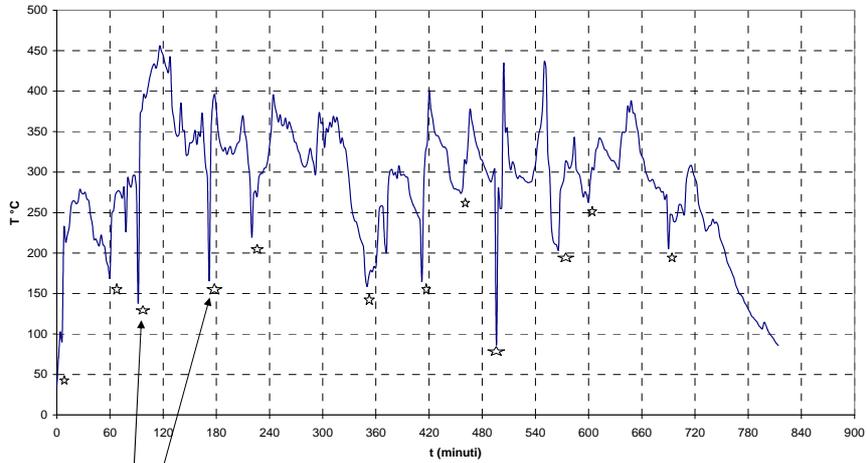
Campagna di misura effettuata dal Politecnico di Milano (data-logger per misura della temperatura) per definire i cicli reali.

Dati della campagna di misura: 13 diversi apparecchi rappresentativi del parco impianti lombardo; 19 periodi di misura (intorno alle 1000 ore di combustione misurate)

POLITECNICO DI MILANO



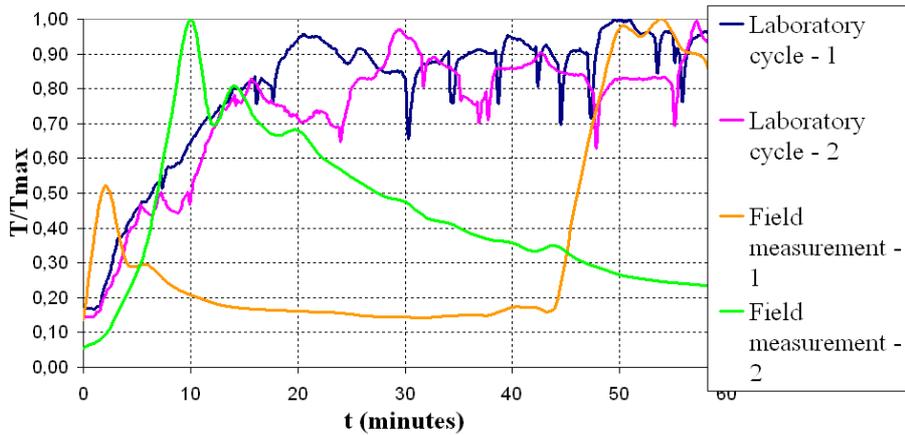
Esempio di ciclo reale per un caminetto chiuso

