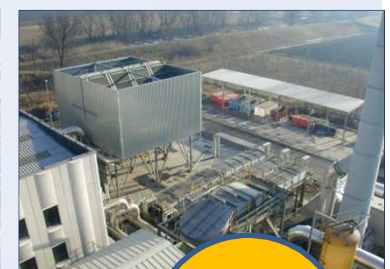


Fanghi di depurazione: gestione e implicazioni normative

Parco scientifico tecnologico COMONETxT v. Cavur 2, LOMAZZO - 25 ottobre 2019

TERMODINAMICA DEI FORNI DI TERMOVALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI E DEI LORO DERIVATI NEL CASO DI CO-COMBUSTIONE CON FANGHI UMIDI

Ing. Daniele DeLodovci, Ph.D. - Società W.T.E. Waste To Energy Srl



Termodinamica dei forni nella co-combustione RSU – fanghi

Dall'analisi che segue si evince che la co-combustione:

- **E' sempre possibile negli impianti di termovalorizzazione**
- **Non è sempre conveniente**
- **La convenienza economica dipende da diversi fattori quali:**
 - La qualità del combustibile base (RSU o suoi derivati) e del fango
 - La tipologia del forno e del suo grado di adiabaticità
 - L'esistenza o meno del preriscaldamento dell'aria di combustione
- **La depurazione fumi è in genere sempre sufficiente a fronteggiare la variabilità del combustibile miscelato se:**
 - Si opera all'interno del diagramma di combustione
 - I fanghi non contengono quantità eccezionali di inquinanti (metalli pesanti, cloro, zolfo, ecc.)
- **Il ciclo termico risente della co-combustione solo nella misura in cui viene ridotto il flusso termico in ingresso nel forno**



Combustibili derivati dai rifiuti impiegabili nella co-combustione con fanghi

- Rifiuti solidi urbani
- Combustibili derivati dai rifiuti (RDF o CSS)
- Rifiuti industriali
- Rifiuti ospedalieri
- Fanghi essiccati



Biomasse impiegabili nella co-combustione con fanghi

- Residui dalla lavorazione del legno vergine (segature, cortecce, ecc.)
- Rifiuti legnosi (infissi dismessi, mobili, strutture, ecc.)
- Rifiuti agricoli (stocchi e tutoli, paglie, foglie, ramaglie, ecc.)
- Biomasse vergini provenienti da short rotation
- Paglia
- Torba



Biomasse impiegabili nella co-combustione con fanghi



Termodinamica dei forni: dati fondamentali e diagramma di combustione**Elementi per la modellazione della co-combustione**

- Definizione delle caratteristiche dei combustibili coinvolti
- Diagramma di combustione
- Grado di adiabaticità del forno

