

SPALANIE W NAPĘDACH LOTNICZYCH

LABORATORIUM

Ćwiczenie 2 - Stechiometria spalania

Wprowadzenie

Celem wprowadzenia do tematu konieczne jest wprowadzenie kilku pojęć opisujących zagadnienia poruszane w tym ćwiczeniu, jak i podczas kolejnych laboratoriów:

Mieszanina palna – mieszanina paliwa i utleniacza w której płomień rozprzestrzenia się nieograniczenie także po zaprzestaniu działania źródła zapłonu.

Zapłon – zapoczątkowanie procesu spalania w mieszaninie palnej. Można wyróżnić dwa rodzaje zapłonu:

- **zapłon wymuszony** – spowodowany przez lokalnie wprowadzone źródło zapłonu, np. iskra elektryczna, płomień pilotujący itp.;
- **samozapłon** – spowodowany równomiernym podgrzewaniem całej masy mieszaniny palnej aż do przekroczenia temperatury samozapłonu.

Spalanie – egzotermiczna reakcja chemiczna przebiegająca między paliwem a utleniaczem. Występować może w różnych postaciach i nie wszystkie z nich charakteryzuje się wytępowaniem płomienia oraz świeceniem. Wyróżnić można następujące systemy spalania:

- spalanie przedpłomieniowe – proces o długim przebiegu w czasie (1-100 s), a reakcja przebiega w zakresie temperatur 600-800 K (produkty spalania cechuje wysoka koncentracja częściowo utlenionych związków); powoduje to wydzielenie się tylko częściowej energii zawartej w paliwie,
- deflagacja – proces o szybkim przebiegu, podczas którego w czasie 1 ms następuje wydzielenie około 80% całkowitej energii paliwa; charakteryzuje się świeceniem i występowaniem frontu płomienia oddzielającego produkty spalania od świeżej mieszanki paliwowo-powietrznej; wszystkie procesy spalania występujące w komorach spalania silników turbinowo-odrzutowych odnoszą się do tego systemu,
- detonacja – proces o bardzo szybkim przebiegu – fala detonacyjna ze strefą reakcji chemicznej rozprzestrzenia się z prędkością naddźwiękową 1-4 km/s; w zwykle stosowanych mieszaninach paliwowo-powietrznych w komorach spalania silników turbinowo-odrzutowych procesy detonacji nie występują, jednak w warunkach dodawania tlenu dla usprawnienia zapłonu rozruchu silnika fale detonacyjne mogą się pojawić.

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania (L_0) – oznacza ilość powietrza przypadającego na jednostkę paliwa w stechiometrycznej mieszance palnej wyrażane w $\text{kg}_{\text{pow}}/\text{kg}_{\text{pal}}$ lub $\text{m}^3_{\text{pow}}/\text{kg}_{\text{pal}}$. Rzeczywiste zapotrzebowanie powietrza do spalania zależne jest od współczynnika nadmiaru powietrza.

Stechiometria spalania i współczynnik nadmiaru powietrza – do całkowitego i zupełnego spalania paliwa węglowodorowego, czyli do postaci niepalnych produktów CO_2 i pary wodnej H_2O potrzebna jest odpowiednia ilość powietrza. W spalaniu bierze udział tylko tlen, którego w powietrzu, według udziału masowego jest około 23% (wg udziału objętościowego 21%). Zapotrzebowanie tlenu do pełnego spalania paliwa może być obliczone z równania reakcji chemicznej. W sytuacji, kiedy ilość powietrza podawanego do procesu spalania dobrana jest dokładnie według wartości wynikających ze stechiometrii, wtedy mówi się o spalaniu w warunkach stechiometrycznych, a współczynnik nadmiaru powietrza jest równy jedności ($\lambda=1$). Jeżeli do spalania używane jest więcej powietrza aniżeli wynika to ze stechiometrii, wtedy $\lambda>1$ (mieszanka uboga), a gdy występuje niedomiar utleniacza, wtedy $\lambda<1$ (mieszanka bogata). Współczynnik nadmiaru powietrza obliczyć można ze wzoru:

$$\lambda = \frac{V_{\text{pow}}}{V_{\text{gazu}} * L_0}$$

gdzie:

V_{pow} – objętość powietrza podawanego do spalania, m^3 ,

V_{gazu} – objętość gazu do spalania, m^3 ,

L_0 - stechiometryczne (teoretyczne) zapotrzebowanie powietrza, m^3/m^3 .

