

L2. Pomiary i obliczenia wybranych parametrów procesu spalania paliwa gazowego

1. Kontrola spalania gazu ziemnego

2. Pomiary ciepła spalania i wartości opałowej gazu ziemnego

Kontrola spalania gazu ziemnego

Spalanie paliw polega na gwałtownym utlenieniu składników palnych zawartych w paliwie przebiegającym z wydzielaniem ciepła i zjawiskami świetlnymi. Ostatecznymi produktami utleniania składników palnych paliwa są: dwutlenek węgla CO_2 , dwutlenek siarki SO_2 i para wodna H_2O [2 - 4, 6].

Spalanie zupełne występuje, gdy produkty spalania nie zawierają gazowych składników palnych (np. CO , H_2 , CH_4). Jeżeli natomiast stałe produkty (żużel, popiół) nie zawierają wolnego węgla i siarki występuje **spalanie całkowite**.

Spalanie ze stosunkiem nadmiaru powietrza $\lambda = 1$ może powodować duże straty stałych i gazowych składników palnych ze względu na utrudniony kontakt tlenu ze składnikami palnymi paliwa (szczególnie dla paliw stałych). Z kolei zbyt wysoki nadmiar powietrza powoduje nadmierne straty ciepła fizycznego oraz znaczne obniżenie temperatury spalania [5, 9].

Dlatego też, spalanie należy prowadzić ze stosunkiem nadmiaru powietrza właściwym dla danego rodzaju paliwa, paleniska, palnika czy też komory spalania. Przykładowe stosunki nadmiaru powietrza dla wybranych paliw i palenisk przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela. Stosunki nadmiaru powietrza λ dla niektórych typów palenisk i rodzajów paliwa [5]

Typ paleniska	Rodzaj paliwa	Stosunek nadmiaru powietrza λ
Ręczne	Węgiel kamienny - kostka	1,6 ÷ 1,9
	- miał	1,7 ÷ 2,2
Mechaniczne taśmowe z podmuchem strefowym	Węgiel kamienny - miał	1,4 ÷ 2,2
Mechaniczne z rusztem schodkowym	Węgiel brunatny	1,4 ÷ 1,8
Pyłowe	Pył węgla kamiennego, brunatnego, torfu, antracytu, miału koksowego	1,2 ÷ 1,3
Pyłowo – cyklonowe	Paliwo jak wyżej	1,05 ÷ 1,1
Olejowe	Benzyny, mazut, smoły węglowe	1,2 ÷ 1,4
Gazowe	Gaz ziemny, wielkopiecowy koksowniczy i inne	1,05 ÷ 1,1

Celem kontroli procesu spalania jest określenie jakości spalania. Służy temu określenie stosunku nadmiaru powietrza i rzeczywistej temperatury spalania.

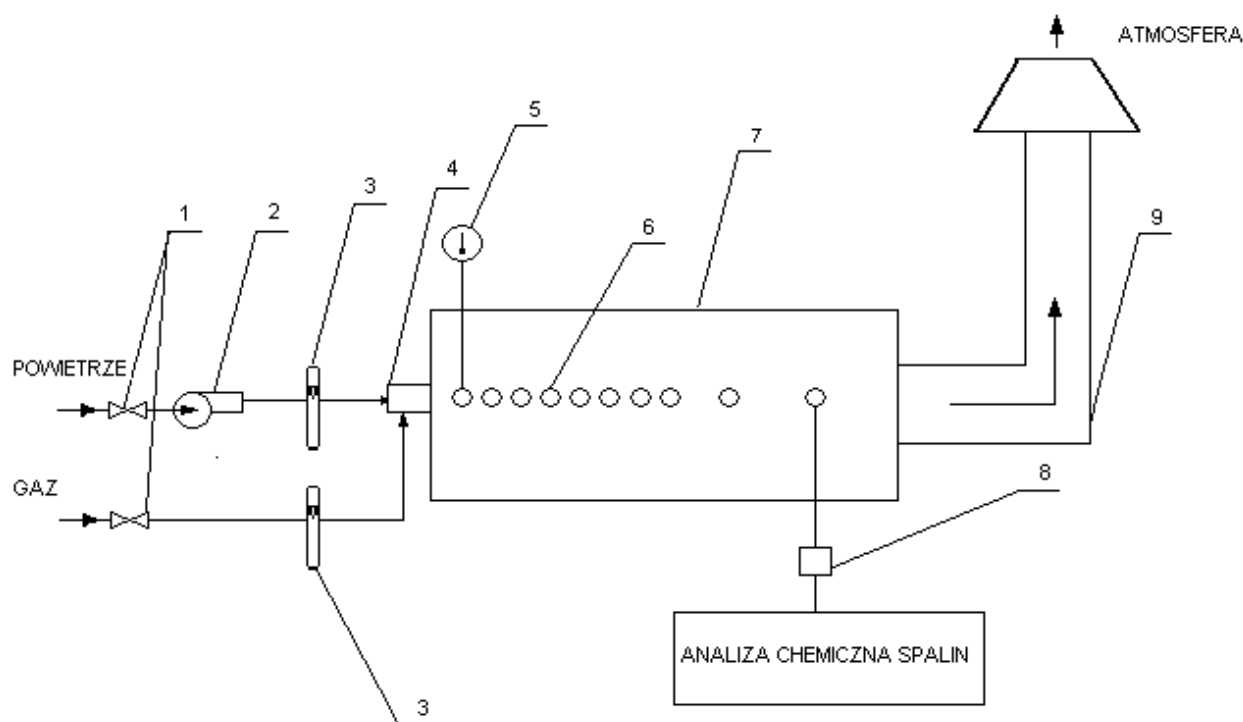
Kontrolę stosunku nadmiaru powietrza należy prowadzić w oparciu o:

1. analizę chemiczną paliwa,
2. pomiary strumieni paliwa i powietrza spalania,
3. analizę chemiczną spalin.

Natomiast kontrolę temperatury przeprowadza się przez bezpośredni pomiar lub obliczenia.

Proces spalania można kontrolować w sposób graficzny stosując trójkąt Ostwalda lub kwadrat Buntego wykonany tylko dla danego typu paliwa [5, 9].

1. Stanowisko pomiarowe



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego. 1 – regulator przepływu, 2 - wentylator, 3 - rotamet, 4 - palnik, 5 - termometr, 6 - wziernik, 7 –piec, 8 – filtr, 9 – odprowadzenie spalin.

2. Wykonanie ćwiczenia

Ćwiczenia polega na badaniu zmian jakości spalania przy stałej mocy cieplnej pieca przy zmiennym stosunku nadmiaru powietrza (temperatura, skład chemiczny spalin)

Należy wykonać pomiar składu chemicznego spalin oraz temperatury płomienia w nagrzanym piecu opalanym gazem ziemnym. Pomiar składu chemicznego spalin wykonujemy za pomocą analizatora spalin dla kilku wartości stosunku nadmiaru powietrza λ [7, 8]. Równocześnie mierzymy temperaturę płomienia za pomocą termopary [1, 10].

3. Sprawozdanie powinno zawierać:

- * Schemat stanowiska laboratoryjnego,
- * Sposób poboru spalin do analizy,
- * Sposób pomiaru temperatury w piecu,
- * Zasada działania rotametri,
- * Wyniki pomiarów,
- * Obliczenia:

Przyjąć skład gazu ziemnego: $\text{CH}_4=97\%$; $\text{C}_2\text{H}_6=0.7\%$; $\text{CO}_2=0,3\%$; $\text{N}_2=1\%$ i $\text{O}_2=1\%$

a) Tlen teoretyczny dla danego składu chemicznego gazu

$$O_t = \frac{1}{2}CO + \frac{1}{2}H_2 + \frac{3}{2}H_2S + (n + \frac{m}{4})C_nH_m - O_2, \frac{\text{m}^3\text{O}_2}{\text{m}^3\text{gazu}}$$

gdzie:

$CO, H_2, H_2S, C_nH_m, O_2$ – udziały objętościowe składników palnych w gazie,
 m^3 składnika/ m^3 gazu.

b) Powietrze teoretyczne

$$V_0 = \frac{100}{21} \cdot O_t, \frac{\text{m}^3\text{powietrza}}{\text{m}^3\text{gazu}}$$

c) Stosunek nadmiaru powietrza dla pomiarów I, II i III wg wzorów:

λ_1 – wyznaczony w oparciu o pomiar strumieni objętościowych paliwa i powietrza spalania

$$\lambda_1 = \frac{\dot{V}_c}{V_0 \dot{V}_g}$$

gdzie:

\dot{V}_c – strumień objętościowy powietrza całkowitego, m³/h,

\dot{V}_g – strumień objętościowy spalonego gazu, m³/h,

V_0 – powietrze teoretyczne, m³ powietrza/m³ gazu.

