



Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowej Akademii Technicznej



INSTYTUT POJAZDÓW I TRANSPORTU
ZAKŁAD SILNIKÓW I INŻYNIERII EKSPLOATACJI

Instrukcja do ćwiczenia T – 05

Pomiar parametrów przepływu płynu różnymi metodami

Opracował:

kpt. mgr. inż. Adrian Trzeciak

WARSZAWA 2022

1. Wprowadzenie

Pomiar strumienia przepływu substancji jest typowym pomiarem pośrednim. W związku z tym jednym z kryteriów podziału urządzeń do pomiaru strumienia przepływu substancji jest wielkości fizyczna mierzona w sposób bezpośredni. Można na tej podstawie wyróżnić między innymi:

- Anemometry skrzydełkowe
- Anemometry ciśnieniowe – np. rurka Pitota, rurka Prandla
- Termoanemometry,
- Przepływomierze pływakowe
- Przepływomierze zwężkowe
- Przepływomierze ultradźwiękowe
- Przepływomierze elektromagnetyczne
- Przepływomierze Coriolisa

Strumień przepływu substancji można wyrazić zarówno w jednostkach objętości, jak i masy:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

gdzie:

$\dot{V}$ – objętościowy strumień przepływu,

V – objętość substancji

$\dot{m}$ – masowy strumień przepływu,

m – masa substancji

t - czas

Wielkości te są powiązane ze sobą przez gęstość (ρ) przepływającej substancji:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

W ćwiczeniu laboratoryjnym parametry opisujące przepływ substancji będą wyznaczane za pomocą:

- Zwężki
- Anemometru skrzydełkowego
- Rurki Prandtla

Za pomocą zwężki oraz anemometru skrzydełkowego wyznacza się parametry przepływu średnie dla całego badanego przekroju. Korzystając z sondy ciśnienia w postaci rurki Prandtla wyznacza się parametry punkcie w którym umieszczona jest sonda.

Podczas pomiaru z wykorzystaniem zwężki lub rurki Prandtla bezpośredniemu pomiarowi podlegają wartości ciśnienia przepływającego płynu. Na podstawie tego pomiaru można wyznaczyć wartość prędkości. Należy przy tym pamiętać, że przy zastosowaniu zwężki wyznaczy się wartość prędkość średniej, a przy pomiarze z wykorzystaniem rurki Prandtla – prędkości lokalnej. Zależność między zmierzonym ciśnieniem, a prędkością przedstawia **zachowania energii dla linii prądu** wyrażona równaniem Bernouliego:

$$d\left(\frac{v^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} - dU = 0$$

Zakładając, że badany płyn jest nieściśliwy (ma stałą gęstość), to równanie powyższe można zapisać:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - gz = const$$

lub:

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + p - \rho \cdot g \cdot z = const$$

Gdzie:

$\rho \cdot g \cdot z$ - Człon charakteryzujący składową energii potencjalnej związany z wysokością „z” linii prądu

p – ciśnienie statyczne – składowa członu opisującego energię potencjalną wynikająca z ciśnienia statycznego płynu

$\frac{\rho \cdot v^2}{2}$ – ciśnienie dynamiczne – człon charakteryzujący energię kinetyczną elementu płynu

v – prędkość

Założenie braku ściśliwości jest prawdziwe dla cieczy oraz gazów poruszających się z niską prędkością. Należy zwrócić uwagę, iż w powyższym wzorze dodajemy wartości ciśnienia

wyrażone w Pa, zatem nie można poszczególnych członów równania traktować dosłownie jako energię kinetyczną i potencjalną ponieważ nie są wyrażone w jednostkach energii.

Często w rozważaniach zmiany wysokości linii prądu są pomijalne, w związku z tym równanie Bernouliego można zapisać:

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + p = \text{const}$$

Stała po prawej stronie równania reprezentuje wielkość zwaną ciśnieniem całkowitym. Stąd można napisać:

$$\frac{\rho \cdot v^2}{2} + p = p_c$$

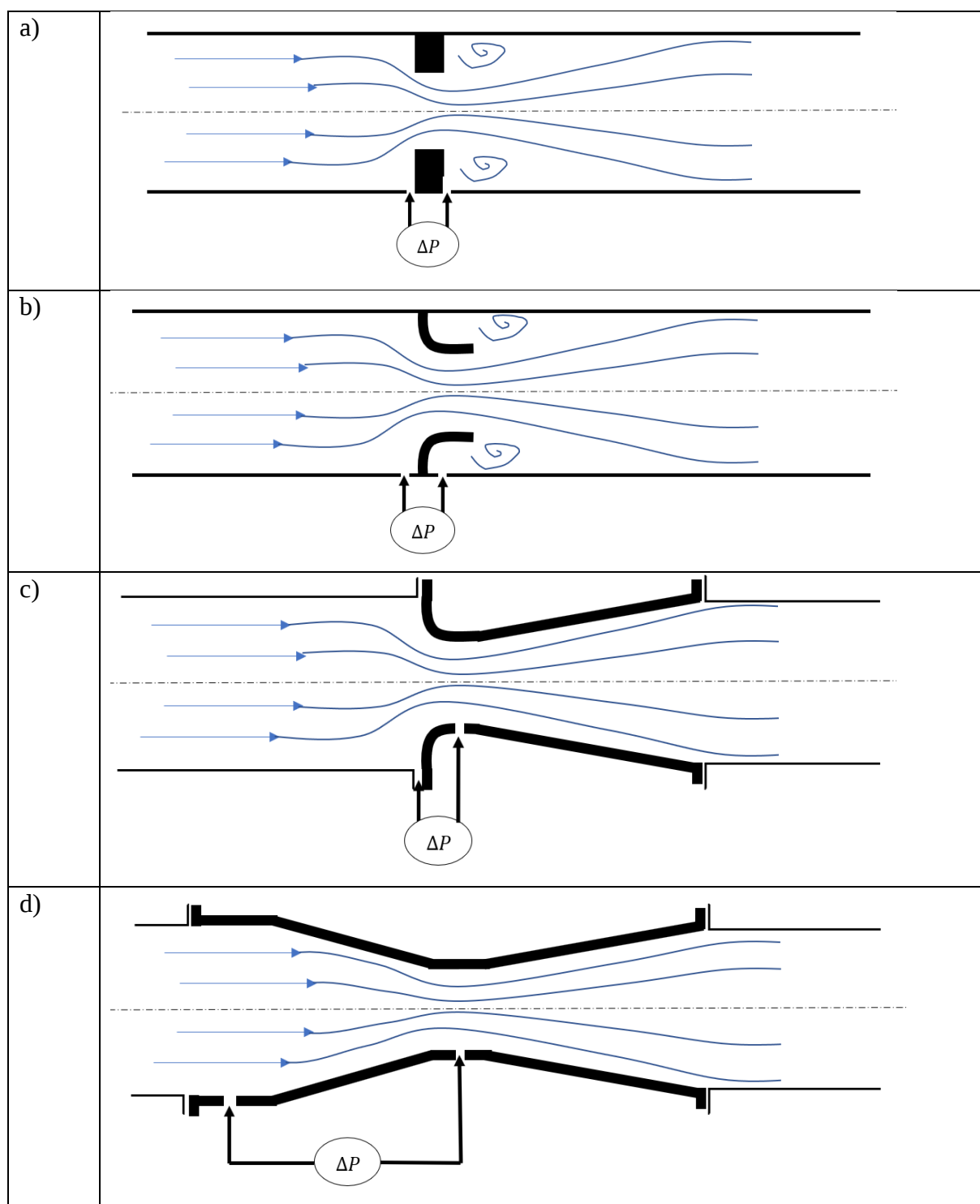
Wykonując pomiar ciśnienia nie jesteśmy w stanie oszacować wartości przepływu dysponując tylko równaniem Bernouliego. Konieczne jest wykorzystanie znanej z termodynamiki zasady zachowania masy. W mechanice płynów powszechnie nazywana jest ona równaniem ciągłości. Równanie to w uproszczeniu można zapisać:

$$\dot{V} = v \cdot A$$

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

2. Zwężki pomiarowe, kryzy

Przepływomierze zwężkowe zwane również zmiennociśnieniowymi są stosunkowo tanimi i szeroko stosowanymi urządzeniami do pomiaru ilości przepływu cieczy lub gazu. Można wśród nich wyróżnić: kryzy, dysze ISO, dysze Venturiego, klasyczne dysze Venturiego. W przemyśle oraz do celów rozliczeniowych (np. w gazownictwie) najczęściej spotyka się pierwsze trzy rozwiązania. Klasyczne dysze Venturiego stosuje się głównie w laboratoriach.



