



JAKOŚĆ ROZPYLANIA PALIW CIEKŁYCH

1. CEL ĆWICZENIA:

- Zapoznanie ze sposobami rozpylania paliw ciekłych;
- Poznanie zjawisk fizycznych występujących podczas rozpylania cieczy;
- Wprowadzenie w zagadnienia metodologii oceny jakości rozpylania;
- Wyznaczenie podstawowych parametrów rozpylonej strugi kropel w zależności od parametrów rozpylania (rodzaj paliwa, temperatura, ciśnienie, typ dyszy).

2. ZAGADNIENIA POWIĄZANE

- ❖ Sposoby rozpylania cieczy.
- ❖ Fizyczne podstawy rozpylania.
- ❖ Rozpylacze – charakterystyka ogólna i podział, obliczenia rozpylaczy, eksploatacja.
- ❖ Rodzaje paliw ciekłych i wpływ ich właściwości na warunki rozpylania.
- ❖ Parametry zewnętrzne i wewnętrzne rozpylonej strugi kropel i metody ich pomiaru.
- ❖ Procesy mechaniczne rozpylonej cieczy.
- ❖ Procesy termo-dyfuzyjne rozpylonej cieczy.
- ❖ Spalanie kropel paliwa.

Uwaga !!!

Przed przystąpieniem do realizacji ćwiczenia należy zapoznać się z instrukcją BHP obowiązująca w laboratorium Spalania w Napędach Lotniczych, a w trakcie trwania laboratorium stosować się do poleceń opiekuna dydaktycznego.

3. WSTĘP

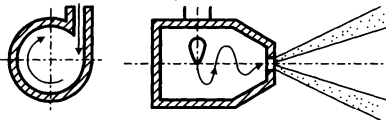
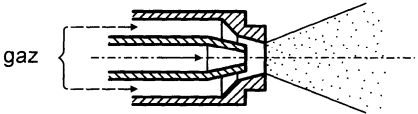
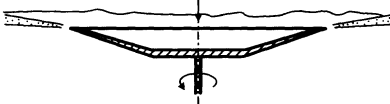
3.1. Rozpylanie cieczy

Wśród cieczy poddawanych rozpylaniu przeważają paliwa i woda. Jednak w rzeczywistości są rozpylane prawie wszystkie ciecze o bardzo zróżnicowanych własnościach – od roztopionych metali, poprzez farby, lakiery, środki ochrony roślin, do perfum. Rozpylanie cieczy jest procesem mającym ogromne znaczenie w wielu dziedzinach techniki między innymi w energetyce, przemyśle chemicznym, motoryzacji, klimatyzacji i rolnictwie.

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), pistolet natryskowy, zraszacz rolniczy, element instalacji tryskaczowej ppoż., komora zraszania. Rozpylacze mogą pracować pojedynczo lub zespołowo.

Istnieje wiele klasyfikacji rozpylaczy opartych o różne kryteria. W tabeli 1 podano klasyfikacje rozpylaczy w oparciu o kryterium rodzaju energii użytej do rozpylania cieczy.

Tabela1. Podział rozpylaczy wg energii zastosowanej do rozpylania [1]

Energia cieczy	Rozpylacze strumieniowe 
	Rozpylacze wirowe 
Energia gazu	Rozpylacze pneumatyczne 
Energia mechaniczna	Rozpylacze rotacyjne 
Energia drgań, elektryczna itd.	Rozpylacze różne akustyczne, ultradźwiękowe, elektrostatyczne, pulsacyjne i inne

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 turbulentne, 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 kropli i proces rozpylania. Więcej informacji na temat sposobów wytwarzania rozpylonej cieczy, budowy rozpylaczy oraz ich projektowania i zastosowania można znaleźć w pracach [1,2]

3.2. Własności fizyczne paliw ciekłych

Paliwa ciekłe w większości pochodzą z przeróbki ropy naftowej. Z ropy naftowej otrzymuje się następujące produkty: benzyna ok. 40%, nafta ok. 5%, olej napędowy ok. 20%, olej opałowy ok. 25% oraz pozostałe produkty (olej smarny, asfalt i inne) ok. 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 ciecz, w których fazą rozproszoną jest woda w ilości 20-30%. Czastki 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. Do paliw ciekłych zalicza się również mieszaniny olejowo-pyłowe czyli paliwa stało-ciekłe (ang. Coal-in-oil mixture, COM). Również płynny szlam węglowy (ang. Coal-water slurriers, CWS) zalicza

się do paliw ciekłych. Stosowane są również paliwa z dodatkami metalicznymi w celu zwiększenia wartości opałowej. Paliwa takie stanowią roztwory koloidalne, a ich lepkość jest znacznie większa niż zwykłych paliw (nawet tysiąckrotnie). Rozpylanie paliw COM, CWS i paliw z dodatkami metalicznymi napotyka wiele trudności. Paliwa ciekłe spala się w postaci rozpylonej, ponieważ rozdrobnienie na krople zapewnia dużą intensywność parowania cieczy. Zatem rozpylanie ma bardzo duże znaczenie dla szybkości i jakości spalania paliw ciekłych.

Jak wspomniano, większość cieczy (w tym i paliw rozpylanych w różnych procesach przemysłowych) to ciecze niejednorodne, czyli mieszaniny cieczy, roztwory chemiczne, roztwory koloidalne, zawiesiny i emulsje. Są to w większości ciecze nienewtonowskie, bardzo zróżnicowane pod względem własności reologicznych. Na ich proces rozpylania decydujący wpływ ma gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe cieczy.

Gęstość ρ (masa właściwa) wyznaczona jako stosunek masy substancji m do jej objętości V wyznaczonych w tej samej temperaturze ($\rho = m/V$) istotnie wpływa na proces przygotowania paliwa do spalania. Zmiana gęstości paliwa np. oleju wiąże się ze zmianą strumienia masowego paliwa przepływającego przez dysze rozpylacza (palnik, wtryskiwacz) przy stałym strumieniu objętości. Wpływ ciśnienia na gęstość cieczy można pominąć ze względu na bardzo małą ściśliwość cieczy. Uwzględniając wpływ wzrostu temperatury na gęstość cieczy należy przyjmować średnią wartość współczynnika rozszerzalności objętościowej ξ w przedziale $\Delta T = T_2 - T_1$. Dla większości cieczy gęstość ρ maleje ze wzrostem temperatury. Dla wzrostu temperatury od T_1 do T_2 możemy ją wyznaczyć ze wzoru

$$\rho_{T_2} = \frac{\rho_{T_1}}{1 + \xi(T_2 - T_1)}. \quad (1)$$

Jeżeli ciecz tworzy mieszaninę dwufazową, w której fazą ciągłą jest ciecz o gęstości ρ_1 , a fazą rozproszoną jest ciecz lub ciało stałe o gęstości ρ_2 , to gęstość mieszaniny wynosi:

$$\rho = (1 - \alpha)\rho_1 + \alpha\rho_2 \quad (2)$$

lub

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1 - \beta}{\rho_1} + \frac{\beta}{\rho_2}, \quad (3)$$

gdzie $\alpha = V_2/V$ i $\beta = m_2/m$ są odpowiednio udziałami objętościowym i wagowym fazy rozproszonej w mieszaninie ($V = V_1 + V_2$ – objętość mieszaniny, $m = m_1 + m_2$ – masa mieszaniny). Pomiaru gęstości cieczy dokonuje się przy pomocy piknometru, areometru (densymetru) lub wagi hydrostatycznej. Więcej informacji na temat wyznaczania gęstości cieczy znajduje się w pracach [3-5].