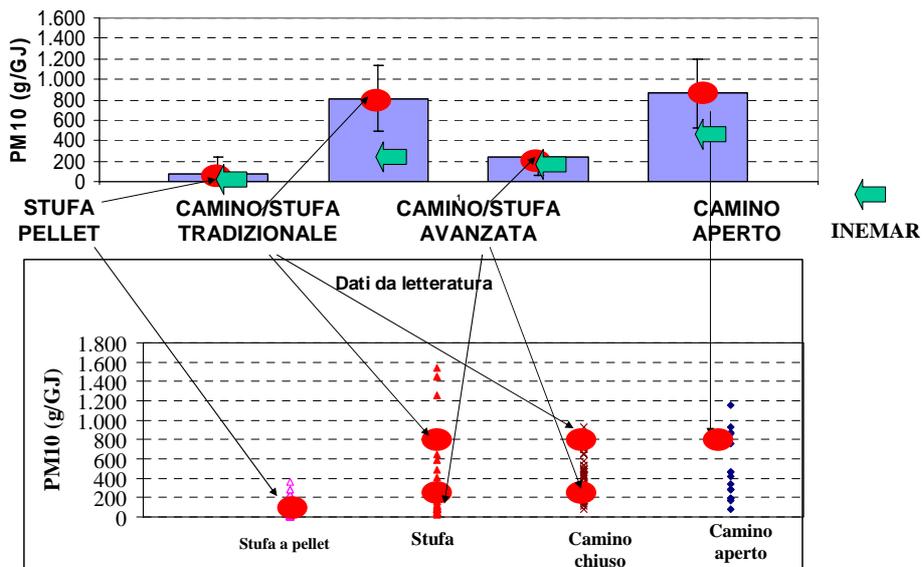
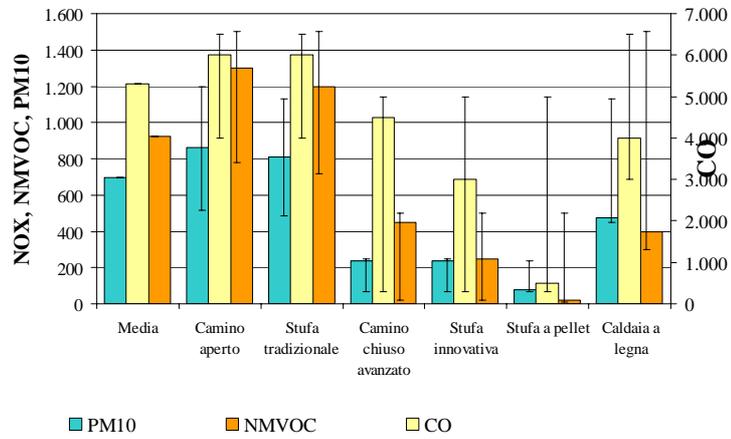


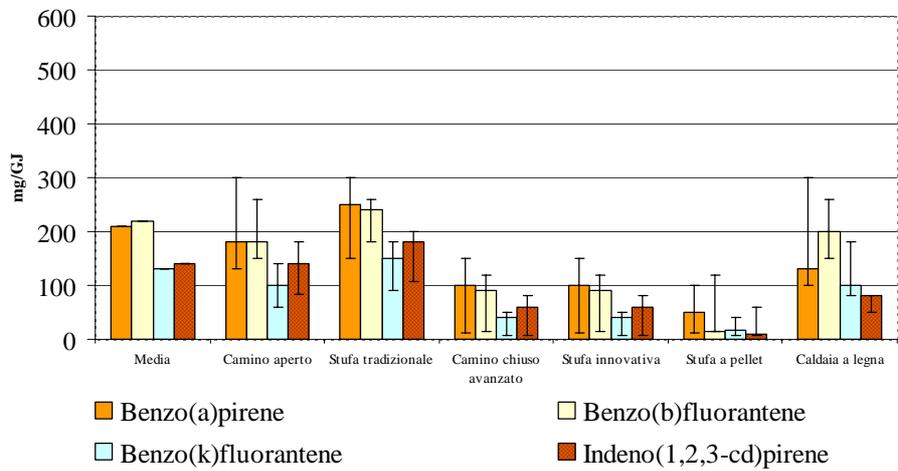
Tempi medi tra una carica e l'altra: 60-80 minuti



