

Politechnika Wroclawska  
Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Zakład Miernictwa i Eksploatacji Maszyn i Urządzeń Energetycznych

## **Laboratorium z Badania Maszyn**

Ćwiczenie nr 45.

### **Pomiar bilansowy układu ciepłowniczego**

Prowadzący:

Wykonał:

.....

### Tabela pomiarowa

Lp.	Mierzony parametr	Oznaczenie	Wymiar	Wartość				Wartość Średnia
1.	Zużycie paliwa	$\dot{m}_{pal}$	kg/s					
1.1	Ubytek masy paliwa	$\Delta m_{pal}$	kg	-	-	-		
1.2	Czas pomiaru	$\tau$	s					
2.	Parametry wody							
2.1	Temperatura za kotłem	$t'_{w1}$	°C					
2.2	Temperatura przed kotłem	$t'_{w2}$	°C					
2.3	Ciśnienie za kotłem	$p_{w1}$	MPa					
2.4	Ciśnienie przed kotłem	$p_{w2}$	MPa					
2.5	Spadek ciśnienia na zwężce podwójnej	$\Delta h'$	mmHg					
2.6	Strumień wody w układzie CO	$\dot{m}'_w$	kg/s					
2.7	Spadek ciśnienia na zwężce cylindrycznej	$\Delta h''$	mmHg	-	-	-		
2.8	Strumień wody w układzie c.w.u.	$\dot{m}''_w$	kg/s	-	-	-		
2.9	Temperatura wody w układzie c.w.u. - początkowa - końcowa	$t_{w1}^{c.w.u.}$ $t_{w2}^{c.w.u.}$	°C °C	- -	- -	- -		
3	Parametry powietrza							
3.1	Temperatura otoczenia	$t_{p1}$	°C					
3.2	Temperatura za nagrzewnicą - pierwsza - druga - średnia	$t'_{p2}$ $t''_{p2}$ $t_{p2} = \frac{t'_{p2} + t''_{p2}}{2}$	°C °C °C					
3.3	Ciśnienie dynamiczne - wysokość ciśnienia - wartość ciśnienia	$h_d$ $p_d$	mmH <sub>2</sub> O Pa					
3.4	Prędkość strugi powietrza	$w_p$	m/s					
3.5	Strumień objętościowy powietrza	$\dot{V}_{pn}$	m <sup>3</sup> /s					
3.6	Strumień masowy powietrza	$\dot{m}_p$	kg/m <sup>3</sup>					
4	Parametry spalin							
4.1	Temperatura spalin	$t_{sp}$	°C					
4.2	Skład spalin suchych	CO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CO	% % ppm					

## Wzory obliczeniowe

### 1. Zużycie paliwa

$$\dot{m}_{pal} = \frac{\Delta m_{pal}}{\tau} \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

### 2. Strumień wody

#### 2.1 Układ CO – zwężka podwójna

$$\dot{m}_w = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_w} \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

$$d = 0,01217 \text{ m}$$

$$D = 0,036 \text{ m}$$

$$C = 0,684$$

$$\Delta p = \Delta h \cdot (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) \cdot g \quad [Pa]$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{Hg} &= 13546 \frac{kg}{m^3} \\ \rho_{H_2O} &= 998 \frac{kg}{m^3} \end{aligned} \right| \text{ dla } t = 20^\circ C$$

$$\rho_w - \left[ \frac{kg}{m^3} \right] - \text{gęstość wody dla temperatury } t_{w1}'$$

$$t_{w1}' = 30^\circ C - \rho_w = 996 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{w1}' = 40^\circ C - \rho_w = 992 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{w1}' = 50^\circ C - \rho_w = 988 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{w1}' = 60^\circ C - \rho_w = 983 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{w1}' = 70^\circ C - \rho_w = 977 \text{ kg/m}^3$$

#### 2.2 Układ c.w.u. – zwężka cylindryczna

$$d = 0,010 \text{ m}$$

$$D = 0,036 \text{ m}$$

$$C = 0,801$$

### 3. Ciśnienie dynamiczne powietrza

$$\Delta p = h_d \cdot \rho_w \cdot g \quad [Pa]$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 - \text{gęstość wody}$$

#### 4. Prędkość przepływu powietrza przez nagrzewnicę

$$w_p = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_p}} \quad \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$\rho_p$  - gęstość powietrza dla temperatury  $t_{p2}$  [°C] i ciśnienia [MPa] (z tabeli)

#### 5. Strumień objętościowy powietrza

$$\dot{V}_{pn} = w_p \cdot 2 \cdot A \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$A = (0,470 \times 0,520) = 0,244 \text{ m}^2$$

