

# Energie rinnovabili

*Tecnologia e impiantistica per l'utilizzo delle colture*



**Corso di laurea magistrale in Scienze e tecnologie agrarie  
a.a. 2012-13 – 3 CFU**

*dott. Daniele Dell'Antonia*



---

**La combustione delle biomasse**

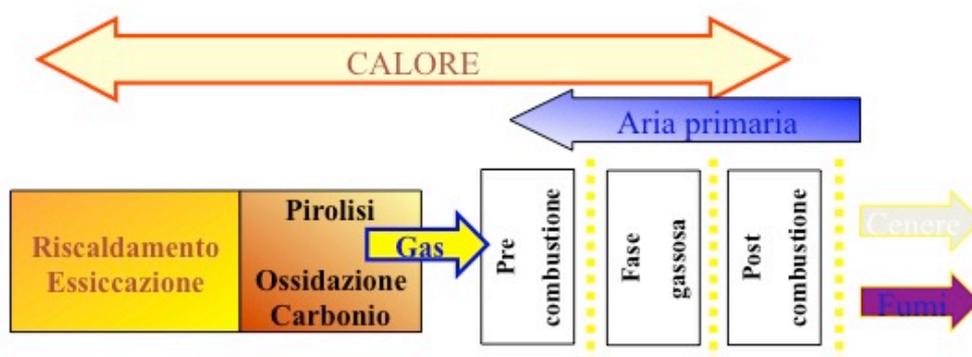
## Definizione

- è una reazione chimica di ossidazione fra un *combustibile* ed un *comburente* (in genere l'ossigeno), con sviluppo di energia termica (ovvero è una reazione esotermica). Da questa reazione si generano nuovi componenti, i prodotti della combustione



## Ossidazione

- $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Energia}$        $4\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- Ossidazione completa dei costituenti i tessuti vegetali con emissione di energia termica, fumi e ceneri. La quantità di tali prodotti è, rispetto alla massa iniziale del combustibile, in relazione alle caratteristiche chimiche e fisiche del materiale di partenza