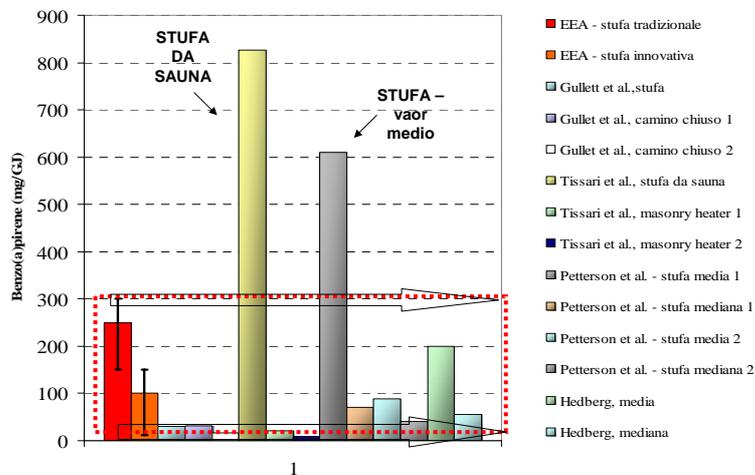
TEMPERATURE PROFILES IN THE FIRST HOUR OF A COMBUSTION CYCLE - CLOSED FIREPLACE







Le fonti non concordano sui composti da misurare e su come eventualmente pesare la tossicità (TEF). Tutte le fonti però concordano sulla rilevanza della fonte: nel settore residenziale p.es. EEA sul benzo(a)pirene: 210 mg/GJ da biomassa; 0,562 ug/GJ metano; 22 mg/GJ gasolio Il benzo(a)pirene è indicato come il composto più rilevante per la cancerogenità ma non è detto che sia il solo rilevante.



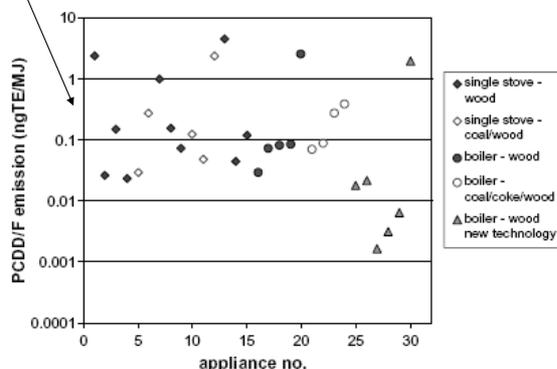


## PCDD/F

### In-field measurements of PCDD/F emissions from domestic heating appliances for solid fuels

C. Hübner, R. Boos, T. Prey \*

Livello medio EEA



Nessun dubbio sulle modalità di misura ma grande variabilità dei fattori di emissione. Il miglior studio riassuntivo (Hubner et al., 2005) è stato realizzato in Austria misurando al camino 30 apparecchi in condizioni reali di utilizzo.

In generale minori emissioni negli impianti centralizzati più moderni. Esiste correlazione con OGC (e quindi con la qualità della combustione) a parte dove si ha co-combustione di altri materiali (la co-combustione aumenta moltissimo le emissioni)

POLITECNICO DI MILANO



## Ottimizzazione degli apparecchi mediante simulazione fluidodinamica

32

### OBIETTIVI

Per tutti i sistemi: riduzione quasi a zero del **particolato più grossolano** (derivante da risospensione dal letto di combustione)

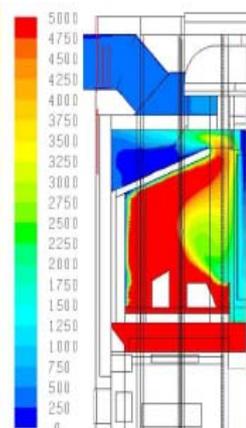
Per i sistemi ad **alimentazione manuale**: **significativa riduzione delle emissioni di composti organici e fuliggine** tramite ottimizzazione della combustione

Per i sistemi ad **alimentazione automatica**: **riduzione sino quasi a zero di composti organici e fuliggine e riduzione del particolato inorganico**

In generale, si ritiene che tutti i sistemi che riducono CO e PM contribuiscano anche a ridurre il particolato

**Attuale livello tecnologico per caldaie e stufe a pellet: 20-50 mg/MJ.** Ci si attendono miglioramenti rispetto a questi valori.

Brunner, Biedermann Obernberger – Primary measures for low-dust combustion: relevant findings - Central European Biomass Conference 2001



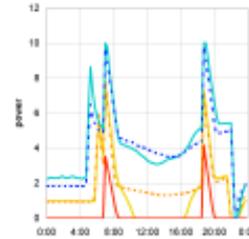
POLITECNICO DI MILANO



I test di certificazione hanno dimostrato gli enormi progressi relativi allo 'stato dell'arte' dei piccoli impianti a biomassa  
Tuttavia i test di certificazione sono riferiti a condizioni stazionarie

Ormai la certificazione delle emissioni allo stato stazionario non è in grado di discriminare sufficientemente le prestazioni dei diversi apparecchi, sia per l'efficienza che per le emissioni inquinanti.

