

## Kontrola procesu spalania

**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  $\text{CO}_2$ , dwutlenek siarki  $\text{SO}_2$  i para wodna  $\text{H}_2\text{O}$  [2 - 4, 6].

**Spalanie zupełne** występuje, gdy produkty spalania nie zawierają gazowych składników palnych (np.  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). 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  $\lambda$  dla niektórych typów palenisk i rodzajów paliwa [5]

Typ paleniska	Rodzaj paliwa	Stosunek nadmiaru powietrza $\lambda$
Ręczne	Węgiel kamienny - kostka - miał	1,6 ÷ 1,9 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.

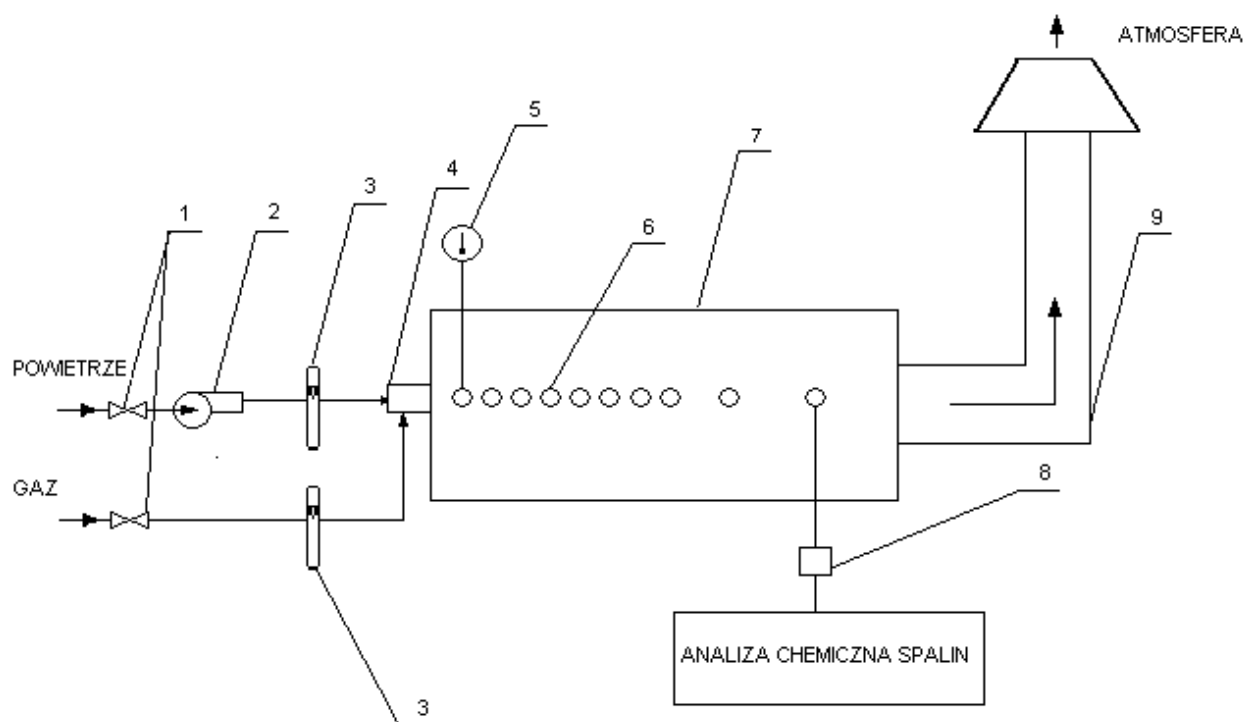
Kontrolę stosunku nadmiaru powietrza należy prowadzić w oparciu o:

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  $\lambda$  [7, 8]. Równocześnie mierzymy temperaturę płomienia za pomocą termopary [1, 10].

## 3. Sprawozdanie powinno zawierać:

4. Schemat stanowiska laboratoryjnego,
5. Sposób poboru spalin do analizy,
6. Sposób pomiaru temperatury w piecu,
7. Zasada działania rotametri,
8. Wyniki pomiarów,
9. Obliczenia:

a) Tlen teoretyczny dla danego składu chemicznego gazu

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

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

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

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

$\lambda_1$  – 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, m<sup>3</sup>/h,

$\dot{V}_g$  – strumień objętościowy spalonego gazu, m<sup>3</sup>/h,

$V_0$  – powietrze teoretyczne, m<sup>3</sup> powietrza/m<sup>3</sup> gazu.

$\lambda_2$  – 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, %.

$\lambda_3$  – wyznaczony w oparciu o analizę chemiczną paliwa i bilans CO<sub>2</sub>

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

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.

10. Własne wnioski i spostrzeżenia,

## 11. Literatura

1. Charakterystyki termometryczne termoelementów  
[http://www.czaki.pl/czaki/pliki/m009/155\\_ch\\_ki\\_termopar.pdf](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.