

# SPALANIE W NAPĘDACH LOTNICZYCH

## LABORATORIUM

### Ćwiczenie 6 - Emisja zanieczyszczeń z procesów spalania paliw

#### Wprowadzenie

Praktycznie wszystkie zanieczyszczenia emitowane przez silnik turboodrzutowy są produktami procesu spalania, powstającymi w komorze spalania. Do najważniejszych zanieczyszczeń emitowanych przez silniki zaliczamy:

- Niedopalone węglowodory –  $C_nH_m$ ,
- Tlenek węgla – CO,
- Tlenki azotu –  $NO_x$ ,
- Tlenki siarki –  $SO_x$ ,
- Oraz cząstki dymu – np. sadza

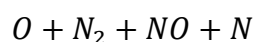
Wszystkie one są szkodliwa i toksyczne dla środowiska. Proces spalania w komorze determinuje skład oraz ilość zanieczyszczeń. Spośród wymienionych zanieczyszczeń największy wpływ na toksyczność spalin ma CO, HC,  $NO_x$ , oraz zadymienie. Siarka została wyeliminowana prawie całkowicie ze składu paliwa.

#### Powstawanie toksycznych zanieczyszczeń

##### Tlenki azotu:

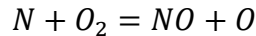
W silnikach turboodrzutowych spośród tlenków azotu największe znaczenie ma NO pozostałe ( $N_2O$  i  $NO_2$ ) występują w znacznie mniejszych ilościach. Głównym mechanizmem powstawania  $NO_x$  jest tzw. mechanizm termiczny, który może być wspomagany tworzeniem się tzw. „szybkich” tlenków azotu w strefie płomienia z udziałem węglowodorów.

Opracowany przez Zeldowicza termiczny mechanizm powstawania NO opiera się na utlenianiu molekularnego azotu przez występujący w płomieniu atomowy tlen. Reakcja ta zachodzi powyżej  $1500^\circ C$  atomy tlenu reagują z cząsteczkami azotu:

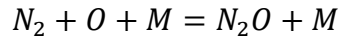
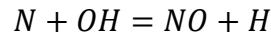


Uwolniony w ten sposób azot atomowy reaguje z  $O_2$ , prowadząc do odtworzenia atomów tlenu oraz zwiększając produkcję azotu.

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”



Pozostałe reakcje powstawania NO<sub>x</sub>:



### Tlenek węgla i węglowodory:

Obecność tych gazów w spalinach świadczy generalnie o niezupełnym spalaniu w komorze spalania silnika turbodoładowanego. Ponieważ korelacja pomiędzy tymi związkami jest pozytywna, to działania powodujące zmniejszenie CO powodują jednocześnie zmianę emisji C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>. Należą do nich:

- Przeorganizowanie aerodynamiki komory spalania, w stronę osiągnięcia  $\lambda=1,2$  w strefie pierwotnej komory,
- Zwiększenie objętości strefy pierwotnej lub wydłużenie czasu przebywania cząstek paliwa w strefie,
- Zmniejszenie ilości powietrza wykorzystywanego do schłodzenia ścianek rury żarowej komory spalania,
- Poprawa jakości rozpylania paliwa, czyli rozbitcie na mniejsze krople oraz uzyskanie bardziej równomiernego ich rozkładu.

W przeciwieństwie do tlenków azotu emisja CO i C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> maleje wraz ze wzrostem ciśnienia.

### Dymy – sadza

Parametrem, który ma decydujące znaczenie na emisję dymu są: temperatura powietrza na wylocie z komory spalania, ciśnienie oraz charakterystyka rozpylacza paliwa. Nie można jednoznacznie określić wpływu temperatury powietrza, ponieważ z jednej strony wzrost temperatury przyspiesza formowanie się cząstek sadzy a z drugiej przyczynia się do lepszego jej wypalania. Zmniejszenie zadymienia można osiągnąć poprzez eliminację obszarów „przebogaconych” w paliw. Generalnie redukcji dymu zawsze sprzyja dostarczenie możliwie największych ilości powietrza do strefy pierwotnej spalania, szczególnie gdy łączy się to ze zwiększeniem intensywności zawirowania przepływu. Jednak należy brać pod uwagę, że nadmierna ilość wprowadzonego powietrza do komory spalania powoduje wzrost emisji CO i C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>. Niemniej jednak zastosowanie dodatkowego zawirowywacza powietrza, umożliwiającego dostarczenie intensywne zawirowanego powietrza bezpośrednio do strefy spalania pierwotnego może przyczynić się do redukcji emisji dymu.