Z parametrów charakteryzujących paliwa ciekłe, znaczny wpływ na proces rozpylania, a za tym przygotowania paliwa ciekłego do spalania ma lepkość cieczy. Lepkość cieczy jednorodnych zależy od własności płynu tylko w zakresie laminarny, natomiast w zakresie turbulentnym zależy od ruchu cieczy. Dla ruchu laminarnego obowiązuje wzór Newtona, w którym naprężenie styczne τ jest proporcjonalne do gradientu prędkości w kierunku normalnym do kierunku przepływu dV/dy :

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy}, \quad (4)$$

gdzie μ jest współczynnikiem lepkości dynamicznej.

Często jest stosowane pojęcie współczynnika lepkości kinematycznej ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (5)$$

Ciecze spełniające warunek (4) są nazywane cieczami newtonowskimi.

Ciecze nienewtonowskie to ciecze, których opór płynięcia dla określonego ciśnienia i temperatury zmienia się w zależności między innymi od gradientu prędkości, kierunku płynięcia, a także rodzaju procesów, jakim płyn poddawany był poprzednio.

Ciecze niejednorodne o bardzo małej koncentracji fazy rozproszonej uważa się za ciecze newtonowskie. Przy większych stężeniach wszelkie mieszaniny (emulsje, zawiesiny itp.) nabierają cech nienewtonowskich, zatem większość paliw można uznać za ciecze nienewtonowskie. Lepkość paliw stało-ciekłych zależy głównie od rozmiarów cząstek i udziału pyłu. Przy udziale wagowym pyłu powyżej 40% lepkość paliwa wzrasta bardzo szybko (15-30 razy) w stosunku do lepkości mazutu. Obliczenie lepkości na podstawie znajomości lepkości składników mieszaniny jest praktycznie niemożliwe [1].

Dla większości cieczy lepkość maleje 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 Stkesa, prawie Hagena-Poiseuille'a i tzw. metody rotacyjne (urządzenia: wiskozymetr Hopplera, wiskozymetr Ostwalda, wiskozymetr Englera, wiskozymetr rotacyjny np. Rheotest). Opis metod i urządzeń do wyznaczania lepkości można znaleźć w pracach [3-5].

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.

Procesy spalania paliw ciekłych przebiegają najczęściej na granicy faz ciecz – gaz. W takich przypadkach istotną rolę w kinetyce procesu spalania odgrywa wielkość powierzchni rozdzielającej poszczególne fazy, w jakich znajdują się reagenty. Jedną z wielkości charakteryzujących wpływ powierzchni międzyfazowych na proces spalania, a w szczególności rozpylania paliwa ciekłego, jest napięcie powierzchniowe. Siłę napięcia powierzchniowego ilościowo określa współczynnik napięcia powierzchniowego. Zgodnie z definicją współczynnik napięcia powierzchniowego σ oznacza siłę F przypadającą na jednostkę długości odcinka swobodnej powierzchni cieczy, gdzie siła jest styczna do powierzchni, a jednocześnie prostopadła do odcinka l :

$$\sigma = \frac{F}{l} . \quad (6)$$

Siła ta wywołana jest faktem, że energia cząstek na powierzchni fazy jest różna od energii cząstek wewnątrz fazy. Powstaje więc siła powierzchniowa, zwana napięciem powierzchniowym, powodująca "wciąganie" cząsteczek do wnętrza cieczy. Każdy układ dąży do stanu o minimalnej energii swobodnej. Ponieważ najmniejsza energia powierzchniowa jest związana z kulistym kształtem cieczy, rozdrobniona ciecz przyjmuje postać kulistych kropeł. Współczynnik ten można traktować jako przyrost energii potencjalnej warstwy powierzchniowej cieczy związany z powiększeniem powierzchni swobodnej o jednostkową wartość. Jest on wielkością. Charakterystyczną dla danej cieczy w danej temperaturze, niezależną od wielkości powierzchni swobodnej. W przypadku mieszanin zagadnienie napięcia powierzchniowego jest bardzo złożone. Ogólnie biorąc, napięcie powierzchniowe zależy od rodzaju mieszanin i jej składu procentowego, zatem napięcie powierzchniowe takich mieszanin może przyjmować wartości skrajne. Istnieje szereg metod teoretycznego obliczania σ , ale mają one charakter przybliżony, stąd zwykle wykorzystuje się do tego celu metody doświadczalne. Do pomiaru σ najczęściej używane są metody: wzniesienia kapilarnego, pęcherzykowa, stalagmometryczna i tensometryczna [3]

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

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

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

Na szczególną uwagę zasługuje wpływ dodatku *polimerów* na warunki rozpylania. Badano rozpylanie paliw lotniczych, toluenu i wody z dodatkiem różnych polimerów o koncentracji 50-3000 ppm (0,005-0,3% wag.) [1]. Obecnie mechanizm działania polimerów nie jest dostatecznie poznany. Wiadomo natomiast, że wzrost koncentracji polimeru prowadzi do zaniku małych kropeł i formowania się dużych kropeł, które następnie zniekształcają się do postaci jednego włókna lub wielu cienkich włókien, a także zwartych strug. Zjawisko to wykorzystuje się na przykład do redukcji zapalności paliw podczas awaryjnych lądowań w lotnictwie [1].

Więcej informacji na temat wpływu właściwości fizycznych cieczy na warunki rozpylania znaleźć można między innymi w pracach [1-3].

3.3. 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, tj. 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. Wynika z tego, że zadaniem rozpylaczy jest przede wszystkim wytworzenie strug lub błon cieczy.

Obecnie brakuje jednolitej teorii rozpylania cieczy. Wiadomo jednak, że powinna ona opierać się na turbulencji cieczy, kawitacji w rozpylaczu i działaniu aerodynamicznym otoczenia [1].

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 intensywność 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).

Parametry zewnętrzne i wewnętrzne są ściśle ze sobą powiązane. Użytkownicy rozpylaczy powinni poddawać je okresowej kontroli. Kontrola nie powinna ograniczać się tylko do ogólnej oceny wyglądu rozpylaczy, lecz powinna obejmować kontrolne pomiary. Dotyczy to szczególnie rozpylaczy pracujących w skrajnie trudnych warunkach (na przykład rozpylaczy palnikowych).

