



Politechnika Wrocławska

Wydział Elektryczny,
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Laboratorium Przetwarzania i Analizy Sygnałów Elektrycznych
(bud A5, sala 310)

Instrukcja dla studentów Wydziału Chemicznego

Pomiary w aparaturze procesowej

Ćwiczenie 1

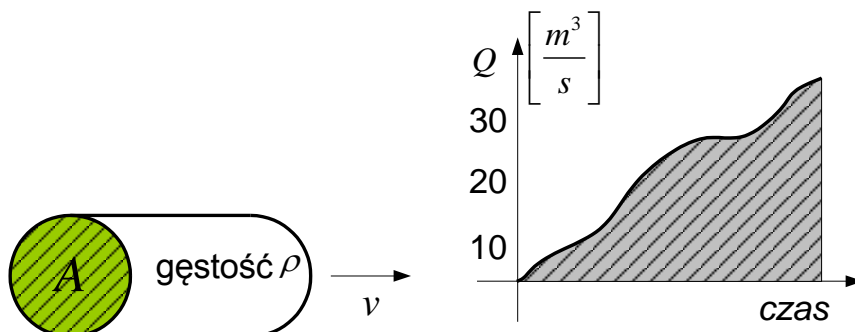
Pomiary natężenia przepływu gazów

I. Wstęp

Pomiary wielkości opisujących ilość płynów i gazów są bardzo powszechnie stosowane w celach rozliczeniowych w codziennym życiu (ilość zużytej wody, gazu, zatankowanego paliwa itp.). Pomiary te służą do rozliczeń finansowych.

Pomiary natężenia przepływu masowego oraz objętościowego cieczy i gazów należą do grupy najczęściej mierzonych wielkości w przemyśle przetwórczym.

Natężenie przepływu Q jest to ilość materiału przepływającego w jednostce czasu



Natężenie przepływu można wyrazić w objętości lub masie przepływającej w jednostce czasu. Wielkości te powiązane są gęstością przepływającego medium

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = v A \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_m = \frac{dm}{dt} = Q_v \rho \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Gdzie:

V - objętość; v – prędkość; m – masa; t – czas; ρ – gęstość; A – powierzchnia przekroju

II. Przegląd metod pomiaru strumienia masy i strumienia objętości przepływającego medium (ciecze, pary, gazy)

Klasyfikacja przepływomierzy według kryterium zastosowanych fizycznych zasad przetwarzania

1. Przepływomierze manometryczne – pomiar różnicy ciśnienia (zasada zachowania energii wyrażona prawem Bernoulliego)

- zwężkowe
- z krzywizną
- piętrzące
- kapilarne

2. Przepływomierze grawimetryczne:

- rotametry
- przepływomierze klapowe

3. Przepływomierze dynamometryczne

4. Przepływomierze tachometryczne:

- przepływomierze turbinowe
- przepływomierze komorowe

5. Przepływomierze oscylacyjne:

- przepływomierze wirowe
- przepływomierze z wirami precesyjnymi
- 6. Przepływomierze elektromagnetyczne
- 7. Przepływomierze ultradźwiękowe
- 8. Przepływomierze oparte na pomiarze siły Coriolisa

III. Przepływomierze zwężkowe

Przepływomierze, w których elementem powodującym spadek ciśnienia jest odpowiednio ukształtowane przewężenie rurociągu (zwężka pomiarowa), nazywamy zwężkowymi.

