

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA i ENERGETYKI
INSTYTUT MASZYN i URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH**

Analiza gazów spalinowych

Laboratorium miernictwa

(M – 7)

Opracował: dr inż. Grzegorz Wiciak
Sprawdził: dr inż. Jan Około - Kułak
Zatwierdził: dr hab. inż. Janusz Kotowicz

1 Cel i zakres ćwiczenia

Celem analizy gazów spalinowych jest kontrola procesu spalania. Kontrola ta polega na wyznaczeniu udziałów objętościowych głównych składników spalania (CO_2 , CO , O_2 , N_2) paliwa gazowego. Ponadto celem ćwiczenia jest praktyczne wykonanie analizy i określenie jakości procesu spalania gazu na stanowisku laboratoryjnym.

Do pomiaru udziałów objętościowych głównych składników spalania (CO_2 , CO , O_2 , N_2) służą analizatory gazów spalinowych:

- ze względu na zasadę działania analizatory dzieli się na:
 - o chemiczne
 - o fizyczne
 - o fizyko – optyczne
- ze względu na sposób obsługi dzieli się na:
 - o obsługiwane ręcznie
 - o automatyczne o napędzie elektrycznym
- ze względu na dokładność wskazań, analizatory dzielimy na
 - o laboratoryjne
 - o przemysłowe

Przed przystąpieniem do analizy spalin gazu palnego i podaniem próbki spalin do analizatora należy ją odpowiednio przygotować. W tym celu spaliny poddaje się oczyszczeniu z zanieczyszczeń lotnych i wilgoci - oczyszczanie obejmuje następujące czynności: doprowadzenie spalin do temperatury otoczenia, usunięcia zanieczyszczeń (pyłów), usunięcie czynników agresywnych (groźnych dla analizatora i instalacji pomiarowej), usunięcie lub normalizacja stężenia pary wodnej, która może fałszować wskazania analizatora). Spaliny „przechodzą” do analizatora najczęściej poprzez tor gazowy

Wariant I: (→ Płuczka → Filtr ceramiczny → Filtr z watą szklaną → Absorber wilgoci → Pompa zasysająca → Zawór regulacyjny → Przepływomierz → Analizator). Spaliny ze spalanego gazu w pierwszej kolejności przepływają do płuczki, którą stanowi szklane naczynie z metalowym wieczkiem. W wieczku znajdują się otwory służące do doprowadzania i odprowadzania spalin. Szklane naczynie wypełnione jest cieczą aspiracyjną (to znaczy taką, która nie pochłania gazów zawartych w próbce, w szczególności tych składników, które są przedmiotem analizy). W przypadku spalin celowe jest stosowanie stężonego roztworu soli kuchennej o kwaśnym odczynie uzyskanym przez dodanie niewielkiej ilości kwasu solnego. W płuczce następuje wstępne usunięcie zanieczyszczeń i schłodzenie spalin.

Następnie spaliny doprowadzane są do układu filtracyjnego. Układ ten składa się z filtru ceramicznego i filtru z watą szklaną, układ ten charakteryzują dobre własności filtracyjne. Filtry cechuje wysoka sprawność przepływów i dobra przepuszczalność. Filtry posiadają wysoka pojemność do zatrzymywania zanieczyszczeń. Ponadto charakteryzują się dobrą odpornością chemiczną na większość roztworów organicznych i nieorganicznych, są one fizycznie i biologicznie obojętne. Pierwszy filtr – ceramiczny jest selektorem wstępnym, który wytrąca z zassanej próbki spalin ziarna o większych średnicach. Drugi filtr – z watą szklaną jest filtrem z materiałem filtrującym, który zatrzymuje pozostałą część zanieczyszczeń. Włókno szklane charakteryzuje się higroskopijnością i zatrzymuje pył o bardzo małych cząstkach.

Odfiltrowane spaliny przepływają do absorbera, w którym osusza się próbkę. W absorberze wilgoć zawartą w spalinach pochłaniają odpowiednia sól i specjalne kuleczki.

Absorber połączony jest z pompą, która zasysa spaliny przez instalację. Zasysająca pompa spalin jest bardzo „wrażliwa” na spaliny, dlatego musi znajdować się dopiero za układem filtrów. Za pompą spalin na przewodzie tłocznym zamontowany jest zawór regulacyjny, którym można regulować strumień spalin doprowadzany do analizatora poprzez przepływomierz.