Podstawowe wybrane parametry rozpylonej strugi cieczy definiuje się następująco:

Kąt rozpylenia α 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 α . Wartości większe, zależne od wewnętrznej geometrii, cechują rozpylacze wirowe i pneumatyczne. Dla rozpylaczy rotacyjnych żądany kąt rozpylenia α można uzyskać w przypadku wymuszonego odpływu rozpylacza przez gaz. Rozpylacze wirowe charakteryzują się dużym przedziałem kątów rozpylenia $\alpha \in (15 \div 120^\circ)$.

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

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 pogładową wielkością służącą do oceny jakości rozpylenia. Korzystając z odpowiednich średnich średnic kropeł, można dokonywać analizy większości zjawisk fizycznych i obliczeń dotyczących ruchu kropeł oraz wymiany ciepła i masy. Przykłady wykorzystania średnich średnic kropeł podano w tabeli 2. Posługiwanie się średnimi średnicami kropeł jest wystarczająco dokładne w obliczeniach inżynierskich.

Tabela 2. Średnie średnice kropeł

Nazwa średniej średnicy	Zastosowanie
Arytmetyczna	Porównywanie układów dyspersyjnych
Powierzchniowa	Zjawiska powierzchniowe, np. absorpcja, parowanie
Objętościowa	Zjawiska objętościowe
Sautera (objętościowo-powierzchniowa)	Zasięg kropeł, wymiana masy, wymiana ciepła
Proberta (względna objętościowa)	Parowanie, dyfuzja międzycząsteczkowa, spalanie
Masowa de Brouckere'a	Frakcjonowanie kropeł, spalanie

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 dzielimy 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 $Dn = \sum F_{ij} d_i$, (7)

- średnia powierzchniowa średnica $Ds = \sqrt{\sum F_{ij} (d_i)^2}$, (8)

- średnia objętościowa średnica $Dv = \sqrt{\sum F_{ij} (d_i)^3}$, (9)

- średnia objętościowa średnica ważona

wg powierzchni (Sautera) $Da = \frac{(Dv)^3}{(Ds)^2}$, (10)

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 wg zależności (11) – (13). Można wyznaczyć również tzw. średnicę geometryczną wg zależności (14).

- $Bn = A_i \frac{d_i}{dn}$ – całkowity udział średnicowy i-tej klasy wymiarowej, (11)

- $Bs = A_i \left(\frac{d_i}{ds} \right)^2$ – całkowity udział powierzchniowy i-tej klasy wymiarowej, (12)

- $Bv = A_i \left(\frac{d_i}{dv} \right)^3$ – całkowity udział objętościowy i-tej klasy wymiarowej, (13)

- $d_{geo} = \frac{\sum n_i \cdot \log(d_i)}{\sum n_i}$ – Średnica geometryczna, (14)

gdzie: $A_i = \frac{\sum n_{ij}}{\sum_j \sum_i n_{ij}}$.

Wymiary kropeł zależą zarówno od wielkości kontrolowanych (geometria rozpylacza, ciśnienie rozpylania, rodzaj cieczy, jej temperatura, itp.), jak też od wielkości niekontrolowanych (turbulencja cieczy, zakłócenia, drgania itp.). W wyniku rozpylania powstają krople o zróżnicowanych średnicach, przy czym proces ich powstawania ma charakter statystyczny. Teoretyczne ustalenie liczby i średnicy kropeł na podstawie samego mechanizmu rozpadu jest praktycznie niemożliwe. Krople tworzą zatem zbiór statystyczny, w którym zmienną losową jest średnica kropeł d . Rozkład średnic kropeł tworzy **widmo rozpylania** (widmo średnic kropeł).

3.4. Widmo rozpylania

Zgodnie z zasadą statystyki matematycznej, pod pojęciem widma średnic kropeł rozumie się rozkład liczby kropeł Δn_i przynależnej do danego zbioru średnic (klasy) o stałej szerokości Δd reprezentowanego przez średnicę d_i odpowiadającą środkowi przedziału:

$$\left\langle d_i - \frac{\Delta d}{2}, \quad d_i + \frac{\Delta d}{2} \right\rangle. \quad (11)$$

Widmo rozpylania sporządza się na podstawie pomiarów średnic kropeł. Pomiar polega na zakwalifikowaniu każdej średnicy do odpowiedniego przedziału średnic kropeł (u nas maksymalnie 256 klas). Szerokość przedziału (np. $\Delta d = 7 \mu m$) ustala się w zależności od metody pomiaru i wymaganej dokładności. Udział ilościowy kropeł ΔA_i w danym przedziale, odniesiony do całkowitej liczby kropeł n wyznacza się z zależności:

$$\Delta A_i = \frac{n_i}{n}, \quad (12)$$

gdzie n_i - liczba zmierzonych cząstek w danej klasie, n – całkowita liczba zmierzonych cząstek. Na podstawie udziału ilościowego sporządza się wykres (histogram) udziału ilościowego kropeł $\Delta A_i = f(d)$ (ciągła czarna linia na rys. 1). Można także wyznaczyć krzywą sumarycznego rozkładu ilościowego kropeł poprzez sumowanie odpowiednich rzędnych krzywej rozkładu ilościowego kropeł ($\Phi_n(d) = \sum_1^i \Delta A_i$) (przerywana czerwona linia na rys. 1)..