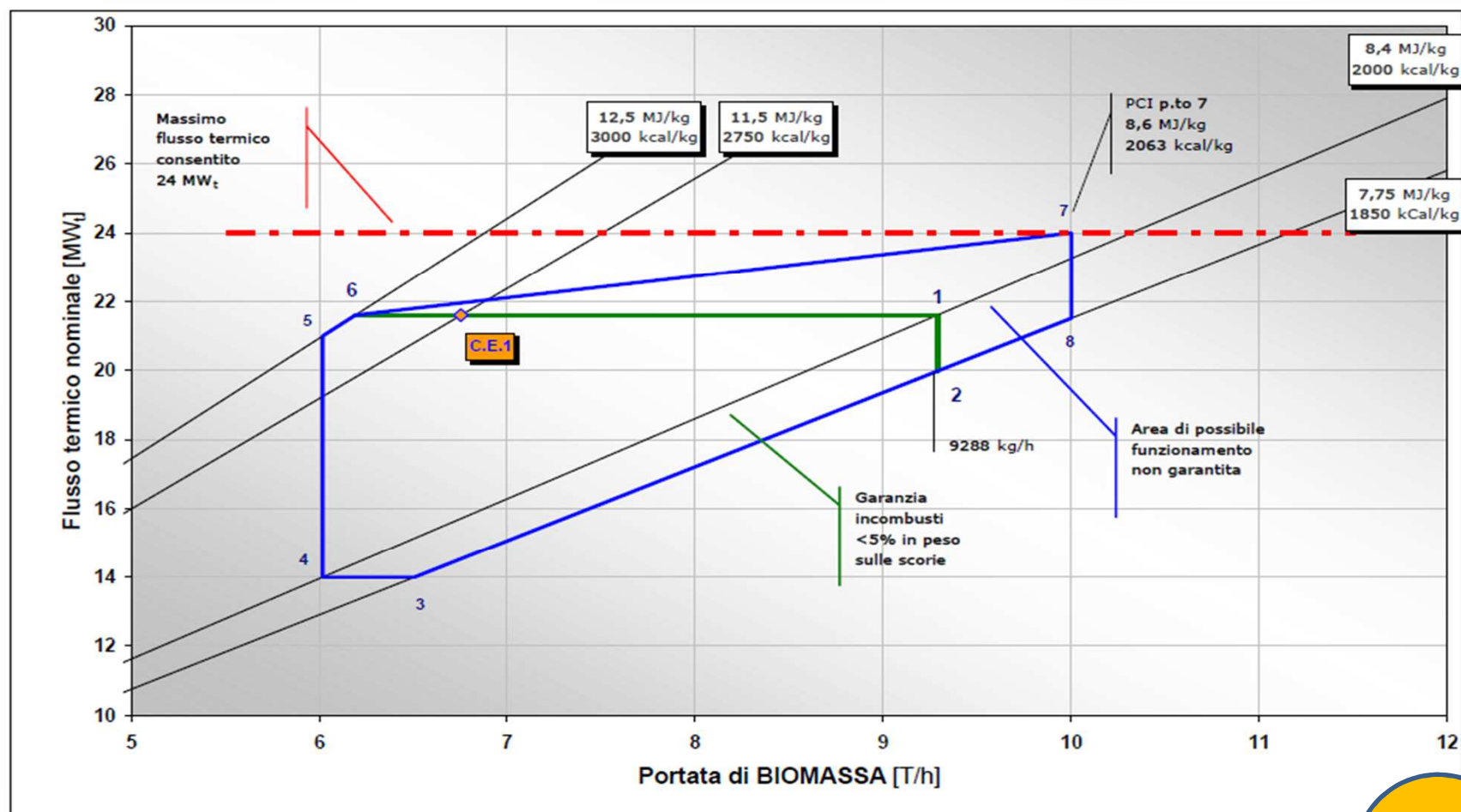
Caratteristiche del combustibile

Sono almeno da considerare per lo studio dell'impatto sulle varie sezioni degli impianti, dalla combustione alla depurazione fumi

