POLITECHNIKA WROCŁAWSKA,
INSTYTUT INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ I POMIAROWEJ
LABORATORIUM POMIARÓW WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

I-21

Ćwiczenie nr 5. POMIARY NATĘŻENIA PRZEPŁYWU GAZÓW METODĄ ZWĘŻOWĄ

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady pomiaru natężenia przepływu metodą zwężkową oraz poznanie istoty przedmiotu normalizacji metod zwężkowych.

2. Program ćwiczenia

2.1 Przeprowadzić pomiar natężenia przepływu metodą zwężkową Nastawiając różne wartości natężenia przepływu gazu w rurociągu odczytywać wskazania na U-rurce (l1 i Δl). Następnie korzystając z programu **kryza1.exe** oblicz wartość natężenia przepływu masowego (q_m) i objętościowego (q_v) dla zmierzonych różnic ciśnień.

2.2 Korzystając z programu komputerowego **kryza1.exe**, sprawdzić jaki wpływ na wyniki pomiarów metodą zwężkową, mają błędy pomiarów wielkości wpływowych np. błąd pomiaru: różnicy ciśnień, temperatury gazu, wilgotności itp.

2.3 Korzystając z programu komputerowego **kryza1.exe** dokonać symulacji wpływu temperatury i wilgotności na wyniki pomiarów metodą zwężkową. W tym celu obliczyć wartość natężenia przepływu masowego (q_m) i objętościowego (q_v) dla co najmniej 10 punktów uzyskanych z pomiarów podpunkt 2.1 dla temperatur i wilgotności wyższych i niższych od zmierzonych. Przedstaw postać analityczną zależności q_m, q_v od Δl.

2.4. Za pomocą przetwornika różnicy ciśnień na natężenie prądu wykreśl charakterystykę przetwarzania przyrządu I=f(Δl).

2.5 Przeprowadź analizę metrologiczna uzyskanych pomiarów.

3. Wprowadzenie

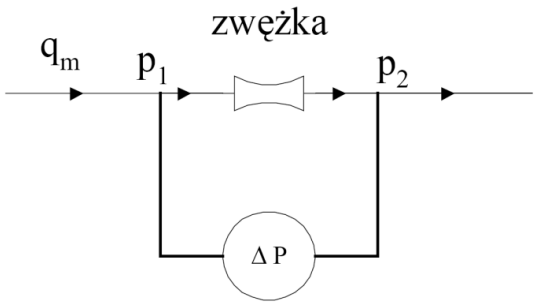
Masowym q_m oraz objętościowym q_v natężeniem przepływu[1] płynu nazywamy odpowiednio ilość masy lub objętość płynu (cieczy lub gazu) przepływającego w jednostce czasu przez dany przekrój rurociągu. Stosowanymi jednostkami dla q_m i q_v są odpowiednio kg/s i m^3/s.

Większość stosowanych metod pomiaru natężenia przepływu polega na pomiarze objętościowego natężenia przepływu. Wartość masowego natężenia przepływu wymaga znajomości (lub pomiaru) gęstości płynu. Są to więc pośrednie metody pomiaru masowego natężenia przepływu. Tak jest również w wypadku przedstawionej w ćwiczeniu metody zwężkowej.

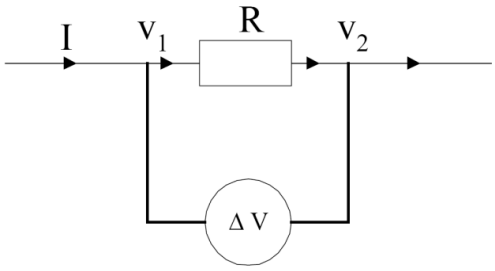
4. Metoda zwężkowa

Jeśli do przewodu, przez który przepływa ciecz lub gaz (płyn), wstawimy przewężenie rys.1a, tzw. zwężkę i będziemy mierzyli manometrem różnicowym ciśnienie przed przewężeniem i blisko za przewężeniem, to manometr wykaże różnicę ciśnień. (Zwróć uwagę na analogię występowania różnicy potencjałów na końcach rezystora przy przepływie prądu elektrycznego, rys. 1b)

[1] Norma PN-93/M-53950/01 wprowadza inne określenie dla tych wielkości, a mianowicie odpowiednio strumień masy i strumień objętości.