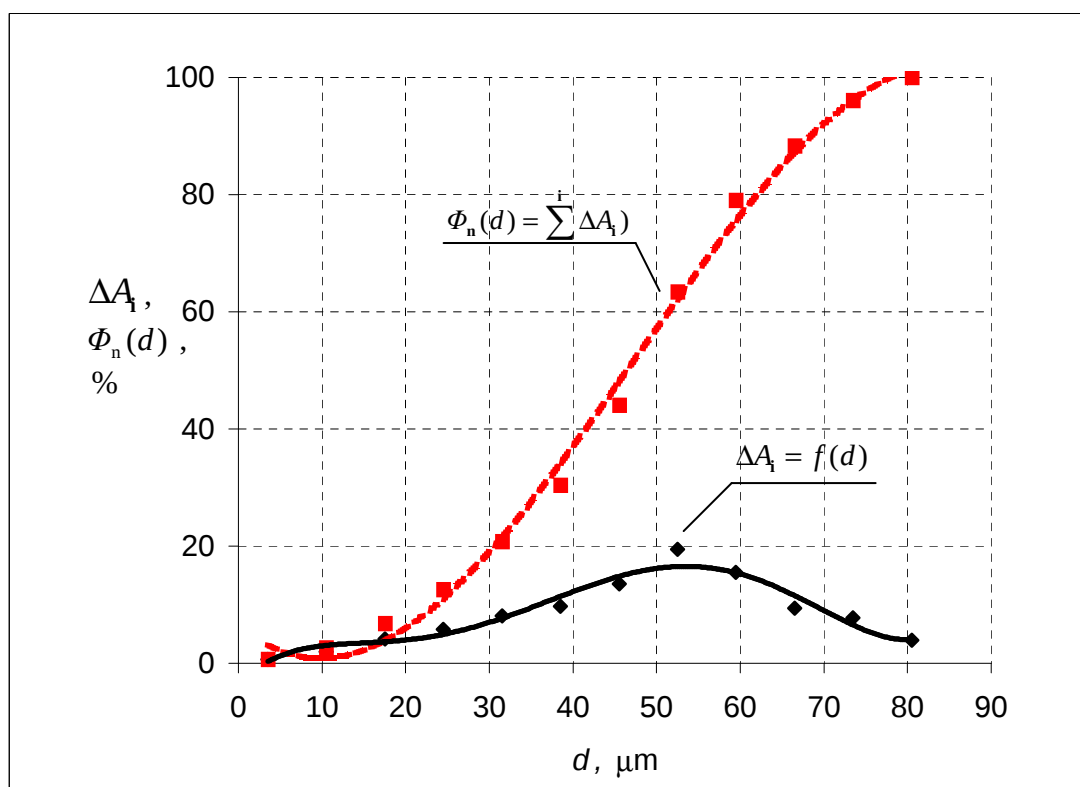
Krzywa sumarycznego rozkładu ilościowego kropeł powstaje w wyniku sumowania odpowiednich rzędnych krzywej (histogramu) rozkładu ilościowego kropeł – punkty na obu krzywych korelują ze sobą. Krzywa sumarycznego rozkładu ilościowego kropeł niesie informację jaki jest udział ilościowy (procentowy) kropeł o średnicach mniejszych od średnicy wskazanej w całkowitej liczbie kropeł. Poniżej w tabeli 3 przedstawiono przykład analizy wyników po-

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

miaru widma rozpylonych kropeł i uzyskane na jej podstawie wykresy (krzywe) udziału ilościowego i sumarycznego udziału ilościowego kropeł przedstawione na rys. 1.

Tabela 3. Wyniki pomiarów widma rozpylonych kropeł

Nr klasy pomiarowej	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zakres średnic, μm	0-7	7-14	14-21	21-28	28-35	35-42	42-49	49-56	56-63	63-70	70-77	77-84
Środek przedziału, μm	3,5	10,5	17,5	24,5	31,5	38,5	45,5	52,5	59,5	66,5	73,5	80,5
liczba kropeł w klasach	2	6	13	18	25	30	42	60	48	29	24	12
Liczba wszystkich kropeł	309											
Udział ilościowy, %	0,65	1,94	4,21	5,83	8,09	9,71	13,59	19,42	15,53	9,39	7,77	3,88
Udział sumaryczny, %	0,65	2,59	6,80	12,62	20,71	30,42	44,01	63,43	78,96	88,35	96,12	100



Rys. 1. Krzywa rozkładu ilościowego i krzywa sumarycznego rozkładu ilościowego kropeł

W analogiczny sposób powstają wykresy dotyczące rozkładu powierzchni, rozkładu objętości i masy kropeł. Więcej informacji na temat wyznaczania parametrów rozpylonej strugi i funkcji ilościowego rozkładu kropeł znajduje się w pracach [1-3, 6]

4. POMIARY WYBRANYCH PARAMETRÓW ROZPYLONEJ STRUGI KROPEL

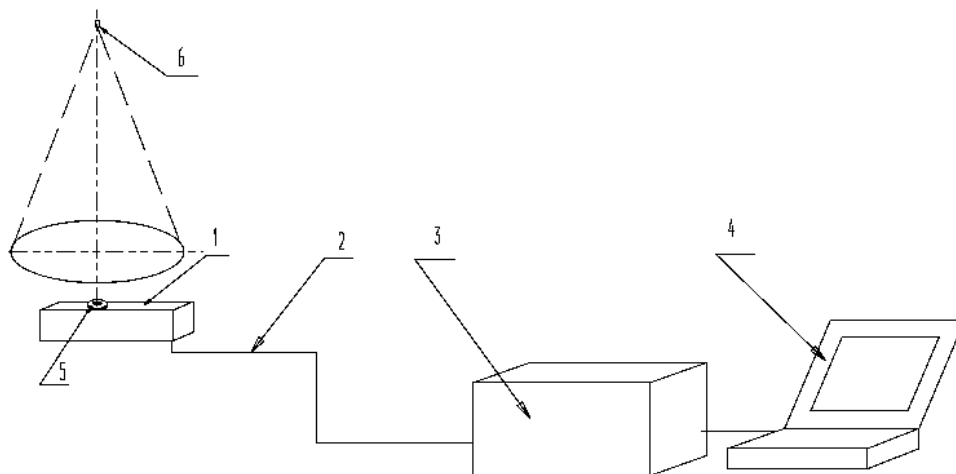
4.1. Opis metody badawczej realizowanej przez analizator AWK D System

Analizator AWK jest przyrządem do pomiaru rozkładu rozpylonych i swobodnie opadających kropeł cieczy w powietrzu, w zakresie od 10 μm do 1 mm. Może być stosowany w warunkach laboratoryjnych lub poligonowych.

Metoda pomiaru rozpylonych kropeł cieczy realizowana przez analizator *AWKD System* oparta jest o zjawisko fotoelektryczne. Technika pomiaru polega na tym, że strumień promieniowania podczerwonego w czujniku jest rozpraszany przez przelatujące przez strefę pomiaru krople. Każdej kropki odpowiada impuls elektryczny detektora fotoelektrycznego proporcjonalny do jej wielkości. Zbiór kropeł jest pierwotnie mierzony i przypisany do 4096 klas wymiarowych. Prędkość zliczania kropeł wynosi ok. 10 tys. na sekundę. Po pomiarze zbiór kropeł jest kalibrowany (przeliczany) na 256 klas wymiarowych, dostępnych dla użytkownika. Pomiar odbywa się automatycznie, a wyniki pomiarów z sondy pomiarowej są zdalnie pobierane przez kartę przetwornika A/C IPS i rejestrowane w pamięci komputera. W trakcie badania jest dostępna wizualizacja pomiarów on-line na monitorze. Pomiar i obróbka danych pomiarowych możliwa jest dzięki dołączonemu oprogramowaniu zawierającemu program AWK, program OSCYLOSKOP, program COMPARE i programy kalibracyjne.

