

# SPALANIE W NAPĘDACH LOTNICZYCH

## LABORATORIUM

### Ćwiczenie 3 - Rozpylanie i spalanie paliw ciekłych

#### Wprowadzenie

##### Rozpylanie cieczy

Paliwa ciekłe spala się w postaci rozpylonej, ponieważ rozdrobnienie na krople zapewnia dużą intensywność parowania cieczy. Z tego powodu rozpylanie cieczy ma bardzo ważne znaczenie dla szybkości i jakości spalania paliw ciekłych. Istota rozpylania cieczy w strudze polega na pokonaniu napięcia powierzchniowego cieczy przez siły zewnętrzne i wewnętrzne:

1. Naprężenia styczne na powierzchni strugi, wywołane różnicą prędkości między cieczą, a powietrzem, które destabilizuje strugę, wywołując jej rozkład,
2. Siły odśrodkowe ruchu wirowego strugi, siły wywołane wzrostem ciśnienia w kropli na skutek parowania w jej wnętrzu,
3. Zewnętrzne siły mechaniczne, elektrostatyczne i ultradźwięków.

Gdy zwiększa się prędkość pojedynczej kropli względem otoczenia, zwiększa się też stopień oddziaływania gazu na kroplę. Gdy siły aerodynamiczne wynikające ze względnego ruchu kropli mogą pokonać siły napięcia powierzchniowego (utrzymujące kroplę w „nierozzerwanej” postaci), może nastąpić jej rozerwanie. Nowopowstałe mniejsze krople mogą łatwiej odparować w otoczeniu powietrza, par paliwa i gorących spalin i ulec efektywniejszemu spalaniu. Zjawisko to opisuje liczba Webera określająca stosunek siły aerodynamicznej rozrywającej kroplę, do siły napięcia powierzchniowego:

$$We = \frac{\rho_g w^2 d_k}{\sigma}$$

gdzie:  $\rho_g$  – gęstość otaczających gazów,  $w$  – prędkość kropli względem płomienia,  $d_k$  – średnica kropli  $\sigma$  – napięcie powierzchniowe.

Ciecze rozpyla się przy pomocy urządzeń zwanych rozpylaczami. Rozpylacz może występować jako urządzenie samodzielne lub wchodzić w skład większego urządzenia, takiego jak palnik kotłowy, system wstępnego odparowania paliwa w turbinach lotniczych (na paliwa ciekłe), element instalacji tryskaczowej ppoż., komora zraszania. Rozpylacze mogą pracować pojedynczo lub zespołowo.

Mechanizm rozpylania cieczy za pomocą rozpylaczy jest zależny od wielkości kontrolowanych (jak np. rodzaj rozpylacza, wymiary i konstrukcja elementów rozpylacza parametry czynników) oraz wielkości niekontrolowanych (takich jak wiry turbulenty, drgania dyszy, niedokładności w wykonaniu elementów dyszy). Te niekontrolowane i przypadkowe wpływy sprawiają, że krople w rozpylonej strudze cieczy mają niejednakowe średnice o różnorodnym rozkładzie. Także rodzaj cieczy ma duży wpływ na przebieg powstawania kropeł i proces rozpylania.

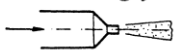
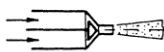

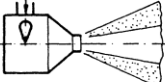
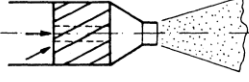
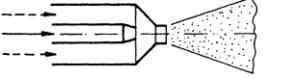
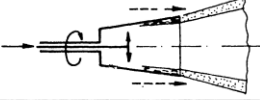
**„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”**



Istotne znaczenie podczas procesu rozpylania ma też lepkość cieczy. Dla większości cieczy parametr ten maleje wraz ze wzrostem temperatury. Informacje o lepkości cieczy najlepiej jest pozyskiwać z pomiarów własnych lub z danych literaturowych. Z pośród metod pomiarowych wyznaczania lepkości cieczy najpopularniejsze są metody oparte na prawie Stokesa, prawie Hagena-Poiseuille'a i tzw. metody rotacyjne. Wartość lepkości determinuje opór przepływu przez rurociągi, elementy palnika, czy układu wtryskującego w silnikach spalinowych. Wzrost lepkości powodować może zmniejszenie zasięgu strugi, zubożenie mieszanki, straty mocy na pokonanie oporów przepływu. Lepkość paliwa wpływa także na rozkład wielkości kropeł uzyskiwany podczas rozpylania.

