

# KONTROLA SPALANIA PALIW

## I. Cel:

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wpływu współczynnika nadmiaru powietrza na parametry termodynamiczne urządzeń oraz wielkość emisji produktów spalania do atmosfery.

## II. Zadania:

1. Zmierzyć zawartość  $[O_2]$  oraz  $[CO]$  w spalinach. Uwaga  $[CO]$  nie może przekraczać 50 ppm (założenie spalania całkowitego i zupełnego)
2. Wyznaczyć moc cieplną wywiązującą się podczas spalania gazu w kalorymetrze.
3. Obliczyć współczynnik nadmiaru powietrza i określić jego wpływ na wielkości charakterystyczne np. temperaturę spalin, moc urządzenia grzewczego, wielkość emisji do atmosfery produktów spalania.

## III. Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Wyniki pomiarów
2. Obliczenia
3. Omówienie warunków pomiarowych – wyjaśnić ich znaczenie dla poprawności wykonania ćwiczenia

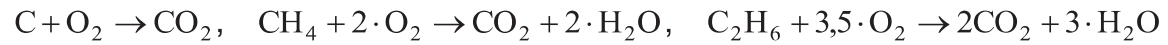
#### IV. Przebieg ćwiczenia

1. Wyregulować zaworem strumień wody przepływającej przez kalorymetr.
2. Ustalić przepływ gazu przez gazomierz w przedziale zmian ciśnienia na U-rurce od 20 do 80 mmH<sub>2</sub>O.
3. Zapalić palnik Bunsena i umieścić go w kalorymetrze.
4. Poczekać na ustalenie się warunków termicznych tak aby temperatura wody na wypływie z kalorymetru nie przekroczyła 80°C.
5. Włączyć pompę poboru spalin na analizatorze. Jeżeli w spalinach wykryto CO powyżej 50 ppm wyjąć palnik i wyregulować dopływ powietrza na palniku i umieścić go w kalorymetrze, poczekać na ustalenie się warunków termicznych.
6. Zarejestrować czas spalania 5 litrów gazu w celu wyznaczenia strumienia objętości spalanego gazu.
7. Zważyć naczynie na wody i umieścić je przy kalorymetrze. Zmienić położenie głowicy zaworu trójdrożnego na kalorymetrze i zarejestrować czas napełniania wody w celu wyznaczenia strumienia masy wody ogrzewanej w kalorymetrze. Równocześnie zanotować średnią temperaturę wody dopływającej i wypływającej oraz temperaturę spalin.
8. Po około 5 minutach przełączyć głowicę zaworu trójdrożnego i zważyć wodę w naczyniu.
9. Dla nowej nastawy ciśnienia gazu pobieranego z sieci powtórzyć czynności z punktów od 2 do 8.
10. Po zakończeniu pomiarów wyłączyć dopływ gazu, wody oraz pompę poboru spalin na analizatorze.
11. Wyniki pomiarów należy przedstawić prowadzącemu ćwiczenie do zatwierdzenia.

## VI. Dodatki

### Obliczenie współczynnika nadmiaru powietrza:

Reakcje podstawowe spalania:



Zapotrzebowanie teoretyczne na tlen przy spalaniu:

$$\begin{aligned} n_{O_2, \min} &= \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n = 2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 = 2 \cdot 0,713 + 3,5 \cdot 0,006 = \\ &= 1,447 \frac{\text{kmol} O_2}{\text{jedn.pal.}} = 1,447 \frac{\text{um}^3 O_2}{\text{um}^3 \text{s.g.p.}} \end{aligned}$$

Zapotrzebowanie wyraża ilość tlenu potrzebną do spalania jednostki paliwa zgodnie z bilansem reakcji podstawowych spalania.

Zapotrzebowanie teoretyczne na powietrze przy spalaniu dla założonego składu powietrza 21% tlenu i 79% azotu:

$$n_{\text{pow}, \min} = \frac{n_{O_2, \min}}{0,21} = 6,891 \frac{\text{um}^3 \text{pow.}}{\text{um}^3 \text{s.g.p.}}$$

Rzeczywiście doprowadzona ilość powietrza do spalania zależy od współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ :

$$n_{\text{pow}} = \lambda \cdot n_{\text{pow}, \min}$$

Skład spalin wyznacza się poprzez obliczenie udziałów poszczególnych składników w spalinach:

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= CO_2 + \sum m C_m H_n = CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 = 0,002 + 0,713 + 2 \cdot 0,006 = \\ &= 0,727 \frac{\text{um}^3 CO_2}{\text{um}^3 \text{s.g.p.}} \end{aligned}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot n_{\text{pow}} - n_{\text{pow}, \min} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot n_{\text{pow}, \min} = 1,447 \cdot \lambda - 1,447$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot n_{\text{pow}} + N_2^{\text{pal}} = 0,79 \cdot \lambda \cdot n_{\text{pow}, \min} + N_2^{\text{pal}} = 5,444 \cdot \lambda + 0,279$$

Objętość spalin suchych wpływających z kalorymetru jest równa

$$V_{\text{ss}} = V_{CO_2} + V_{O_2} + V_{N_2} = 0,727 + 1,447 \cdot \lambda - 1,447 + 5,444 \cdot \lambda + 0,279 = 6,891 \cdot \lambda - 0,441$$

Udział objętościowy składników w spalinach suchych jest równy:

$$[CO_2] = \frac{V_{CO_2}}{V_{\text{ss}}} \cdot 100\%, \quad [O_2] = \frac{V_{O_2}}{V_{\text{ss}}} \cdot 100\%, \quad [N_2] = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{ss}}} \cdot 100\%.$$

Współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  obliczymy ze zmierzonej wartości udziału objętościowego tlenu  $[O_2]_{zm}$  w spalinach suchych:

$$[O_2]_{zm} = \frac{V_{O_2}}{V_{ss}} = \frac{1,447 \cdot \lambda - 1,447}{6,891 \cdot \lambda - 0,441} \Rightarrow \lambda = \frac{-1,447 + 0,441 \cdot [O_2]_{zm}}{6,891 \cdot [O_2]_{zm} - 1,447}$$

gdzie  $[O_2]_{zm}$  należy podstawić jako wartość bezwymiarową.

### **Obliczenie mocy cieplnej urządzenia grzewczego:**

Moc cieplną przekazaną wodzie w kalorymetrze oblicza się z wzoru

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = \frac{m_w}{\tau_w} \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad [W]$$

gdzie  $c_p = 4189 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ .

### **Obliczenie strumienia objętości spalonego gazu:**

Strumień objętości spalonego gazu obliczamy z pomiarów zużycia gazu przepływającego przez gazomierz w czasie:

$$\dot{V}_g = \frac{V_g}{\tau_g},$$

gdzie  $V_g$  jest objętością spalonego gazu w  $\text{m}^3$ , a  $\tau_g$  jest czasem w sekundach.  $1 \text{ liter} = 1 \text{ dm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$ .

### **Obliczenie strumienia objętości powietrza doprowadzonego do spalania:**

Strumień objętości powietrza zależy od ilości spalonego gazu oraz współczynnika nadmiaru powietrza, przy którym przebiegała reakcja:

$$\dot{V}_{\text{pow}} = n_{\text{pow}} \cdot \dot{V}_g = \lambda \cdot n_{\text{pow,min}} \cdot \dot{V}_g = \lambda \cdot 6,891 \cdot \dot{V}_g.$$

### **Obliczenie strumienia objętości spalin suchych opuszczających kalorymetr:**

Strumień objętości spalin jak wyznaczyliśmy wyżej zależy od składu spalin, współczynnika nadmiaru powietrza oraz ilości spalonego gazu:

$$V_{ss} = (V_{CO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}) \cdot \dot{V}_g = (6,891 \cdot \lambda - 0,441) \cdot \dot{V}_g.$$

## **PODSUMOWANIE**

| $\lambda$ | $CO_2$ [%]                 | $t_{sp}$ [ $^{\circ}C$ ]   | $Q$ [W]                    | $\dot{V}_{\text{pow}}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] | $\dot{V}_{ss}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|
| rośnie    | rośnie/maleje <sup>1</sup> | rośnie/maleje <sup>1</sup> | rośnie/maleje <sup>1</sup> | rośnie/maleje <sup>1</sup>                       | rośnie/maleje <sup>1</sup>               |

<sup>1</sup>wybrać poprawną odpowiedź

|  |                      |        |
|--|----------------------|--------|
| Politechnika Poznańska<br>Katedra Techniki Ciepłej |                      |        |
| Kontrola spalania paliw                            |                      |        |
| Imię i nazwisko:                                   |                      |        |
| Data wykonania ćwiczenia:                          | Podpis prowadzącego: | Ocena: |

