

**Katedra Silników Spalinowych  
i Pojazdów ATH  
ZAKŁAD TERMODYNAMIKI**

## **Bilans energetyczny gazowego podgrzewacza wody**

---

## **Przedmiot badań.**

---

Przedmiotem badań jest łazienkowy piecyk gazowy służący do podgrzewania wody.

Piec grzejny jest urządzeniem cieplnym, które dzięki wykorzystaniu ciepła uzyskanego ze spalania paliwa lub pochodzące z innych źródeł (np. przepływ prądu elektrycznego) służy wyłącznie do nagrzewania wsadu umieszczonego w jego komorze roboczej. W hutnictwie piece te są instalowane w ciągach technologicznych do plastycznej przeróbki metali (walcowanie, kucie, tłoczenie, prasowanie) oraz do obróbki cieplnej (hartowanie, normalizowanie i odpuszczanie stali, wyżarzanie itp.). W zależności od procesu różne są temperatury nagrzewania. Wymienione procesy nagrzewania prowadzi się w piecach o działaniu ciągłym (piece przepychowe, tunelowe, pokroczne) lub okresowym (piece wgłębne, komorowe z ruchomym trzonem itp.). Proces nagrzewania w piecach o działaniu ciągłym charakteryzuje się ustalonym rozkładem temperatury wsadu, gazów i obmurza pieca. Wsad jest podawany i odbierany z pieca w sposób ciągły. W piecach o działaniu okresowym załadunek i wyładunek wsadu odbywa się w sposób periodyczny i rozkładu temperatur mają charakter nieustalony. Jednym z najważniejszych wskaźników charakteryzujących energetycznie jakość pracy pieca jest jego sprawność energetyczna. Do pełnej oceny pracy pieca pod względem energetycznym służy bilans energii pieca, umożliwiającą analizę wartości występujących strat.

W piecu służącym jako podgrzewacz wody spala się paliwo gazowe, a wydzielające się ciepło zostaje wykorzystane w pewnej części do podgrzewania wody. Efektywność tego procesu zależy od warunków spalania tj. nadmiaru powietrza, natężenia przepływu wody oraz jej temperatury. Wydajnością piecyka gazowego możemy nazwać stosunek ilości ciepła przekazanego podgrzewanej wodzie do ilości ciepła powstałego w wyniku reakcji spalania. Sprawność takiego pieca w warunkach typowej eksploatacji nigdy nie będzie równa 100% ponieważ powstają straty ciepła do otoczenia poprzez obudowę piecyka, straty kominowe na skutek różnicy temperatury spalin oraz temperatury otoczenia oraz straty powstałe w wyniku niecałkowitego i niezupełnego spalania.

## **Bilans energetyczny.**

---

### Założenia.

- Spalanie jest zupełne i całkowite.
- $\text{CH}_4$  jest nasycony wilgocią -  $\varphi_{\text{CH}_4} = 100\%$ .
- Gaz
  - doskonały
  - pół doskonały.

### Obliczenia.

Bilans energetyczny łazienkowego podgrzewacza wody opracowany jest na zasadzie I zasady termodynamiki:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w$$

$$\dot{H}_g + \dot{H}_p + \dot{H}_{w1} = \dot{H}_{w2} + \dot{H}_{sp} + \dot{Q}_{ot}$$

Entalpie:

$\dot{H}_g$  - gazu

$\dot{H}_{w1}$  - wody na wejściu

$\dot{H}_{w2}$  - wody na wyjściu

$\dot{H}_{sp}$  - spalin

$\dot{Q}_{ot}$  - straty

Strumień entalpii wody na wlocie:

$$\dot{H}_{w1} = \dot{m}_{w1} \cdot c_w \cdot t_{w1}$$

Strumień entalpii wody na wylocie:

$$\dot{H}_{w2} = \dot{m}_{w2} \cdot c_w \cdot t_{w2}$$

$$\dot{H}_g + \dot{H}_a = \dot{H}_{w2} - \dot{H}_{w1} + \dot{H}_{sp} + \dot{Q}_{ot}$$

Różnica entalpii wody na wlocie i wylocie jest strumieniem ciepła użytecznego przekazanego do wody w podgrzewaczu:

$$\dot{Q}_{ef} = \dot{H}_{w2} - \dot{H}_{w1} = \dot{m}_w c_w (t_{w2} - t_{w1})$$

$\dot{Q}_{ef}$  - strumień ciepła przekazanego wodzie.