Wariant II. (→ Przewód ogrzewany → regulator temperatury → Absorber wilgoci → Pompa zasysająca → Zawór regulacyjny → Przepływomierz → Analizator). Drugi wariant drogi gazowej zmniejsza emisję zanieczyszczeń. Jest to tor gazowy z zastosowaniem przewodu ogrzewanego, za którym znajduje się regulator temperatury typu RE8. Regulator ten może być stosowany jako dwustanowy, trójstanowy lub jako synchronizator. Przewód ogrzewany zastępuje płuczkę i filtry. Samodzielnie schładza spaliny do temperatury otoczenia i filtruje zanieczyszczenia.

2 Paliwa

Paliwami nazywa się związki chemiczne węgla elementarnego C, wodoru H₂ i siarki S, które w dużej ilości występują w przyrodzie.

Paliwa i powietrze doprowadzone do komory paleniskowej nazywamy substratami. Za jednostkę paliwa w przypadku spalania paliw gazowych przyjmuje się 1 kmol gazu suchego. Na określenie składników paliwa gazowego przyjmuje się jednostkę kmol/jednostkę paliwa i oznacza się symbolem „n” z odpowiednimi wskaźnikami n_{N_2} kmol/kmol suchego paliwa gazowego. Wielkości dotyczące substratów oznacza się znakiem prim (n' _a, n' _c, n' _o). Skład paliwa gazowego określa się za pomocą udziałów molowych składników w odniesieniu do gazu pozbawionego wilgoci. Udziały te oznacza się symbolami chemicznymi.



2.1 Rodzaj paliwa

Skład paliwa gazowego określony za pomocą udziałów wynosi :

.....

Sposób pobrania próbki spalin do analizy:

.....

2.2 Parametry paliwa

Wartość opałowa paliwa gazowego obliczona na podstawie składu chemicznego paliwa:

$$W_d = 12450 CO + 10650 H_2 + 35700 CH_4 + 62680 C_2H_6 + 59790 C_2H_4 + 55620 C_2H_2 + 77060 C_m H_n = \dots \frac{kJ}{m_n^3}$$

Ciepło spalania paliwa gazowego obliczona na podstawie składu chemicznego paliwa:

$$W_g = 12450 CO + 12630 H_2 + 39540 CH_4 + 68590 C_2H_6 + 63630 C_2H_4 + 57600 C_2H_2 + 81690 C_m H_n = \dots \frac{kJ}{m_n^3}$$

gdzie : C_mH_n udział węglowodorów wyznaczony za pomocą 27% dymiącego kwasu siarkowego.

2.3 Spalanie niezupełne i niecałkowite – wykresy kontrolne spalania.

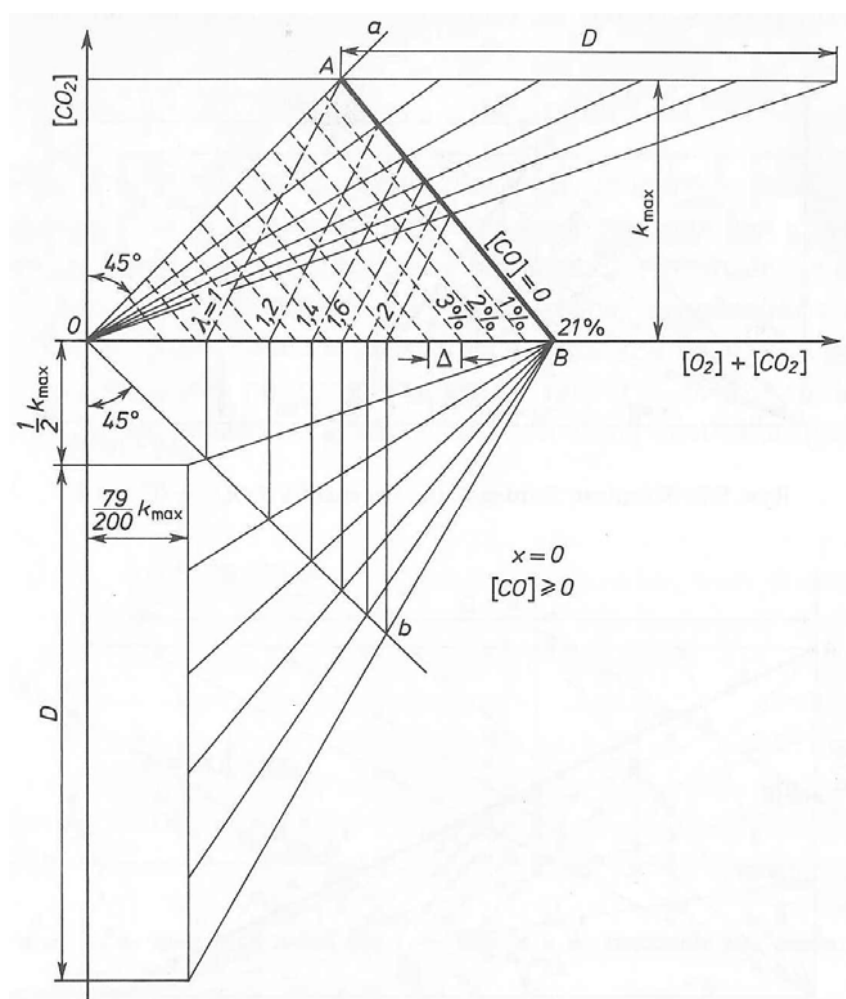
W praktyce trudno precyzyjnie określić nadmiar powietrza ponadto spalanie nie zachodzi w sposób całkowity i zupełny z powodu lokalnego braku tlenu (czyli niedokładnego wymieszania paliwa lub jego części lotnych z powietrzem) lub zbyt niskiej temperatury w gazowych produktach spalania znaleźć się mogą składniki palne takie jak CO, CH₄, H₂. Ponadto część nieopalonego węgla z paliwa może opuścić palenisko w żużlu lub w lotnym koksiku; sadza wylatująca z silnika spalinowego składa się przeważnie z węgla.