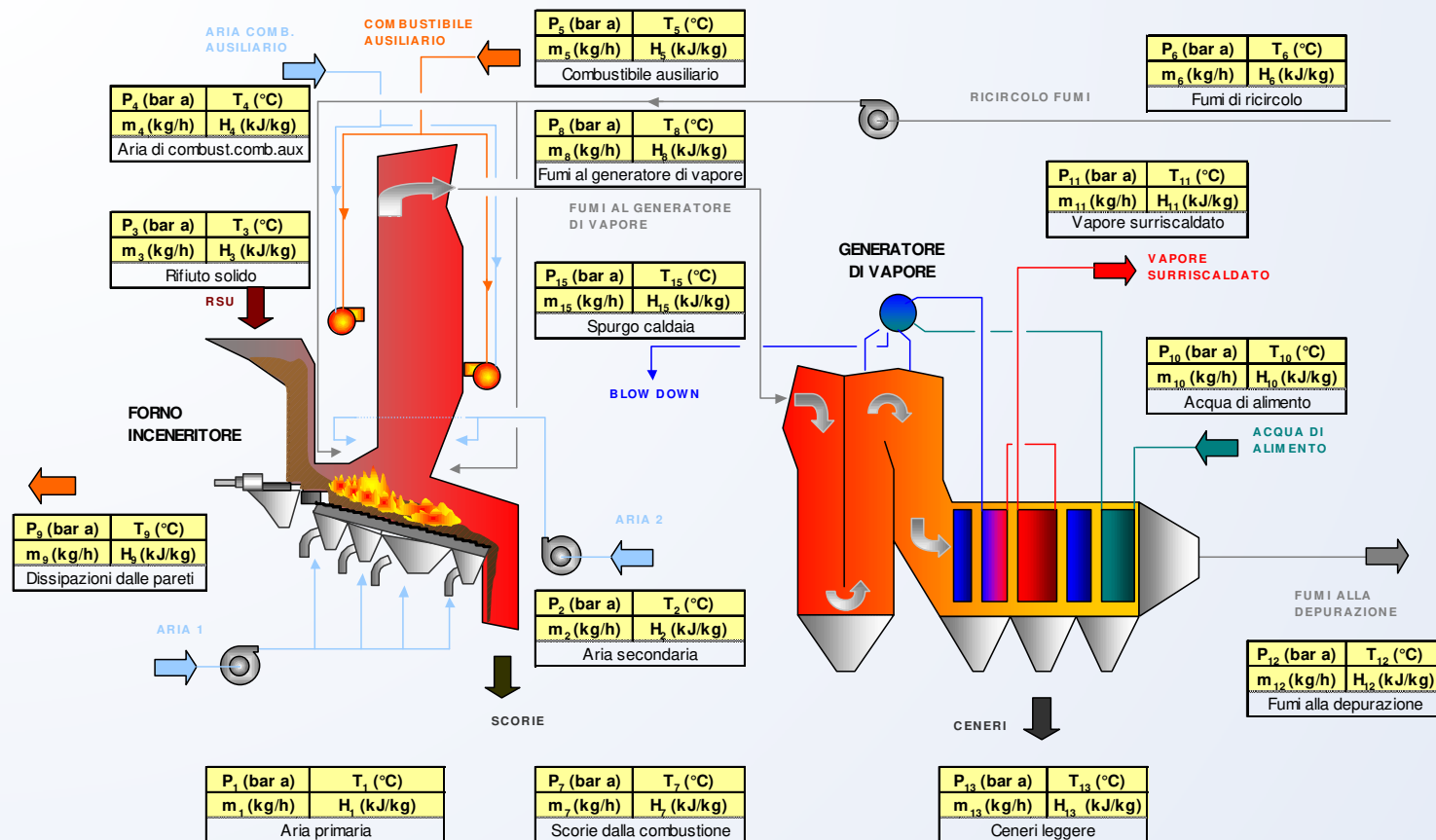
- Contenuto energetico (potere calorifico inferiore o superiore)
- Umidità
- Composizione chimica (S, Cl, F, N, C, O, H, metalli)
- Quantità e qualità delle ceneri



Termodinamica dei forni: il diagramma di combustione (I)



Termodinamica dei forni: il grado di adiabaticità dei forni (II)



Termodinamica dei forni: il grado di adiabaticità dei forni (III)

Energetic balance

$$\sum_{i=1}^6 W_i = \sum_{i=7}^9 W_i$$

Mass balance

$$\sum_{i=1}^6 m_i = \sum_{i=7}^8 m_i$$

Definendo il grado di adiabaticità come segue:

$$\psi = \frac{\sum_i W_{iIN} - (\sum_j W_{jdiss} + W_{pareti})}{\sum_i W_{iIN}}$$

Poiché è

$$Q_{fumi} = \frac{\sum_i W_{iIN} - \sum_j W_{jdiss} - W_{pareti}}{C_{p_{fumi_{TPC}}} T_{PC}}$$