1. Skład chemiczny spalanego gazu oraz powietrza doprowadzonego do procesu:

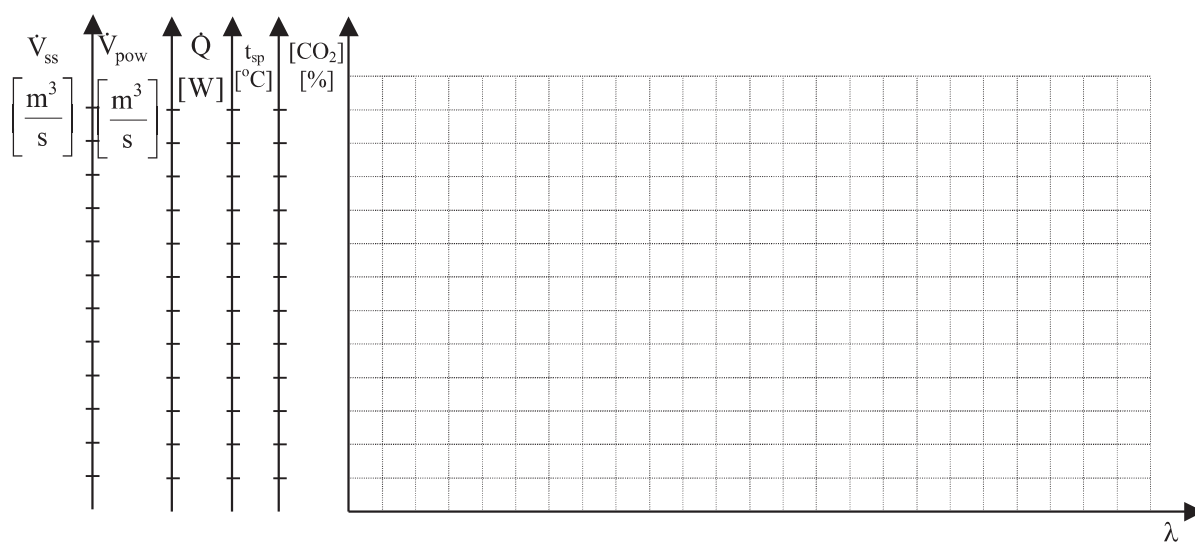
| Paliwo                                  | Powietrze               |
|---|-------------------------|
| [CH <sub>4</sub> ] = 71,3%              | [N <sub>2</sub> ] = 79% |
| [C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ] = 0,6% | [O <sub>2</sub> ] = 21% |
| [N <sub>2</sub> ] = 27,9%               |                         |
| [CO <sub>2</sub> ] = 0,2%               |                         |

2. Zestawienie wyników pomiarów:

|          | Wielkość   | Jednostka  | Wartość |
|----------|--|--|---------|
| Pomiar 1 | 1. zawartość O <sub>2</sub> w spalinach<br>2. zawartość CO w spalinach<br>3. temperatura spalin $t_{sp}$<br>4. temperatura wody na dopływie $t_1$<br>5. temperatura wody na wypływie $t_2$<br>6. masa wody przepływającej przez kalorymetr $m_w$<br>7. czas poboru wody $\tau_w$<br>8. objętość spalonego gazu $V_g$<br>9. czas poboru gazu $\tau_g$<br>10. temperatura otoczenia $t_{ot}$<br>11. ciśnienie otoczenia $p_{ot}$ | %<br>ppm<br>°C<br>°C<br>°C<br>kg<br>s<br>l<br>s<br>°C<br>hPa |         |
| Pomiar 2 | 1. zawartość O <sub>2</sub> w spalinach<br>2. zawartość CO w spalinach<br>3. temperatura spalin $t_{sp}$<br>4. temperatura wody na dopływie $t_1$<br>5. temperatura wody na wypływie $t_2$<br>6. masa wody przepływającej przez kalorymetr $m_w$<br>7. czas poboru wody $\tau_w$<br>8. objętość spalonego gazu $V_g$<br>9. czas poboru gazu $\tau_g$<br>10. temperatura otoczenia $t_{ot}$<br>11. ciśnienie otoczenia $p_{ot}$ | %<br>ppm<br>°C<br>°C<br>°C<br>kg<br>s<br>l<br>s<br>°C<br>hPa |         |
| Pomiar 3 | 1. zawartość O <sub>2</sub> w spalinach<br>2. zawartość CO w spalinach<br>3. temperatura spalin $t_{sp}$<br>4. temperatura wody na dopływie $t_1$<br>5. temperatura wody na wypływie $t_2$<br>6. masa wody przepływającej przez kalorymetr $m_w$<br>7. czas poboru wody $\tau_w$<br>8. objętość spalonego gazu $V_g$<br>9. czas poboru gazu $\tau_g$<br>10. temperatura otoczenia $t_{ot}$<br>11. ciśnienie otoczenia $p_{ot}$ | %<br>ppm<br>°C<br>°C<br>°C<br>kg<br>s<br>l<br>s<br>°C<br>hPa |         |