Ich podstawowe zalety to:

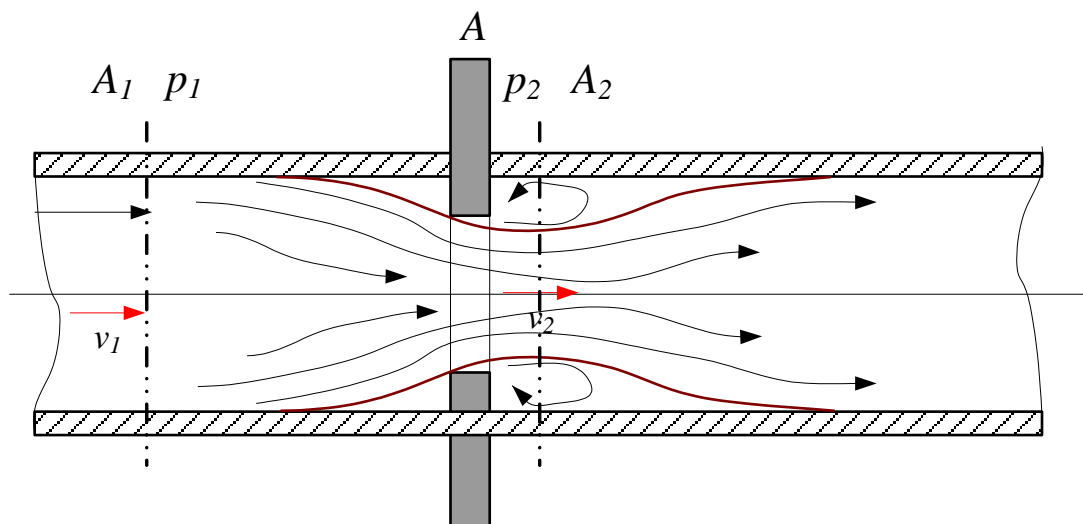
- - wysoka dokładność w warunkach laboratoryjnych dochodząca do $\pm 0,5\%$
- - uniwersalność - nadają się do większości mediów jednofazowych, w ograniczonym zakresie do - dwufazowych, przy praktycznie dowolnych ciśnieniach i temperaturach
- - zwężka wykonywana jest indywidualnie natomiast przetworniki różnicy ciśnień są uniwersalne i są produkowane masowo przy stosunkowo niskich cenach
- - brak konieczności indywidualnego wzorcowania dla zwęzek znormalizowanych
- - wysoka niezawodność.

Zasadnicze wady to:

- - kwadratowa zależność spadku ciśnienia od strumienia przepływu i wynikająca z niej mała zakresowość (4:1)
- - duża stała czasowa, zwłaszcza przy dużych odległościach od manometru
- - w przeciętnych warunkach pomiarowych dość duży błąd – 1-4%.

Zalety przepływomierzy zwężkowych zdecydowanie przeważają nad wadami, są to więc obecnie najbardziej rozpowszechnione przepływomierze. **Okolo 70% przepływomierzy zainstalowanych w przemyśle - to przepływomierze zwężkowe.**

Najbardziej rozpowszechnioną zwężką jest kryza. Przebieg linii prądu czynnika przy przepływie przez kryzę przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Przebieg linii prądu czynnika przy przepływie przez kryzę.

Przez każdy przekrój rurociągu i dyszy w jednostce czasu przepływa ta sama objętość płynu równa natężeniu objętościowemu (prawo ciągłości przepływu)

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = v A = v_1 A_1 = v_2 A_2,$$

gdzie:

v, A – prędkość średnia i powierzchnia przekroju kryzy,

v_1, A_1 – prędkość średnia i powierzchnia przekroju rurociągu,

v_2, A_2 – prędkość średnia i powierzchnia przekroju za kryzą (w miejscu największego przewężenia strugi)

Dla płynu idealnego – nieściśliwego i pozbawionego tarcia – w zwężce umieszczonej poziomo można zapisać

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2),$$

gdzie: p_1 i p_2 to ciśnienie w odpowiednio w przekroju A_1 i A_2 .

Oznaczając symbolem m' stosunek pola powierzchni przekroju rurociągu do pola powierzchni w miejscu największego przewężenia strugi

$$m' = \frac{A_2}{A_1}$$

$$v_1 = v_2 m'$$

Otrzymuje się

$$Q_v = v_2 A_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - m'^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Ze względu na bezwładność masy cieczy pole powierzchni $A_2 < A$; wprowadzając moduł zwężki $m = A_2/A$ i przewężenie (kontrakcja) strugi $m = A_2/A$ można zapisać $m' = \mu m$

$$Q_v = \alpha' A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, (*)$$

gdzie:

$$\alpha' = \frac{\mu}{1 - \mu^2 m^2},$$

jest teoretycznym współczynnikiem przepływu.