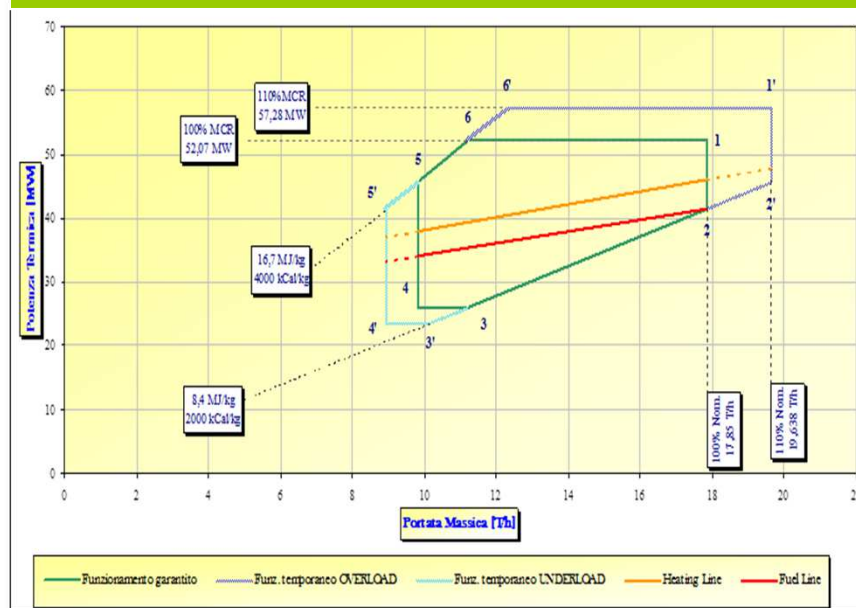
Si ottiene il corollario:

$$Q_{fumi} = \frac{\psi \sum_i W_{iIN}}{C_{p_{fumi_{TPC}}} T_{PC}}$$

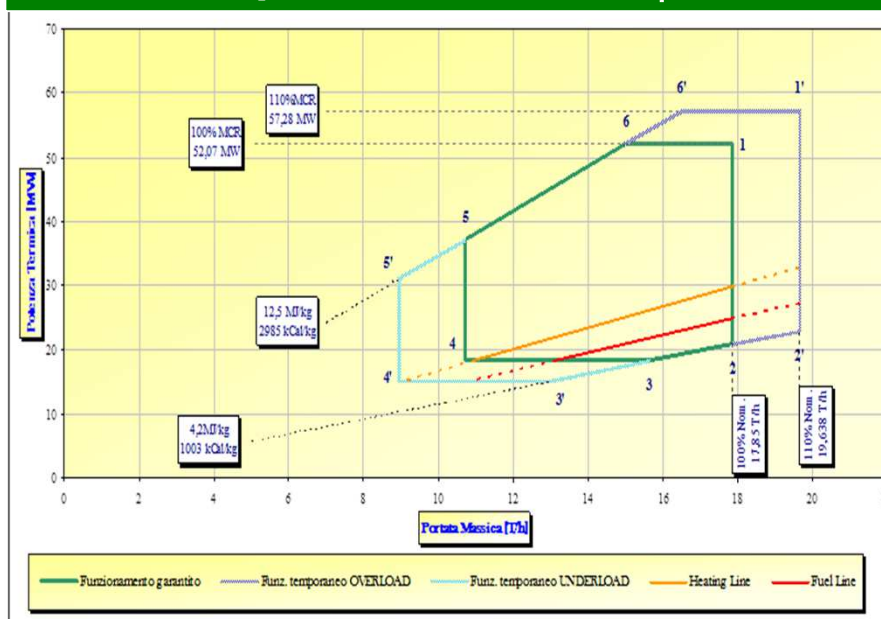


Termodinamica dei forni: il grado di adiabaticità dei forni (IV)

Forno non adiabatico ($\psi=0.65$)



Forno quasi adiabatico ($\psi=0.95$)



Termodinamica dei forni: comportamenti reali dei sistemi in co-combustione (I)

$$Q_{fumi} = \psi \frac{W_{in}}{C_p T_{PC}}$$

$$W_{IN} = G_{comb} PCI_{comb} = G_{RSU} PCI_{RSU} + G_{fanghi} PCI_{fanghi} \quad (\text{posto } \alpha = \frac{G_{fanghi}}{G_{RSU}}) \Rightarrow$$

$$W_{IN} = G_{RSU} (PCI_{RSU} + \alpha PCI_{fanghi})$$

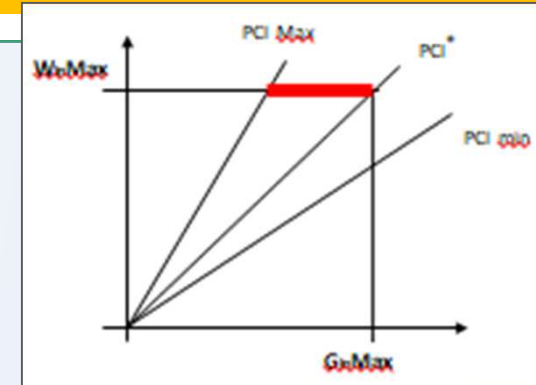
$$Q_{fumi} = \psi \frac{G_{RSU} (PCI_{RSU} + \alpha PCI_{fanghi})}{C_p T}$$