#### 6. Strumień masowy powietrza

$$\dot{m}_p = \dot{V}_{pn} \cdot \rho_p \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$\rho_p$  - gęstość powietrza tak jak w punkcie 4

#### 7. Obliczenia bilansowe kotła

Strumień ciepła dostarczony palników

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_{pal} \cdot Q_{wp}^r \quad [kW]$$

$Q_{wp}^r = 46300 \text{ kJ/kg}$  – wartość opałowa paliwa

Ciepło użyteczne

Strumień ciepła dostarczony do wody w układzie CO

$$\dot{Q}_w^{CO} = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t'_{w2} - t'_{w1}) \quad [kW]$$

$c_w = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$  - ciepło właściwe wody

$$Q_u^{CO} = \frac{\dot{Q}_w^{CO}}{\dot{Q}_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

Strumień ciepła dostarczony do wody w układzie c.w.u.

$$\dot{Q}_W^{cwu} = m_w'' \cdot c_w \cdot (t_{w2}'' - t_{w1}'') \quad [kW]$$

$$Q_u^{cwu} = \frac{Q_w^{cwu}}{Q_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

Straty ciepłne

Strata wylotowa (kominowa)

$$S_k = \frac{\delta(t_{sp} - t_o)}{CO_2 + CO} \quad [\%]$$

$\delta$  – współczynnik Siegerta ( z wykresu)

$$Q_k = \frac{S_k}{100} \cdot Q_d \quad [kW]$$

Lub ze wzoru

$$Q_w = \dot{m}_{pal} \cdot (V_{ss} \cdot c_{ps} + V_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}) \cdot (t_{sp} - t_o) \quad [kW]$$

gdzie,

$$\dot{m}_{pal} - \text{strumień spalanej paliwa} \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$V_{ss} = \frac{22,42}{12} \cdot \frac{C}{CO_2 + CO} - \text{względna objętość spalin suchych}$$

C = 85% - zawartość pierwiastka C w paliwie,

CO<sub>2</sub>, CO - % udziały w spalinach suchych,

$$C_{ps} = 1,34 \left[ \frac{kJ}{m^3 \cdot K} \right] - \text{ciepło właściwe spalin suchych}$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,42}{18} \cdot (9 \cdot h + w) - \text{względna objętość pary wodnej} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

h = 0,14 ; w = 0,005 – udziały masowe wodoru i wody w paliwie

$$c_{pH_2O} = 1,92 \left[ \frac{kJ}{m^3 \cdot K} \right] - \text{ciepło właściwe pary wodnej}$$

$$S_w = \frac{Q_w}{Q_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

### Strata niezupełnego spalania

$$Q_{nz} = \dot{m}_{pal} \cdot V_{ss} \cdot Q_{wCO} \cdot \frac{CO}{100} \quad [kW]$$

$$\dot{m}_{pal} - \text{strumień spalanej paliwa} \quad \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$V_{ss} = \frac{22,42}{12} \cdot \frac{C}{CO_2 + CO} - \text{względna objętość spalin suchych}$$