Rysunek 1. Rodzaje zwężek pomiarowych.

a – kryza, b – dysza ISO, c – dysza Venturiego, d – klasyczna dysza Venturiego

Istota pomiaru metodą zwężkową polega na wprowadzeniu do rurociągu przewężenia przekroju, powodującego przewężenie strumienia przepływającego płynu. W wyniku tego następuje wzrost prędkości płynu w przewężeniu, co skutkuje wzrostem ciśnienia dynamicznego. W konsekwencji, jeżeli ma być spełnione równanie Bernoulliego ciśnienie statyczne „ p ” – musi zmaleć. Różnica wartości ciśnienia przed i za przewężeniem Δp jest

podstawą do wyznaczenia prędkości przepływu, a po rozwiązaniu układu równań: Bernouliego oraz ciągłości można wyznaczyć:

$$\dot{V} = \frac{C \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$
$$\dot{m} = \frac{C \cdot \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

Gdzie:

- C – współczynnik przepływu – uwzględnia wpływ kształtu rozkładu prędkości płynu wzdłuż promienia zwężki. Dla danej zwężki wyznaczany doświadczalnie.
- ε – bezwymiarowa liczba ekspansji. Uwzględnia zmianę gęstości płynu przed i w przewężeniu. Można go wyznaczyć z wykresów tablic zawartych w PN – EN ISO 5167-1 lub na podstawie wzoru empirycznego.
- β – przewężenie - bezwymiarowy parametr zwężki. Stosunek średnicy średnicy przewężenia do średnicy przed przewężeniem.

3. Anemometry

Anemometry to przyrządy do pomiaru prędkości płynu. Mogą mierzyć jej wartość lokalną lub średnią. Można wyróżnić anemometry:

- Spiętrzające (rurki spiętrzające) – np. sonda Prandtla.
- Mechaniczne - skrzydełkow
- Termoanemometry
- Anemometry laserowe

3a. Sonda Prandtla

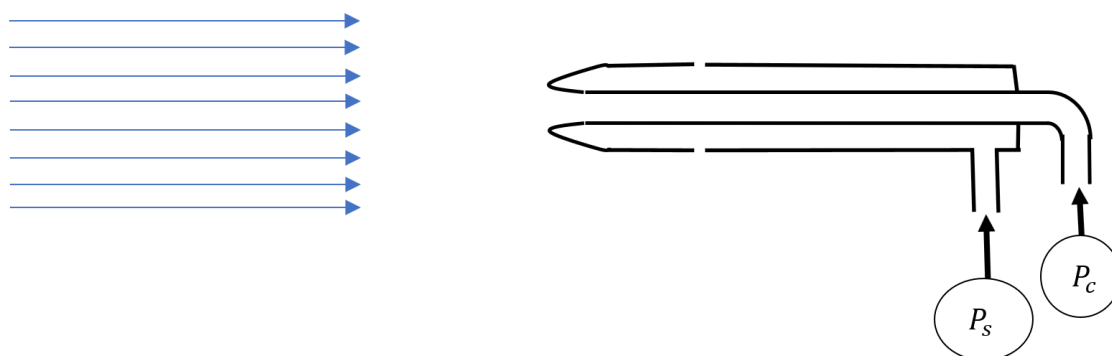
Anemometry spiętrzające mierzą wartość lokalną prędkości (w danym punkcie). Wykonane są one w postaci cienkich rurek o średnicy do kilku, kilkunastu milimetrów. Jeden koniec rurki połączony jest z manometrem, drugi umieszczony w przepływającym płynie. Ciśnienie całkowite mierzone jest po wyhamowaniu płynu do prędkości równej zero, stąd inaczej te sondy nazywa się „rurkami spiętrzającymi”. Początkowo stosowano je w lotnictwie. Na podstawie

zmierzonego w ten sposób ciśnienia wyznacza się prędkość, wysokość oraz prędkość pionową samolotu.