Najbardziej efektywnego spalania pod względem korzyści energetycznych można spodziewać się wówczas gdy spalanie jest całkowite i zupełne bez nadmiaru powietrza tj. przy $\lambda=1$. Węgiel zawarty w paliwie musiałby spalić się bez reszty, wówczas współczynnik niecałkowitego spalania $x = 0$. Wtedy suche produkty spalania składałyby się jedynie z CO₂ i N₂ a udział objętościowy CO₂ w spalinach byłby największy $[CO_2] = k_{max}$. Do kontroli procesu spalania można stosować wykresy kontrolne spalania, gdzie podstawą do ich konstrukcji jest bilans materii elementów chemicznych substratów i produktów spalania

W szczególności nie należy stosować wykresów kontrolnych spalania do wyznaczania stosunku niecałkowitego spalania x . Można natomiast wyznaczyć stosunek λ i kontrolować analizy spalin

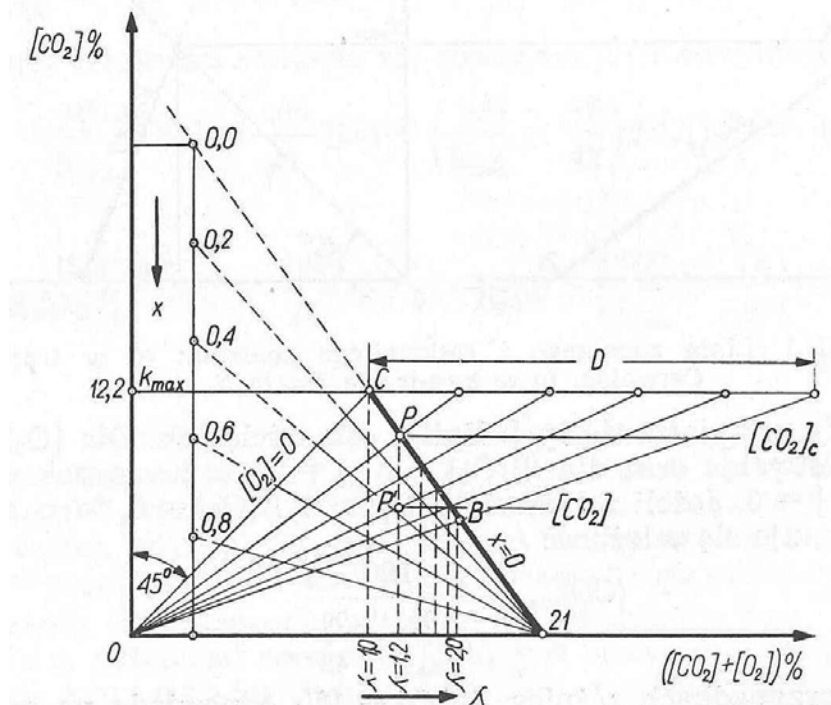
Dla przyjętego powyżej paliwa skonstruować kwadrat Butnego dla następujących przypadków:

1. Spalanie węgla bez reszty $x = 0$. W spalinach jest CO $[CO] \neq 0$.



Rys. 1. Kwadrat Butnego przypadek $[CO] \geq 0, x = 0$ [1]

2. Niecałkowite spalanie węgla $x \neq 0$. W spalinach spalony CO $[CO] = 0$.



Rys. 1. Kwadrat Butnego przypadek $[CO] = 0, x \geq 0$ [2]

Przy konstrukcji wykresów wykorzystuje się następujące zależności:

$$n'_C = CO + CH_4 + mC_mH_n + CO_2 \quad \frac{\text{kmol}}{\text{kmol suchego paliwa gazowego}}$$

$$n'_{O_2} = \frac{1}{2}CO + CO_2 + O_2 \quad ,,$$

$$n'_{N_2} = N_2 \quad ,,$$

$$n_{O_{\min}} = n'_C + \frac{1}{2}n'_{H_2} - n'_{O_2} \quad ,,$$

$$k_{\max} = \left(\frac{n''_{CO_2}}{n''_{ss}} \right)_{\lambda=1} = \frac{n'_C}{n'_C + n'_{N_2} + \frac{79}{21}n_{0\min}} = \frac{100}{1 + \frac{79}{21}\sigma + \nu}$$

$$\text{gdzie: } \sigma = \frac{n_{0\min}}{n'_C} \text{ i } \nu = \frac{n'_{N_2}}{n'_C}$$

$$D = \frac{n_{0\min}}{n'_C} k_{\max} = \sigma k_{\max}$$

$$\Delta = \frac{21}{k_{\max} (\%)} - \frac{79}{200} = \dots\dots\dots \%$$

3 Spaliny

Substancje wyprowadzone z komory paleniskowej po spalaniu nazywamy produktami spalania lub spalinami. Wielkości dotyczące produktów spalania oznacza się w następujący sposób n''_{ss} , n''_s . Spalanie nazywa się zupełnym jeżeli w produktach spalania nie ma gazowych części palnych np. CO, H₂, CH₄. Spalanie nazywa się całkowitym jeżeli w produktach spalania nie ma stałych części palnych $x = 0$.

Spalanie izobaryczne paliwa powoduje zmianę objętości pomiędzy objętością substratów ($1 + n'_a$) a objętością wilgotnych produktów spalania n''_s (łącznie z suchą parą wodną), która nazywa się koncentracją chemiczną.

$$\Delta V_{ch} = 1 + n'_a - n''_s = n' - n'' \quad \text{wiedząc, że } \lambda = \frac{n'_a}{n_{0\min}}$$

Jeżeli para wodna zawarta w spalinach skropli się to zajdzie dodatkowe zmniejszenie objętości tak zwana kontrakcja fizyczna. Reszta produktów spalania nosi nazwę spalin suchych $n'_{ss} = n'_s - n'_{H_2O}$

3.1 Analiza spalin.

Tabela pomiarowa

Składniki badanych spalin wyliczone w % udziałach objętościowych

Liczba pomiaru	Kwadrat Butnego		Wskazania analizatora spalin			[N ₂] %
	[CO] %	λ	[CO ₂] %	[O ₂] %	[CO] %	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

Temperatura otoczenia:.....

Temperatura spali wylotowych.....

Ciśnienie otoczenia.....

Na podstawie wyników otrzymanych wyników pomiarów obliczyć wielkości ujęte w tabeli obliczeniowej

Liczba pomiaru	λ	$n_{a\min}$	n'_a	n''_{ss}	n''_{H_2O}	n''_s	Udziały objętościowe składników spalin wilgotnych				
							% (CO ₂)	% (O ₂)	% (CO)	% (N ₂)	% (H ₂ O)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											

Współczynnik nadmiaru powietrza:

$$\lambda_{obliczeniowe} = \frac{[N_2]}{[N_2] - \frac{79}{21} \left([O_2] - \frac{1}{2} [CO] \right)}$$

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza suchego do spalania:

$$n_{a\min} = \frac{1}{0,21} \left(\frac{1}{2} (H_2 + CO) + 2CH_4 + 3,5C_2H_5 + 3C_2H_4 + 2,5C_2H_2 - O_2 \right) = \dots \frac{kmol}{jedn.pal.}$$