λ_2 – wyznaczony w oparciu o analizę chemiczną spalin

$$\lambda_2 = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{[\text{O}_2] - \frac{1}{2} [\text{CO}]}{[\text{N}_2]}}$$

gdzie:

$[\text{O}_2]$, $[\text{CO}]$, $[\text{N}_2]$ – zawartość tlenu, tlenku węgla i azotu w spalinach suchych, %.

λ_3 – wyznaczony w oparciu o analizę chemiczną paliwa i bilans CO₂

$$\lambda_3 = \frac{[\text{CO}_2]_{\max}}{[\text{CO}_2]}$$

gdzie:

$[\text{CO}_2]_{\max} = k_{\max}$ – maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach suchych ($x = 0$), powstałych w wyniku całkowitego i zupełnego spalania paliwa ($\text{CO} = 0$) z teoretyczną ilością powietrza ($\lambda = 1$), %,

$[\text{CO}_2]$ – zmierzona zawartość dwutlenku węgla w spalinach, %.

$$[\text{CO}_2]_{\max} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{ss}}^t}, \%$$

gdzie:

V_{CO_2} - objętość powstałego CO_2 w spalinach, $m^3 CO_2/m^3$ gazu,

V_{ss}^t - ilość teoretycznych spalin suchych, m^3 spalin suchych/ m^3 gazu.

4. Własne wnioski i spostrzeżenia,

Literatura

1. Charakterystyki termometryczne termoelementów
http://www.czaki.pl/czaki/pliki/m009/155_ch_ki_termopar.pdf,
2. Chomiak J.: Podstawowe problemy Spalania. PWN, Warszawa 1981,
3. Jarosiński J.: Techniki Czystego Spalania. WNT, Warszawa 1996,
4. Kordylewski W. i in.: Spalanie i paliwa. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2001,
5. Nocoń J., Poznański J., Słupek S., Rywotycki M.: Technika Ciepłna. Przykłady z techniki procesów spalania. Wyd. Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2007,
6. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości. Norma PN-92/C-96004/02: Terminologia. Paliwa gazowe. Spalanie,
7. Riedl W., Młodziński B., Bober M.: Aparatura i przyrządy kontrolno-pomiarowe w przemyśle chemicznym”. Cz I. PWSZ, Warszawa 1973,
8. Rotametry szklane laboratoryjne ROL. Instrukcja Obsługi. Zakłady automatyki chemicznej METALCHEM, nr 781, Gliwice 1979,
9. Słupek S., Nocoń J., Buczek A.: Technika Ciepłna-ćwiczenia obliczeniowe. Uczelniane Wyd. Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2005,
10. Termoelementy – Arkusz 1: Charakterystyki (IEC 584-1:1995). Norma europejska. CENELEC, nr ref. EN 60584-1:1995E.

Pytania sprawdzające:

1. Definicja tlenu stechiometrycznego i teoretycznego.
2. Powietrze teoretyczne i całkowite.
3. Stosunek nadmiaru powietrza.
4. Obliczanie ilości spalin wilgotnych i suchych powstałych podczas całkowitego i zupełnego spalania paliwa gazowego.
5. Warunki wyznaczania k_{\max} .
6. Cel kontroli procesu spalania.
7. Parametry kontroli procesu spalania.

Pomiary ciepła spalania i wartości opałowej gazu ziemnego

Ciepło spalania Q_s jest to ilość ciepła otrzymana przy spalaniu całkowitym i zupełnym jednostki paliwa wagowej lub objętościowej, gdy produkty spalania zostały oziębione do temperatury początkowej paliwa i powietrza, a para wodna zawarta w paliwie lub powstała ze spalania wodoru ulega skropleniu wydzielając ciepło skraplania (parowania).

Wartość opałowa Q_i jest to ilość ciepła otrzymana przy spalaniu całkowitym i zupełnym jednostki paliwa wagowej lub objętościowej, gdy produkty spalania oziębione do temperatury początkowej paliwa i powietrza zawierają wodę w postaci pary.

Pomiary ciepła spalania i wartości opałowej wykonuje się w kalorymetrze Junkersa, ręcznym lub automatycznym, przez pomiar bezpośredni. Schemat ręcznego kalorymetru Junkersa pokazano na rys. 1.

Metoda oznaczania ciepła spalania w kalorymetrze Junkersa polega na odebraniu całej ilości ciepła, powstającej podczas spalania określonej ilości paliwa gazowego, przez przepływający w sposób ciągły strumień wody.