4.2. Budowa systemu AWK D

Analizator AWK D składa się z sondy {1}, w której znajduje się przetwornik fotoelektryczny połączony z elektronicznym blokiem pomiarowym EBP {3} kablem {2}. W EBP {3} formowane są impulsy elektryczne, proporcjonalne do średnic kropeł. EBP połączony jest przez kabel USB 2.0. do komputera {4}, gdzie analizowany jest kształt i amplituda impulsu. Wyniki pomiaru są zapisywane w pamięci komputera. Wyniki przedstawiane są na ekranie, a sterowanie przyrządem odbywa się za pomocą klawiatury. Sonda {1} ma trzy wymienne wloty kropeł {5}, których używa się w zależności od koncentracji i wielkości kropeł. Koncentracja kropeł zależna jest od natężenia przepływu cieczy w rozpylaczu i odległości badanego rozpylacza {6} od sondy {1}.



Rys. 2. Schemat budowy systemu AWK

4.3. Uruchamianie sytemu AWK D

W celu uruchomienia systemu należy wykonać następujące czynności:

- Sprawdzić czy sonda jest prawidłowo zamontowana i ustawiona;
- Włączyć komputer i zalogować się do MS Windows;
- Włączyć przycisk sieciowy z tyłu EBP i sprawdzić czy świeci się zielona dioda READY – oznaczająca, że przyrząd jest gotowy do pomiaru.
Uwaga! – świecąca czerwona dioda oznacza, że przyrząd skończył pomiar;
- Wybrać odpowiedni program obsługi analizatora AWKD.

Do obsługi Analizatora AWK służą podstawowe trzy programy komputerowe:

- OSCYLOSKOP – program do kontroli pracy analizatora, może służyć również do obserwacji pojedynczych cząstek;
- AWK D – właściwy program pomiarowo-obliczeniowy;
- COMPARE – program do porównań wyników pomiarów wykonanych przy pomocy sondy AWK D.

UWAGA!

W danej chwili można używać wyłącznie jednego programu.

4.4. Pomiary przy pomocy programu AWKD

Po wybraniu programu AWKD rozpoczyna on pracę od testowania karty przetwornika A/C (A/D). Sygnalizowane są ewentualne błędy lub brak karty. W przypadku braku karty nie można wykonać pomiaru. Można natomiast wykonywać obliczenia i wydruki, oraz wczytywać zapisane wcześniej pomiary.

W przypadku błędu należy wyłączyć komputer oraz blok elektroniczny, sprawdzić gniazda wszystkich kabli i włączyć sprzęt ponownie.

Jeżeli test systemu wypadł pozytywnie na ekranie pojawi się okno główne programu AWKD.

Główne okno programu AWKD wygląda następująco:



Okno to zawiera informacje o podstawowych ustawieniach programu. Znajdują się tu informacje o aktualnych podstawowych ustawieniach i parametrach programu oraz lokalizacje katalo-

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

gów, w których zapisywane są dane. Widać także nazwę ostatnio zmierzonych / wczytanych wyników pomiarów, które program zapamiętał.

Poszczególne menu programu AWKD można wybrać przez kliknięcie na nim lewym klawiszem myszy lub z klawiatury po naciśnięciu klawisza Alt + podkreślona litera w każdym z menu.

4.4.1. Menu USTAWIENIA



Polecenie **Parametry Pomiaru** składa się z 2 zakładek – **Opis pomiaru** i **Parametry**.

Opis pomiaru służy do identyfikacji wykonywanego pomiaru, UWAGA! **Nazwa pliku z wynikami** musi być za każdym razem zmieniona. **Nazwa pliku z wynikami** może mieć do 8 znaków. Jeżeli nazwa pliku pozostanie taka sama, nowy pomiar zostanie nadpisany na poprzedni i wcześniejsze dane pomiarowe zostaną utracone.

Nazwa Pomiaru może być dowolnie długa i służy lepszej identyfikacji pomiaru w bazie. Pozostałe pola służą do szczegółowego opisu pomiaru.

Uwaga!!! Polecenia: **Waga całkowita**, **Waga nadziarna**, ... nie dotyczą AWKD !!!.

W zakładce **parametry** można ustalić niektóre parametry sterujące pomiarem oraz dotyczące wizualizacji pomiaru. Ważniejsze z nich to:

Parametry

Wykres

☒ Histogram

☐ Wykres liniowy

Lupa

Klasy

Zakres

Dmax 2866

Zakończenie pomiaru

Ilość

Czas [s]

Wykres - sposób wizualizacji pomiaru,

Klasy - ilość klas na jakie dzielony jest zakres pomiarowy,

Zakres - umożliwia ustawienie zakresu średnicy maksymalnej $D_{\max}$ podanej programowo,

Zakończenie pomiaru - określa warunki brzegowe, po osiągnięciu których automatycznie zostanie zakończony pomiar (do wyboru mamy ilość zliczonych kropeł lub czas pomiaru).

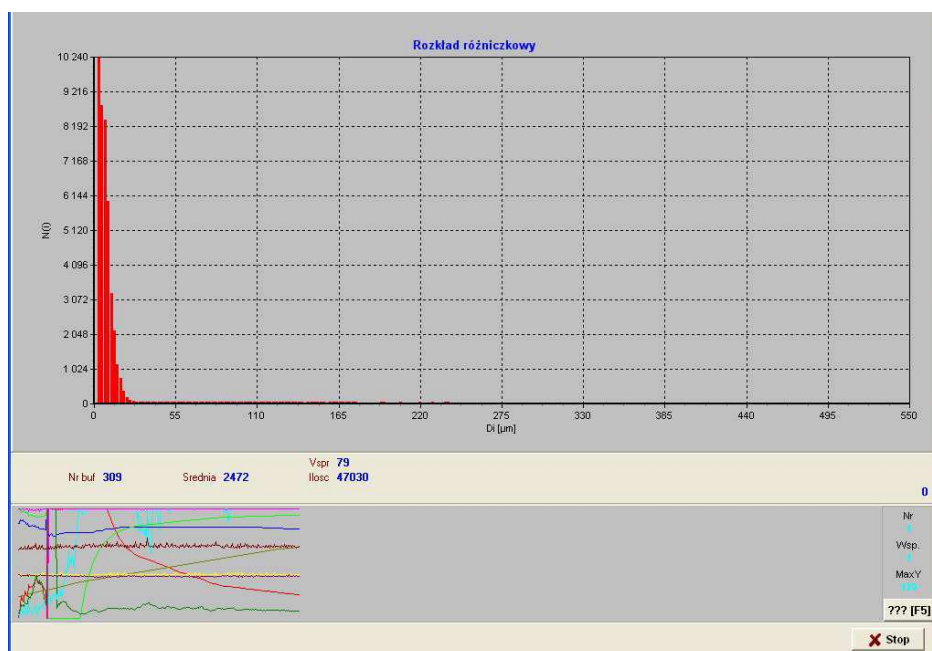
Polecenie **Zapisz parametry** umożliwia zapisanie wprowadzonych zmian do zbioru parametrów. Należy odpowiednio nazwać zbiór (plik) z parametrami. Nazwa pliku sterującego może mieć do 8 znaków.