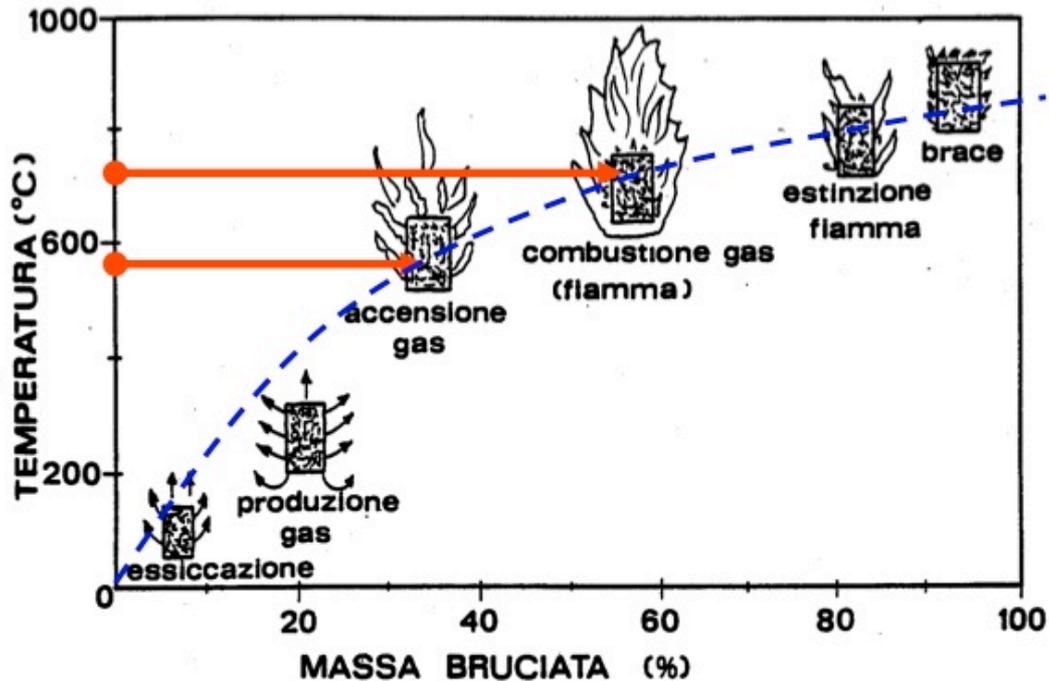
## Composizione biomassa vegetale

- **Fattori costanti**
  - ❖  $C = 45-50\%$ ;  $H = 5-8\%$ ;  $O = 40-45\%$
  - ❖  $PCI = 3,7-5,0 \text{ kWh/kg di s.s.}$
  - ❖  $SV = 90-95\%$  a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$
  
- **Fattori variabili**
  - ❖  $U$  alla raccolta =  $15-60\%$
  - ❖  $C/N = 45-130$
  - ❖ Ceneri =  $5-25\%$  sulla s.s.
  - ❖  $\gamma = 40-300 \text{ kg/m}^3$

## La combustione della biomassa

- Nel caso ideale la combustione rappresenta la completa ossidazione in anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ )
- Per le biomasse la combustione avviene in tre fasi principali:
  - ❖ essiccazione (evaporazione dell'acqua)
  - ❖ pirolisi-gassificazione (degradazione della biomassa in assenza o parziale presenza di ossigeno)
  - ❖ l'ossidazione del carbone e dei gas combustibili

## Fasi della combustione



Fonte: Fiala 2002

## Temperature

- Temperatura della camera di combustione
  - ❖  $T = 900-1100 \text{ } ^\circ\text{C}$  favoriscono la combustione di tutta la sostanza combustibile
- Temperatura dei fumi
  - ❖  $200^\circ\text{C} < T < 350 \text{ } ^\circ\text{C}$  sono normali e indice di:
    - ✓ una sufficiente superficie di scambio
    - ✓ un buon rendimento di trasferimento del calore
    - ✓ un corretto apporto d'aria comburente
  - ❖  $> 350 \text{ } ^\circ\text{C}$  indicano:
    - ✓ una zona di scambio sottodimensionata
    - ✓ una zona di scambio incrostata

## Bilancio di massa

- **bilancio di massa:**
  - ❖ **12 kg di C + 32 kg di O<sub>2</sub> = 44 kg di CO<sub>2</sub>**
- **per la combustione completa di 1 kg di C occorrono:**
  - ❖  $\frac{32}{12} = 2.67$  kg di O<sub>2</sub>, ossia:  $\frac{2.67}{0.232} = 11.49$  kg di aria
  - ❖ **(O<sub>2</sub> nell'aria = 23.2% in peso)**
- **analogamente...**

## Bilancio di massa

- **analogamente...**

reazione	O <sub>2</sub> , kg/kg di combustibile	aria, kg/kg di combustibile
12 kg di C + 32 kg di O <sub>2</sub> = 44 kg di CO <sub>2</sub>	2.67	11.49
4 kg di H <sub>2</sub> + 32 kg di O <sub>2</sub> = 36 kg di 2H <sub>2</sub> O	7.94	34.21
1 kg di S + 1 kg di O <sub>2</sub> = 2 kg di SO <sub>2</sub>	1.00	4.30
1 kg di O <sub>2</sub> = 1 kg di O <sub>2</sub>	-1.00	-4.30
O <sub>2</sub> nell'aria = 23.2% (in peso)		

## Aria teorica

- l'aria teorica è la minima quantità di aria necessaria per far avvenire la combustione completa di 1 kg di combustibile
- dipende unicamente dalla composizione del combustibile:

$$\diamond a_t \equiv \frac{m_{a,t}}{m_c} = 11.56 x_C + 34.48 x_H + 4.31 x_S - 4.31 x_O$$

$m_{a,t}$  = massa dell'aria (teorica)

$m_c$  = massa del combustibile

$x$  = frazione in massa di carbonio, idrogeno, zolfo ed ossigeno nel combustibile