W przypadku powszechnie stosowanych cieczy, w normalnych warunkach, wpływ gęstości, lepkości i napięcia powierzchniowego na średnicę rozpylonych kropeł jest następujący:

1. ciecze o większej gęstości mają większą energię kinetyczną, dlatego powstają mniejsze krople,
2. ciecze o większej lepkości tworzą większe krople,
3. ciecze o większym napięciu powierzchniowym rozpadają się na krople o większej średnicy.

Istnieje wiele klasyfikacji rozpylaczy opartych o różne kryteria. W poniższej tabeli podano klasyfikację rozpylaczy w oparciu o kryterium rodzaju energii użytej do rozpylania cieczy.

Energia cieczy	<i>Rozpylacze strumieniowe</i>	
	<i>o działaniu ciągłym</i>	<i>o działaniu przerywanym</i>
		
Energia cieczy	<i>Rozpylacze wirowe</i>	
		
Energia cieczy	<i>Rozpylacze strumieniowo-wirowe</i>	
		
Energia gazu	<i>Rozpylacze pneumatyczne</i>	
		
Energia mechaniczna	<i>Rozpylacze rotacyjne</i>	
		

 ciecz  
 gaz

Paliwa ciekłe w większości pochodzą z przeróbki ropy naftowej. Otrzymuje się z niej następujące produkty: benzyna (ok. 40%), nafta (ok. 5%), olej napędowy (ok. 20%), olej opałowy (ok. 25%) oraz pozostałe produkty, takie jak olej smarny, asfalt i inne (ok.

**„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”**

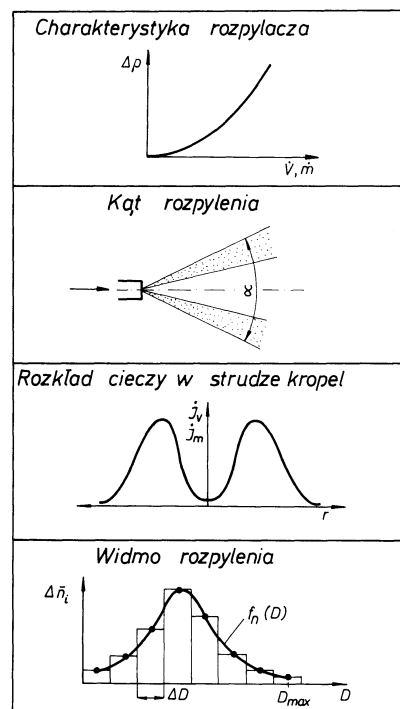
10%). Wykorzystywane są również paliwa powstałe z „upłynnienia” węgla, jak również oleje roślinne i alkohole. W technice paliwa ciekłe stanowią, mimo coraz większego wykorzystania gazu, podstawowe źródło energii.

W energetyce, obok czystych paliw, znalazły szerokie zastosowanie emulsje olejowo-wodne (mazut, gudron). Są to ciecze, w których fazą rozproszoną jest woda w ilości 20-30%. Cząstki wody, które powodują mikroeksplozje wskutek różnej temperatury wrzenia wody i oleju, zmniejszają stopień termicznego rozpadu oleju oraz umożliwiają lepsze rozdrobnienie paliwa i wymieszanie go z tlenem. Efektem tego jest polepszenie warunków spalania.

**Parametry rozpylonej strugi cieczy**

Z praktycznego punktu widzenia, pod pojęciem rozpylania cieczy należy rozumieć rozpad cieczy na małe lub bardzo małe krople. Zachodzi to najczęściej przy dużej prędkości wypływu cieczy z rozpylacza (ok. 100 m/s). Rozpad cieczy na krople przebiega łatwiej, jeżeli ciecz występuje w formie podatnej na rozpad. Najbardziej podatne są cienkie strugi lub błony cieczy, gdyż w obu tych formach energia powierzchniowa jest największa, a przez to największa jest też ich niestateczność.