4.4.2. Menu POMIAR – właściwy pomiar widma rozpylonych kropeł

Polecenie Pomiar - Ten etap stanowi właściwy pomiar. Przed jego wykonaniem powinny być przygotowane i włączone rozpylacze. Na ekranie pojawi się układ współrzędnych z podziałką **Ni[sztuk]** na osi Y oraz **Di[mm]** na osi X.

Aby rozpocząć pomiar należy kliknąć przycisk **Start**.

Podczas pomiaru w czasie rzeczywistym rysowany jest histogram wielkości cząstek.



Liczby znajdujące się pod wykresem oznaczają:

Nr buf - numer bufora do którego zapisywane są w danym momencie informacje,

JAKOŚĆ ROZPYLANIA PALIW CIEKŁYCH

Opracował: dr inż. Tadeusz Mączka

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

Średnia - średnia ilość cząstek zliczana na sekundę,

Vspr - prędkość sprężarki (maksymalna wynosi 120),

Ilość - sumaryczna ilość cząstek zliczona w czasie pomiaru.

Przez kliknięcie na klawisz F5 można rozwinąć / schować legendę opisującą poszczególne linie na wykresie parametrowa dozowania.

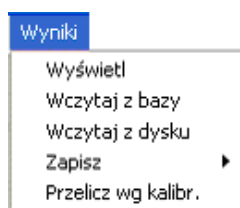
Zakończenie pomiaru - pomiar można zakończyć w następujący sposób:

- ❖ Zakończenie pomiaru automatycznie przez system na po spełnieniu warunków określonych w menu **Ustawienia** w zakładce **parametry**. Koniec pomiaru sygnalizowany jest zapaleniem się czerwonej diody na EBP.
- ❖ zakończenie wymuszone, istnieje możliwość zakończenia pomiaru klawiszem ESC lub po kliknięciu na klawisz **Stop**.

Po zakończeniu pomiaru histogram wielkości cząstek można wydrukować (ikona **Drukuj**) lub zapisać do pliku graficznego (ikona dyskietki i napis **plik**). Po kliknięciu na ikonę **OK** wyniki zostaną automatycznie zapisane. Kliknięcie na ikonę **Anuluj** oznacza rezygnację z zapisania wyników pomiarów.

4.4.3. Menu WYNIKI

Do ważniejszych poleceń menu **Wyniki** zaliczamy:



Wyświetl - polecenie to wyświetla wyniki pomiaru – aktualnie wykonanego lub wczytanego z pamięci komputera.

Wczytaj z bazy - polecenie to umożliwia wczytanie wcześniej zapamiętanych wyników pomiarowych, zapisanych w bazie, tj. w aktualnym katalogu z pomiarami.

Wczytaj z dysku - polecenie to umożliwia wczytanie wcześniej zapamiętanych wyników pomiarowych, zapisanych na 256 klas wymiarowych, w dowolnym miejscu na komputerze.

Po wczytaniu pliku z danymi pomiarowymi poleceniem **Wczytaj z bazy** lub **Wczytaj z dysku** i wyświetleniu ich poleceniem **Wyświetl** mamy do dyspozycji zakładki **Opis** (zakładka Opis zawiera dane podane w menu **Ustawienia** w poleceniu **Opis pomiaru**).

Zakładka **Tabela D** zawiera podstawowe średnie wyniki wykonanego pomiaru mianowicie:

Ilość – to ilość zliczonych cząstek ogółem

Czas – to czas trwania pomiaru

Dn – średnia wielkość cząstki w rozkładzie ilościowym [μm]

Ds – średnia wielkość cząstki w rozkładzie powierzchniowym [μm]

Dv – średnia wielkość cząstki w rozkładzie objętościowym [μm]

Da – średnia Sautera [μm] (średnia objętościowa średnica zważona wg powierzchni)

Dgeo – średnia geometryczna [μm]

Dmed – mediana (średnica cząstek wyznaczająca dokładnie 50% rozkładu ilościowego)

Dmod – moda (średnica cząstek najbardziej znaczących w rozkładzie ilościowym)

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

Opis	Tabela D	Tabela Bin	Wykres Ai	Wykres Bn	Wykres Bs	Wykres Bv
Ilość		1488060				
Czas		205,0				
Dn		9,4				
Ds		11,0				
Dv		12,6				
Da		16,4				
Dgeo		7,8				
Dmed		8,2				
Dmod		6,2				

SSC = 2.765
 WK = 3.406
 WObj = 245.336

Zakładka **Tabela Bin** przedstawia wyniki pomiarów rozdzielone na równe 256, 64, 32, 24, 16 lub 8 klas wymiarowych. Zawiera one następujące informacje:

Ni – liczba kropeł w danej klasie,

Ai – udział ilościowy (procentowy) kropeł z poszczególnych klas,

Bn – udział ilościowy (procentowy) kropeł względem średnicy,

Bs – udział ilościowy (procentowy) kropeł względem powierzchni,

Bv – udział ilościowy (procentowy) kropeł względem objętości.

Opis	Tabela D	Tabela Bin	Wykres Ai	Wykres Bn	Wykres Bs	Wykres Bv
No	D (i)	Ni	Ai	Bn	Bs	Bv
	[µm]		[%]	[%]	[%]	[%]
	Dmed	8,2	7,8	11,8	14,9	18,5
	Dmod	6,2	6,6	10,2	12,6	15,9
1	0.66	21649	1.45	0.20	0.02	0.00
2	1.52	45179	1.58	0.29	0.04	0.00
3	1.93	73159	1.88	0.42	0.07	0.01
4	2.33	106045	2.21	0.59	0.12	0.02
5	2.73	140831	2.34	0.73	0.17	0.03
6	3.14	181248	2.72	0.96	0.25	0.05
7	3.54	221783	2.72	1.08	0.32	0.07
8	3.94	265868	2.96	1.30	0.42	0.11
9	4.35	311733	3.08	1.49	0.53	0.15
10	4.75	359240	3.19	1.68	0.65	0.20

4.4.4. Menu OPCJE

Polecenia **Parametry** opisują parametry pomiaru.

Polecenie **Wykresy** pozwala zmienić wygląd i skalę wykresu i dopasować go do indywidualnych preferencji użytkownika.