## Esempio

% in peso	Benzina	Cherosene	Gasolio	Gas naturale	Propano	Biodiesel	Bioetanolo
C	85.5	86.3	86.3	73.5	81.8	77.1	51.7
H <sub>2</sub>	14.4	13.6	12.7	24.5	18.2	12.1	12.9
S	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
O <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	10.8	32.7
at, kg/kg	14.8	14.6	14.3	16.8	15.6	12.5	8.9

## Aria pratica ed eccesso d'aria

- a causa del non perfetto mescolamento dei reagenti, l'aria teorica non è sufficiente a portare a termine completamente la reazione di combustione; è aggiungere un eccesso d'aria
- si ottiene così il valore della cosiddetta aria pratica:

$$\diamond a_p \equiv \frac{m_{a,p}}{m_c} = n a_t$$

$m_{a,p}$  = massa dell'aria (pratica)

$m_c$  = massa del combustibile

$n$  = indice d'aria = 1÷1.5

$a_t$  = aria teorica

## Indice d'aria

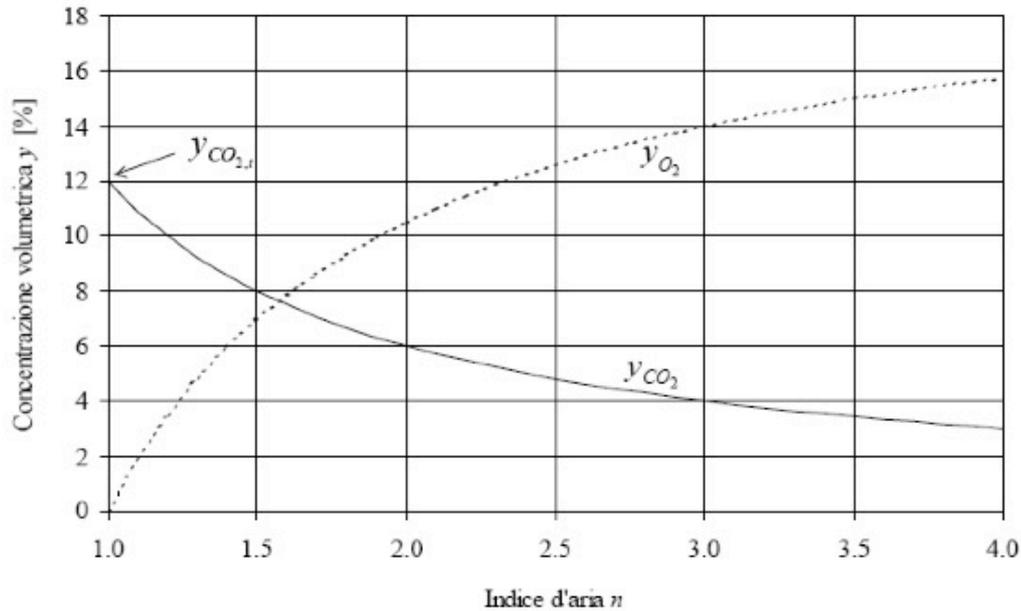
- l'indice d'aria varia tra 1 e 1.5 a seconda della conformazione del bruciatore (tanto più esso è sofisticato tanto più  $n$  è prossimo a 1)
- può arrivare fino a 3.5 qualora si voglia limitare la temperatura di combustione
  - ❖ per non danneggiare gli organi delle macchine
  - ❖ per ridurre la formazione di ossidi di azoto
  - ❖ il valore di  $n$  viene regolato dall'analisi (in continuo per i grandi impianti, o periodica) dei prodotti di combustione
- si può dedurre dalla concentrazione di  $O_2$  nei fumi

$$\diamond n \approx \frac{0.21}{0.21 - y_{O_2}}$$

$y_{O_2}$  = ossigeno nei fumi (concentrazione volumetrica)

0.21 = ossigeno nell'aria

## Indice d'aria



Frazione volumetrica di  $CO_2$  e di  $O_2$  nei fumi secchi nel caso di metano ( $CH_4$ ) (Forgione e Di Marco, 2003).