Parametry rozpylonej strugi cieczy należy podzielić na makroparametry (zewnętrzne) i mikroparametry (wewnętrzne). Podstawowymi parametrami charakteryzującymi makrostrukturę rozpylonego strumienia kropeł są: kąt rozpylenia, zasięg strumienia, stopień jego asymetrii względem osi dyszy rozpylającej oraz intensywności zraszania w wybranym punkcie odległym od osi rozpylacza o dany promień (promieniowy rozkład gęstości zroszenia). Podstawowymi parametrami charakteryzującymi mikrostrukturę strumienia są: jakość rozpylenia – zależna od rozrzutu średnic kropeł (różnicy pomiędzy maksymalną i minimalną średnicą kropli) i charakteryzująca tzw. równomierność zraszania, widmo rozpylenia czyli rozkład ilościowy kropeł wg średnic oraz wartości średnich średnic kropeł (arytmetycznej, powierzchniowej, objętościowej i Sautera). Wybrane parametry przedstawiono w tabeli poniżej.



„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

Podstawowe parametry rozpylonej strugi cieczy definiuje się następująco:

**Kąt rozpylenia  $\alpha$** , to kąt wierzchołkowy strugi kropeł wypływającej z dyszy do nieruchomego otoczenia. Kąt rozpylenia może być jednoznacznie określony tylko w próżni, gdzie możliwe jest wyeliminowanie wpływu otoczenia. Kąt rozpylenia określa kształt zewnętrzny strugi kropeł. Rozpylacze strumieniowe z otworem o przekroju kołowym charakteryzują się bardzo małymi wartościami kąta  $\alpha$ . Wartości większe, zależne od wewnętrznej geometrii, cechują rozpylacze wirowe i pneumatyczne. Dla rozpylaczy rotacyjnych żądany kąt rozpylenia  $\alpha$  można uzyskać w przypadku wymuszonego odpływu rozpylacza przez gaz. Rozpylacze wirowe charakteryzują się dużym przedziałem kątów rozpylenia  $\alpha \in (15 \div 120^\circ)$ .

**Średnie średnice kropeł** są to wielkości umowne, które charakteryzują zbiór jednorodnych kropeł w zastępstwie zbioru rzeczywistego (widma rozpylenia). W zależności od metody i od sposobu obliczania, średnia średnica kropeł może określać taką wartość, jak: liczba, średnica, powierzchnia i objętość kropeł. Wybór średniej średnicy zależy od dziedziny zastosowania rozpylonej cieczy. Średnia średnica wprawdzie nie daje informacji o samym zbiorze kropeł, jest jednak najbardziej poglądową wielkością służącą do oceny jakości rozpylenia.

Przyjmując do opisu parametrów rozpylonych kropeł (cząstek) następujące oznaczenia:

$d$  - średnica cząstek (kropli),

$n$  - liczba zmierzonych cząstek,

$i$  - bieżący numer klasy wymiarowej (podczas pomiarów zbiór kropeł dzieli się maksymalnie na 256 klas wymiarowych wg średnic),

$j$  - bieżący numer pomiaru,

można wyznaczyć najczęściej stosowane średnie średnice występujące w danej strefie obszaru zbioru cząstek, jak również w całym zbiorze wg zależności:

- średnia arytmetyczna średnica:  $D_n = \sum F_{ij} d_i$ ,
- średnia powierzchniowa średnica:  $D_s = \sqrt{\sum F_{ij} (d_i)^2}$ ,
- średnia objętościowa średnica:  $D_v = \sqrt{\sum F_{ij} (d_i)^3}$ ,
- średnia objętościowa średnica ważona wg powierzchni (Sautera):  $D_a = \frac{(D_v)^3}{(D_s)^2}$ ,

gdzie:  $F_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum n_{ij}}$ .