Zasada oznaczenia wartości opałowej w kalorymetrze Junkersa polega na oznaczeniu ciepła, powstającego z kondensacji pary wodnej przy oziębianiu spalin, poprzez pomiar masy wykroplonej wody.

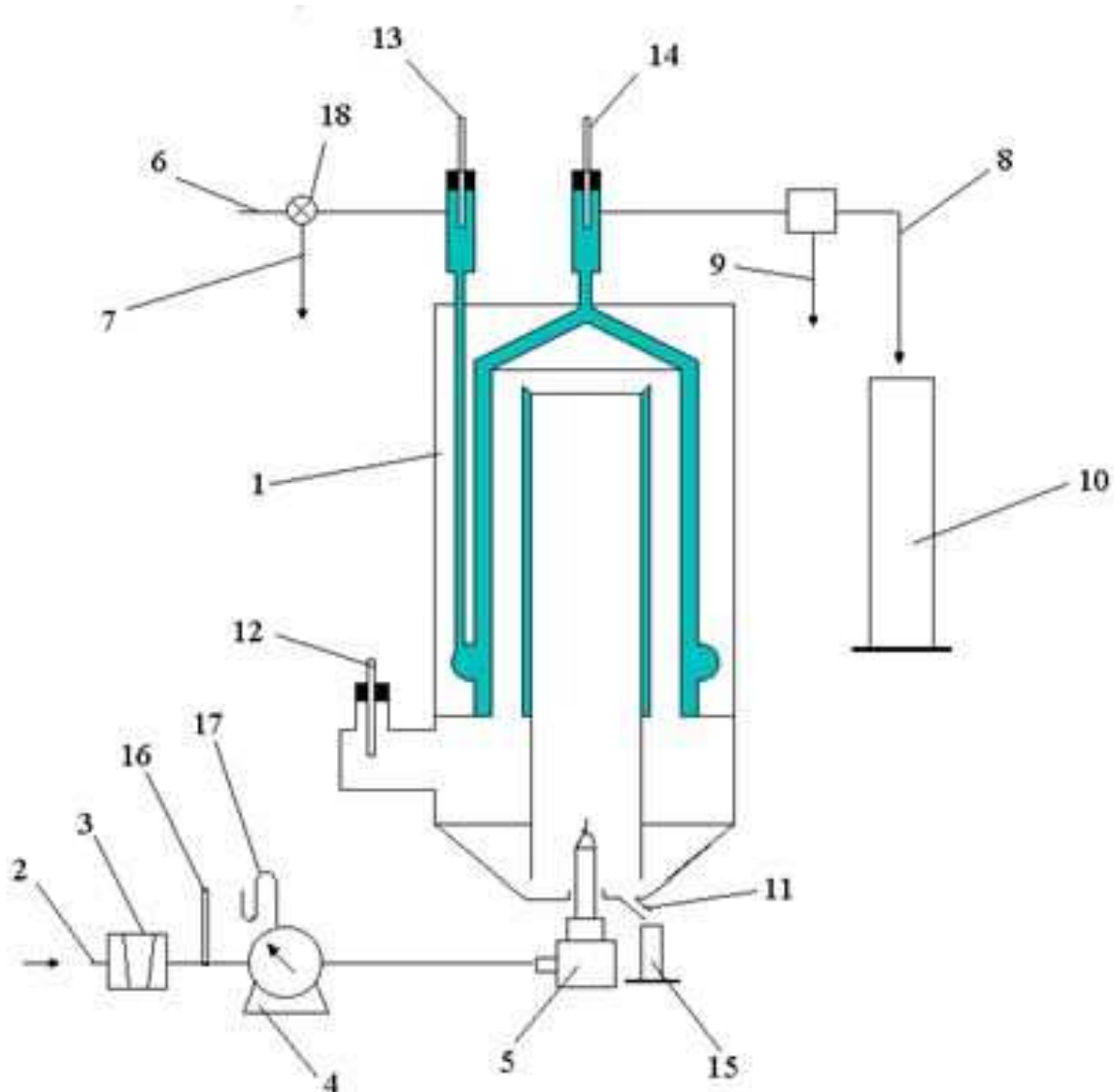
W celu uzyskania poprawnych wyników pomiarów, strumienie gazu i wody dopływające do kalorymetru należy regulować tak, aby różnica temperatur między wypływającą ciepłą wodą i wpływającą zimną wynosiła 10 ± 12 K.