## La forza

- Una forza è una grandezza fisica che si manifesta nell'interazione di due o più corpi, sia a livello macroscopico, sia a livello delle particelle elementari, che cambia lo stato di quiete o di moto dei corpi stessi
  - ❖  $F = m * a$
- Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura della forza è il newton (simbolo N)
  - ❖  $1 N = 1 kg * m/s^2$

## Lavoro ed energia

- Il lavoro di una forza costante lungo un percorso rettilineo è definito come il prodotto scalare del vettore forza per il vettore spostamento :
- L'energia è definita come la capacità di un corpo o di un sistema di compiere lavoro. Nel Sistema Internazionale l'unità di misura per il lavoro e l'energia è il joule che corrisponde allo spostamento di 1 metro di una forza unitaria misurata in newton:
  - ❖  $1 \text{ J} \text{ è pari a } 1 \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-2}$

## La potenza

- La potenza è definita come il lavoro (L) compiuto nell'unità di tempo (t):
- Nel sistema internazionale di unità di misura (SI) la potenza si misura coerentemente in watt (W), come rapporto tra unità di energia in Joule (J) e unità di tempo in secondi (s):
  - ❖  $1 \text{ W} = 1\text{J}/1\text{s}$

## non è chiaro?

➤ torniamo indietro?

$$F = am$$

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ kg} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$L = Fs = E$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$W = \frac{L}{t} = \frac{E}{t}$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

## non è chiaro?

➤ torniamo indietro?

$$W = \frac{L}{t} = \frac{E}{t}$$

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$E = Wt$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ Wh} &= 1 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = \\ &= 1 \text{ J s}^{-1} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ J} \end{aligned}$$

$$1 \text{ kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kWh} &= 3600000 \text{ J} \\ &= \frac{3600000}{4187} \text{ kcal} = 859.8 \text{ kcal} \end{aligned}$$

## Potere calorifico superiore (P.C.S.)

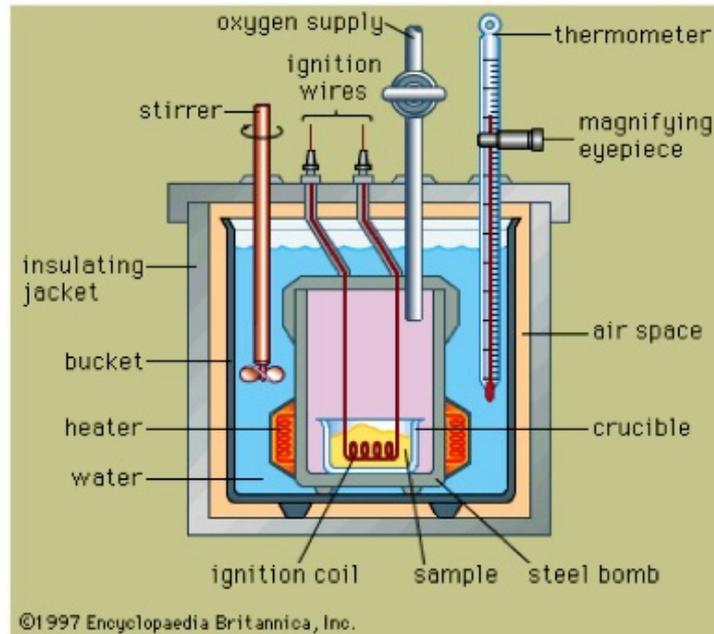
- il potere calorifico superiore  $H_s$  è la quantità totale di calore sviluppata dalla reazione di combustione completa dell'unità di massa (s.s.) del combustibile
  - ❖  $C + O_2 = CO_2 + 97.0 \text{ kcal}$  (per mole di C)
  - ❖ 1 mole di C = 12 g
- per kg di C:
  - ❖  $\frac{97.0 \text{ kcal} \times 1000 \text{ g}}{12 \text{ g}} = 8079 \text{ kcal} \times 4187 \text{ J/kcal} = 33.83 \text{ MJ}$
- analogamente...