Si è tentato pertanto di sviluppare un sistema di certificazione – in questo caso applicato alle caldaie – basandosi sulla simulazione in laboratorio di un ciclo di carico 'standard' – riferito a giorni tipo (p.es.: giorno estivo con solo acqua calda sanitaria, giorno invernale, mezza stagione)



	EN 303-5	Test cycle	Heat storage	
efficiency	84,7	75,2	73,7	[%]
CO	84,8	289,1	168,1	[kg/TJ]
NO <sub>x</sub>	105,8	105,2	125,4	[kg/TJ]
org. C	2,1	15,7	11,9	[kg/TJ]
PM	10	20	14	[kg/TJ]

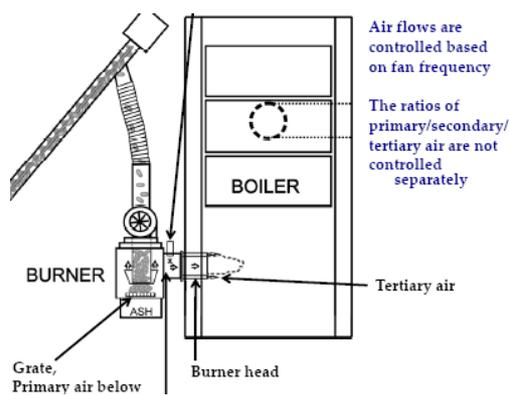
M. Schwartz – Determination of annual efficiency and emission factors of small-scale biomass boilers – Central European Biomass Conference 2001



Sistemi di gassificazione di piccola taglia: citata dallo IEA una tecnologia di sviluppo dei sistemi di combustione residenziali attualmente in fase pre-commerciale

Un esempio: sperimentazione di una stufa a pellet da 15 kW basata su tre afflussi d'aria controllati da un'unica valvola

Risultati in laboratorio: 1,4-2,4 mg/MJ (PM1)



Fonte: Jokkiniemi – The effect of combustion – gasification technology on emissions – Central European Biomass Conference 2001



- Fine, P.M., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T., 2001. Chemical characterization of fine particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the northeastern united states. *Environ.Sci.Technol* 35, 2665-2675.
- Fine, P.M., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T., 2002. Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of woods grown in the southern united states. *Environmental Science and Technology* 36, 1442-1451.
- Tissari, J., Lyyräinen, J., Hytönen, K., Sippula, O., Tapper, U., Frey, A., Saarnio, K., Pennanen, A.S., Hillamo, R., Salonen, R.O., Hirvonen, M.-., Jokiniemi, J., 2008. Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. *Atmospheric Environment* 42, 7862-7873.
- Gullett, B., Toutati, A., Hays, M., 2003. PCDD/F,PCB,HxCBz, PAH, and PM Emission Factors for Fireplace and Woodstove Combustion in the San Francisco Bay Region . *Envi. Science Technology*
- Tissari, J., Hytonen, K., Lyyranen, J., Jokiniemi, J., 2007. A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment* 41, 8330-8344.



- Petterson et al., 2011. Stove Performance and Emission Characteristic in Residential Wood Log and Pellet Combustion. *Energy & Fuels*
- Hedberg, E., Kristensson, A., Ohlsson, M., Johansson, C., Johansson, P., Swietlicki, E., Vesely, V., Wideqvist, U., Westerholm, R., 2002. Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove. *Atmospheric Environment* 36, 4823-4837.
- Nussbaumer, T., Klippel, N., Johansson, L., 2008. "Survey on measurements and emission factors on particulate matter from biomass combustion in IEA countries." In: 16th European Biomass Conference and Exhibition, Valencia-5000).
- Kochbach Bolling, A., Pagels, J., Yttri, K.E., Barregard, L., Sallsten, G., Schwarze, P.E., Boman, C., 2009. Health effects of residential wood smoke particles: The importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. *Particle and fibre toxicology* 6, 29.
- Klippel, N. and Nussbaumer, T., 2007. Health relevance of particles from wood combustion in comparison to Diesel soot. In: 15th European Biomass Conference, International Conference Centre, Berlin, 7-11.
- EEA – EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook
- Hubner, C., Boos, R., Prey, T., 2005. In-field measurements of PDD/F emissions from domestic heating appliances for solid fuels. *Chemosphere* 58