Za kryzą, za punktem maksymalnego przewężenia, wskutek zmniejszania się prędkości rośnie ciśnienie. Nie osiągnie jednak wartości jakie było przed kryzą. Przyczyną tego są straty spowodowane głównie intensywnym ruchem wirowym w martwych strefach za kryzą. Spadek ciśnienia jest trwałą stratą ciśnienia i dla kryz jest stosunkowo duża od 10 do 90% mierzonego spadku ciśnienia.

Dla gazów, wskutek zmniejszania się ciśnienia w przewężeniu, nastąpi adiabaticzne rozprężenie i wzrost prędkości. Konieczne jest więc wprowadzenie jeszcze jednego współczynnika poprawkowego - liczby ekspansji ε . Równanie (**) przyjmie wówczas postać:

$$Q_v = \alpha' \varepsilon A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}.$$

Liczba ekspansji ε jest mniejsza od jedności dla gazów, dla płynów nieściśliwych (cieczy) jest równa 1. Gdyby przyjąć, że α' , ε i ρ są stałe, to uzyskamy kwadratową zależność strumienia od mierzonego spadku ciśnienia $p_1 - p_2$.

IV. Algorytm wyznaczania strumienia objętości i strumienia masy za pomocą zwężki pomiarowej według PN-93/M-53950/01 (ISO 5167-1:1991) „Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwęzek pomiarowych”

W metodzie zwężkowej strumień przepływu jest wyznaczany na podstawie pomiaru spadku ciśnienia na specjalnie wykonanej zwężce pomiarowej. Metoda zwężkowa charakteryzuje się dużą dokładnością, dlatego posłuży do wzorcowania wykonanego w pracy przetwornika termooanemometrycznego.

Do pomiaru spadku ciśnienia Δp na zwężce zastosowany został manometr hydrostatyczny (U - rurka).

Kolejność wykonywania obliczeń strumienia objętości i strumienia masy oraz przykładowe obliczenia

a) Obliczenie przewężenia β zwężki pomiarowej (norma - punkt 3.2.5. str. 3):

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{31,5}{45} = 0,7,$$

β - przewężenie zwężki pomiarowej,
 d - otwór zwężki pomiarowej [mm],
 D - średnica wewnętrzna rurociągu [mm].

b) Ograniczenie stosowania zwężki (norma - punkt 8.3.1, str. 20):

$$\begin{aligned} 12,5 &\leq d \\ 50 &\leq D \leq 1000 \quad (\text{ekstrapolacja}) \\ 0,2 &\leq \beta \leq 0,75 \end{aligned}$$

c) Ustalenie gęstości gazu p_1 w warunkach roboczych (Załącznik krajowy do normy - punkt 5,5, str. 26)

Gęstość gazu ρ_1 w warunkach roboczych tj. przy ciśnieniu bezwzględnym p_1 i temperaturze T_1 należy wyznaczyć ze wzoru:

$$\rho_1 = \rho_n \frac{p_1 \cdot T_o}{p_n \cdot T_1 \cdot K_1}$$

$$\rho_1 = 1,2929(\text{kg/m}^3) \cdot \frac{(101325 + 1000)[\text{Pa}] \cdot 273,15[\text{K}]}{101325[\text{Pa}] \cdot 296,15[\text{K}] \cdot 1} = 1,204 \text{ kg/m}^3$$

ρ_n -1,2929 (kg/m³) – gęstość normalna powietrz (Załącznik krajowy do normy, str.27-Tablica ZK-9),

p_n – 1,01325 Pa, T_n – 273,15 K;- warunki normalne

p_1 (Pa), T_1 (K); - warunki robocze,

$p_1 = p_n + 1000 = 102325$ Pa; średnie robocze ciśnienie czynnika,

K_1 - względny współczynnik ściśliwości przy ciśnieniu p_1 i temperaturze T_1 równy Z_1/Z_2 .