Rys. 1a. Występowanie różnicy ciśnień na zwężce przy przepływie płynu



Rys. 1b. Występowanie różnicy potencjałów na rezystorze przy przepływie prądu elektrycznego

Ciśnienie przed zwężką będzie większe niż ciśnienie za zwężką. Różnica ta (Δp) będzie tym większa, im większe będzie natężenie przepływu płynu przez rurociąg. Opisuje to prawo Bernouliego, które mówi, że suma energii potencjalnej i kinetycznej płynu w każdym przekroju przewodu ma wartość stałą (1).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{const.} \tag{1}$$

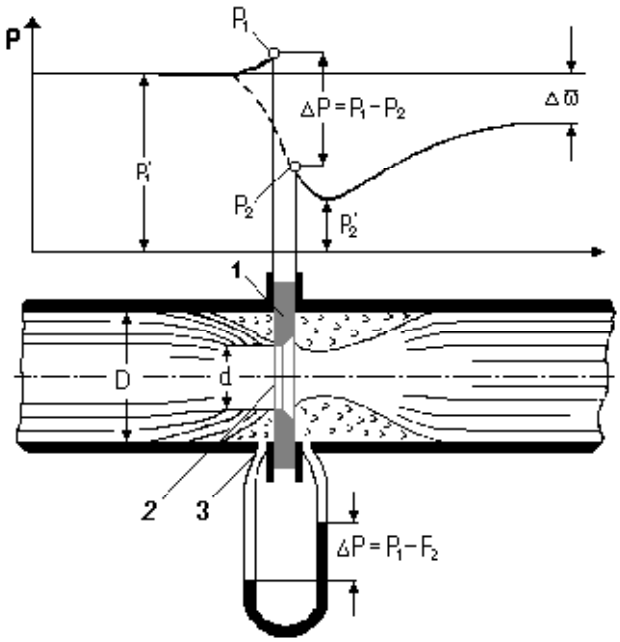
gdzie:
p – ciśnienie płynu,
ρ – gęstość płynu,
v – prędkość płynu.

Zastosowanie powyższego równania dla przekroju przed zwężką i dla przekroju za zwężką, w miejscu największego zwężenia strumienia, umożliwia otrzymanie zależności pomiędzy prędkością przepływu i różnicą ciśnień (2).

$$v = \text{const} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \tag{2}$$

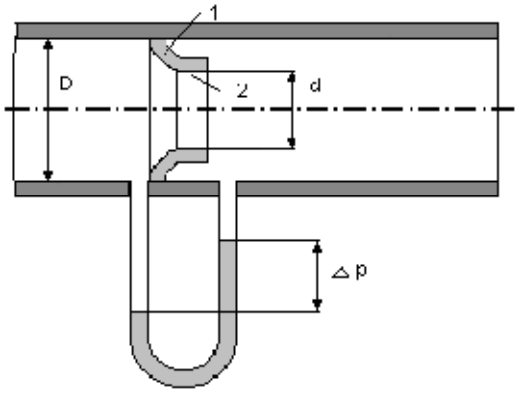
Tę zależność różnicy ciśnień (przed i za urządzeniem zwężającym strumień płynu) od natężenia przepływu wykorzystuje się do pomiaru natężenia przepływu cieczy i gazów w rurociągach. Przyrządy pomiarowe oparte na tej zasadzie są bardzo szeroko stosowane w praktyce przemysłowej i często są jedynymi przyrządami pozwalającymi na dokonanie pomiaru. Poza tym poważną ich zaletą jest prosta budowa. Stosowane są trzy zasadnicze typy zwężek: **kryzy**, **dysze**, i **dysze Venturiego**.

Na rys. 2. przedstawiono kryzę. W przewód między dwoma kołnierzami wstawiona jest cienka tarcza **1** z okrągłym otworem **2** pośrodku. Środek otworu ustawiony jest w osi rury. Z obu stron tarczy-kryzy wprowadzone są rurki, tzw. **rurki impulsowe 3**, do których podłącza się manometr różnicowy. Strumień cieczy już w pewnej odległości od kryzy ulega stopniowemu zwężeniu. Jednakże największe zwężenie uzyskuje się nie w otworze kryzy, ale w pewnej odległości za nim, tak że przekrój strumienia w jego najwęższym miejscu jest mniejszy od przekroju otworu kryzy. Następnie strumień stopniowo rozszerza się, wypełniając w końcu cały przekrój przewodu. Przy ściance przewodu, jak to zaznaczono na rysunku, powstają wiry, przy czym po stronie dopływu płynu zajmują one przestrzeń dużo mniejszą niż po stronie odpływu.