W komorach spalania silników turbinowo-odrzutowych towarzyszący procesowi spalania płomień jest stabilizowany w określonym obszarze i zasilany w sposób ciągły w paliwo i powietrze. Dla takich warunków działania, w zależności od tego, czy proces mieszania obu składników następuje przed początkiem procesu spalania, czy też bezpośrednio podczas spalania na drodze dyfuzji, płomień dzieli się na kinetyczne i dyfuzyjne.

Płomień – strefa, w której zachodzi proces spalania. Ze względu na sposób przygotowania mieszaniny palnej można wyróżnić dwa rodzaje płomienia:

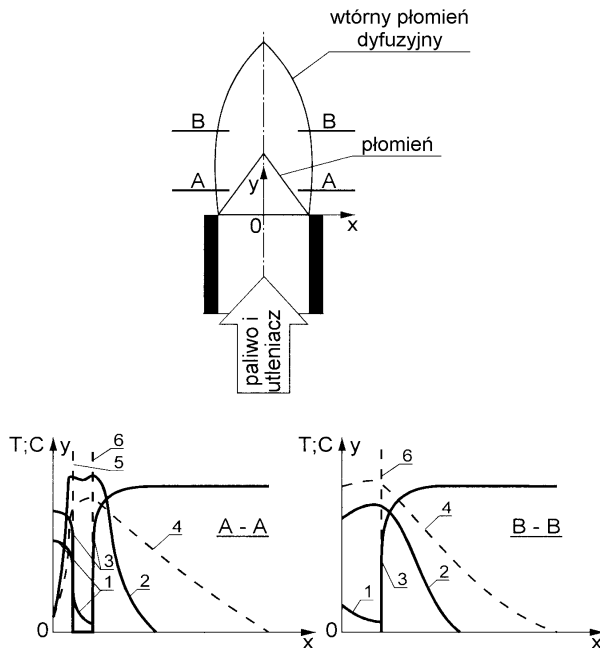
- **płomień kinetyczny**, w którym paliwo i utleniacz zostały wymieszane przed osiągnięciem strefy spalania, a szybkość spalania zależy od kinetyki reakcji chemicznej;
- **płomień dyfuzyjny**, w którym paliwo i utleniacz mieszają się dyfuzyjnie w warstwie granicznej pomiędzy nimi a szybkość spalania ograniczana jest szybkością dyfuzji.

Struktura płomienia kinetycznego

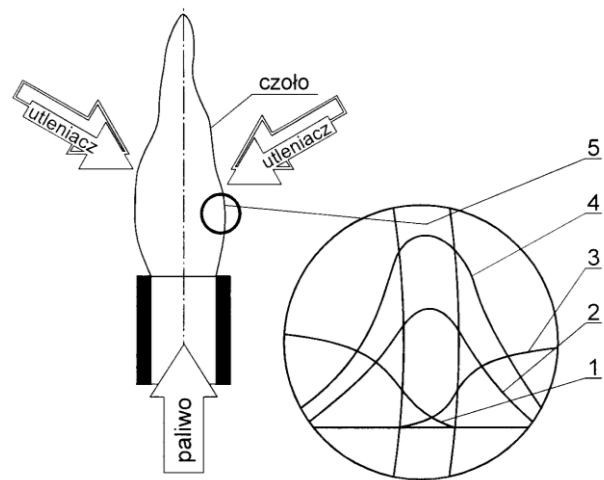
W płomieniu kinetycznym wstępna strefa podgrzewania i inicjacji utleniania paliwa sytuuje się przed czołem płomienia. Dalej położona jest główna strefa reakcji – czoło płomienia, a za nią strefa popłomienna. Za koniec strefy podgrzewania i inicjacji reakcji przyjmuje się ten punkt, w którym przebiega samoistnie proces utleniania paliwa, bez dostarczania ciepła z głównej strefy reakcji, co w przybliżeniu odpowiada punktowi

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

przebiegu na krzywej rozkładu temperatury. W głównej strefie reakcji, w czole płomienia, zachodzą intensywne reakcje utleniania paliwa, o czym świadczą duże gradienty temperatury i stężenia. W głównej strefie reakcji powstają produkty pośrednie i końcowe utleniania paliwa, w tym rodniki dyfundujące do strefy podgrzewania i inicjacji reakcji, początkujące reakcje utleniania paliwa. W płomieniu kinetycznym, przy niedomiarze utleniacza, wytwarza się drugi zewnętrzny stożek typu dyfuzyjnego. Dopalają się w nim produkty częściowego utleniania paliwa, jak np. tlenek węgla.