### 3. Zestawienie wyników obliczeń:

|          | Wielkość   | Jednostka             | Wartość |
|----------|--|-----------------------|---------|
| Pomiar 1 | 1. współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda$               | -                     |         |
|          | 2. obliczoną wartość $[\text{CO}_2]$                       | %                     |         |
|          | 3. moc urządzenia grzewczego $\dot{Q}$                     | W                     |         |
|          | 4. strumień objętości spalonego gazu $\dot{V}_{\text{sg}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 5. strumień objętości powietrza $\dot{V}_{\text{pow}}$     | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 6. strumień objętości spalin suchych $\dot{V}_{\text{ss}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
| Pomiar 2 | 1. współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda$               | -                     |         |
|          | 2. obliczoną wartość $[\text{CO}_2]$                       | %                     |         |
|          | 3. moc urządzenia grzewczego $\dot{Q}$                     | W                     |         |
|          | 4. strumień objętości spalonego gazu $\dot{V}_{\text{sg}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 5. strumień objętości powietrza $\dot{V}_{\text{pow}}$     | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 6. strumień objętości spalin suchych $\dot{V}_{\text{ss}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
| Pomiar 3 | 1. współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda$               | -                     |         |
|          | 2. obliczoną wartość $[\text{CO}_2]$                       | %                     |         |
|          | 3. moc urządzenia grzewczego $\dot{Q}$                     | W                     |         |
|          | 4. strumień objętości spalonego gazu $\dot{V}_{\text{sg}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 5. strumień objętości powietrza $\dot{V}_{\text{pow}}$     | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |
|          | 6. strumień objętości spalin suchych $\dot{V}_{\text{ss}}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |         |



### 4. Wnioski:

## PODSTAWOWE ZASADY PRZELICZANIA WYNIKÓWN

### 7. PODSTAWOWE ZASADY PRZELICZANIA WYNIKÓWN

#### 7.2. Obliczanie stężenia dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>

#### 7.3. Obliczanie stężenia tlenków azotu NO<sub>x</sub>

#### 7.4. Stężenie "nierozrzedzonego" tlenku węgla CO<sub>u</sub>

#### 7.5. Stężenia masowe gazu

##### 7.5.1. Stężenia masowe składników gazu

##### 7.5.2. Stężenia masowe odniesione do zawartości tlenu w spalinach

#### 7.6. Obliczenia parametrów spalania

#### 7.7. Parametry paliw

#### 7.8. Wpływ parametrów paliwa na dokładność wyników obliczeń

### 7. PODSTAWOWE ZASADY PRZELICZANIA WYNIKÓWN

#### 7.2. Obliczanie stężenia dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>

Objętościowa zawartość dwutlenku węgla (wyrażona w [% vol.]) nie jest uzyskiwana z bezpośrednich pomiarów, lecz jest obliczana na podstawie zmierzonego stężenia tlenu i parametru CO<sub>2max</sub>, charakterystycznego dla danego paliwa. Wzór prezentuje zależność wg której analizator oblicza objętościowe stężenie CO<sub>2</sub>.

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{max}} \cdot \left( 1 - \frac{\text{O}_{2\text{meas}}[\%]}{20.95\%} \right)$$

#### 7.3. Obliczanie stężenia tlenków azotu NO<sub>x</sub>

W spalinach, obok tlenku azotu NO, występują również wyższe tlenki, w tym głównie NO<sub>2</sub>. Stężenie tlenków azotu wyrażone w [ppm] można z dużą dokładnością wyrazić jako sumę stężeń NO i NO<sub>2</sub>. Jeżeli w urządzeniu **GA-21 plus** nie zainstalujemy

czujnika dwutlenku azotu NO<sub>2</sub>, a jedynie czujnik tlenku azotu NO, wówczas zawartość NO<sub>2</sub> zostaje oszacowana na podstawie zmierzonej ilości NO. Najczęściej przyjmuje się, że tlenek azotu NO występujący w spalinach stanowi ok. 95 % ogólnej sumy tlenków azotu NO<sub>x</sub>. **GA-21 plus** dokonuje oszacowania łącznego stężenia tlenków azotu NO<sub>x</sub> wg następującego wzoru:

$$\text{NO}_x[\text{ppm}] = \frac{\text{NO}[\text{ppm}]}{0.95}$$

W przypadku gdy jeden z czujników opcjonalnych analizatora **GA-21 plus** jest czujnikiem NO<sub>2</sub> nie zachodzi konieczność szacowania ilości NO<sub>2</sub>. W takim przypadku stężenie NO<sub>x</sub> jest obliczane przez analizator jako suma zmierzonych stężeń NO i NO<sub>2</sub>:

$$\text{NO}_x[\text{ppm}] = \text{NO}[\text{ppm}] + \text{NO}_2[\text{ppm}]$$

#### 7.4. Stężenie "nierozrzedzonego" tlenku węgla CO<sub>u</sub>

W celu uniezależnienia oceny zawartości tlenku węgla w spalinach od nadmiaru powietrza, z jakim prowadzony jest proces spalania, wprowadza się pojęcie stężenia „nierozrzedzonego” tlenku węgla CO<sub>undil</sub> (wielkość ta bywa również nazywana "stężeniem CO przeliczonym na 0 % O<sub>2</sub>"). Wartość CO<sub>undil</sub> jest obliczana wg poniższego wzoru:

$$\text{CO}_{\text{undil}} = \text{CO} \cdot \lambda$$

|    |                                   |
|----|-----------------------------------|
| CO | stężenie objętościowe CO w [ppm], |
| λ  | współczynnik nadmiaru powietrza   |

#### 7.5. Stężenia masowe gazu

**GA-21 plus** dokonuje również przeliczenia stężeń wyrażonych w [ppm] na stężenia masowe wyrażone w [mg/m<sup>3</sup>]. Stężenia masowe składników gazowych są zależne od ciśnienia i temperatury gazu. W celu umożliwienia porównywania wyników wprowadzono pojęcie tzw. *warunków umownych* - są to umowne wartości temperatury i ciśnienia na jakie przelicza się stężenia masowe składników. W **GA-21 plus** przyjęto warunki umowne wynoszące 1013 hPa i 0°C.

Należy zwrócić uwagę, że analizator podaje dwie różne wartości wyrażone w [mg/m<sup>3</sup>] są to tzw. bezwzględne stężenia masowe i stężenia masowe względem tlenu.



Wartości te bywają często mylone - w następnych punktach wyjaśniono dokładnie sposób ich wyliczania i różnice między nimi.

### 7.5.1. Stężenia masowe składników gazu

Bezwzględne stężenia masowe określają ile miligramów danego gazu występuje w 1 m<sup>3</sup> gazów spalinowych w warunkach umownych (1013 hPa, 0°C). Wartości tych stężeń przeliczane są ze stężeń wyrażonych w [ppm], przy użyciu współczynników A z tabeli paliw, według następującego wzoru (wzór podany przykładowo dla stężenia CO):

$$\text{CO} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \text{CO}[\text{ppm}] \cdot A_{\text{CO}}$$

Gdzie:

|                        |   |
|------------------------|---|
| CO[mg/m <sup>3</sup> ] | bezwzględne masowe stężenie CO w spalinach (dla danych warunków umownych) |
| CO[ppm]                | bezwzględne objętościowe stężenie CO w spalinach (z pomiaru)              |
| A <sub>CO</sub>        | współczynnik przeliczeniowy z poniższej tabeli:                           |

| Gaz                               | A - $\left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3 \cdot \text{ppm}} \right]$ |
|-----------------------------------|--|
| CO                                | 1.250  |
| NO                                | 1.340  |
| SO <sub>2</sub>                   | 2.860  |
| NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> | 2.056  |

**Tab. 7** Współczynniki do przeliczania stężeń w [ppm] na stężenia masowe w [mg/m<sup>3</sup>] (dla warunków normalnych 1013 hPa, 0°C)

**Uwaga:** Stężenie masowe tlenków azotu NO<sub>x</sub> obliczane jest przez analizator (zgodnie z normami) przy użyciu współczynnika dla dwutlenku azotu NO<sub>2</sub>.

### 7.5.2. Stężenia masowe odniesione do zawartości tlenu w spalinach

Obok stężeń masowych bezwzględnych, obliczane są stężenia masowe odniesione do (ważone względem) ilości tlenu w spalinach. Stężenie danego składnika w odniesieniu do zawartości tlenu wyraża się wzorem (przykładowo dla wartości CO):


$$\text{CO}_{\text{wzg}} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{20,95\% - \text{O}_{2\text{odn}}}{20,95\% - \text{O}_{2\text{mierz}}} \cdot \text{CO} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$$

|                     |   |
|---------------------|---|
| CO <sub>wzg</sub>   | zawartość CO w odniesieniu do tlenu, wyrażana w [mg/m <sup>3</sup> ]  |
| O <sub>2odn</sub>   | tlenu odniesienia, parametr umowny, wybierany przez wskazanie paliwa lub podawany niezależnie z klawiatury, wyrażony w [Vol. %] |
| O <sub>2mierz</sub> | zmierzona zawartość O <sub>2</sub> w spalinach, wyrażona w [Vol. %]   |
| 20.95 %             | zawartość tlenu w czystym powietrzu   |
| CO                  | zmierzona zawartość CO w spalinach wyrażoną w [mg/m <sup>3</sup> ] (bezwzględne stężenie masowe)                                |