Względny współczynnik ściśliwości jest ilorazem współczynnika ściśliwości w warunkach

roboczych (p_1, T_1) i w warunkach normalnych (p_n, T_n), (Załącznik krajowy do normy, str. 29 - rys. ZK-37):

$$K_1 = \frac{Z_1}{Z_n} = \frac{1}{0,9994} \approx 1$$

d) Lepkość dynamiczna w temperaturze roboczej T_1 (Załącznik krajowy do normy punkt 5.9, str. 32):

$$\mu_1 = \mu_n \frac{1 + \frac{C_s}{273,15}}{1 + \frac{C_s}{T_1}} \sqrt{\frac{T_1}{273,15}}$$

$$\mu_1 = \mu_n \frac{1 + \frac{C_s}{273,15}}{1 + \frac{C_s}{T_1}} \sqrt{\frac{T_1}{273,15}} = 17,08 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa)} \cdot \frac{1 + \frac{113}{273,15}}{1 + \frac{113}{296,15}} \sqrt{\frac{296,15 [K]}{273,15 [K]}} = 18,1981 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$\mu = 17,08 \cdot 10^{-6}$ (Pa·s) - lepkość dynamiczna w warunkach normalnych, (Załącznik krajowy do PN, str. 27 - Tablica ZK-9),

T_1 - temperatura gazu w warunkach roboczych,

$C_s = 113$ - stała Sutherlanda (Załącznik krajowy do PN Tablica ZK-9, str. 27)

e) Współczynnik przepływu C - wartość tymczasowa (norma punkt 8.3.2.1 str. 20):

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^3 + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left[\frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75}$$

$Re_D = 10^6$ – założona wartość liczby Reynoldsa

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot 0,7^{2,1} - 0,184 \cdot 0,7^3 + 0,0029 \cdot 0,7^{2,5} \cdot \left[\frac{10^6}{10^6} \right]^{0,75} = 0,5487$$

f) Obliczenie ciśnienia różnicowego Δp :

$$\Delta p = \Delta h \gamma g = 110 \cdot 10^{-3} \text{ (m)} \cdot 998,2 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)} = 1077 \text{ Pa}$$

gdzie:

$\gamma = 998,2 \text{ kg/m}^3$ – gęstość wody (temperatura 20° C)

Δh (m) – różnica poziomów odczytana z U-rurki,

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyśpieszenie ziemskie,

g) Liczba ekspansji (norma p.8.3.2.2, str 21):

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot 0,7^4) \frac{1,077 \text{ (Pa)}}{1,4 \cdot 102325 \text{ (Pa)}} = 0,9963$$

$\kappa = 1,4$ - wykładnik izentropy powietrza zależny od temperatury i ciśnienia (Załącznik krajowy do PN, str. 39 - rys, ZK-54)

h) Obliczanie przybliżonej wartości strumienia masy Q_m

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1} \text{ (kg/s)}$$

$$Q_m = \frac{0,5487}{\sqrt{1-0,7^4}} \cdot 0,9963 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 992,25 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 1077 [Pa] \cdot 1,204 [kg/m^3]} = 0,0248 \text{ kg/s}$$

i) Obliczenie liczby Reynoldsa R_{e_D} , wykorzystując przybliżoną wartość strumienia masy obliczoną w punkcie (h):

$$R_{e_D} = \frac{4Q_m}{\pi \cdot d \cdot \mu_1} = \frac{4 \cdot 0,0248 [kg/s]}{\pi \cdot 0,0315 [m] \cdot 18,1981 \cdot 10^{-6} [Pa \cdot s]} = 0,0551 \cdot 10^6$$

j) Obliczenie dokładnej wartości współczynnika przepływu C wykorzystując wartość liczby Reynoldsa R_{e_D} obliczoną w punkcie (i):

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^2 + 0,0029 \cdot \beta^{7,5} \cdot \left[\frac{10^6}{R_{e_D}} \right]^{0,75}$$