Entalpia gazu palnego:

Jeżeli gaz jest doskonały:

$$\dot{H}_g = \dot{n}_g (Mh)_g = \dot{n}_g \left[ (M_{wd})_{CH_4} + \Delta(Mh)_g \Big|_m^{tg} + X_{zg} \Delta(Mh)_{H_2O} \Big|_m^{tg} \right]$$

dla  $t_n \neq 0$ :

$$\Delta(Mh)_g \Big|_m^{tg} = (M_{cp})_g \cdot (t_g - t_n)$$

dla  $t_n = 0$ :

$$\Delta(Mh)_g \Big|_0^{tg} = (M_{cp})_g \Big|_0^{tg} \cdot (t_g) = (a + b \cdot t_g) \cdot t_g$$

dla gazów półdoskonałych ( $M_{cp}$ ) jest funkcją temperatury, stosujemy więc średnie ciepło właściwe dobierając go z tabeli 1.

Rodzaj gazu	$(M_{cp}) _0^t$ [kJ/kmol·K]
Metan – CH <sub>4</sub>	$36,51 + 22,77 * 10^{-3} t$
Tlen – O <sub>2</sub>	$29,66 + 3,257 * 10^{-3} t$
Dwutlenek węgla – CO <sub>2</sub>	$39,24 + 9,340 * 10^{-3} t$
Para wodna – H <sub>2</sub> O	$32,90 + 5,792 * 10^{-3} t$
Azot – N <sub>2</sub>	$28,63 + 2,572 * 10^{-3} t$
Powietrze	$28,85 + 2,716 * 10^{-3} t$

Tabela 1. Średnie ciepło właściwe ( $M_{cp}$ ) dla wybranych pół doskonałych gazów.

Strumień molowy  $\dot{n}_g$  wyliczamy z równania Clapeyrona:

$$\dot{n}_g = \frac{\dot{V}_g \cdot p_{gs}}{(MR) \cdot T_g}$$

gdzie:

$$\dot{V}_g = \frac{V_g}{\tau} \text{ objętościowe natężenie przepływu gazu.}$$

$$p_{gs} = p_g - \varphi_g \cdot p_s(t_g)$$

$$p_g = p_{mg} + P_{ot}$$

- $p_{gs}$  – ciśnienie gazu suchego
- $p_g$  – ciśnienie gazu
- $p_{mg}$  – ciśnienie manometryczne gazu

$$(MR) = 8314,7 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}$$

Entalpia spalin:

$$\dot{H}_{sp} = \dot{n}_g (n_{CO_2}'' (Mh)_{CO_2} \Big|_0^{ts} + n_{O_2}'' (Mh)_{O_2} \Big|_0^{ts} + n_{N_2}'' (Mh)_{N_2} \Big|_0^{ts} + n_{H_2O}'' (Mh)_{H_2O} \Big|_0^{ts})$$

gdzie:  $n_i''$  – ilość kilomoli poszczególnych składników spalin powstałych ze spalania jednego kilomola gazu palnego.

- $n_{CO_2}'' = 1$
- $n_{O_2}'' = (\lambda - 1)n_{O_2 \min} = 2(\lambda - 1)$
- $n_{N_2}'' = \lambda \frac{n_{O_2 \min}}{0,21} \cdot 0,79 = 7,524\lambda$
- $n_{H_2O}'' = 2 + X_{zg} + n_a' X_{za} = 2 + X_{zg} + 9,524\lambda \cdot X_{za}$

$X_{zg}$  – molowy stopień zawilżenia gazu

$$X_{zg} = \frac{p_s(t_g)}{p_g - p_s(t_g)}$$

- $p_s(t_g)$  – ciśnienie nasycenia w temperaturze gazu

$X_{za}$  – molowy stopień zawilżenia powietrza

$$X_{za} = \frac{\varphi_{ot} p_s(t_{ot})}{p_{ot} - \varphi_{ot} p_s(t_{ot})}$$

- $p_s(t_{ot})$  – ciśnienie nasycenia w temperaturze otoczenia

Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ .

$$[CO_2] = \frac{n_{CO_2}''}{n_{CO_2}'' + n_{O_2}'' + n_{N_2}''} = \frac{1}{1 + 2(\lambda - 1) + \frac{0,79}{0,21} \cdot 2 \cdot \lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\frac{1}{[CO_2]} + 1}{9,52381}$$

Entalpia powietrza.

$$\dot{H}_a = \dot{n}_a' \cdot n_g \left[ \Delta(Mh)_a + X_{za} \Delta(Mh)_{H_2O} \Big|_0^{t_{ot}} \right]$$

gdzie:

- $\dot{n}_a' = \lambda \cdot n_{a \min} = \lambda \cdot \frac{n_{O \min}}{0,21} = \lambda \cdot \frac{2}{0,21} = 9,524 \cdot \lambda$

Bilans energetyczny podgrzewacza.