W niektórych analizach wyznacza się **Medianę** (średnica cząstek wyznaczającą dokładnie 50% rozkładu) lub **Modę** (średnica cząstek najbardziej znaczących w rozkładzie).

Mając daną ilość cząstek w danej klasie, można obliczyć również całkowite udziały: średnicowe, powierzchniowe i objętościowe, dla danej klasy wymiarowej średnic w całym zbiorze kropeł. Można wyznaczyć również tzw. średnicę geometryczną:

- $B_n = A_i \frac{d_i}{d_n}$  – całkowity udział średnicowy  $i$ -tej klasy wymiarowej,
- $B_s = A_i \left( \frac{d_i}{d_s} \right)^2$  – całkowity udział powierzchniowy  $i$ -tej klasy wymiarowej,

„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

- $Bv = A_i \left( \frac{d_i}{dv} \right)^3$  – całkowity udział objętościowy i-tej klasy wymiarowej,
- $d_{geo} = \frac{\sum n \cdot \log(d_i)}{\sum n}$  – średnica geometryczna, gdzie:  $A_i = \frac{\sum n_{ij}}{\sum_j \sum_i n_{ij}}$ .

W wyniku rozpylania powstają krople o zróżnicowanych średnicach, przy czym proces ich powstawania ma charakter statystyczny. Krople tworzą zbiór statystyczny, w którym zmienną losową jest średnica kropeł  $d$ . Rozkład średnic kropeł tworzy **widmo rozpylania** (widmo średnic kropeł).

Zagadnienia rozpylania cieczy jest kluczowe w lotnictwie i znajduje swoje zastosowanie we wtryskiwaczach paliwa lotniczych silników turbinowych. Ich zadaniem jest dostarczenie paliwa w ilości niezbędnej do uzyskania (w każdych warunkach lotu) osiągnięć silnika żądanych przez pilota. Jednocześnie wtryskiwacze powinny zapewniać wysoka jakość rozpylenia paliwa na krople, dla umożliwienia jego odparowania i całkowitego spalania przed osiągnięciem łopatek dyszowych turbiny w komorze spalania wytwornicy spalin oraz przed osiągnięciem dyszy wylotowej w dopalaczach silników odrzutowych. Im lepsze uzyskuje się rozpylenie paliwa, tym krótszy jest czas niezbędny na jego odparowanie i wytworzenie jednorodnej mieszanki i tym krótsza może być komora spalania. Sprzyjają temu konstrukcje współczesnych silników, w których coraz częściej występują spręży o wartościach przekraczających  $\pi=25...30$ , a nawet 50, co jednak wymaga stosowania wysokich ciśnień przed wtryskiwaczami.

Od silników lotniczych wymaga się pracy na różnych zakresach w zmiennych warunkach lotu, z czym wiąże się szeroki zakres niezbędnych wydatków paliwa, które w warunkach pracy silnika na zakresie biegu jałowego w locie na dużej wysokości mogą być nawet 30 razy mniejsze od wydatku w warunkach pracy na zakresie maksymalnym na ziemi. W przypadku najprostszych wtryskiwaczy strugowych lub wirowych zarówno prędkość wypływu paliwa z dyszy wtryskiwacza, jak i jego wydatek jest proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego ze spadku ciśnienia we wtryskiwaczu. To oznacza, że przy konieczności 30-krotnego zmniejszenia wydatku paliwa, konieczne jest 900-krotne zmniejszenie wartości spadku ciśnienia we wtryskiwaczu, co powoduje, że wtryskiwacz nie jest w stanie zapewnić odpowiedniego rozpylenia paliwa. Z tego względu niezbędne jest stosowanie wtryskiwaczy o znacznie bardziej skomplikowanej konstrukcji.

Większość lotniczych silników turbinowych ma klasyczne układy zasilania z wtryskiwaczami wirowymi, a w silnikach odrzutowych najczęściej dwuobwodowy system zasilania. Pierwszy obwód zasila w nich komory spalania w fazie rozruchu i podczas pracy silnika na biegu jałowym, a drugi włącza się do pracy w zakresie ciągów lub mocy niezbędnych do lotu.