Według identycznego wzoru obliczana jest wielkość stężenia odniesiona do zawartości tlenu dla dwutlenku siarki SO<sub>2</sub>, tlenków azotu NO<sub>x</sub> oraz innych gazów. Wielkości stężeń odniesione do zawartości tlenu zostały wprowadzone w celu uniezależnienia oceny stężeń od parametrów spalania. Wartość bezwzględną (tj. wyrażoną w [ppm]) można sztucznie zaniżyć, prowadząc proces spalania ze zwiększonym nadmiarem powietrza (duża zawartość O<sub>2</sub> w spalinach). Nie musi to jednak oznaczać zmniejszenia całkowitej emisji. Wzór, obliczający stężenie względem tlenu, uwzględnia zawartość tlenu w spalinach, uniezależniając w ten sposób wartość wynikową od współczynnika nadmiaru powietrza.

Parametr O<sub>2odn</sub> - tlen odniesienia jest wartością umowną. Normy zalecają różne wartości tego parametru dla różnych paliw. W urządzeniu **GA-21 plus** wartość tlenu odniesienia może być przyjęta samoczynnie przy wyborze paliwa (tzw. automatyczny wybór tlenu odniesienia) lub wprowadzona z klawiatury przez operatora (tzw. ręczny wybór tlenu odniesienia).

Stężenia masowe względne obliczone przy dwóch różnych pomiarach są porównywalne tylko wtedy, gdy dla obu przeliczeń przyjęto jednakowy tlen odniesienia i jednakowe warunki umowne.

 **Jeżeli zmierzona wartość tlenu jest niższa od wartości tlenu odniesienia wówczas stężenie względne obliczone wg wzoru byłoby mniejsze od stężenia absolutnego. Aby nie dopuścić do takiego sztucznego zaniżenia wartości, w przypadku gdy O<sub>2mierz</sub> < O<sub>2odn</sub>, w miejsce wartości stężeń względnych analizator podaje wartości stężeń bezwzględnych.**

## 7.6. Obliczenia parametrów spalania

Obok pomiaru parametrów dotyczących składu spalin, analizator prowadzi obliczenia niektórych parametrów spalania. Wzory wg których prowadzone są obliczenia

parametrów spalania są wzorami empirycznymi. Analizator **GA-21 plus** oblicza parametry spalania zgodnie z zasadami przewidywanymi przez normę DIN. Najważniejszym z tych parametrów jest ilość ciepła unoszonego przez spaliny do otoczenia - tzw. **strata kominowa  $S_L$** . Strata kominowa obliczana jest wg wzoru empirycznego zwanego wzorem Siegerta:

$$S_L = (T_{\text{gas}} - T_{\text{amb}}) \cdot \left( \frac{A1}{CO_2} + B \right)$$

|                  |  |
|------------------|--|
| $S_L$            | strata kominowa - procentowa ilość ciepła wydzielonego w procesie spalania jaka zostaje uniesiona ze spalinami |
| $T_{\text{gas}}$ | temperatura spalin   |
| $T_{\text{amb}}$ | temperatura powietrza wlotowego kotła (przez analizator przyjmowana jako temperatura otoczenia)                |
| $CO_2$           | obliczona (na podstawie zawartości tlenu i $CO_{2\text{max}}$ ) ilość $CO_2$ w spalinach, wyrażona w [vol %]   |
| $A1, B$          | współczynnik Siegerta charakterystyczny dla danego paliwa (patrz tabela paliw)                                 |

Na podstawie obliczonej straty kominowej analizator szacuje sprawność energetyczną procesu spalania (nie należy mylić ze sprawnością kotła)  $\eta$

$$\eta = 100\% - S_L$$

|        |                    |
|--------|--------------------|
| $\eta$ | sprawność spalania |
| $S_L$  | strata kominowa    |

Wzór powyższy zakłada, że jedyną wielkością powodującą zmniejszenie sprawności spalania jest strata kominowa. Pomija zatem straty niecałkowitego spalania, straty na promieniowanie itp. Uproszczenie takie wynika z niemożności zmierzenia wielkości innych strat za pomocą analizatora spalin. Ze względu na daleko idące uproszczenie w powyższym wzorze, należy pamiętać, że obliczonej w ten sposób sprawności nie można traktować jako wartości dokładnej. Tak wyliczona sprawność jest jednak bardzo wygodna jako parametr porównawczy podczas regulacji paleniska. Wzór, pomimo uproszczenia, wiernie oddaje tendencje zmian sprawności tzn. pozwala zaobserwować czy sprawność rośnie czy maleje. Jest to zupełnie wystarczająca informacja podczas regulacji.