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot 0,7^{2,1} - 0,184 \cdot 0,7^2 + 0,0029 \cdot 0,7^{7,5} \cdot \left[\frac{10^6}{0,0551 \cdot 10^6} \right]^{0,75} = 0,5579$$

k) Obliczenie zrewidowanej wartości Strumienia masy Q_m lub strumienia objętości Q_v wykorzystując wartość współczynnika przepływu obliczoną w punkcie (j)

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot p_1} \quad (\text{kg/s})$$

$$Q_m = \frac{0,5579}{\sqrt{1-0,7^4}} \cdot 0,9963 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 992 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2 \cdot 1077 [Pa] \cdot 1,204 [kg/m^3]} = 0,0253 \text{ kg/s}$$

$$Q_v = \frac{q_m}{\rho_1} = \frac{0,0253 [kg/s]}{1,204 [kg/m^3]} = 0,021 \text{ m}^3 / \text{s}$$

V. Wykorzystanie anemometru wiatraczkowego AM-4202 do szybkiego wyznaczania strumienia objętości powietrza

W przepływomierzach turbinowych (wiatraczkowych) wykorzystuje się proporcjonalność prędkości obrotowej wirnika do objętościowego natężenia przepływu.

Anemometr wiatraczkowy firmy Lutron AM - 4202

Pomiar prędkości przepływu gazu v:

I zakres: 0,4-30,0 m/s dokładność $\pm(2\% + 1 \text{ cyfra})$
 II zakres: 1,4-108,0 km/h dokładność $\pm(2\% + 3 \text{ cyfry})$

Strumień objętości Q_v można obliczyć na podstawie znajomości prędkości v przepływającego w kanale gazu, oraz na podstawie znajomości powierzchni przekroju poprzecznego A tego kanału, korzystając ze wzoru:

$$Q_v = \iint_s v_n \cdot dA$$

v_n -składowa prędkość w kierunku prostopadłym do elementu powierzchni dA

Zgodnie z powyższą zależnością do szybkiego wyznaczenia strumienia objętości Q_v można użyć miernika prędkości przepływu gazu.

Strumień objętości Q_v przepływającego gazu.

$$Q_v = A \cdot v \text{ (m}^3/\text{s)},$$

gdzie:

v - prędkość gazu [m/s],

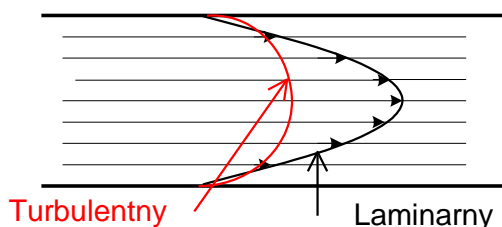
A - powierzchnia pomiarowa [m²]

Ponieważ powierzchnia pomiarowa A anemometru nie jest znana, została zastąpiona współczynnikiem K , którego wartość wyznaczono podczas wzorcowania anemometru

$$Q_v = K \cdot v \text{ (m}^3/\text{s)},$$

$K = 0,001503 \text{ m}^2$ - współczynnik wzorcowania,

Wyznaczony w ten sposób strumień objętości Q_v jest obarczony błędem pomiaru wynikającym z klasy użytego anemometru oraz dodatkowym błędem, wynikającym z przyjętego założenia, że w całym mierzonym przekroju prędkość przepływającego powietrza v jest przyjęta jako stała. W zależności od położenia anemometru w rurociągu stała wzorcowania powinna być korygowana. Wykonanie uchwytu gwarantującego, że całe powietrze wlatujące do kanału pomiarowego przepływa przez sondę miernika, pozwala na osiągnięcie większej dokładności pomiaru.