Ogólne wymagania dotyczące rozpylaczy są następujące:

1. Zdolność do dobrego rozdrobnienia paliwa w szerokim zakresie wydatków,
2. Zdolność do szybkiej reakcji na zmianę wydatku paliwa,
3. Stabilny proces rozpylania,
4. Możliwie najniższe ciśnienie zasilania
5. Możliwość łatwego przeskalowania konstrukcyjnego,
6. Niskie koszty, waga, a także łatwość serwisu i utrzymania,
7. Odporność na uszkodzenia transportowe i podczas instalacji,
8. Odporność na zanieczyszczenia i tworzenie się nagaru,
9. Równomierność osiowego i obwodowego rozkładu kropeł paliwa.

„ZPR PWR – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”

### Spalanie paliw ciekłych

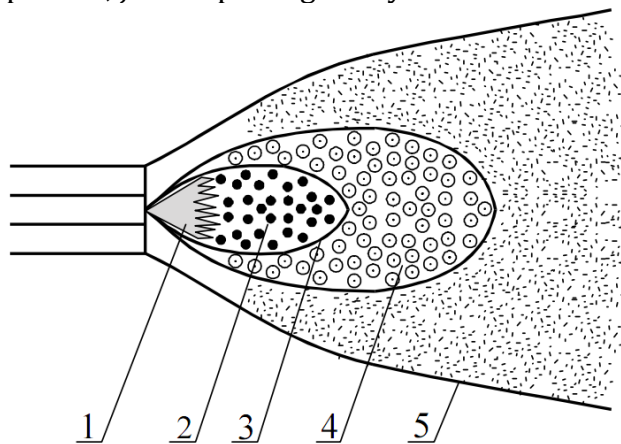
Spalanie paliw ciekłych w większości zastosowań polega na ich rozpyleniu i spalaniu zbioru kropeł, stąd ważny jest mechanizm spalania pojedynczej kropli. W procesie spalania paliw ciekłych należy wyróżnić dwie fazy: odparowania, a następnie spalania par. Dlatego na szybkość spalania paliw ciekłych dominujący wpływ mają następujące czynniki:

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

Szybkość parowania cieczy zależy przede wszystkim od strumienia ciepła dopływającego  $q$  do paliwa ciekłego, dlatego w quasi-ustalonych warunkach wrzenia szybkość parowania  $m_p$  można określić jako:

$$m_p = q/L_p, \text{ gdzie } L_p \text{ jest ciepłem parowania.}$$

Dwa pozostałe czynniki – szybkość mieszania i kinetyka chemiczna – mają podobny wpływ na szybkość spalania, jak dla paliw gazowych.



Struktura płomienia rozpylonego oleju

- 1 – struga rozpylonej cieczy, 2 – strefa parowania, 3 – strefa zapłonu,  
4 – strefa spalania indywidualnego kropeł, 5 – granice płomienia

Aby zapłon paliwa w komorze spalania był niezwodny musi być ono dobrze rozdrobnione i wymieszane z utleniaczem, a skład tej mieszanki powinien być zbliżony do stechiometrycznego (dla nafty jest to około 14,7 kg powietrza, na kilogram paliwa). Osiąga się to stosując wtryskiwacze o bardzo małych otworach dysz, które przy ciśnieniu 5-10 barów powodują powstanie mgły paliwa. Niestety przez takie wtryskiwacze nie można przetłoczyć tak dużej ilości paliwa, jaka wymagana jest w zakresie startowym. Przykładowo dla silnika turbodoładowanego K-15 przepływ paliwa przez wtryskiwacze rozruchowe przy rozruchu na ziemi wynosi 90 kg/h, a przepływ paliwa przez wtryskiwacze główne na zakresie startowym 1750 kg/h. Stąd konieczność rozdzielania układu podawania paliwa. Wtryskiwacze rozruchowe jest zwykle tylko kilka, a głównych kilkanaście, bądź kilkadziesiąt.

