


Ćwiczenie nr 5. **POMIARY NATEŻENIA PRZEPIYU GAZÓW**

Cel ćwiczenia: Poznanie zasady pomiarów natężenia przepływu metodą zwężkową. Poznanie istoty przedmiotu normalizacji metod zwężkowych.

Program ćwiczenia:

1. Przeczytać instrukcję do ćwiczenia. Zapoznać się z instalacją na stanowisku laboratoryjnym. Sprawdzić poprawność połączeń, a w razie potrzeby połączyć układ pomiarowy jak na Rys.7
2. Uruchomić komputer, następnie uruchomić program **Virtual Box**. 
3. Wyniki zapisywać w arkuszy kalkulacyjnym.
4. Odczytać wartość ciśnienia atmosferycznego i temperatury w pomieszczeniu.
5. Zmierzyć przepływ maksymalny przy całkowicie otwartym zaworze oraz przepływ minimalny przy całkowicie zamkniętym. Wyznaczyć zakres zmian ciśnienia, a następnie podzielić go na dziesięć równych przedziałów
6. Wykonać pomiar natężenia przepływu powietrza w układzie jak na schemacie (Rys.7) Nastawiając różne wartości natężenia przepływu odczytywać prąd wskazywany przez miliamperomierz oraz wysokości słupków cieczy Ururki (Δl i Δl). Wyniki zapisać w tabeli (przykład)
7. Otworzyć program **kryza.exe** z folderu **Przepływ** na Pulpicie i zapoznać się z zasadą działania programu. Przy pomocy programu kryza.exe obliczyć wartości przepływów i liczby Reynoldsa. Wyniki umieścić w tabeli (przykład Tab. 1)
8. Sporządzić wykresy zależności natężenia prądu w funkcji różnicy ciśnień oraz przepływu masowego i objętościowego ($I = f(\Delta p)$; $I = f(q_m)$ $I = f(q_v)$), wyznaczyć parametry statyczne (charakterystyka, zakres przetwarzania, czułość, nieliniowość itp.)
9. Zbadać wpływ temperatury na pomiar przepływu. Dla wybranego punktu pomiarowego obliczyć wartości przepływów dla temperatur z przedziału (10 ÷ 70 co 10°C). Sporządzić charakterystykę $q_m=f(T)$, $q_v=f(T)$
10. Zbadać wpływ wilgotności na pomiar przepływu. Dla wybranego punktu pomiarowego obliczyć wartości przepływów dla wilgotności z przedziału (10 ÷ 70 co 10%). Sporządzić charakterystykę $q_m=f(W)$, $q_v=f(W)$
11. Zbadać wpływ niepewności pomiarów poszczególnych zmiennych
 - a) średnicy kryzy $\pm 5\%$ i 10% (wykonać obliczenia dla $d = d \pm 5\%$ (10%))
 - b) niepewności odczytu Δh , wahań poziomu do 2 mm oraz wpływ menisku 1mm.
 - c) Niepewność pomiar ciśnienia $\pm 10\%$

Przykładowe tabele

Tab. 1. Wyniki pomiaru natężenia przepływu powietrza metodą Ururki Dokładność odczytu wysokości słupa cieczy w Ururce $\Delta h = \pm \dots\dots$

Lp	h_{p1} [mm]	h_{p2} [mm]	h_{p3} [mm]	Δl [mm]	l_1 [mm]	I [mA]	ΔI [mA]	δI [%]
1								
...								
min 10								

Tab. 2 Obliczone wartości przepływów przy pomocy programu kryza.exe

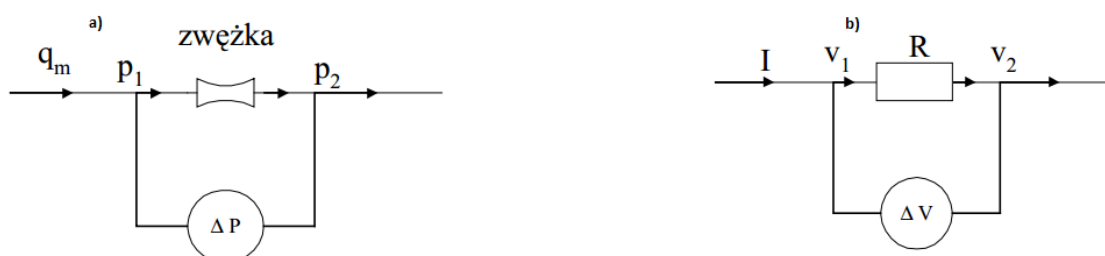
Lp	Δl [mm]	l_1 [mm]	q_m [kg/s]	q_v [m ³ /s]	Re_D	I [mA]	ΔI [mA]	δI [%]
1								
...								
min 10								

Wprowadzenie:

Masowym q_M oraz objętościowym q_v natężeniem przepływu 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 m³/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.