Rys. 1. Rozkłady stężenia i temperatury w płomieniu kinetycznym: 1 – paliwo, 2 – spaliny, 3 – utleniacz, 4 – temperatura, 5 – płomień kinetyczny, 6 – wtórny płomień dyfuzyjny



Rys. 2. Rozkłady stężenia i temperatury w płomieniu kinetycznym: 1 – paliwo, 2 – spaliny, 3 – utleniacz, 4 – temperatura, 5 – płomień

Struktura płomienia dyfuzyjnego

Płomień dyfuzyjny powstają w warstwie granicznej między strumieniami gazu palnego i gazowego utleniacza lub pomiędzy strumieniem gazu palnego a otaczającym go nieruchomym utleniaczem. Obszar intensywnej reakcji chemicznej, widoczny jako świecąca powierzchnia, znajduje się w miejscu, w którym stosunek dyfundującego strumienia paliwa do strumienia utleniacza przyjmuje wartość stechiometryczną.

W płomieniu dyfuzyjnym chemiczna reakcja spalania jest więc zawsze poprzedzona czysto fizycznym procesem mieszania, który zależy od praw rządzących dyfuzją w strumieniach gazowych. Ze względu na te prawa, płomień dyfuzyjny dzieli się na laminarne i turbulenty; w pierwszym dyfuzja ma charakter czysto molekularny, w drugim – turbulenty. Uwarunkowanie mechanizmu spalania w płomieniach dyfuzyjnych procesami przenoszenia uwidacznia się wyraźnie w zewnętrznym wyglądzie tych płomieni. Płomień laminarne mają poprzeczny wymiar niewiele większy od wymiaru wylotowego otworu dyszy paliwowej, a ich zewnętrzna powierzchnia jest gładka i wyraźnie zarysowana. W płomieniach turbulenty natomiast wymiar poprzeczny znacznie przewyższa wymiar dyszy paliwowej, a

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

powierzchnia płomienia nie ma określonego kształtu i podlega ciągłym zmianom, takim jak drgania i falowanie.

Ze względu na mechanizm rozprzestrzeniania się płomienia rozróżnia się płomienie laminarne i turbulentne. Zagadnienie to jest szerzej omawiane podczas ćwiczenia „Aerodynamika płomieni i stabilność spalania”.

Palniki gazowe

Do podstawowych funkcji palników gazowych należy: przygotowanie w palniku lub na wylocie z niego mieszaniny palnej paliwa z powietrzem w określonym stosunku, zapewnienie ciągłego zapłonu mieszaniny palnej, całkowitego i zupełnego spalania, ustabilizowanie czoła płomienia na wylocie z palnika, zapewnienie określonej aerodynamicznej struktury płomienia, odpowiednie ukierunkowanie płomienia w komorze spalania i zabezpieczenie projektowanej wydajności cieplnej komory spalania. Według sposobu działania, palniki dzieli się na:

- palniki zewnętrznego mieszania (dyfuzyjne), w których paliwo i powietrze są podawane oddzielnie, a mieszanie następuje dopiero w dyszy wylotowej palnika lub w komorze spalania na wylocie z dyszy palnika);
- palniki wstępnie zmieszanych gazów (kinetyczne), w których zapewnione zostaje zmieszanie paliwa z odpowiednią ilością powietrza przed podawaniem do komory spalania);
- palniki z niepełnym wstępnym mieszaniem (kinetyczno-dyfuzyjne), w których gaz miesza się z częścią powietrza koniecznego do spalania przed dyszą wylotową palnika, a pozostała część powietrza jest podawana oddzielnie i miesza się ze wstępnie przygotowaną mieszaniną paliwa oraz powietrza w komorze spalania na wylocie z palnika).