Z bilansu energetycznego:

$$\dot{H}_g + \dot{H}_a + \dot{H}_{w1} = \dot{H}_{w2} + \dot{H}_{sp} + \dot{Q}_{ot}$$

wyznaczamy straty ciepła do otoczenia.

$$\dot{Q}_{ot} = \dot{H}_g + \dot{H}_a - (\dot{H}_{w2} - \dot{H}_{w1}) - \dot{H}_{sp}$$

$$\dot{Q}_{ot} = \dot{H}_g + \dot{H}_a - \dot{Q}_{ef} - \dot{H}_{sp}$$

Sprawność termiczna podgrzewacza

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{ef}}{\dot{Q}_d}$$

gdzie:

-  $\dot{Q}_d = n_g (MWd)_{CH_4}$  strumień energii doprowadzonej.

Temperatura $t$ [°C]	Wartość opałowa metanu ( $MW_d$ ) [kJ/kmol]	Ciepło spalania metanu ( $MW_g$ ) [kJ/kmol]
0	802 095	892 204
2	802 113	892 053
4	802 131	891 900
6	802 149	891 749
8	802 168	891 597
10	802 186	891 445
12	802 204	891 293
14	802 222	891 140
15	802 231	891 064
16	802 240	890 988
17	802 249	890 912
18	802 258	890 836
19	802 266	890 760
20	802 276	890 684
21	802 284	890 607
22	802 293	890 531
23	802 302	890 455
24	802 311	890 378
25	802 320	890 302
26	802 329	890 226
27	802 338	890 150
28	802 346	890 073
29	802 355	889 997
30	802 364	889 921

Tabela 2. Wartość opałowa i ciepło spalania metanu

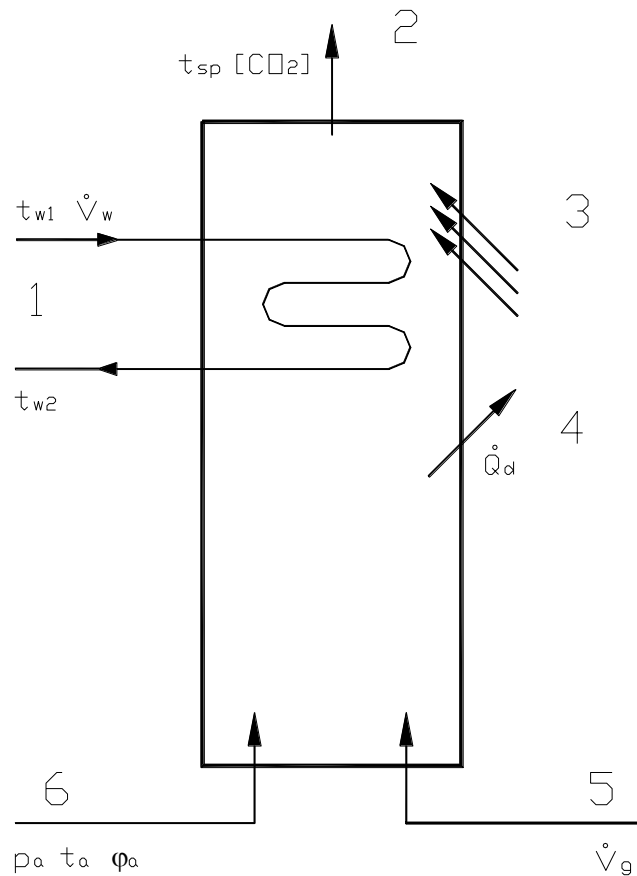
## Pomiary

---

### Opis stanowiska

Powietrze (tzw. powietrze pierwotne) do palników jest zasysane poprzez gaz wypływający z kalibrowanych dysz. W gardzieli palnika wytwarza się mieszanina palna gazu z powietrzem, która płonie po opuszczeniu palnika. Do strefy palnika dostarczane jest również powietrze z otoczenia (tzw. powietrze wtórne), które dostarcza tlenu do spalania. Duży nadmiar powietrza w obrębie palników pozwala zmniejszyć straty energii chemicznej paliwa powodowanej

niecałkowitym spalaniem. Do przerwania ciągu kominowego służy dodatkowy wlot powietrza, który również zabezpiecza przed zdmuchnięciem płomienia. Poprzez te trzy niekontrolowane wloty dopływa niekontrolowana ilość powietrza, co ma wpływ na bilansowanie piecyka. Podstawą do rozpoczęcia bilansu jest dokładne zmierzenie strumienia gazu oraz jego parametry termiczne. Na podstawie zmierzenia stężenia ilości  $\text{CO}_2$  w spalinach suchych opuszczających kocioł, oblicza się nadmiar powietrza  $\lambda$ . Na tej podstawie oblicza się łączny strumień powietrza. Następnie można rozpocząć bilans, pod warunkiem znajomości składu gazu i jego wartości opałowej.