Istnieje natomiast możliwość uwzględnienia obniżenia sprawności poprzez niepełne spalanie (niedopalenie). Stratę tę opisuje wielkość zwana stratą przez niedopalenie **IL**. Określa ona procentową stratę ciepła spowodowaną obecnością gazów palnych (konkretnie CO) w spalinach.

Strata przez niedopalenie obliczana jest w oparciu o zmierzoną zawartość CO w spalinach wg wzoru:

$$IL = \frac{\alpha \cdot CO[\%]}{CO[\%] + CO_2[\%]}$$

|                     |  |
|---------------------|--|
| CO, CO <sub>2</sub> | zawartość objętościowa odp. CO i CO <sub>2</sub> w spalinach |
| $\alpha$            | współczynnik charakterystyczny dla danego paliwa             |

Obliczenie  $S_{CO}$  pozwala na wprowadzenie korekty do obliczonej wcześniej sprawności spalania. Oblicza się zatem różnicę sprawności  $\eta$  i straty przez niedopalenie IL:  $\eta^*$ :

$$\eta^* = \eta - IL$$

Ostatnim parametrem spalania obliczanym przez **GA-21 plus** jest współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Współczynnik ten określa ile razy ilość powietrza dostarczana do kotła jest większa od minimalnej ilości potrzebnej do całkowitego spalania paliwa. Urządzenie oblicza współczynnik  $\lambda$  na podstawie znanej dla danego paliwa wartości  $CO_{2max}$  oraz zmierzonej zawartości  $CO_2$  w spalinach wg wzoru:

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_{2mierz}}$$

Wzór powyższy można przekształcić do postaci:

$$\lambda = \frac{20,95\%}{20,95\% - O_{2mierz}[\%]}$$

## 7.7 Parametry paliw

Podstawą do prawidłowego wyznaczenia wielkości opisujących proces spalania jest znajomość parametrów paliwa. Analizator **GA-21 plus** posiada na trwałe zapisane parametry zestawu paliw. Paliwa te określane są mianem paliw standardowych. Parametry opisujące paliwa standardowe przechowywane w pamięci analizatora przedstawiono w tabeli zamieszczonej na następnej stronie.

| Nr. | Paliwo          | CO <sub>2max</sub> | A1    | B     | $\alpha$ | O <sub>2ref</sub> | Wo                      | jedn.          |
|-----|-----------------|--------------------|-------|-------|----------|-------------------|-------------------------|----------------|
| 1.  | Olej OH/EL      | 15.4               | 0.500 | 0.007 | 52       | 3                 | 37.80 MJ/kg             | kg             |
| 2.  | Gaz ziemny H    | 11.7               | 0.370 | 0.009 | 32       | 3                 | 37.35 MJ/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| 3.  | Gaz miejski     | 13.1               | 0.350 | 0.011 | 32       | 3                 | 16.34 MJ/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| 4.  | Gaz koksowniczy | 10.2               | 0.290 | 0.011 | 32       | 3                 | -                       | m <sup>3</sup> |
| 5.  | Gaz płynny      | 14.0               | 0.420 | 0.008 | 32       | 3                 | -                       | m <sup>3</sup> |
| 6.  | Bio-Diesel      | 15.7               | 0.457 | 0.005 | 52       | 3                 | 37.40 MJ/kg             | kg             |
| 7.  | Olej OH/EL      | 15.3               | 0.590 | 0     | 52       | 3                 | 42.70 MJ/kg             | kg             |