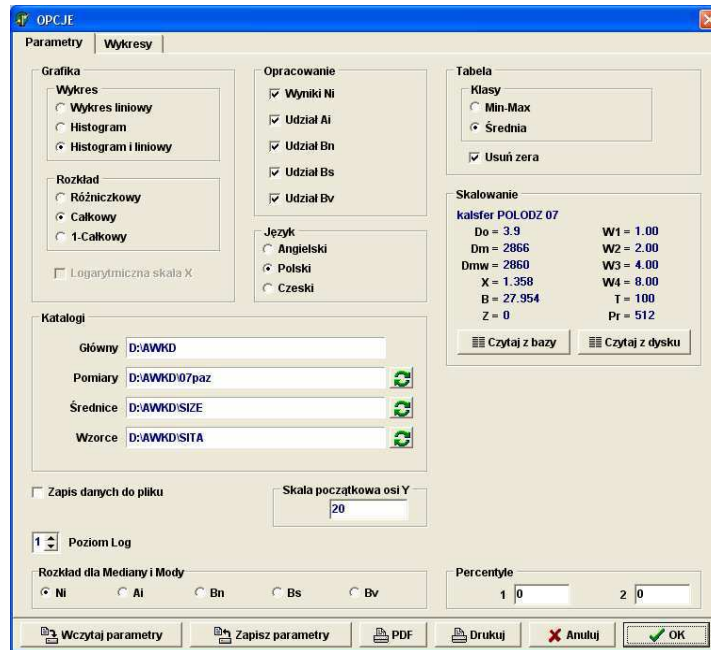
UWAGA!!!

Z pozostałych funkcji menu należy korzystać po zapoznaniu się z instrukcją [7].

Funkcje **Serwis** i **Konfiguracja** są przeznaczone dla serwisu.

JAKOŚĆ ROZPYLANIA PALIW CIEKŁYCH

Opracował: dr inż. Tadeusz Mączka



4.5 . Analiza wyników przy pomocy programu COMPARE

Program ten umożliwia użytkownikowi:

- Umieszczenie w celu porównania w jednej tabeli lub na jednym wykresie wyników pomiarów wielu prób (ze względu na wielkość tabeli i czytelność wykresów ilość wyników do jednoczesnego porównania ograniczono do 10),
- Porównywanie wyników pomiarów wykonywanych w różnych terminach, różniące się zakresami pomiarowymi, liczbą klas oraz kalibracją,
- Kasowanie zbiorów zawierające wyniki, które po porównaniu użytkownik uzna za niepotrzebne,
- Drukowanie tabel i wykresów będących wynikiem porównań.

4.5.1. Obsługa programu COMPARE

Wywołać program COMPARE, poprzez kliknięcie na skrót umieszczony na pulpicie. Na ekranie ukaze się menu główne:

W menu głównym mamy dostępne ikony:

Dane - wybór zbiorów zawierających wyniki pomiarów oraz konfigurację sit bezpośrednio z dysku

Baza - wybór zbiorów zawierających wyniki pomiarów oraz konfigurację sit za pośrednictwem bazy danych (widać opisy zbiorów),

Opcje - wybór sposobu prezentacji w tabeli i grafice;

Tabela - prezentacja wyników w tabeli;

Grafika - prezentacja graficzna wyników;

Wyjście - zakończenie programu.

Aby rozpocząć pracę w programie należy określić katalog danych, w menu **Baza** lub **Dane** wybrać do 10 plików przeznaczonych do analizy z miejsca na dysku gdzie były zapisane (katalogu) i zapisać wybory klikając na polecenie OK.

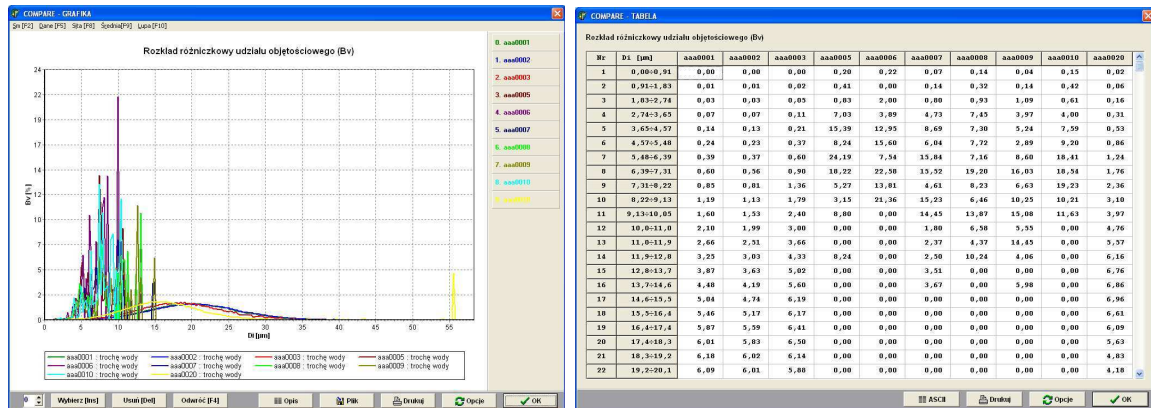
Menu **Dane** pozwala na wybór zbiorów zawierających wyniki pomiarów oraz konfigurację sit bezpośrednio z dysku.

Dowolny zakres - można wybrać do porównania dowolne pomiary (tylko na wykresie);

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

Jeden zakres - można wybrać do porównania pomiary o tym samym Dm (zakres pierwszego wybranego zbioru z wynikami określa pozostałe), umożliwia prezentację wyników na wykresie, w tabeli oraz wyliczanie sumy i wartości średniej zbiorów.

Po wyborze wyników do analizy należy wybrać sposób prezentacji wyników z menu **Tabela** lub **Grafika**. Wyniki można wydrukować, zapisać lub obrabiać intuicyjnie wybierając ikonę z poleceniem.