W przypadku zastosowań nie lotniczych, zalecenia związane z wyznaczaniem lokalnej wartości prędkości płynu z wykorzystaniem pomiaru ciśnienia przy zastosowaniu rurek spiętrzających zawiera norma PN-81/M-42366 oraz PN-M-42364:1981

Szczegóły dotyczące zastosowania rurek spiętrzających i anemometrów skrzydełkowych do pomiarów przepływów gazów zawarto w: PN-EN ISO 16911-1:2013-07. Emisja ze źródeł stacjonarnych – Manualne i automatyczne wyznaczanie prędkości i strumienia objętości w przewodach – Część 1: Manualna metoda odniesienia.

Jednym z przykładów rurki spiętrzającej jest rurka Prandtla. (rysunek 2) W czole zakończonej kuliści rurki znajduje się otwór, przez który mierzona jest wartość ciśnienia całkowitego „ p_c ”.



Rysunek 2. Schemat rurki Prandtla.

Na powierzchniach bocznych znajdują się otwory do pomiaru ciśnienia statycznego „ p ”. Na podstawie równania Bernoulliego łatwo określić, że:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p)}{\rho}}$$

Jeżeli uwzględnimy ściśliwość płynu to równanie komplikuje się do postaci:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p}{\rho} \left[\left(\frac{p_c}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]}$$

W przypadku powietrza wpływ ściśliwości można pominąć przy prędkości wynoszącej nawet 140 m/s.

3b. Anemomoetry mechaniczne - skrzydełkowe

Najpopularniejszym zastosowaniem anemometrów mechanicznych jest pomiar prędkości powietrza. Miarą prędkości jest liczba obrotów wirnika w jednostce czasu. Mierzą one średnią prędkość strumienia przepływającego przez płaszczyznę wirnika. Jeżeli pomiarowi podlega przepływ w kanale o średnicy zbliżonej do średnicy wirka – mierzą one wówczas prędkość średnią. Jeżeli pomiarowi podlega prędkość w kanale o średnicy znacznie większej niż średnica wirnika – można przyjąć, że pomiarowi podlega wartość lokalna prędkości. Na co dzień najczęściej można się spotkać z anemometrami:

- czasowymi (Robinsona) służącymi do pomiaru prędkości wiatru
- skrzydełkowymi - służącymi np. do pomiaru wydajności wentylacji



Rysunek 3. Anemometr czasowy - z lewej, Anemometr skrzydełkowy - z prawej.

3c. Termoanemomoetry

Termoanemometr jest przyrządem, który służy do pomiaru prędkości przepływu powietrza. Urządzenie działa w oparciu o zasadę konwekcyjnej wymiany ciepła pomiędzy sondą nagrzewaną energią elektryczną a omijającym ją gazem. Nagrzewany czujnik zmienia proporcję natężenia prądu i oporu włókna.

Termoanemometry to specjalistyczne przyrządy pomiarowe, które posiadają znacznie bardziej rozbudowane funkcje względem klasycznych anemometrów (wiatromierzy). Przede wszystkim wykorzystywane są do prowadzenia badań w zakresie aerodynamiki. Główna różnica konstrukcyjna w porównaniu z anemometrami, która jednocześnie zapewnia tym urządzeniom przedrostek -termo, wynika z funkcji chłodzenia czujnika.

Przy dokonywaniu pomiarów prędkości przemieszczenia się gazów czujnik termooanemometru zostaje na bieżąco chłodzony strumieniem powietrza. W wyniku tych działań dochodzi do zmiany rezystancji, która mierzona jest za pomocą mostka Wheatstone'a. Na podstawie tego parametru mierzona jest faktyczna wartość temperatury powietrza. Możliwość ta wynika bezpośrednio z liniowego charakteru zależności między zmianami termicznymi a rezystancją zainstalowanego detektora.

Wykorzystanie termooanemometrów: urządzenia pomiarowe mają szerokie zastosowanie laboratoryjno-badawcze. Służą do realizowania badań aerodynamicznych. Oprócz tego jednak stosowane są w usługach i przemyśle do profesjonalnego pomiaru prędkości poruszania się gazów. Taki sposób wykorzystywania tych mierników związany jest zazwyczaj z badaniem stanu instalacji i szybów wentylacyjnych. Ponadto termooanometry stosowane są do precyzyjnego pomiaru objętości powietrza, regulowania instalacji typu HVAC i wszelkich nieszczelności ciągów powietrznych.