Termodinamica dei forni: comportamenti reali dei sistemi in co-combustione (II)

$$PCI_{MAX} > PCI > PCI^* \text{ e } W_{IN} = cost$$

$$Q_{fumi} = \psi \frac{G_{RSU} (PCI_{RSU} + \alpha PCI_{fanghi})}{C_p T}$$



Al massimo flusso termico, se il PCI del fango è > 0 , l'introduzione di fango determina una riduzione di G_{RSU}

$$PCI_{fango} > 0 \text{ con } W_{in} = cost \text{ allora } \uparrow G_{fango} \Rightarrow \downarrow G_{RSU}$$

Al massimo flusso termico, se il PCI del fango è < 0 l'introduzione di fango determina un aumento di G_{RSU}

$$PCI_{fango} < 0 \text{ con } W_{in} = cost \text{ allora } \uparrow G_{fango} \Rightarrow \uparrow G_{RSU}$$

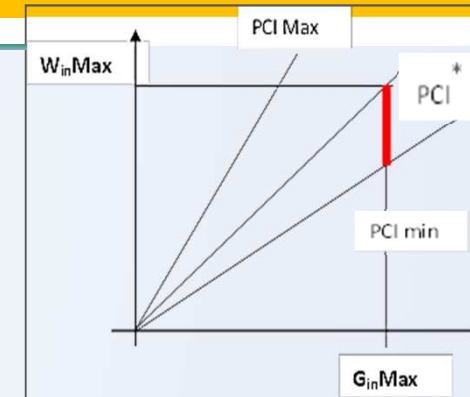
Nota 1: operando al massimo flusso termico, tanto più alto è il PCI del combustibile di base (RSU), tanto più è interessante smaltire fanghi umidi perché la loro introduzione nel forno determina un aumento dello smaltimento di RSU.



Termodinamica dei forni: comportamenti reali dei sistemi in co-combustione (III)

$$PCI^* > PCI > PCI_{min} \text{ e } G_{comb} = cost$$

$$Q_{fumi} = \psi \frac{G_{RSU} (PCI_{RSU} + \alpha PCI_{fanghi})}{C_p T}$$



Al massimo flusso massico, se il PCI del fango è < 0 , si ha una riduzione del flusso termico sviluppato nel forno, con minore erogazione di energia da parte dell'impianto

$$PCI_{fango} < 0 \text{ con } G_{comb} = cost \text{ allora } \uparrow G_{fango} \Rightarrow \downarrow W_{IN}$$

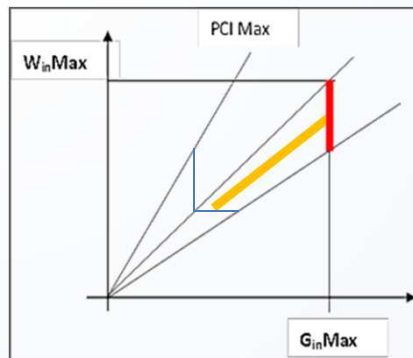
Al massimo flusso massico, se il PCI del fango è > 0 , si ha un aumento del flusso termico sviluppato nel forno, con maggiore erogazione di energia da parte dell'impianto

$$PCI_{fango} > 0 \text{ con } G_{comb} = cost \text{ allora } \uparrow G_{fango} \Rightarrow \uparrow W_{IN}$$

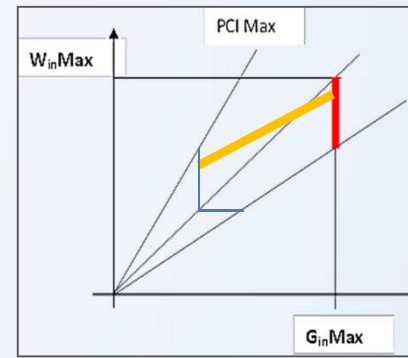
Nota 2: a flusso massico costante, per aumentare il flusso termico nel forno è necessario aumentare il potere calorifico dei fanghi.