$$Q_{wCO} = 12600 \left[ \frac{kJ}{m^3} \right] - \text{wartość opałowa CO}$$

$$CO - \text{udział CO w spalinach} \quad [\%]$$

$$S_{nz} = \frac{Q_{nz}}{Q_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

### Równania bilansowe

$$Q_d = Q_w^{CO} + Q_w^{cwu} + Q_w^{(k)} + Q_{nz} + Q_r \quad [kW]$$

$$100 = Q_u^{CO} + Q_u^{cwu} + S_w^{(k)} + S_{nz} + S_r \quad [\%]$$

$$Q_r = Q_d - (Q_w^{cwu} + Q_w^{(k)} + Q_{nz} + Q_w^{CO}) \quad [kW]$$

$$S_r = 100 - (Q_w^{cwu} + S_w^{(k)} + S_{nz} + Q_w^{CO}) \quad [\%]$$

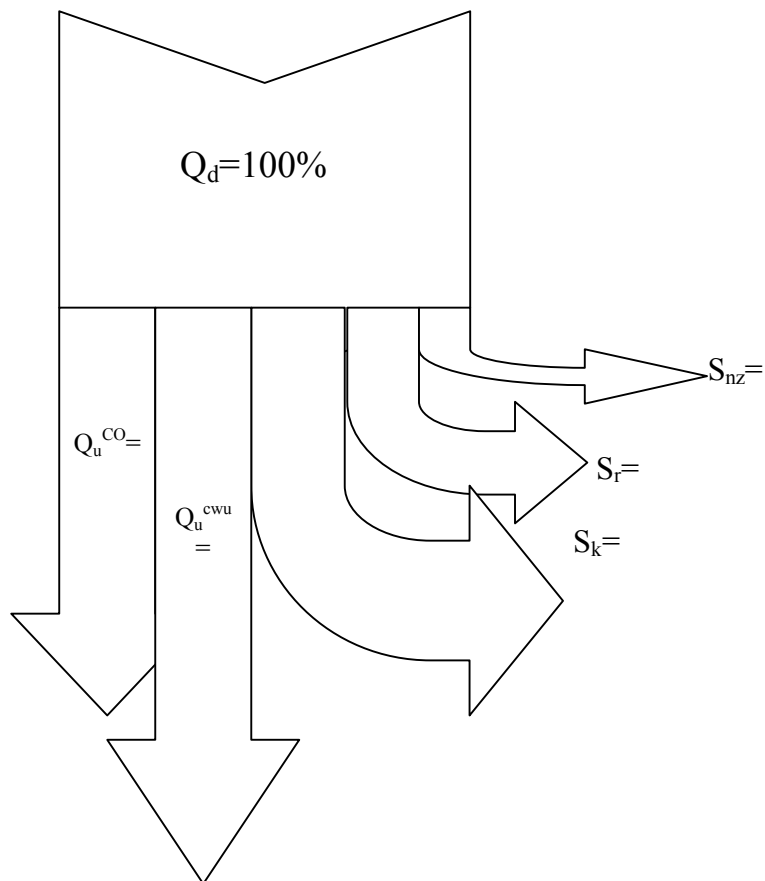
### Sprawność energetyczna kotła

$$\eta_k = \frac{Q_u}{Q_d} \cdot 100 = \frac{Q_u^{CO} + Q_u^{cwu}}{Q_d} \quad [\%]$$

Zestawienie obliczeń bilansowych

Strumienie ciepłe	kW	%
Strumień dostarczonego ciepła	$Q_d =$	$Q_d =$
Strumień użyteczny dostarczony do wody w układzie CO	$Q_w^{CO} =$	$Q_u^{CO} =$
Strumień użyteczny dostarczony do wody w układzie c.w.u	$Q_w^{c.w.u} =$	$Q_w^{CO} =$
Strata wylotowa (kominowa)	$Q_k =$	$S_k =$
Strata niezupełnego spalania	$Q_{nz} =$	$S_{nz} =$
Reszta strat	$Q_r =$	$S_r =$
Sprawność energetyczna kotła	$\eta_k = \%$	

Wykres Sankey'a



## 8. Bilans cieplny nagrzewnicy powietrza

Ciepło dostarczone do nagrzewnicy powietrza

$$\dot{Q}_d \equiv Q_w^{CO} \quad [kW]$$

Strumień ciepła dostarczony do podgrzanego powietrza

$$\dot{Q}_{pn} = \dot{m}_p \cdot c_{pp} \cdot (t_{p2} - t_{p1}) \quad [kW]$$

$$c_{pp} = 1,005 \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ - ciepło właściwe powietrza}$$

Sprawność energetyczna nagrzewnicy powietrza

$$\eta_{np} = \frac{Q_{np}}{Q_w^{CO}} \cdot 100 \quad [\%]$$

## 9. Bilans cieplny nagrzewnicy wody

Ciepło dostarczone do nagrzewnicy

$$\dot{Q}_{dn} = Q_w^{cwu} \quad [kW]$$

Ciepło dostarczone do wody zawartej w podgrzewaczu wody

$$\dot{Q}_{pw} = m_w \cdot c_w \cdot \frac{1}{\tau} \cdot (t_{w2}^{cw} - t_{w1}^{cw})$$

$\tau[s]$  - czas grzania wody

$m_w = 100 \text{ kg}$  - masa wody zawartej w podgrzewaczu

$t_{w1}^{cw}, t_{w2}^{cw} [^\circ\text{C}]$  – początkowe i końcowe temp. wody w podgrzewaczu

$$c_w = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K} \text{ - ciepło właściwe wody}$$

Sprawność energetyczna podgrzewacza wody

$$\eta_{pw} = \frac{Q_{pw}}{Q_w^{cwu}} \cdot 100 \quad [\%]$$



## 10. Przykładowe obliczenia

$$\dot{m}_w = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_w} = \frac{0,684}{\sqrt{1-(0,338)^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,01217)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9478 \cdot 998} = 0,347 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$w_p = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7}{1,127}} = 3,52 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_{pn} = w_p \cdot 2 \cdot A = 3,52 \cdot 2 \cdot 0,244 = 0,858 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_{pal} \cdot Q_{wp} = 0,001 \cdot 46300 = 46,3 \text{ kW}$$