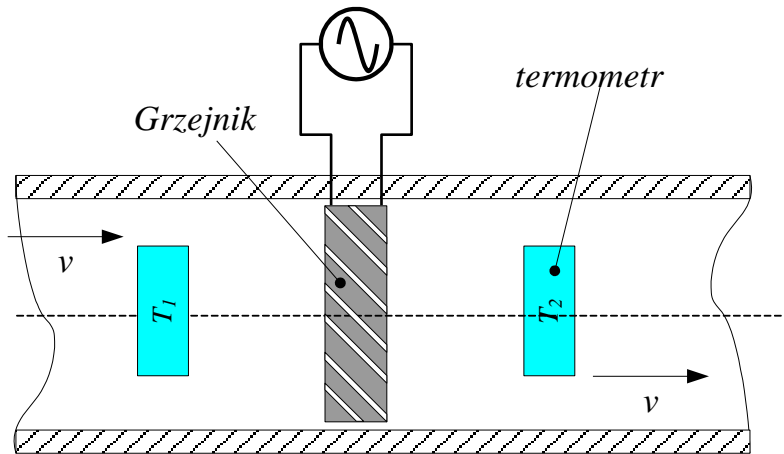


Rys. 3. Rozkład prędkości lokalnej płynu w zależności od odległości od osi rurociągu.

Dla przepływu turbulentnego stosunek prędkości maksymalnej v_{\max} (w okolicach osi rurociągu) do średniej wartości prędkości v_{avg} wynosi 1,2. Dla przebiegu laminarnego stosunek ten jest równy 2. Przy ściankach rurociągu $v=0$.

VI. Kalorymetryczna metoda wyznaczania natężenia przepływu masowego

W przepływomierzu kalorymetrycznym pomiar przepływu masowego wykonywany jest przez pomiar różnicy temperatur mierzonych przed i za grzejnikiem o znanej wartości wydzielanej mocy.



Rys.4 Kalorymetryczny przetwornik natężenia przepływu

W przypadku braku przepływu nie ma różnicy temperatur między czujnikiem T1 a T2.

Przy założeniu, że ciepło wydzielane w grzejniku podgrzewa w całości tylko medium – bilans mocy jest zachowany i wynosi

$$P = c_p Q_m (T_2 - T_1), \quad (**)$$

gdzie:

P – moc grzejnika

c_p – ciepło właściwe

Natężenie przepływu masowego jest więc odwrotnie proporcjonalne do różnicy temperatur.

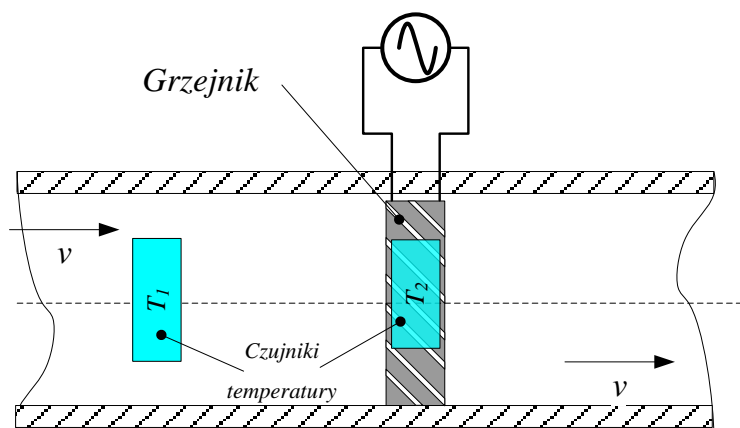
$$Q_m = \frac{P}{(T_2 - T_1)} K,$$

gdzie K to współczynnik przepływomierza zależny od kilku czynników między innymi:

- ciepła właściwego płynu
- przewodności cieplnej płynu,
- współczynnika wymiany ciepła
- lepkości dynamicznej płynu

Zależność (**) spełniona jest przy małych przekrojach i przepływach. Istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność pomiaru jest wyznaczenie różnicy temperatur. Im większy przepływ przy stałej mocy grzejnika tym mniejsza różnica temperatur i mniejsza dokładność. Stosuje się także konstrukcje o niesymetrycznym położeniu czujników temperatury.