|     |                        |      |       |   |    |    |                          |                |
|-----|------------------------|------|-------|---|----|----|--------------------------|----------------|
| 8.  | Olej HL                | 15.9 | 0.610 | 0 | 52 | 3  | 39.90 MJ/kg              | kg             |
| 9.  | Mazut                  | 18.0 | 0.650 | 0 | 52 | 3  | 38.80 MJ/kg              | kg             |
| 10. | Gaz z. H. z dmuchawą   | 12.1 | 0.460 | 0 | 32 | 3  | 37.35 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 11. | Gaz miejski z dmuchawą | 10.0 | 0.380 | 0 | 32 | 3  | 16.34 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 12. | Propan z dmuchawą      | 13.7 | 0.500 | 0 | 32 | 3  | 93.60 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 13. | Propan                 | 13.7 | 0.475 | 0 | 32 | 3  | 93.60 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 14. | Butan z dmuchawą       | 14.1 | 0.500 | 0 | 32 | 3  | 128.00 MJ/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| 15. | Butan                  | 14.1 | 0.475 | 0 | 32 | 3  | 128.00 MJ/m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| 16. | Biogaz z dmuchawą      | 11.7 | 0.780 | 0 | 32 | 3  | 24.00 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 17. | <a href="#">Biogaz</a> | 11.7 | 0.710 | 0 | 32 | 3  | 24.00 MJ/m <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup> |
| 18. | Węgiel kam. HU 31,5    | 18.8 | 0.683 | 0 | 69 | 11 | 31.50 MJ/kg              | kg             |
| 19. | Węgiel kam. HU 30,3    | 18.5 | 0.672 | 0 | 69 | 11 | 30.30 MJ/kg              | kg             |
| 20. | Węgiel brunatny HU 8,2 | 19.1 | 1.113 | 0 | 69 | 11 | 8.20 MJ/kg               | kg             |
| 21. | Węgiel brunatny HU 9,4 | 19.1 | 0.988 | 0 | 69 | 11 | 9.40 MJ/kg               | kg             |
| 22. | Węgiel drzewny         | 19,4 | 0,650 | 0 | 69 | 11 | 15,30 MJ/kg              | kg             |

**Tab. 8 Parametry paliw przechowywane w pamięci analizatora GA-21 plus**

W tabeli przedstawiono następujące parametry:

|                    |  |
|--------------------|--|
| CO <sub>2max</sub> | maksymalna zawartość dwutlenku węgla w spalinach, wielkość charakterystyczna dla danego paliwa. Jest to parametr określający jaka ilość dwutlenku węgla wystąpi w spalinach jeżeli proces spalania będzie prowadzony ze współczynnikiem nadmiaru powietrza równym 1.   |
| A1, B              | współczynniki występujące we wzorze empirycznym Siegerta. Dla węgla kamiennego w Polsce przyjmuje się na ogół A1 = 0,65.   |
| α                  | współczynnik służący do obliczania straty przez niedopalenie. Należy przyjmować:<br>= 69 dla paliw stałych<br>= 52 dla paliw ciekłych<br>= 32 dla paliw gazowych   |
| O <sub>2ref</sub>  | tlen odniesienia - parametr służący do obliczania względnej zawartości składników (wzór 4). Jest to wielkość umowna. Polskie normy na ogół zalecają wartość 5 lub 6 %. W tabeli zgodnie z normą DIN przyjęto: dla paliw stałych 11%, dla paliw gazowych i ciekłych 3 % |
| WO                 | wartość opałowa paliwa - ilość energii wydzielana przy całkowitym spalaniu jednego kilograma (lub 1 m <sup>3</sup> w przypadku gazów) paliwa.  |

## 7.8. Wpływ parametrów paliwa na dokładność wyników obliczeń

**GA-21 plus** nie mierząc zawartości dwutlenku węgla, oblicza ją ze zmierzonej zawartości tlenu i parametru CO<sub>2max</sub>. Na podstawie tak obliczonej zawartości CO<sub>2</sub> jest następnie obliczana strata kominowa, sprawność spalania i strata przez

niedopalenie. Widać zatem, że parametry paliwa, a w szczególności wartość  $CO_{2max}$ , mają zasadniczy wpływ na obliczenia parametrów cieplowniczych. Następujące wyniki obliczane przez **GA-21 plus** są uzależnione od parametrów paliwa:

|                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| zawartość CO <sub>2</sub>    | zależy od $CO_{2max}$             |
| strata kominowa $S_L$        | zależy od $CO_{2max}$ oraz A1 i B |
| sprawność $\eta$ i $\eta^*$  | zależy od $CO_{2max}$ oraz A1 i B |
| strata przez niedopalenie IL | zależy od $CO_{2max}$             |

Jak widać ze wzoru  $\cdot$  wartość współczynnika nadmiaru powietrza nie zależy od parametrów paliwa. Od parametrów paliwa nie zależą również wyniki pomiarów wielkości gazowych (za wyjątkiem wspomnianego CO<sub>2</sub>) i oczywiście wyniki pomiarów temperatury oraz wielkości elektrycznych.

Należy zwrócić uwagę, że w żadnym ze wzorów przeliczeniowych nie występuje wartość opałowa paliwa  $WO$ . Parametr ten nie ma wpływu na żaden z wyników pomiarowych prezentowanych przez **GA-21 plus**.