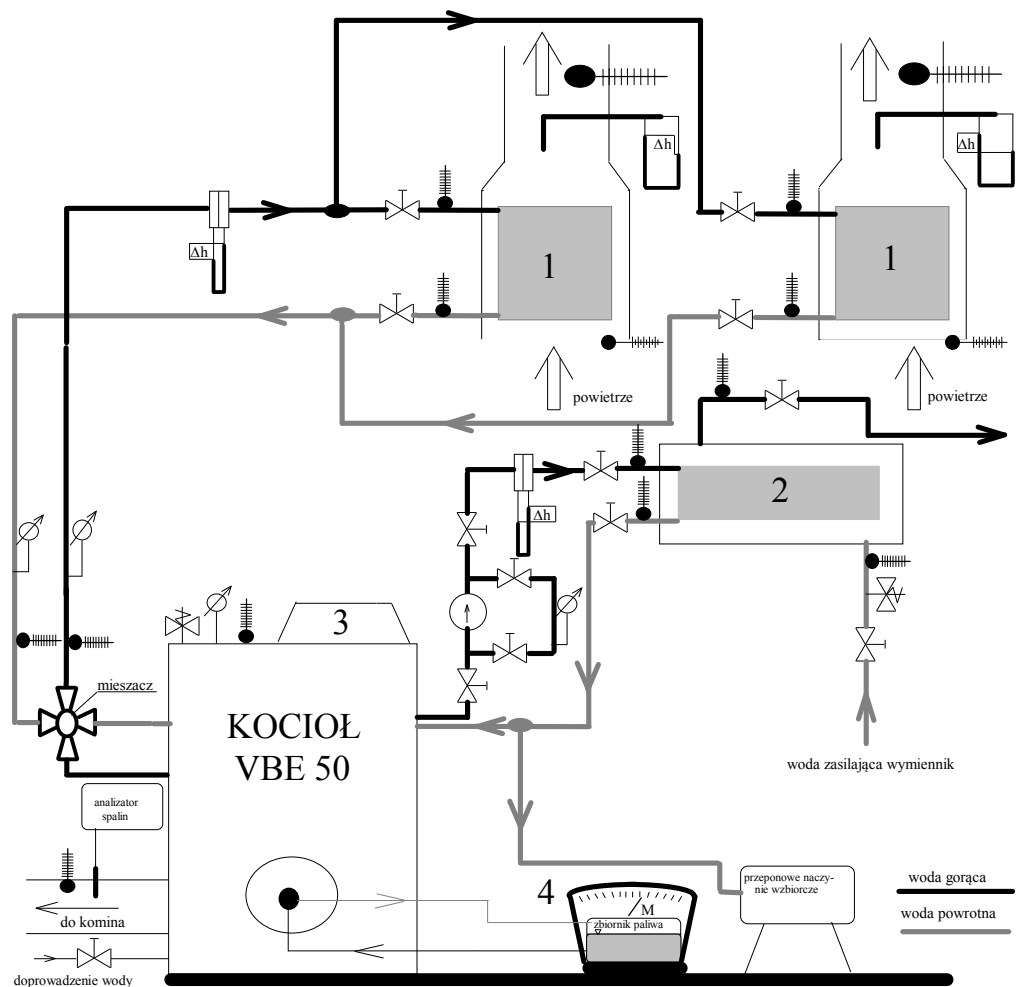
$$\dot{Q}_w^{CO} = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t'_{w2} - t'_{w1}) = 0,347 \cdot 4,18 \cdot (61 - 49,9) = 16,53 \text{ kW}$$

$$V_{ss} = \frac{22,42}{12} \cdot \frac{C}{CO_2 + CO} = \frac{22,42}{12} \cdot \frac{85}{10,7 + 0,0016} = 14,81 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,42}{18} \cdot (9 \cdot h + w) = \frac{22,42}{18} \cdot (9 \cdot 0,14 + 0,005) = 1,575 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$Q_w = \dot{m}_{pal} \cdot (V_{ss} \cdot c_{ps} + V_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}) \cdot (t_{sp} - t_o) = 0,001 \cdot (14,81 \cdot 1,34 + 1,575 \cdot 1,92) \cdot (99 - 17) = 18,75 \text{ kW}$$

$$S_w = \frac{Q_w}{Q_d} \cdot 100 = \frac{18,75}{46,3} \cdot 100 = 40,4\%$$



1- wymienniki ciepła (nagrzewnice) wodno-powietrzne, 2- nagrzewnica ciepłej wody użytkowej, 3- kocioł grzewczy firmy Viessmann VBE-50, 4- zbiornik z olejem opalowym.