Termodinamica dei forni: comportamenti reali (IV)



Forno quasi adiabatico
e relativa «fuel line»
(in giallo)



Forno fortemente
non adiabatico
e relativa «fuel line»
(in giallo)

Nota 3:

- Nei forni a basso grado di adiabaticità il funzionamento nell'area $G = \text{cost}$ è critico.
- La non adiabaticità del forno determina una notevole sensibilità della macchina al peggioramento della qualità del combustibile e/o del carico termico.
- Al diminuire del PCI introdotto in camera di combustione diviene rapidamente necessario il preriscaldamento dell'aria e, successivamente, l'avvio dei bruciatori di supporto alla combustione.
- Operare in quest'area con bassi gradi di adiabaticità diviene oneroso.
- La convenienza della co-combustione deve essere studiata caso per caso sulla base di dati storici relativi alla qualità del combustibile, operando poi valutazioni di dettaglio sulle caratteristiche del forno.



Termodinamica dei forni: comportamenti reali dei sistemi in co-combustione (V)

Funzionamento al di fuori del diagramma di combustione

Caso A

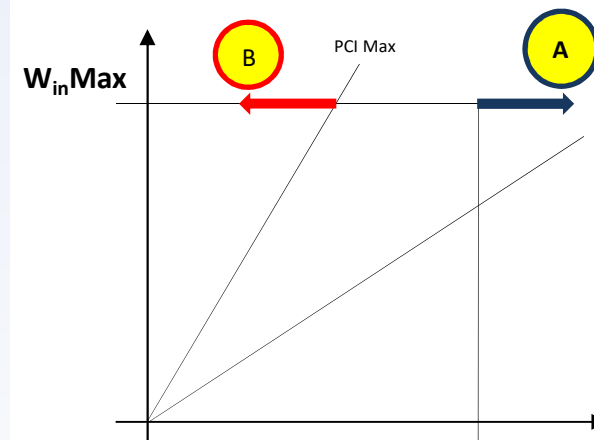
Aumento dello strato di combustibile sulla griglia

- Avvicinamento del fronte fiamma al pozzo scorie
- Possibilità di aumento degli incombusti
- Possibile formazione di CO nella parte alta della griglia
- Aumento della portata fumi per la variazione apprezzabile del Cp fumi

Caso B

- Assottigliamento dello strato di combustibile sulla griglia
- Arretramento fronte fiamma
- Formazione di NO_x

$$W_{\text{MAX}} = \text{cost}$$



Termodinamica dei forni: comportamenti reali dei sistemi in co-combustione (VI)

Funzionamento fuori del diagramma di combustione

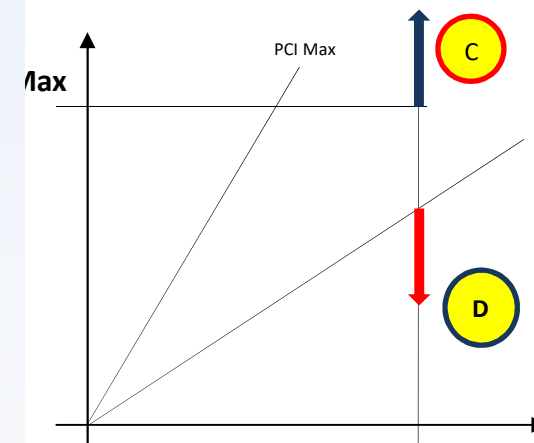
- Aumento dei NO_x
- Aumento del cemento termico della suola di combustione con potenziali corrosioni
- Aumento del cemento termico delle pareti di caldaia con potenziali corrosioni
- Aumento della portata fumi con:
 - Incremento sporcamento superfici di scambio caldaia
 - Minori tempi di residenza in PC e nella depurazione fumi con possibili peggioramenti dell'efficienza di depurazione