## Potere calorifico superiore (P.C.S.)

- può essere approssimativamente valutato come:
  - ❖  $H_s \cong 33.83x_C + 121.42\left(x_H - \frac{x_O}{8}\right) + 9.21x_S$
  - ❖ **[MJ/(kg s.s. di combustibile)]**
- $x_O$  è l'  $O_2$  (organico) che forma  $H_2O$  con l' $H_2$  senza liberare energia in quantità apprezzabile
- ogni 16 g di  $O_2$  (organico) vengono sottratti alla reazione 2 g di  $H_2$  (8:1 in peso)

## Potere calorifico superiore (P.C.S.)

- si misura con un calorimetro in base al  $\Delta t^\circ$  di una massa nota di acqua



## Potere calorifico inferiore (P.C.I.)

- è la quantità totale di calore sviluppata dalla reazione di combustione completa dell'unità di massa (s.s.) del combustibile, quando l'acqua prodotta non viene condensata
- nei combustibili contenenti  $H_2$  si sviluppa acqua
- quantità di acqua sviluppata:
  - ❖  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 58.5 \text{ kcal}$
  - ❖  $4 \text{ kg } H_2 + 32 \text{ kg } O_2 = 36 \text{ kg } H_2O$
  - ❖  $m_{H_2O} = 9 \text{ kg} / \text{kg di } H_2$

## Potere calorifico inferiore (P.C.I.)

- calore latente di vaporizzazione dell'acqua:
  - ❖  $\approx 2.512 m_{H_2O}$  [MJ/(kg di combustibile)]
  - ❖ dove  $m_{H_2O}$  è la massa di acqua formatasi in seguito alla combustione di 1 kg di combustibile; 2.5 MJ/kg è il calore latente di vaporizzazione
- per cui:

$$\text{❖ } H_i = H_s - 2.512 \times 9x_H$$

## Confronto

% in peso	Benzina	Cherosene	Gasolio	Gas naturale	Propano	Biodiesel	Bioetanolo
C	85.5	86.3	86.3	73.5	81.8	77.1	51.7
H <sub>2</sub>	14.4	13.6	12.7	24.5	18.2	12.1	12.9
S	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
O <sub>2</sub>	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	10.8	32.7
at, kg/kg	14.8	14.6	14.3	16.8	15.6	12.5	8.9
H <sub>s</sub> , MJ/kg s.s.	46.4	45.7	44.6	54.5	49.8	39.1	28.2
H <sub>2</sub> O, kg/kg	1.30	1.22	1.14	2.21	1.64	1.09	1.16
H <sub>i</sub> , MJ/kg s.s.	43.2	42.6	41.8	49.0	45.6	36.4	25.3
H <sub>i</sub> /at	2.92	2.93	2.93	2.92	2.92	2.90	2.82

## P.C.I.

Fonti Solide	kcal/kg
Carbon fossile Cokerie	7.400
Carbone da vapore	6.350
Carbone altri usi	7.400
Lignite	2.500
Carbone di legna	7.500
Coke da cokeria	7.000
Rifiuti	2.500
Biomasse	2.500
Prodotti da carbone non energetici	7.400
Coke di petrolio	8.300

ENEA Rapporto  
Energia  
e Ambiente **2004**

Fonti Gassose	kcal/mc
Gas naturale	8.250
Gas di cokeria	4.250
Gas di officina	4.250
Gas di altoforno	900
Gas residui di raffineria	12.000

## P.C.I.

Fonti Liquide	kcal/kg
Petrolio greggio	10.000
Semilavorati	10.000
Distillati leggeri di petrolio	10.400
Benzine	10.500
Carboturbo	10.400
Petrolio	10.300
Gasolio	10.200
Olio Combustibile A.T.Z.	9.800
Olio Combustibile B.T.Z.	9.800
G. P. L. (Gas di petrolio liquefatto)	11.000
Prodotti petroliferi non energetici	5.109