Większość zanieczyszczeń emitowanych z silników turbodoładowanych, to powstałe w komorze spalania produkty utleniania. Głównie są to: węglowodory, tlenek węgla, tlenek azotu, tlenki siarki (w obecnie użytkowanych paliwach lotniczych zawartość siarki jest niewielka) oraz dym. Wszystkie są toksyczne i szkodliwe dla środowiska. O składzie spalin decydują przede wszystkim warunki spalania, także jakość rozpylenia paliwa przez wtryskiwacze (rozbicie kropeł na jak najmniejsze oraz otrzymanie równomiernego ich rozkładu).

## Cel ćwiczenia

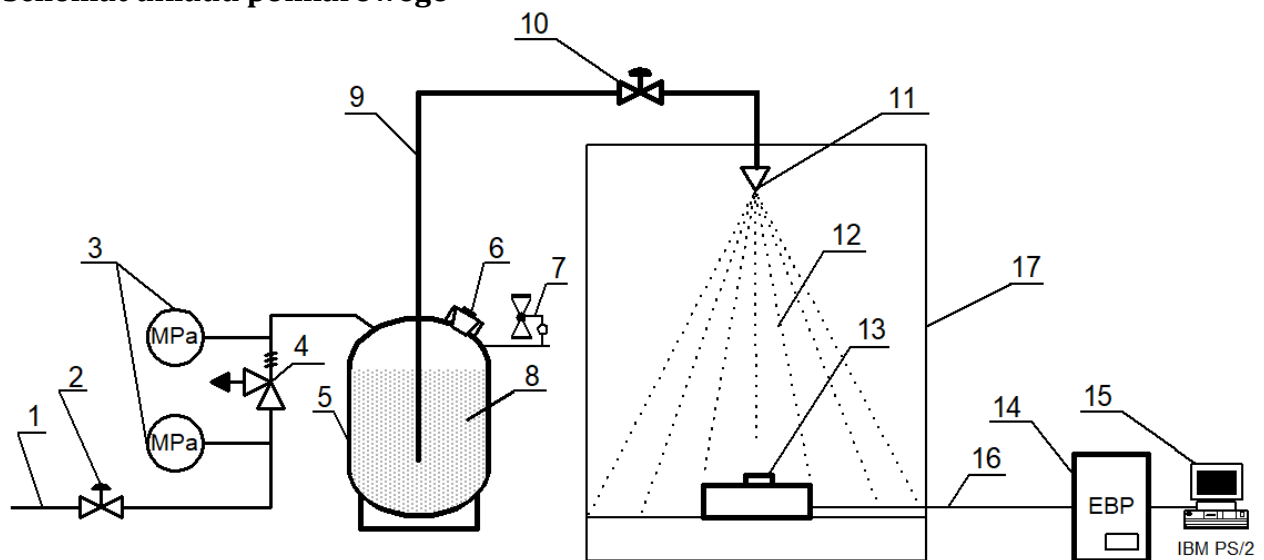
Celem ćwiczenia jest zapoznanie ze sposobami rozpylania paliw ciekłych, poznanie zjawisk fizycznych występujących podczas rozpylania cieczy oraz wyznaczenie podstawowych parametrów rozpylonej strugi kropeł w zależności od parametrów rozpylania (np. ciśnienie, typ dyszy). W drugiej części ćwiczenia sprawdzany jest wpływ jakości rozpylenia paliwa na stopień jego wypalenia w komorze spalania.

## Przebieg ćwiczenia

### Badanie jakości rozpylania cieczy

W pierwszym kroku należy zidentyfikować i sprawdzić poprawność połączenia instalacji pneumatycznej i hydraulicznej stanowiska badawczego zgodnie ze schematem, następnie zapoznać się z praktyczną obsługą programów AWKD i COMPARE (instrukcje na stanowisku pomiarowym).