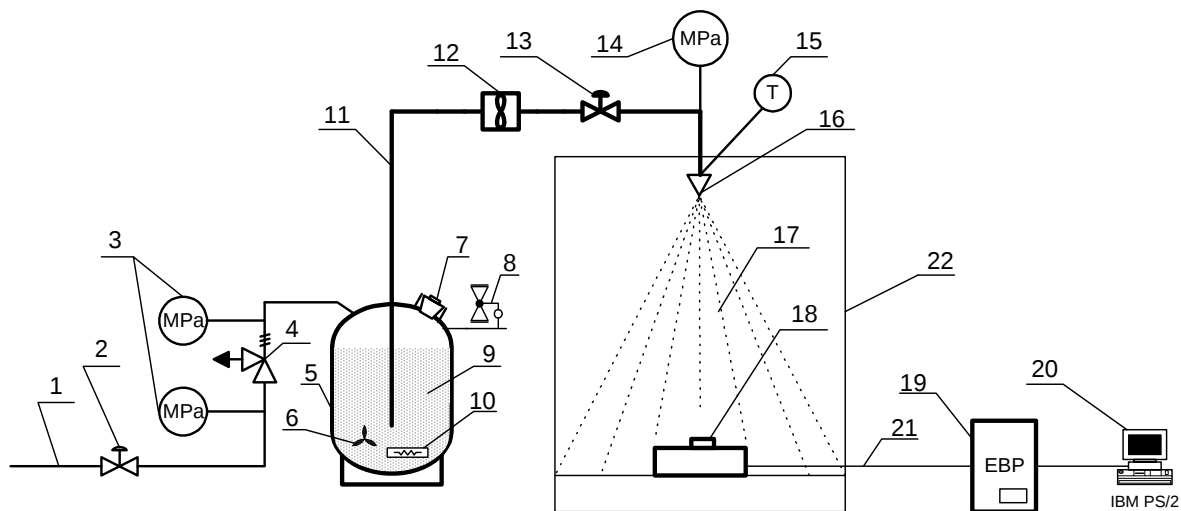


Aby zakończyć program COMPARE najpierw trzeba wyjść do Menu Głównego. Pracę programu można zakończyć poprzez: kliknięcie myszą na ikonę końca (krzyżyk) naciśnięcie jednocześnie klawiszy Alt + F4 lub wybranie menu **Wyjścia**.

5. PROGRAM BADAŃ

5.1. Przygotowanie układu eksperymentalnego do badania

Zidentyfikować i sprawdzić poprawność połączenia instalacji pneumatycznej i hydraulicznej stanowiska badawczego zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3. Poprosić opiekuna dydaktycznego o kontrolę układów pneumatycznego i hydraulicznego.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania jakości rozpylania

1 – instalacja sprężonego powietrza 0-0,6 MPa, 2 –pneumatyczny zawór odcinający, 3 – manometry gazowe, 4 – reduktor ciśnienia, 5 – zbiornik hydroforowy, 6 – mieszałdo (opcja), 7 – otwór wlewowo-rewizyjny, 8 – zawór bezpieczeństwa, 9 – rozpylana ciecz, 10 – grzejnik (opcja), 11 – instalacja hydrauliczna, 12 – miernik przepływu (opcja), 13 – zawór spryskiwacza, 14 – manometr cieczowy (opcja), 15 – czujnik temperatury (opcja), 16 – dysza, 17 – struga rozpylonej cieczy, 18 – sonda, 19 – elektroniczny blok pomiarowy, 20 komputer z oprogramowaniem, 21 - kabel sygnałowy 20 m, 22 – komora natryskowa

JAKOŚĆ ROZPYLANIA PALIW CIEKŁYCH

Opracował: dr inż. Tadeusz Mączka

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

Przystąpić do zidentyfikowania poszczególnych części składowych systemu pomiarowego AWKD, sprawdzić poprawność połączeń. Następnie po sprawdzeniu przez opiekuna dydaktycznego i na jego wyraźne polecenie uruchomić system. Następnie zapoznać się z praktyczną obsługą programów AWKD i COMPARE.

5.2. Procedura wykonania pomiarów

Po sprawdzeniu przez opiekuna dydaktycznego i na jego wyraźne polecenie wykonać procedurę sprawdzenia poprawności działania układu rozpylania cieczy i przystąpić do badań. Czynności sprawdzające układu badawczego do badania jakości rozpylania wykonać w kolejności:

1. Wybrać i zamontować odpowiednią dyszę do badań;
2. Uzupełnić w zbiorniku hydroforowym (w razie konieczności lub na polecenie opiekuna dydaktycznego) czynnik do rozpylania (wskazaną ciecz);
3. Pokrętkę nastawy reduktora ustawić tak aby za reduktorem panowało niskie ciśnienie po podłączeniu do instalacji sprężonego powietrza (w pozycji wykręconej, wykręcamy w lewo);
4. Sprawdzić poprawność zamknięcia otworu wlewowo-rewizyjnego;
5. Podać ciśnienie do układu pneumatycznego przez otwarcie zaworu pneumatycznego;
6. Ustawić żądane ciśnienie za reduktorem np. 0,05 MPa;

UWAGA!!! Za reduktorem nie przekraczać ciśnienia 0,4 MPa

7. Otworzyć zawór spryskiwacza;
8. Ocenić wizualnie jakość rozpylania;
9. Zamknąć zawór spryskiwacza;
10. Uruchomić program AWKD i ustawić odpowiednie parametry pomiaru zgodnie z opisem podanym w punkcie 4.4 niniejszego opracowania;
11. Ponownie otworzyć zawór spryskiwacza;
12. Ustawić żądane ciśnienie za reduktorem;
13. Po ustabilizowaniu ciśnienia uruchomić rejestrację wyników (kliknięcie ikony **Pomiar**);
14. Zapisać i/lub wydrukować dane pomiarowe;
15. Przystąpić do kolejnej rejestracji pomiarów zmieniając np. ciśnienie lub inne parametry procesu rozpylania;
16. Po zakończeniu pomiarów zamknąć program AWKD, zamknąć zawór spryskiwacza, zredukować ciśnienie za reduktorem do ok. 0.05 MPa, zamknąć zawór pneumatyczny.
17. Uruchomić program COMPARE, a następnie porównać otrzymane wyniki i przeprowadzić ich analizę.

5.3. Zadania do wykonania

- Dla wybranej dyszy wykonać serię pomiarów jakości rozpylania w funkcji ciśnienia rozpylania (np. 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 MPa) – przyjąć stałość temperatury i ciśnienia w trakcie badań;
- Określić wartość kąta rozpylania w zależności od ciśnienia rozpylania;
- Przy pomocy programu COMPARE wykonać krzywe rozkładu ilościowego i/lub krzywa sumarycznego rozkładu ilościowego kropel i na ich podstawie przeprowadzić dyskusję dotyczącą wpływu ciśnienia na jakość rozpylania;
- 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;
- Przeprowadzić analizę otrzymanych wyników badań jakości rozpylania i podać wnioski.

LABORATORIUM SPALANIA I PALIW

Uwaga!!! Opiekun może na bieżąco zmodyfikować listę zadań.

Z przeprowadzonego ćwiczenia należy wykonać sprawozdanie, które jest podstawą do jego zaliczenia.

Bibliografia

- [1] Orzechowski Z, Prywer J., *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylonej cieczy*, WNT, Warszawa 2008
- [2] Kordylewski W. i inni, *Spalanie i paliwa*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [3] Wilk R.K. i inni, *Laboratorium techniki spalania*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001
- [4] Pigoń K, Ruziewicz Z., *Chemia fizyczna*, PWN, Warszawa 1980
- [5] Żuczkowski R. i inni, *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki*, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989
- [6] Gałaj J., Kieliszek S., Drzymała T., *Badanie wpływu zawirowania strumienia centralnego wybranej dyszy na parametry strumienia rozpylonego*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 5/2006
- [7] KAMIKA Instruments, AWKD System Analizator do pomiaru rozpylonych kropel cieczy, Instrukcja instalacji i obsługi , Warszawa 2008