4. Rozkład prędkości w rurze o przekroju kołowym.

Niezależnie od wybranej metody pomiaru parametrów przepływu szczególnie ważne jest by przepływ ten był ustabilizowany. Oznacza to, że w przypadku rurociągów należy przed sondą pomiarową umieścić odpowiedniej długości odcinek prosty (bez kolan i trójników). Dokładna długość tego odcinka zależy od rodzaju sondy pomiarowej (przepływomierza), oraz liczby Reynoldsa. Szczegółowe informacje są zawarte w normach. Z kolei w przypadku pomiarów przepływu zewnętrznego, w bezpośrednim otoczeniu sondy nie mogą znajdować się przeszkody zaburzające przepływ.

Należy również pamiętać, że w nawet w przypadku najbardziej stabilnego przepływu warstwy płynu płynące w okolicy ścianki będą miały inne (mniejsze) wartości prędkości niż te oddalone od ścianki. Przyjmuje się, że warstwa płynu znajdująca się w bezpośrednim kontakcie ze ścianką ma prędkość równą zero. Wynika to z istnienia sił lepkości w płynie i jest szczególnie ważne przy rozważaniu przepływu przez rurociąg.

Ogólne przyjętym kryterium wpływu lepkości (a także jednym z kryteriów podobieństwa przepływów) jest bezwymiarowa liczba Reynoldsa Re . Jest ona jednocześnie miarą stosunku występujących w płynie sił bezwładności do sił lepkości. Wyrażona jest wzorem:

$$Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu}$$

Gdzie:

v – prędkość charakterystyczna (w rurociągach przyjmuje się prędkość średnią)

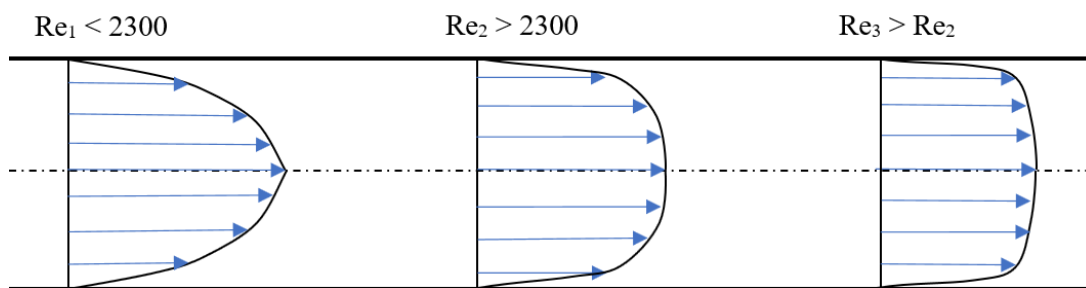
l – wymiar charakterystyczny (w rurociągach przyjmuje się średnicę hydrauliczną przewodu)

μ – lepkość dynamiczna płynu (dla danego płynu odczytywana z tablic – nie należy mylić z lepkością kinematyczną).

W zależności od liczby Re przepływ w rurociągach o przekroju kołowym można podzielić na:

- Laminarny $Re < 2300$
- Turbulentny $Re > 2300$

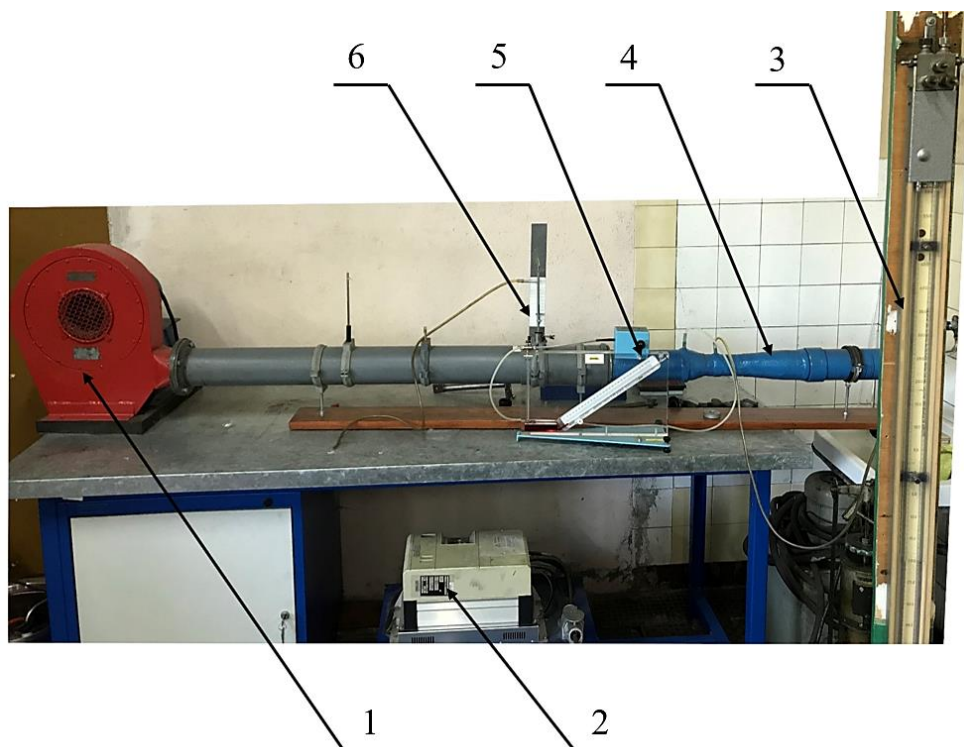
W miarę zwiększania się liczby Re profil prędkości w rurze o przekroju kołowym przechodzi z parabolicznego staje się coraz bardziej zbliżony do prostokątnego. Przykładowy profil w zależności od liczby Reynoldsa pokazano na rysunku 4. Należy mieć również na uwadze, że podział ten jest umowny i w wielu przypadkach możliwe jest utrzymanie laminarnego przepływu w rurociągu dla $Re > 2300$. W większości, dzieje się tak do $Re = 5000$, są jednak przypadki gdzie przepływ laminarny był utrzymany nawet przy $Re = 80\,000$.



Rysunek 4. Profile prędkości w rurze o przekroju kołowym w zależności od liczby Re .

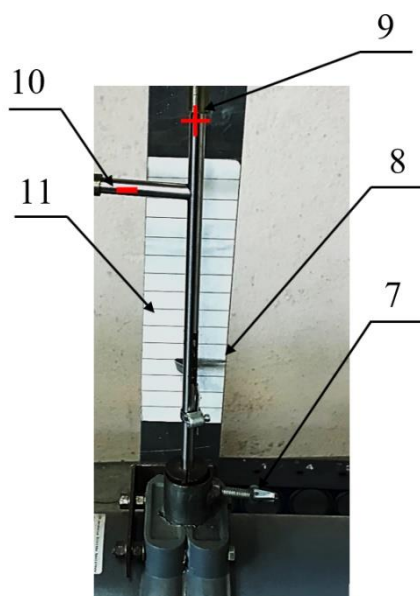
5. Przebieg Ćwiczenia:

Ogólny widok stanowiska przedstawiono na rysunku:



1. Dmuchawa
2. Falownik
3. Manometr cieczowy
4. Zwężka pomiarowa
5. Manometr cieczowy z rurką skośną
6. Mocowanie sondy Prandtla

Szczegóły mocowania sondy Prandtla:



- 7 - Śruba
- 8 – Wskaźnik położenia sondy
- 9 – Króciec ciśnienia całkowitego
- 10 – Króciec ciśnienia statycznego
- 11 - Podziałka

5a. Procedura pomiarowa:

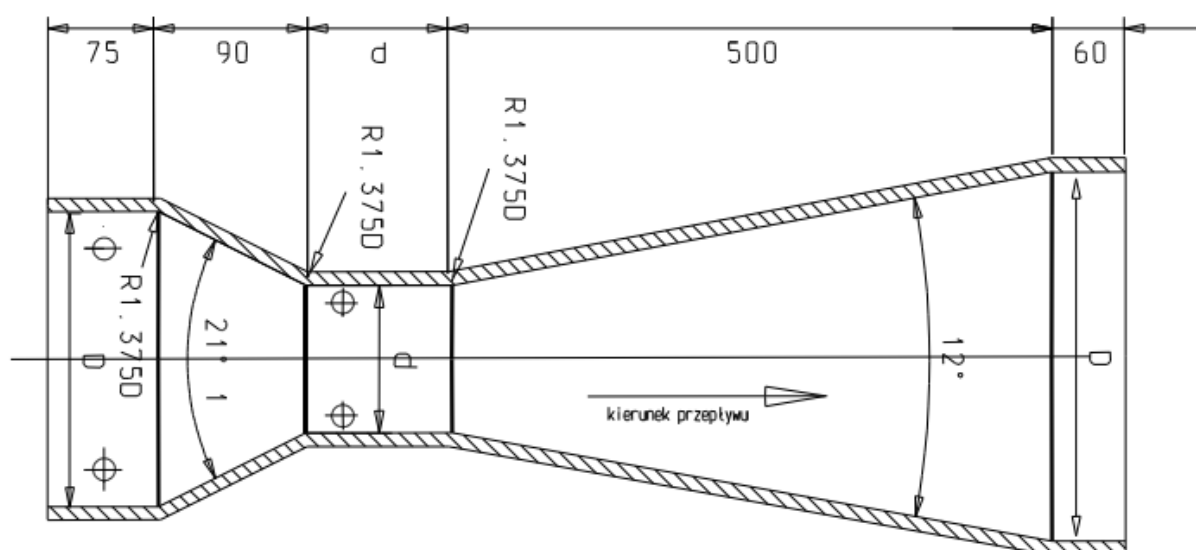
1. Przygotować protokół pomiarowy.
2. Odczytać ze stacji meteorologicznej znajdującej się w laboratorium parametry otaczającego powietrza (temperatura, wilgotność, ciśnienie).
3. Ustawić na falowniku (2) prędkość obrotową dmuchawy wskazaną przez prowadzącego.
4. Odczytać pięciokrotnie wartość ciśnienia statycznego:
 - a. Na wejściu do zwężki – za pomocą manometru cieczowego (5).
 - b. W gardzieli zwężki – za pomocą manometru cieczowego (3).
 - c. Odczytane wartości każdorazowo zapisać w protokole pomiarowym
5. Poluzować śrubę (7), ustawić rurkę Prandtla w skrajnym górnym położeniu, tak by wskaźnik (8) pokrywał się z jedną z działek na podziałce (11). Podłączyć manometr różnicowy dostarczony przez prowadzącego z odpowiednimi króćcami rurki Prandtla. Odczytać wartość ciśnienia dynamicznego. Obniżyć sondę o jedną działkę. Powtórzyć pomiar. Pomiar powtarzać do osiągnięcia skrajnego dolnego położenia sondy.
6. Zmierzyć prędkość powietrza wypływającego ze zwężki za pomocą anemometry skrzydełkowego dostarczonego przez prowadzącego.
7. W zależności od wskazówek prowadzącego procedurę z punktów 2 – 5 powtórzyć dla innych prędkości obrotowych dmuchawy.

5b Wskazówki do wykonania sprawozdania:

1. Sprawozdanie wykonać według szablonu dostępnego na stronie:
<https://www.wim.wat.edu.pl/index.php/dla-studentow-zajecia/materialy-do-zajec/category/16-materialy-dla-studentow-silniki-spalinowe.html>
2. Zapoznać się z zasadami wykonania sprawozdania charakterystyk silnika - są uniwersalne i obowiązują również do sprawozdań z laboratorium termodynamiki.
3. Obliczyć masowe i objętościowe natężenie przepływu powietrza przez zwężkę w jednostkach układu SI.
4. Na podstawie pomiarów ciśnienia dynamicznego wyznaczyć rozkład prędkości w rurze. Znajac masowe natężenie przepływu oraz średnicę kanału określić średnią prędkość przepływu (z równania ciągłości) i liczbę Reynoldsa. Na podstawie otrzymanego profilu prędkości oraz liczby Re określić czy przepływ jest laminarny czy turbulentny.
5. W zależności od wymagań prowadzącego przeprowadzić analizę błędów lub niepewności pomiaru.
6. Sporządzić wykres obrazujący profil prędkości w rurze. Ewentualnie inne wykresy zależnie od wymagań prowadzącego.

Załącznik 1.

Wymiary zwężki zabudowanej w stanowisku:



$d = 40 \text{ mm}$

$D = 80 \text{ mm}$

$C = 0,995$

Załącznik 2.

Wskazówki do określania ciśnienia względnego przy pomocy manometrów cieczowych.