Pod względem konstrukcyjnym palniki dzieli się na:

- palnik gazowy inżektorowy (atmosferyczny), ze wstępnym mieszaniem paliwa i powietrza, które jest zasysane przez gaz wypływający z dyszy paliwowej palnika,
- palnik gazowy nadmuchowy, w którym powietrze jest podawane przez urządzenie nadmuchowe, z pełnym i niepełnym wstępnym mieszaniem oraz bez wstępnego mieszania paliwa i utleniacza.

Ze względów konstrukcyjnych i sposobu organizacji przepływu strumieni paliwa i utleniacza na wylocie z palnika palniki można podzielić na palniki wirowe i o przepływie niezawioranym.

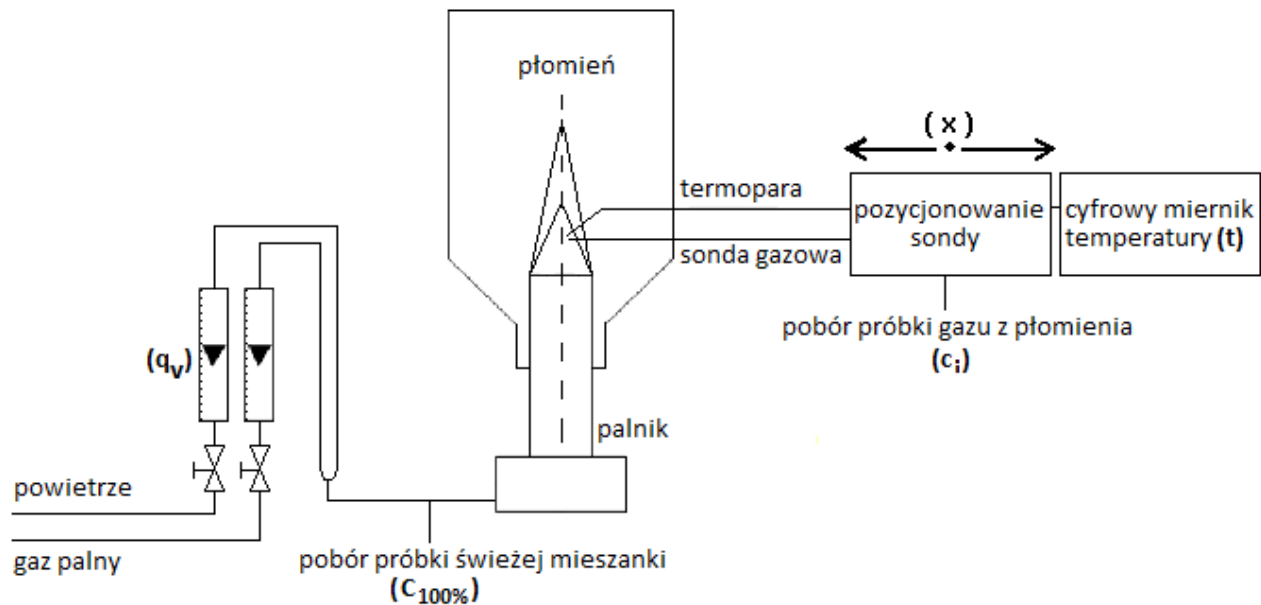
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem spalania paliw gazowych, poznanie typów płomieni oraz ich struktury, obserwacja działania palnika gazowego oraz pomiar rozkładu temperatury i składu mieszanki wewnątrz płomienia, a także określenie podstawowych wskaźników i parametrów związanych z procesem spalania, obliczenie składu mieszanki palnej i współczynnika nadmiaru powietrza.

Przebieg ćwiczenia

Podczas realizacji ćwiczenia zapoznaje się z budową i działaniem palnika gazowego oraz obserwuje się powstający płomień. Na podstawie pomiaru strumieni gazu palnego i powietrza określany jest skład mieszaniny. Sprawdzane jest, czy stężenie spalanego gazu zawiera się w obliczonych teoretycznie stężeniowych granicach palności. W pierwszym kroku realizacji drugiej części ćwiczenia pobierana jest do analizy chromatograficznej próbka dopływającej do palnika mieszaniny paliwowo-powietrznej. Następnie wykonuje się badanie rozkładu temperatury i zawartości gazu palnego wewnątrz płomienia. Sonda gazowa oraz termopara są przemieszczane od środka symetrii palnika do zewnątrz płomienia wzdłuż jego promienia. W określonych punktach (co 1mm) pobierana jest próbka gazów oraz mierzona temperatura. Zawartość gazu palnego w próbce jest określana przy użyciu chromatografu gazowego.