Rzeczywista ilość powietrza zużyta do spalania:

$$n'_a = \lambda n_{a \min}$$

Ilość spali suchych w przypadku spalania całkowitego i zupełnego:

$$n''_{ss} = n_{CO_2} + n_{N_2} + \frac{n_{0 \min}}{0,21} (\lambda - 0,21) = \dots \frac{kmol}{jedn.pal}$$

$$n''_{CO_2} = n'_C = \frac{1}{100} (CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4) = \dots \frac{kmol}{jedn.pal}$$

Jeżeli wyniki analizy mamy podane w % objętościowych to ilość spalin suchych możemy obliczyć ze wzorów:

Spalenie zupełne:
$$n''_{ss} = \frac{n''_{CO_2}}{[CO_2]} \times 100 = \frac{n'_C}{[CO_2]} \times 100 = \dots \frac{kmol}{jedn.pal}$$

Spalenie niezupełne
$$n''_{ss} = \frac{n''_{CO_2}}{[CO_2] + [CO]} \times 100 = \frac{n'_C}{[CO_2] + [CO]} \times 100 = \dots \frac{kmol}{jed.pal}$$

Ilość pary wodnej w spalinach wilgotnych:

$$n''_{H_2O} = \frac{1}{100} (H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4) = \dots \frac{kmol}{jedn.pal}$$

Ilość spalin wilgotnych:

$$n''_s = n''_{ss} + n''_{H_2O} = \dots \frac{kmol}{jedn.pal}$$

Do wzorów wprowadzono $\frac{1}{100}$ ponieważ w tabeli obliczeniowej udziały objętościowe wyznaczone są w %. W analizie gazów spalinowych i przy obliczaniu straty kominowej za jednostkę paliwa gazowego przyjmuje się niejednokrotnie $1 m_n^3$ i oznacza się symbolem V z odpowiednim wskaźnikiem. Stąd:

$$V_s'' = V_{ss}'' + V_{H_2O}'' = \dots \frac{m_n^3}{m^3 \text{ gazu suchego}}$$

Udziały w % obj.

$$(CO_2)\% = [CO_2]\% \frac{V_{ss}''}{V_s''}$$

$$(O_2)\% = [O_2]\% \frac{V_{ss}''}{V_s''}$$

$$(CO)\% = [CO]\% \frac{V_{ss}''}{V_s''}$$

$$(N_2)\% = [N_2]\% \frac{V_{ss}''}{V_s''}$$

$$(H_2O)\% = \frac{V_{H_2O}''}{V_s''}$$

4 Strata wylotowa

4.1 Strata wylotowa fizyczna.

Strata wylotowa fizyczna – nazywana także stratą wyraźną wynika stąd, że temperatura spalin wylotowych jest wyższa od temperatury otoczenia. Stratę stanowi więc ta ilość ciepła, jaką oddają spaliny izobaryczne ochłodzone do temperatury otoczenia.

Na podstawie wartości otrzymanych z pomiarów można obliczyć stratę wyraźną:

$$S_w = \frac{V_s'' c_{P_{\text{średnie}}} (t_{sw} - t_0)}{W_d} 100\% = \dots\dots\dots$$

gdzie średnie ciepło właściwe w zakresie temperatur od 0°C do 273,15 °C gazów zawartych w spalinach: $c_{P_{\text{średni}}} = [(N_2) + (O_2)]c_{P_{2at}} + (CO_2)c_{PCO_2} + (H_2O)c_{PH_2O} = \dots\dots\dots = \frac{kJ}{kmol K}$

4.2 Strata wylotowa utajona.

Strata wylotowa utajona wynika z zawartości gazów palnych spalinach. Stratę tę określa ilość ciepła, jaka wydzieliliby się wówczas kiedy produkty wtórnego spalania zostałyby ochłodzone do temperatury otoczenia.

Na podstawie wartości otrzymanych pomiarów można obliczyć stratę wylotową utajoną:

$$S_{CO} = \frac{V_{CO}'' W_{dCO}}{W_{dpaliwa}} 100\% = \dots\dots\dots$$

gdzie: $V_{CO}'' = \frac{V_{CO_2}'' [CO]}{[CO_2] + [CO]}$

LITERATURA

- [1] Szargut J., Termodynamika techniczna. PWN W-wa 1991
- [2] Ochęduszko S., Termodynamika stosowana. WNT W-wa 1964
- [3] pod redakcją: Graczyk Cz., Dydaktyczne materiały powielane do ćwiczeń laboratoryjnych z metrologii wielkości energetycznych. Wyd. 3 Gliwice 1977