### Schemat układu pomiarowego



1 – instalacja sprężonego powietrza 0-0,6 MPa, 2 – pneumatyczny zawór odcinający, 3 – manometry gazowe, 4 – reduktor ciśnienia, 5 – zbiornik hydroforowy, 6 – otwór wlewowo-rewizyjny, 7 – zawór bezpieczeństwa, 8 – rozpylana ciecz, 9 – instalacja hydrauliczna, 10 – zawór spryskiwacza, 11 – dysza rozpylacza, 12 – struga rozpylonej cieczy, 13 – sonda, 14 – elektroniczny blok pomiarowy, 15 – komputer z oprogramowaniem, 16 – kabel sygnałowy, 17 – komora natryskowa,

### Procedura wykonania pomiarów

Po sprawdzeniu układu przystąpić należy do pomiarów według schematu:

1. Wybrać i zamontować odpowiednią dyszę do badań,
2. Sprawdzić ilość cieczy w zbiorniku hydroforowym (w razie konieczności uzupełnić wskazaną cieczą),
3. Pokrętko nastawy reduktora ustawić tak, aby za reduktorem panowało niskie ciśnienie po podłączeniu do instalacji sprężonego powietrza,
4. Sprawdzić poprawność zamknięcia otworu wlewowo-rewizyjnego,



**„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”**

5. Podać ciśnienie do układu pneumatycznego przez otwarcie zaworu pneumatycznego,
6. Ustawić żądane ciśnienie za reduktorem, nieprzekraczające 0,4 MPa,
7. Uruchomić program AWKD i ustawić odpowiednie parametry pomiaru,
8. Otworzyć zawór spryskiwacza i ustawić żądane ciśnienie za reduktorem,
9. Po ustabilizowaniu ciśnienia uruchomić rejestrację wyników,
10. Zapisać dane pomiarowe,
11. Przystąpić do kolejnej rejestracji pomiarów zmieniając np. ciśnienie lub inne parametry procesu rozpylania;
12. Po zakończeniu pomiarów zamknąć program AWKD, zamknąć zawór spryskiwacza, zredukować ciśnienie za reduktorem do ok. 0,05 MPa, zamknąć zawór pneumatyczny.

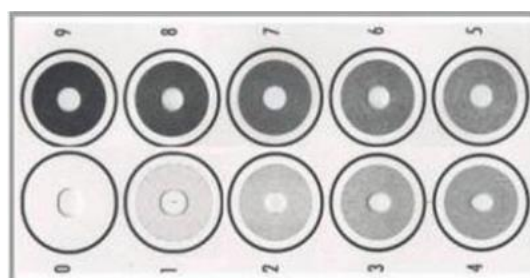
**Badanie jakości rozpylania cieczy**

1. Dla wybranej dyszy wykonać serię pomiarów jakości rozpylania w funkcji ciśnienia rozpylania (np. 0,05; 0,15; 0,25; 0,35 MPa lub innych) – przyjąć stałość temperatury i ciśnienia w trakcie badań,
2. Określić wartość kąta rozpylania w zależności od ciśnienia rozpylania,
3. Przy pomocy programu COMPARE wykonać krzywe rozkładu ilościowego i/lub krzywe sumarycznego rozkładu ilościowego kropeł i na ich podstawie przeprowadzić dyskusję dotyczącą wpływu ciśnienia na jakość rozpylania,
4. Dla wybranego ciśnienia rozpylania zbadać równomierność zraszania w funkcji odległości sondy od osi rozpylacza (np. 0; 15; 30; 45 cm) – przyjąć, że rozkład intensywności zraszania jest osiowo-symetryczny.