Schemat stanowiska pomiarowego



Opracowanie wyników pomiarów

1. Obliczenie ze wzoru Le Chateliera granic palności L_d i L_g spalanej mieszanki gazów palnych:

$$L_d = \frac{100}{\frac{a_1}{L_{d_1}} + \frac{a_2}{L_{d_2}}} \quad \text{oraz} \quad L_g = \frac{100}{\frac{a_1}{L_{g_1}} + \frac{a_2}{L_{g_2}}}$$

gdzie: L_d i L_g - odpowiednio dolna i górna granica palności mieszaniny,
 $a_{1,2}$ - udział poszczególnych składników palnych, %,
 $L_{d/g1,2}$ - dolna/górna granica palności poszczególnych składników, %.

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

2. Określenie składu spalanej mieszanki gazowo-powietrznej:

$$r = \frac{q'_{v\text{ gazu}}}{q'_{v\text{ gazu}} + q_{v\text{ pow}}} * 100\%$$

gdzie: **r** – udział gazu w mieszaninie,

$q'_{v\text{ gazu}}$ – strumień objętości gazu palnego, dm^3/h ,

$q_{v\text{ pow}}$ – strumień objętości powietrza, dm^3/h .

Ponieważ strumień objętości gazu mierzony jest rotametrem wyskalowanym dla powietrza, należy dokonać korekty wyniku wg poniższego wzoru:

$$q'_{v\text{ gazu}} = q_{v\text{ gazu}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{pow}}}{\rho_{\text{gazu}}}}$$

gdzie: $q'_{v\text{ gazu}}$ – rzeczywisty strumień objętości gazu palnego, dm^3/h ,

$q_{v\text{ gazu}}$ – zmierzony rotametrem strumień objętości gazu, dm^3/h ,

ρ_{pow} – gęstość powietrza, kg/m^3 ,

ρ_{gazu} – gęstość gazu palnego, kg/m^3 .

Sprawdzić należy czy wyznaczony udział gazu palnego mieści się w teoretycznym przedziale palności dla gazu o danym składzie.

Na podstawie rzeczywistych wartości strumieni ($q'_{v\text{ gazu}}$ oraz $q_{v\text{ pow}}$) i obliczonego teoretycznego zapotrzebowania powietrza do spalania badanej mieszaniny (L^t_p) obliczyć należy współczynnik nadmiaru powietrza (λ).

a. Wyznaczenie stopnia wypalenia gazu

$$S_w = \left(1 - \frac{c_i}{c_{100\%}} \right) * 100\%$$

gdzie: **S_w** – stopień wypalenia

c_i – zawartość gazu palnego, zmierzona chromatograficznie w próbce pobranej w danym punkcie płomienia

$c_{100\%}$ – zawartość gazu palnego w świeżej mieszaninie paliwowo-powietrznej, zmierzona chromatograficznie

b. Wykonanie wykresów

W sprawozdaniu należy wykonać wykresy zależności stopnia wypalenia gazu (**S_w**) oraz temperatury płomienia (**t**) w funkcji odległości od środka palnika (**x**). Obie krzywe powinny być przedstawione w jednym układzie współrzędnych

Zestawienie mierzonych wartości (protokół pomiarowy)

1. Strumień objętości gazu palnego (zmierzony rotametrem dla powietrza) q_v gazu, dm^3/h .
2. Strumień objętości powietrza q_v pow, dm^3/h .
3. Zawartość gazu palnego w świeżej mieszance, $c_{100\%}$, C.
4. Wyniki sondowania płomienia:

odległość sondy gazowej od środka symetrii palnika	liczba reprezentująca zawartość niespalonego gazu w danym punkcie (i)	temperatura płomienia
x, mm	C_i , C	t, °C
0		
1		
...		

Literatura:

1. „Spalanie i paliwa” pod red. W. Kordylewskiego, PWr, Wrocław 2008
2. „Komory spalania silników turbinowo-odrzutowych – procesy, obliczenia, badania”, R. Łapucha, Warszawa 2004