Stały strumień objętości gazu można uzyskać poprzez:

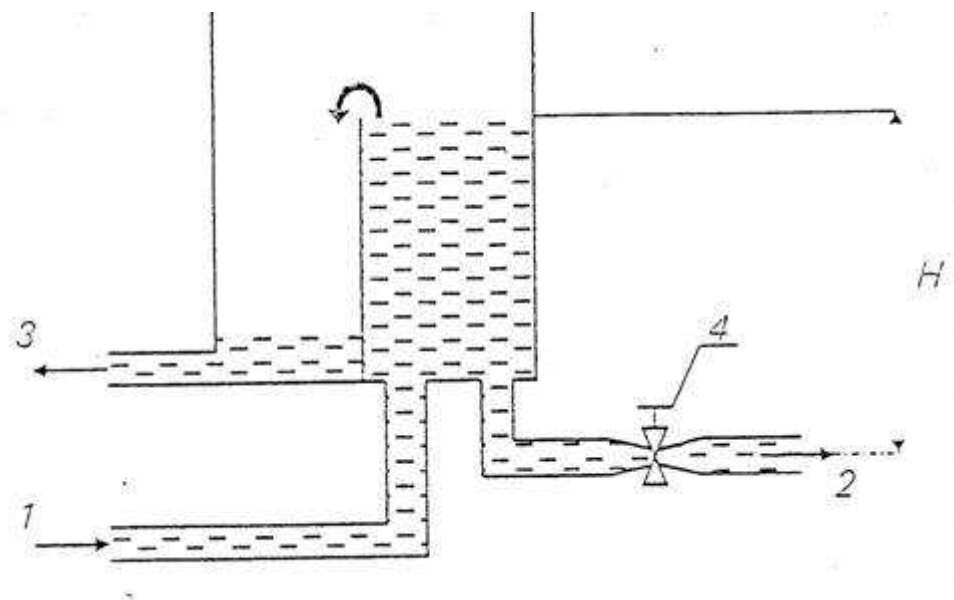
- zamontowanie regulatora przepływu gazu na wejściu do kalorymetru
- zamontowanie stabilizatora ciśnienia gazu na wejściu do kalorymetru

Stały strumień objętości przepływającej wody można uzyskać stosując naczynie przelewowe. Schemat naczynia przelewowego przedstawiono na rys. 2.

Regulując średnicę dyszy na wlocie wody do kalorymetru, przy stałym ciśnieniu hydrostatycznym, uzyskuje się stały strumień objętości wody dopływającej do kalorymetru. Woda ogrzewa się w płaszczu kalorymetru Junkersa – wymienniku ciepła. Następnie wpływa do zbiornika wypływowego wody skąd przez zawór trójdrożny odpływa do naczynia pomiarowego lub do zlewu.



Rys. 1. Schemat ręcznego kalorymetru Junkersa. 1 – kalorymetr Junkersa;
 2 – dopływ gazu z sieci gazowej; 3 – regulator przepływu gazu; 4 – gazomierz mokry;
 5 – palnik; 6 – dopływ wody z sieci; 7 – powrót wody nadmiarowej; 8 – odpływ wody do naczynia pomiarowego; 9 – odpływ wody do zlewu; 10 – naczynie pomiarowe wody;
 11 – odpływ skroplin; 12 – pomiar temperatury spalin; 13 – pomiar temperatury wody na dopływie do kalorymetru (zimnej); 14 - pomiar temperatury wody na odpływie do kalorymetru (cieplej); 15 – naczynie pomiarowe ilości skroplin; 16 – pomiar temperatury gazu; 17 – pomiar ciśnienia gazu; 18 – naczynie przelewowe.



Rys. 2. Schemat naczynia przelewowego. 1 – woda zasilająca z sieci;
 2 – woda wpływająca do płaszcza wodnego kalorymetru; 3 – woda nadmiarowa;
 4 – regulacja średnicy dyszy; H – stałe ciśnienie hydrostatyczne w naczyniu przelewowym.

Temperaturę wody zimnej wpływającej oraz temperaturę wody ciepłej wypływającej z kalorymetru odczytuje się na termometrach zamontowanych na wlocie i wylocie wody. Spaliny uchodzą wylotem spalin. Temperaturę spalin mierzy się termometrem. Skraplająca się woda przy oziębianiu spalin wypływa z dolnej części kalorymetru.

Pomiary rozpoczyna się po ustaleniu różnicy temperatur wody na dopływie i wypływie wynoszącej $10 \div 12$ K.