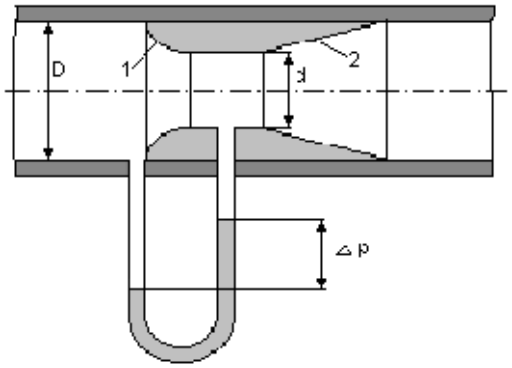


Rys. 2. Kryza i rozkład ciśnień wzdłuż przewodu

Rozkład ciśnień w pobliżu kryzy pokazany jest u góry rysunku. Linia ciągła obrazuje zmiany ciśnienia statycznego wzdłuż ścianki przewodu, a linia przerywana - wzdłuż osi. Jak wynika z tego wykresu, ciśnienie przy ściance przewodu tuż przed kryzą (wskutek jej dławiącego działania wzrasta od wartości p'_1 do p_1. Za kryzą następuje spadek ciśnienia do p_2. Najmniejszą wartość p'_2 ciśnienie uzyskuje w miejscu, gdzie strumień jest najwęższy. Później ciśnienie stopniowo wzrasta, ale nigdy nie osiąga swej pierwotnej wartości p_1 (ciśnienia przed kryzą). Różni się ono od tego ciśnienia zawsze o pewną wartość $\Delta\varpi$. Ta wartość $\Delta\varpi$ jest stratą ciśnienia płynu, spowodowaną działaniem kryzy.



Rys. 3. Schemat dyszy



Rys.4. Schemat dyszy Venturiego

Na rys. 3 przedstawiono **dyszę 1** wstawioną w przewód, przez który przepływa płyn. Dysza, jak widać na rysunku, różni się od kryzy tym, że po stronie dopływu nie ma ostrej krawędzi, lecz specjalnie profilowaną krzywiznę. Dzięki temu zwężenie strumienia płynu odbywa się łagodniej, co powoduje zmniejszenie się obszaru wirów po stronie dopływowej zwężki, a tym samym zmniejsza stratę energii przepływającego płynu. Krzywizna przechodzi w część cylindryczną **2**, która jest odpowiednikiem otworu w kryzie. Dzięki specjalnym kształtom dyszy (którą jest trudniej wykonać niż kryzę) strata ciśnienia $\Delta\varpi$ jest mniejsza.

Na rys. 4 pokazano schematycznie trzeci typ zwężki – **dyszę Venturiego**. Składa się ona z dwóch części: jednej zwężającej **1**, profilowanej podobnie jak u dyszy i przechodzącej w krótki odcinek cylindryczny, i drugiej **2** stopniowo rozszerzającej się, aż do wymiaru przewodu, zwanej **dyfuzorem**. Dzięki odpowiedniemu kształtowi części dopływowej przestrzeń przy ściankach, zajmowana przez wiry, jest niewielka; rozszerzająca się stopniowo część za przewężeniem pozwala na całkowite usunięcie wirów na tym odcinku. Dysza Venturiego przy przepływie przez nią płynu powoduje najmniejszą stratę ciśnienia $\Delta\varpi$. Jest to wynikiem z jednej strony odpowiedniego profilowania części dopływowej, a z drugiej, stopniowego rozszerzania się strumienia płynu za przewężeniem, uwarunkowanego kształtem drugiej części rury.

Zasada działania zwężek wszystkich typów jest taka sama, a więc i zasadnicza zależność natężenia przepływu od różnicy ciśnień przed nimi i za nimi jest również taka sama. Występujące różnice w zmianach strumienia, jak również w rozkładzie ciśnień w pobliżu zwężki ujęte są w postaci współczynników wyznaczonych doświadczalnie. Aby móc korzystać z wyznaczonych doświadczalnie współczynników musi być zachowane podobieństwo między zwężką, na której zostały przeprowadzone prace badawcze w celu wyznaczenia tych wartości, a tymi zwężkami, które mają być użyte do pomiarów. W tym celu zwężki znormalizowano. Zwężki znormalizowane można stosować bez uprzedniego wzorcowania, tzn. bez doświadczalnego wyznaczania zależności spadku ciśnienia przed i za zwężką od natężenia przepływu.

Powyższe zagadnienia ujęte są w normie PN-93/M-53950/01 - Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych.