Stosowanie wtryskiwaczy ze wstępnym odparowaniem paliwa oraz wspomaganym powietrzem sprzyja także ograniczeniu emisji sadzy.

Pomiar zadymienia i emisji gazowych składników toksycznych w spalinach jest podstawą do analizy jakości procesu spalania w silnikach lotniczych co stanowi ważną bazę do procedury optymalizacyjnej konstrukcji całej komory spalania.

„ZPR PWR – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

## Spalanie kropeł paliwa

Spalanie paliw ciekłych w większości zastosowań polega na ich rozpyleniu i spalaniu zbioru kropeł, stąd ważny jest mechanizm spalania pojedynczej kropli.

W procesie spalania paliw ciekłych należy wyróżnić dwie fazy: odparowania, a następnie spalania par. Dlatego na szybkość spalania paliw ciekłych dominujący wpływ mają następujące czynniki:

- parowanie cieczy,
- mieszanie par z utleniaczem,
- kinetyka chemiczna reagowania paliwa z tlenem.

Spalanie kropeł ciężkiego oleju jest bardziej złożone niż oleju lekkiego, ponieważ rozmiary kropeł są większe, nagrzewanie jest bardziej nierównomierne, a ponadto następuje termiczny rozkład paliwa. Najpierw z wierzchnich warstw kropli parują lekkie frakcje oleju, które spalają się płomieniu wokół kropli. Następnie ulegają krakingowi ciężkie frakcje oleju, a produkty pirolizy zasilają płomień. Pozostałość koksowa, która zawiera przede wszystkim węgiel, wymaga znacznie większego czasu do spalania niż spalanie par, dlatego determinuje długość płomienia. Umownie spalanie kropeł ciężkiego oleju można podzielić na cztery etapy:

- I. czas indukcji zapłonu – zakończony zapłonem lekkich frakcji,
- II. spalanie – parowanie, kraking ciężkich frakcji oleju, formowanie się powłoki koksowej,
- III. mikroeksplozja – rozerwanie powłoki koksowej,
- IV. dopalanie cząstek koksu olejowego.

## Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem spalania paliw ciekłych, obserwacja działania palnika olejowego oraz pomiar temperatur i emisji zanieczyszczeń (tlenku węgla, tlenków azotu i sadzy) podczas spalania paliw ciekłych.

## Przebieg ćwiczenia

W trakcie trwania ćwiczenia zapoznaje się z budową i działaniem palnika olejowego oraz obserwuje się wytwarzany przezeń płomień.

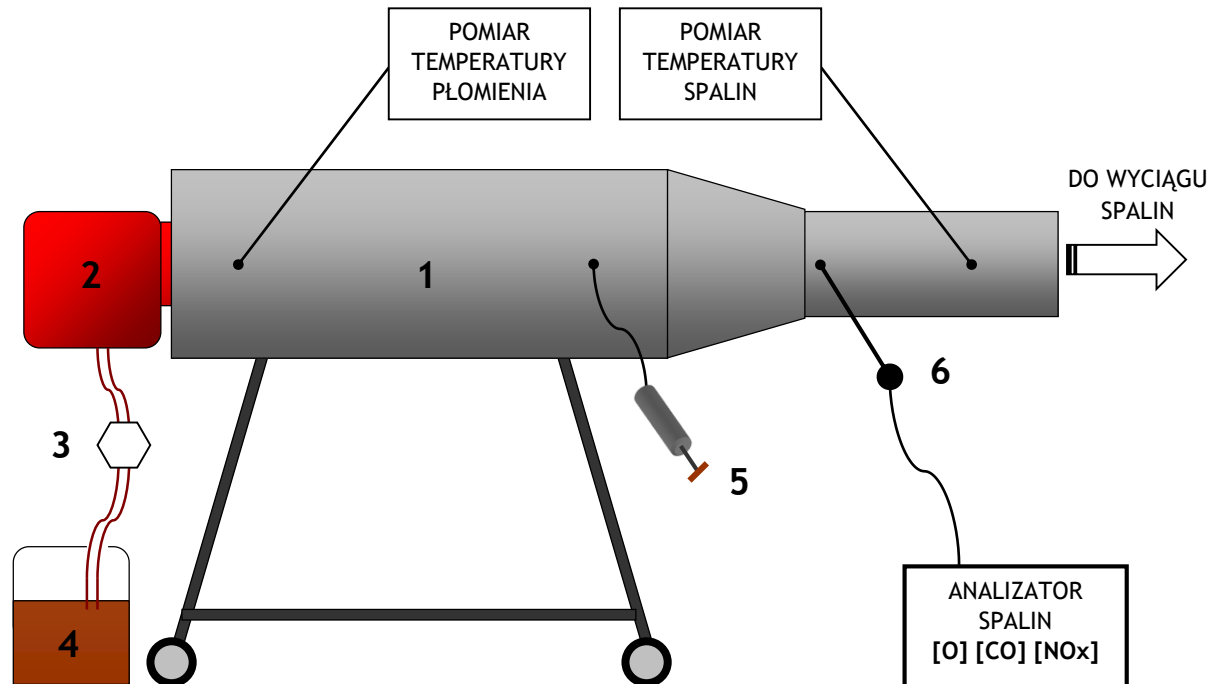
Następnie wykonuje się badania płomienia olejowego stopniowo zmieniając ilość powietrza dostarczanego do spalania (a co za tym idzie wartość współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ ).