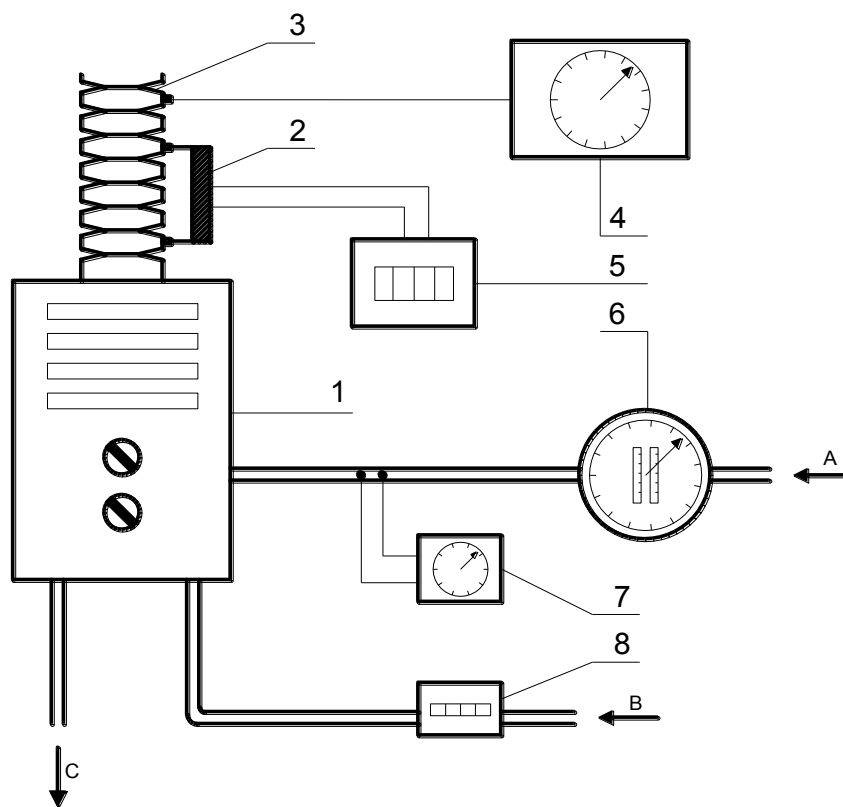
Rysunek 1. Schemat bilansowy piecyka.

- 1) przepływ wody.
- 2) ujście spalin.
- 3) powietrze do przerywania ciągu kominowego.
- 4) straty ciepła do otoczenia.
- 5) paliwo gazowe.
- 6) dopływ powietrza.



### Opis stanowiska pod względem zastosowanych urządzeń.

Na rysunku przedstawiono schematycznie stanowisko pomiarowe z wyszczególnieniem punktów oraz urządzeń pomiarowych. Natężenie przepływu wody mierzy się rotametrem (8), a przyrost jej temperatur w piecu – przy pomocy termometrów rtęciowych (7,8) umieszczonych na rurociągach dopływowym i odpływowym. Informacja o  $\lambda$  przy spalaniu zawarta jest w stężeniu  $[\text{CO}_2]$  w spalinach pobieranych z przewodu kominowego (3). Zastosowano ciągły pomiar dwutlenku węgla przy pomocy infralitu z odczytem cyfrowym. Natężenie przepływu gazu palnego oraz jego temperaturę mierzy się przy pomocy gazomierza z wbudowanym termometrem i manometrem cieczowym (6). Temperaturę spalin w kanale kominowym mierzy się przy pomocy termopary Fe-Ko (2). Jak już zostało wspomniane próbka spalin jest zasysana z przewodu kominowego. Do pomiaru stężenia dwutlenku węgla zastosowano infralit - przyrząd wykorzystujący absorpcję promieniowania podczerwonego przez gaz trójatomowy (dwutlenek węgla) będący składnikiem roztworu gazowego. Ponieważ para wodna również wykazuje zdolność absorpcji promieniowania podczerwonego, należy ją usunąć z analizowanej próbki. W tym celu próbkę gazową schładza się przy pomocy chłodziarki termoelektrycznej. Wówczas wykrapla się znaczna ilość pary wodnej, a dalsze usunięcie pary wodnej odbywa się na drodze chemicznej (na drodze wiązania jej z chlorkiem wapna). Dopiero wtedy gaz pozbawiony wody jest kierowany do analizatora.



Rys. 2. Schemat stanowiska pod względem zastosowanych urządzeń.