5. **Podstawowe zależności**

Podstawowy wzór (3), z którego oblicza się strumień masy jest następujący:

$$q_m = C \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}}{\sqrt{1-\beta^4}} \tag{3}$$

gdzie:
C – współczynnik przepływu [bezwymiarowy],
ε_1 – liczba ekspansji [bezwymiarowa],
d – średnica otworu zwężki [m],
Δp – różnica ciśnień [Pa],
ρ_1 – gęstość płynu przed zwężką [kg/m^3],
β – przewężenie zwężki pomiarowej [bezwymiarowe].

Przewężenie β zwężki pomiarowej jest charakterystycznym parametrem zwężki i stanowi stosunek średnicy otworu zwężki do średnicy rurociągu (4).

$$\beta = \frac{d}{D} \tag{4}$$

gdzie:
d – średnica otworu zwężki [mm],
D – średnica rurociągu [mm].

Współczynnik przepływu C – określony dla przepływu płynu nieściśliwego, charakteryzuje zależność między rzeczywistym, a teoretycznym strumieniem masy lub objętości, i dla tych samych zwężek jego wartość nie zależy od instalacji a tylko od liczby Reynoldsa. Określa go równanie Stolza (5):

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,1840 \cdot \beta^{3} + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left[\frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75} \tag{5}$$

gdzie: Re_D – liczba Reynoldsa [bezwymiarowa].

Liczba Reynoldsa Re_D – parametr bezwymiarowy wyrażający iloraz sił bezwładności i sił lepkości. Odniesiony do średnicy rurociągu w obszarze przed zwężką wyraża się wzorem (6). Parametr ten jest bardzo ważny w technice pomiarów przepływów, gdyż wykorzystywany jest m.in. do określania momentu przejścia z przepływu laminarnego na przepływ burzliwy (turbulentny) (Rys. 5).

a) b)

$$\frac{v_{max}}{v_{sr}} = 2 \text{ przy } Re_D > 2000$$

Re_D	4000	10^5	10^6
$\frac{v_{max}}{v_{sr}}$	1,27	1,22	1,15

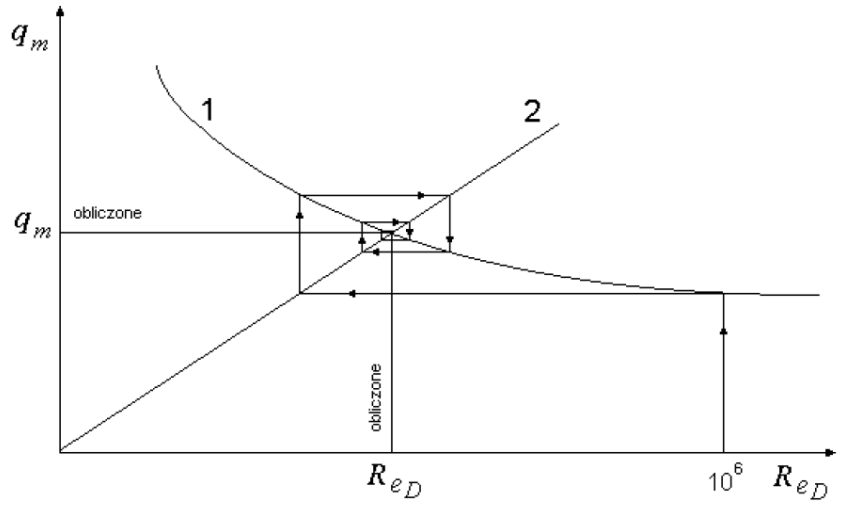
Rys. 5. Modele przepływów: a) laminarnego, b) turbulentnego

Warunek, aby przepływ miał charakter turbulentny jest istotny, ponieważ tylko wtedy stosunek maksymalnej prędkości (w osi zwężki) do prędkości średniej w całym przekroju jest stały – nie zależy od prędkości płynu.

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \tag{6}$$

gdzie: μ_1 – lepkość dynamiczna płynu [Pa·s].

Porównując wzory (3), (5) i (6) widzimy, że natężenie przepływu zależy od liczby Reynoldsa, a liczba Reynoldsa zależy od natężenia przepływu. Jest to zagadnienie uwikłane, które najlepiej rozwiązać metodą iteracyjną (zaleca tę metodę także, wspomniana wcześniej norma). Ilustracja tej metody pokazana jest na rys. 6. W pierwszym kroku obliczamy q_m, korzystając z zależności (3) i (5) – krzywa 1, podstawiając dużą wartość Re_D np. 106 W drugim kroku obliczamy Re_D, korzystając ze wzoru (6) – krzywa 2, podstawiając wcześniej obliczoną wartość q_m. Obliczenia takie powtarzamy, aż do uzyskania wystarczającej dokładności.