W modelu czujnika przepływu kalorymetrycznego zamontowanego na stanowisku dydaktycznym czujnik T2 umieszczony jest na grzejniku. Taki zabieg umożliwia otrzymanie większej różnicy temperatury przy tych samych parametrach konstrukcyjnych czujnika.



Rys.4. Kalorymetryczny przetwornik natężenia przepływu z niesymetrycznym rozmieszczeniem czujników temperatury

VII. Przebieg ćwiczenia

Regulacja natężenia przepływu powietrza wykonuje się przez zmianę napięcia zasilającego silnik wentylatora. Służy do tego autotransformator .

Pomiary wykonać w kilkunastu punktach jednocześnie trzema metodami. Wskazane są równomierne odstępy mocy silnika np. co 50W.

Po zmianie napięcia zasilającego odczekać kilkadziesiąt sekund w celu ustabilizowania się przepływu oraz ze względu na bezwładność przepływomierzy – zwłaszcza kalorymetrycznego.

W tabeli pomiarowej umieszczać następujące wartości:

P - mocy silnika

h – różnica wysokości słupa wody w ururce,

T1 – temperatura powietrza

T2 – temperatura grzejnika

ΔT – różnica temperatur

v – prędkość wskazywana przez anemometr wiatraczkowy firmy Lutron AM – 4202

I_p – prąd z przetwornika różnicy ciśnienia firmy JUMO.

Moc silnika do ustawienia [W]	Moc silnika zmierzona P [W]	h [mm]	I_p [mA]	T1 [°C]	T2 [°C]	ΔT [°C]	v [m/s]
0							
30							
40							
50							
60							
70							
80							
90							
100							
150							
200							
300							
400							
500							
600							
700							

Pomiar metodą zwężkową

W celu wyznaczenia różnicy ciśnień zanotować różnicę słupa wody w ururce. Do obliczeń przyjmując parametry zwężki oraz środowiskowe tak jak w przykładzie w rozdziale IV.

Pierwiastek kwadratowy różnicy ciśnienia wskazuje przetwornik 404304 firmy Jumo. Sygnałem wyjściowym jest prąd od 0 do 20mA. Zakres ciśnienia wejściowego do 5mbarów.

Pomiar z wykorzystaniem anemometru wiatraczkowego.

Do prawidłowego obliczenia wartości przepływu objętościowego wymagana jest znajomość stałej wzorcowania. Wynosi ona $K = 0,001503 \text{ m}^2$. Przed pomiarami upewnić się, czy czujnik pokrywa cały przekrój rurociągu – w razie potrzeby skorygować.

W celu zwiększenia rozdzielczości pomiaru przy małych przepływach można przełączyć miernik do wskazań w km/h.

Pomiar metodą kalorymetryczną

Dwukanałowy miernik temperatury Lutron TM-906A posiada dwa pola odczytowe. Można jedno z nich ustawić do wyświetlania różnicy temperatur.

Podłączyć grzejnik do zasilacza – do wyjścia o regulowanym napięciu i prądzie (podłączenie do wyjścia nieregulowanego 5V może uszkodzić - grzejnik). Ustawić stabilizację prądu na wartość nie powodującą wzrostu temperatury grzejnika ponad 300°C przy braku przepływu powietrza (około 1,5A). W czasie pomiarów nie wolno regulować wartości prądu.

VIII. Zadania do wykonania w sprawozdaniu z ćwiczenia laboratoryjnego

W sprawozdaniu umieścić

1. Tabelę zawierającą wyniki obliczeń przepływu objętościowego i masowego wyznaczonego metodą zwężkową i anemometrem
2. Wykresy zależności natężenia przepływu w funkcji mocy silnika.
3. Wykres różnicy względnej pomiędzy wskazaniem natężenia „anemometru” i „zwężki”.
4. Dla przepływomierza kalorymetrycznego wykreśl zależność różnicy temperatur ΔT od natężenia przepływu masowego obliczonego metodą zwężkową.
5. Aproxymuj krzywą wykres $Q_m=f(\Delta T)$.