ENEA Rapporto  
Energia  
e Ambiente **2004**

Energia elettrica	kcal/kWh
Energia idraulica	2,200
Energia geotermica	2,200
Eolico + Fotovoltaico	2,200
Energia elettrica finale	0,860

## Contenuto energetico

- $H_s$  ed  $H_i$  sono riferiti alla s.s.
- per combustibili che contengono una certa frazione  $U$  di acqua, si parla propriamente di contenuto energetico  $C_E$ , che tiene conto dell'energia necessaria a fare evaporare l'acqua contenuta

$$\diamond C_E = H_i(1 - U) - 2.5U$$

dove

$C_E$  è in MJ/kg di tal quale;

$U$  = umidità, o rapporto in peso fra l'acqua e il tal quale; 2.5 sono MJ/kg, il calore latente di vaporizzazione dell'acqua.

## Esempio

- gasolio: P.C.I. = 10 200 kcal/kg

$$1 \text{ t di gasolio} = \frac{10\,200}{10\,000} = 10.2 \text{ tep}$$

$$1 \text{ tep} = \frac{10\,000}{10\,200} = 0.98 \text{ t di gasolio}$$

### Esempio

- **gas naturale: P.C.I. = 8 250 kcal/m<sup>3</sup>**

$$1 \text{ m}^3 \text{ di gas} = \frac{8\,250}{10\,000} = 0.825 \text{ tep}$$

$$1 \text{ tep} = \frac{10\,000}{8\,250} \times 1000 = 1212 \text{ m}^3 \text{ di gas}$$

- **densità: 0.83 kg/Nm<sup>3</sup>**

$$1 \text{ kg di gas} = \frac{8\,250 \times 0.83}{10\,000} = 0.685 \text{ tep}$$

$$1 \text{ tep} = \frac{10\,000}{8\,250 \times 0.83} \times 1000 = 1.46 \text{ t di gas}$$

1 Nm<sup>3</sup> = 1 m<sup>3</sup>  
di gas a 1 bar  
e a 20°C

### Esempio

- **1 barile (barrel, bbl) di petrolio = 158.984 L**

- **densità del petrolio: 0.86 kg/L**

$$1 \text{ bbl} = \frac{158.984 \text{ L} \times 0.86 \text{ kg/L}}{1000 \text{ kg/t}} = 0.137 \text{ tep}$$

$$1 \text{ tep} = \frac{1}{0.137} \times 1000 = 7.30 \text{ bbl}$$

## Hi e at

Combustibile	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	$H_l$ [MJ/kg]	$a_t$ [kg <sub>s</sub> /kg <sub>c</sub> ]	$H/a_t$ [MJ/kg]	Temp. di accensione [°C]	CO <sub>2</sub> gen. [kg/MJ]
Legna secca	500-800	18-20	5.8-6.7	3.1		0.096
Lignite		20.5				
Litantrace		26				
Antracite		30.5				
Coke	1000	30.2	10.1	2.99		0.103
RSU(*)	100	8	2.7	2.96		0.103
Benzina	730-760	44	14.7	2.99	400	
Gasolio	815-855	43.3	14.7	2.95	250	0.073
Olio denso	950	41.1	13.8	2.98		0.077
Gas di città	0.56÷0.61	30	10	3.00		
GPL	2.25	46	15.5	2.97	400	0.065
Gas naturale	0.83	47.7	17.3	2.76	560	0.056
Butano	2.7	45.7	15.4	2.97	365	
Acetilene	1.17	48.1	13.3	3.61	305	

(\*) Rifiuti Solidi Urbani

## Unità di misura energetiche

- **Wattora (Wh) = 3.600 J = 3,6 kJ**
- **Kilowattora (kWh) = 3.600 kJ = 3,6 MJ**
- **Caloria (cal) = 4,186 J**
- **Kilocaloria (kcal) = 4.186 J = 4,186 kJ**
- **Kilowattora (kWh) = 3,57 MJ = 860 kcal**
- **Tonnellata equivalente di petrolio (TEP)**
- **1 TEP = 10 Gcal = 41,86 GJ = 11,72 MWh**