Rys. 6. Ilustracja obliczenia natężenia przepływu w sposób iteracyjny W niniejszym ćwiczeniu korzysta się z programu komputerowego **kryza1.exe**.

Uwzględniono w nim i inne wielkości, od których zależy istota pomiaru natężenia przepływu gazów metodą zwężkową – wymienione wcześniej we wzorach (3), (5), (6), jak: lepkość dynamiczna, liczba ekspansji, gęstość gazu.

Lepkość dynamiczna μ – dla gazów, w różnych temperaturach roboczych, opisana jest zależnością (7).

$$\mu = \mu_n \cdot \frac{1+\frac{C_S}{273,15}}{1+\frac{C_S}{T}} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15}} \tag{7}$$

gdzie: μ_n – lepkość dynamiczna w warunkach normalnych tj. w tempera turze 0^oC i ciśnieniu 101,325 kPa; dla powietrza $\mu_n = 17,08 \cdot 10^{-6}$ Pa·s

T – temperatura termodynamiczna gazu w warunkach roboczych

C_s – stała Sutherlanda, $C_s = 113$.

Liczba ekspansji ε – Uwzględnia ściśliwość płynu. Dla płynów nieściśliwych (cieczy) ε = 1, dla płynów ściśliwych (gazów) ε < 1. Jeśli znany jest wykładnik izentropy κ, liczbę ekspansji oblicza się wg wzoru doświadczalnego (8).

$$\varepsilon_1 = 1-(0,41+0,35\cdot\beta^4)\cdot\frac{\Delta p}{\kappa\cdot p_1} \tag{8}$$

gdzie:

Δp – różnica ciśnień [Pa],

p_1 – ciśnienie po stronie dopływowej [Pa],

κ – wykładnik izentropy [bezwymiarowy], dla powietrza κ =1,4.

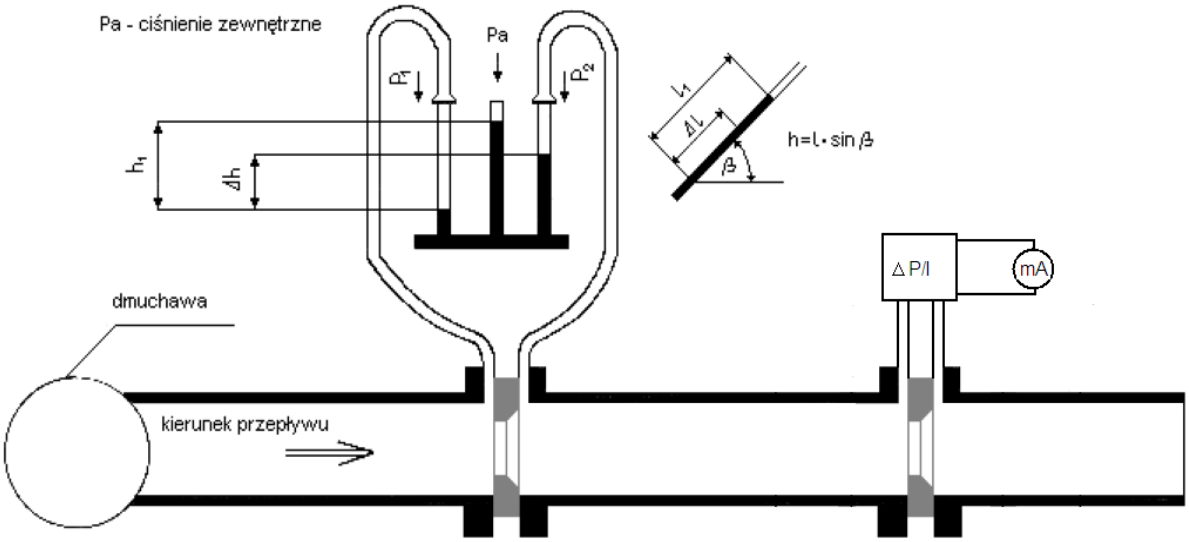
β – przewężenie [bezwymiarowe].

Gęstość gazu wilgotnego

(patrz norma PN-93... str. 30)

6. **Parametry instalacji w stanowisku laboratoryjnym**

– średnica rurociągu D=106 [mm]
– zwężka pomiarowa: kryza, średnica otworu d=65,3 [mm]
– przewidywane maksymalne natężenie przepływu: $q_{m\ max}$=0,15 [kg s^{-1}]



Rys. 8. Stanowisko do pomiaru natężenia przepływu powietrza