Caso C

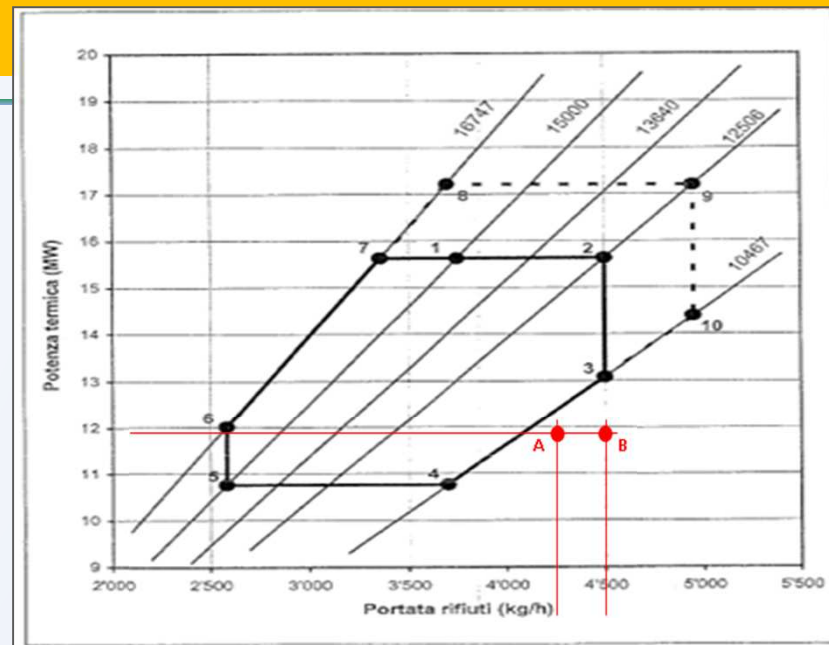
Caso D

- Difficoltà a mantenere la T in PC soprattutto nei forni non adiabatici
- Probabile formazione di CO e relativa accensione dei bruciatori di supporto
- Probabile presenza di incombusti nelle scorie
- Depurazione fumi flussata con minori portate ma più umide (dew point)

$$W_{MAX} = \text{cost}$$



Co-combustione RSU-fanghi: Un caso concreto in un forno fortemente non adiabatico



4.S.4						
Ns Rif		EL071-1	EL071-2	EL071-3	EL071-4	EL071-5
Campione		L1 Centrifugato	L1 Centrifugato	L1 Centrifugato	L1 Centrifugato	L1 Centrifugato
		campione 1	campione 3	campione 4	campione 5	campione 6
Data prelievo		11/03/2015	11/03/2015	11/03/2015	11/03/2015	11/03/2015
Data arrivo		19/03/2015	19/03/2015	19/03/2015	19/03/2015	19/03/2015
Modalità di prelievo:		a cura del richiedente	a cura del richiedente	a cura del richiedente	a cura del richiedente	a cura del richiedente
Residuo a 105 °C	%	21,5	54,3	14,1	25,6	67,7
Potere calorifico inferiore	kJ/kg s.s.	14579	14865	14773	14738	14882
Potere calorifico inferiore	kJ/kg	1163	6924	< 100	1904	9264



Termodinamica dei forni nella co-combustione RSU – fanghi

Dunque emerge che la co-combustione di RSU e/o suoi derivati e fanghi:

- **E' sempre possibile negli impianti di termovalorizzazione**
- **Non è sempre conveniente**
- **La convenienza economica è correlata a diversi fattori da indagare con attenzione**
- **La depurazione fumi è in genere sempre sufficiente a fronteggiare la variabilità del combustibile miscelato**
- **Il ciclo termico risente della co-combustione solo nella misura in cui viene ridotto il flusso termico in ingresso nel forno**



TERMODINAMICA DEI FORNI DI TERMOVALORIZZAZIONE DEI RIFIUTI E DEI LORO DERIVATI NEL CASO DI CO-COMBUSTIONE CON FANGHI UMIDI

Ing. Daniele De Lodovici, Ph.D.



W.T.E. Waste To Energy Srl

Via Goffredo Mameli, 16
21052 Busto Arsizio (Varese) - Italy

Email: wte@wastetoenergy.it; sales@wastetoenergy.it
Telephone: +39 0331 670066 / 653558 - Mobile: +39 329273792.5 / .8
Web Page: www.wastetoenergy.it - Skype: [wastetoenergy](https://www.skype.com/name/wastetoenergy)