Wykonanie pomiaru ciepła spalania Q_s

Po ustaleniu się warunków pracy w kalorymetrze Junkersa podstawić pod wylotem wody naczynie pomiarowe. Odkręcić zawór trójdrożny i równocześnie odczytać stan początkowy pomiarów: stan gazomierza oraz temperatury na termometrach po stronie dopływu i wypływu wody. Wykonać 10 odczytów temperatur wody w równych odstępach czasu. Następnie zakręcić zawór, odczytać stan końcowy gazomierza i zważyć dokładnie zebraną wodę. Wykonać pomiar trzykrotnie.

Wykonanie pomiaru wartości opałowej Q_i

Po ustaleniu się warunków pracy w kalorymetrze Junkersa podstawić pod wylotem skraplającej się wody ze spalin suche naczynie pomiarowe i równocześnie odczytać stan początkowy gazomierza. Po spaleniu określonej ilości gazu odczytać stan końcowy gazomierza i równocześnie wyjąć naczynie pomiarowe z wykroploną wodą. Zważyć wykroploną wodę. Wykonać pomiar trzykrotnie.

Obliczenie ciepła spalania Q_s i wartości opałowej Q_i :

$$Q_s = \frac{m_w c_p (t_k - t_p)}{V_{o1}}, \quad \text{kJ/m}^3$$

$$Q_i = Q_s - \frac{2454 g}{V_{o2}}, \quad \text{kJ/m}^3$$

gdzie:

2454 – ciepło parowania wody w 20°C, kJ/kg,

m_w – masa podgrzanej wody zebranej w naczyniu pomiarowym, kg,

c_p – ciepło właściwe wody równe 4.187 kJ/kg K,

t_p – temperatura wody wlotowej – zimnej, °C,

t_k – temperatura wody wylotowej – cieplej, °C,

g – masa wykroplonej wody ze spalin, kg,

V_{o1} – objętość spalonego gazu w trakcie pomiaru masy podgrzanej wody przeliczonej na warunki normalne: $p = 101325 \text{ Pa}$ i $T = 273 \text{ K}$, m^3 ,

V_{o2} – objętość spalonego gazu w trakcie pomiaru masy wykroplonej wody ze spalin przeliczonej na warunki normalne: $p = 101325 \text{ Pa}$ i $T = 273 \text{ K}$, m^3 .

$$V_o = V_g \frac{(p_b + 9.81 a) 273}{101325 (273 + t_g)}, \quad \text{m}^3$$

gdzie:

V_g – zmierzona objętość spalonego gazu, m^3 ,

p_b – ciśnienie barometryczne, Pa,

a – nadciśnienie gazu odczytane z gazometru, mm SW,

t_g – temperatura gazu, °C.

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Schemat stanowiska pomiarowego,
2. Wyniki pomiarów,
3. Obliczenie średnich wartości Q_s i Q_i ,
4. Spostrzeżenia i wnioski.

Literatura:

1. PN-86/C-96002. Pomiar ciepła spalania i wartości opałowej za pomocą kalorymetru.
2. PN-92/C-96004/02. Terminologia. Paliwa gazowe. Spalanie.
3. Słupek S., Nocoń J., Buczek A.: Technika Ciepłna-ćwiczenia obliczeniowe. Uczelniane Wyd. Naukowo-dydaktyczne AGH, Kraków 2005,
4. Nocoń J., Poznański J.: Technika Ciepłna-przykłady z techniki procesów spalania. Wyd. AGH, Kraków 1990,
5. Chomiak J.: Podstawowe problemy Spalania. PWN, Warszawa 1981,
6. Jarosiński J.: Techniki Czystego Spalania. WNT, Warszawa 1996,
7. Kordylewski W. i in.: Spalanie i paliwa. Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2001.

Zakres pytań sprawdzających:

1. Spalanie, spalanie całkowite i zupełne
2. Paliwa i ich podział,
3. Ciepło spalania,
4. Wartość opałowa,
5. Zasada działania kalorymetru Junkersa,
6. Metoda oznaczania ciepła spalania gazu w kalorymetrze Junkersa,
7. Zasada oznaczenia wartości opałowej gazu w kalorymetrze Junkersa.

Karta pomiarowa: Pomiary ciepła spalania i wartości opałowej gazu ziemnego

Wielkość	Jednostka	Pomiar I	Pomiar II	Pomiar III
V_{g1}	m^3			
V_{g2}	m^3			
m_w	kg			
t_p	$^{\circ}C$			
t_k	$^{\circ}C$			
t_{sp}	$^{\circ}C$			
t_g	$^{\circ}C$			
a	mm SW			
p_b	Pa			
g	kg			