Przy użyciu analizatora bada się skład spalin pod kątem zawartości tlenu i zanieczyszczeń (CO, NO<sub>x</sub>). Jednocześnie mierzy się zawartość sadzy metodą Bacharacha (pomiar na podstawie zaczernienia filtra papierowego). Wykonuje się też pomiar temperatury płomienia i spalin z wykorzystaniem termopar.

Określenie zawartości niedopalonych węglowodorów (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>). Jednocześnie mierzy się zawartość sadzy (odpowiedzialnej za dym w spalinach) metodą Bacharacha. Pomiar wykonywany jest na podstawie zaczernienia filtra papierowego, na którym zatrzymuje

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”  
się sadza podczas zaciągania próbki spalin z komory spalania. Zawartość sadzy określa się na podstawie porównania koloru otrzymanego na filtrze z dziesięciostopniową (0-9) skalą porównawczą.

## Schemat stanowiska pomiarowego



- |                    |  |
|--------------------|--|
| 1. Komora spalania | 4. Zbiornik oleju                        |
| 2. Palnik olejowy  | 5. Pomiar ilości sadzy metodą Bacharacha |
| 3. Filtr oleju     | 6. Sonda analizatora spalin              |

## Opracowanie wyników

### 5.1. Wyznaczenie współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda$

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2}$$

gdzie:  $\lambda$  – współczynnik nadmiaru powietrza, -  
21 – zawartość tlenu w powietrzu, %  
 $O_2$  – zawartość tlenu w spalinach, %

**Przeliczenie udziału zanieczyszczeń na odniesiony do stałej zawartości tlenu 3%:**

„ZPR PWR – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

$$CO^{3\%} = CO^{zm} \cdot \frac{21-3}{21-O_2}$$

$$NO_x^{3\%} = NO_x^{zm} \cdot \frac{21-3}{21-O_2}$$

gdzie: **CO<sup>3%</sup>**– przeliczona zawartość CO w spalinach, ppm  
**NO<sub>x</sub><sup>3%</sup>**– przeliczona zawartość NO<sub>x</sub> w spalinach, ppm  
CO – zmierzona zawartość CO w spalinach, ppm  
NO<sub>x</sub> – zmierzona zawartość NO<sub>x</sub> w spalinach, ppm  
21 – zawartość tlenu w powietrzu, %  
3– referencyjna zawartość tlenu w spalinach, %  
O<sub>2</sub> – zawartość tlenu w spalinach, %

### Wykonanie wykresów

W sprawozdaniu należy wykonać wykresy zależności: emisji zanieczyszczeń przeliczonych na 3% udział tlenu w spalinach (**CO<sup>3%</sup>** oraz **NO<sub>x</sub><sup>3%</sup>**), zawartości sadzy (**S**), oraz temperatury płomienia i spalin (**t<sub>p</sub>** i **t<sub>s</sub>**), od współczynnika nadmiaru powietrza (**λ**).

### Zestawienie mierzonych wartości

numer pomiaru	temperatura		skład spalin			zawartość sadzy S
	płomienia t <sub>p</sub>	spalin t <sub>s</sub>	O <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	
-	°C		%	ppm	ppm	°B
1						
2						
...						

### Literatura

- 1 . „Komory spalania silników turbinowych – organizacja procesu spalania”, M. Gieras, Warszawa 2010