**Badanie wpływu jakości rozpylania na jakość spalania paliwa**

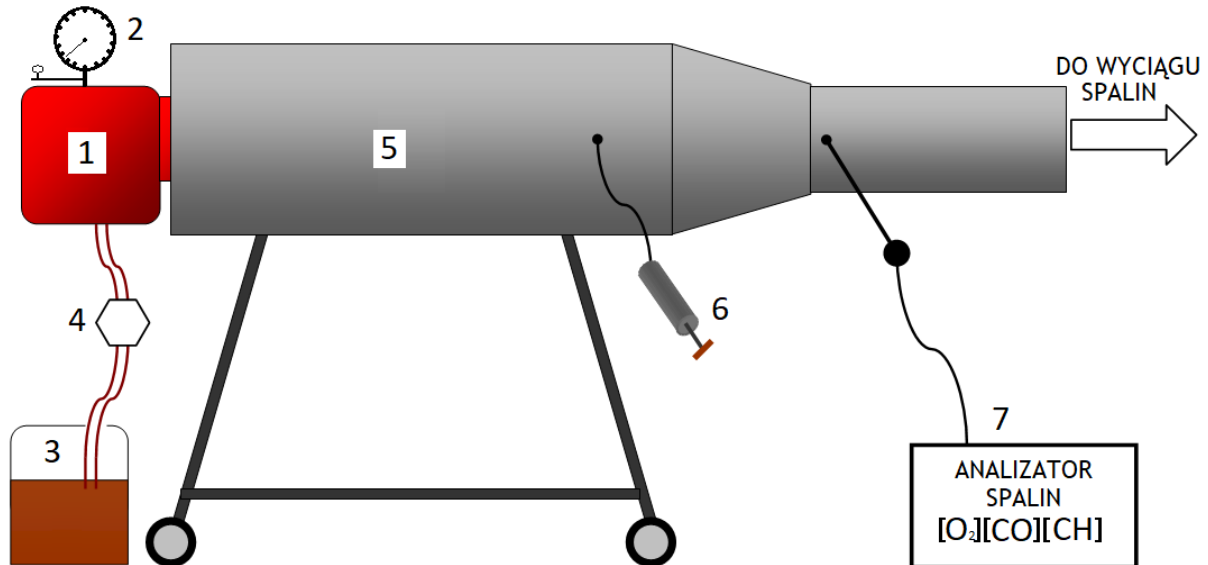
W trakcie ćwiczenia zapoznaje się z budową i działaniem palnika olejowego oraz obserwuje się płomień powstający podczas spalania wybranego paliwa ciekłego. Następnie wykonuje się badania płomienia olejowego stopniowo zmieniając ciśnienie odpowiedzialne za rozpylanie paliwa (rozpylacz ciśnieniowy), przy zachowaniu stałej ilości powietrza podawanej do spalania przez wemtylator.

Przy użyciu analizatora spalin bada się skład spalin pod kątem zawartości tlenu i tlenku węgla (CO). Opcjonalnie można określać też zawartość niedopalonych węglowodorów ( $C_nH_m$ ). Jednocześnie mierzy się zawartość sadzy (odpowiedzialnej za dym w spalinach) metodą Bacharacha. Pomiar wykonywany jest na podstawie zaciernienia filtra papierowego, na którym zatrzymuje 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 przedstawioną na rysunku poniżej:





## Schemat układu pomiarowego



1 – palnik olejowy, 2 – regulacja i pomiar ciśnienia rozpylania paliwa, 3 – badane paliwo, 4 – filtr paliwa, 5- komora spalania, 6- pomiar ilości sadzy metodą Bacharacha, 7- analizator spalin z sondą pomiarową

## Opracowania wyników

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 poziomu zanieczyszczeń na odniesiony do stałej zawartości tlenu 3%:

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

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

gdzie:  $CO^{3\%}$  – przeliczona zawartość CO w spalinach, ppm  
 $CH^{3\%}$  – przeliczona zawartość CH w spalinach, ppm  
CO – zmierzona zawartość CO w spalinach, ppm  
CH – zmierzona zawartość CH w spalinach, ppm



**„ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej”**

- 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 **CH<sup>3%</sup>**) i zawartości sadzy (**S**), w funkcji kilku nastaw ciśnienia pracy rozpylacza.

### Zestawienie mierzonych wartości

numer pomiaru	Ciśnienie rozpylania	skład spalin			ilość sadzy S
		O <sub>2</sub>	CO	CH	
-	bar	%	ppm	ppm	°B
1.					
2.					
3.					
...					

### 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
3. „Lotnicze silniki turbinowe – konstrukcja – eksploatacja – diagnostyka, część II”, R. Łapucha, Warszawa 2012
4. „Komory spalania silników turbinowych – organizacja procesów spalania”, M. Gieras, Warszawa 2010
5. Materiały do laboratorium ze „Spalania i paliw”, PWr,
6. „Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy“, Z. Orzechowski, J. Prywer., Warszawa 2008