1. 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)



Rys.1. Występowanie różnicy ciśnień na zwężce przy przepływie płynu a) ; występowanie różnicy potencjałów na rezystorze przy przepływie prądu elektrycznego b)

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 Bernoulliego, które mówi, że suma energii potencjalnej i kinetycznej płynu w każdym przekroju przewodu ma wartość stałą (1).

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

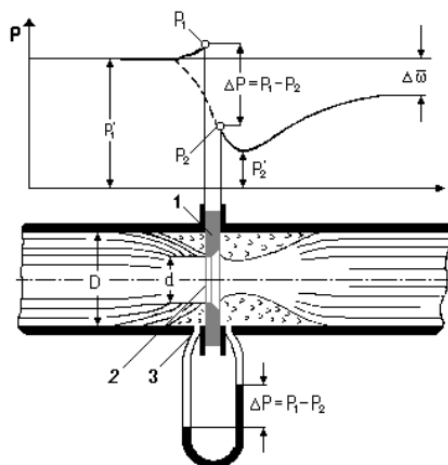
gdzie: p – ciśnienie płynu,
 ρ – gęstość płynu,
 v – prędkość płynu.

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).

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

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.

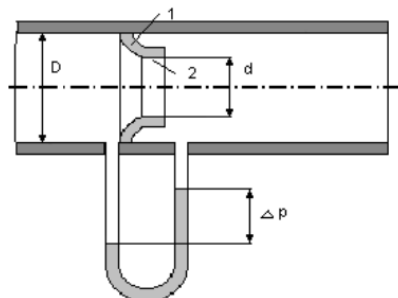
Na Rys.2 przedstawiono kryzę. W przewód między dwoma kołnierzami wstawiona jest cienka tarcza **1** z okrągłym otworem **2** pośrodku. Środek otworu ustawiony jest w osi rury. Z obu stron tarczy-kryzy wprowadzone są rurki, tzw. rurki impulsowe **3**, do których podłącza się manometr różnicowy. Strumień 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.



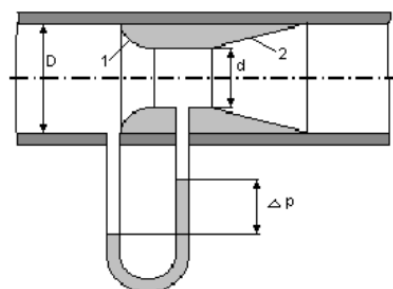
Rys.2 Kryza i rozkład ciśnień wzdłuż przewodu

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 $\Delta\sigma$. Ta wartość $\Delta\sigma$ jest stratą ciśnienia płynu, spowodowaną działaniem kryzy.

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 Δp jest mniejsza.



Rys.3 Schemat dyszy



Rys.4 Schemat dyszy Venturiego

Na Rysunku 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 Δp . 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 zwęzek 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 zwęzek pomiarowych.

Podstawowe zależności

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

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

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/m³],
 β – przewężenie zwężki pomiarowej [bezwymiarowe].

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

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (4)$$

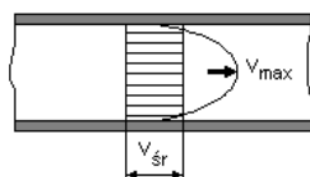
gdzie: d – średnica otworu zwężki [mm],
 D – średnica rurociągu [mm].

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

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

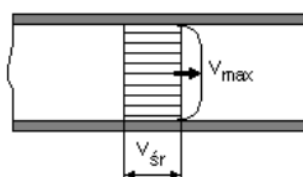
gdzie: Re_D – liczba Reynoldsa [bezwymiarowa].

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)

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



b)

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

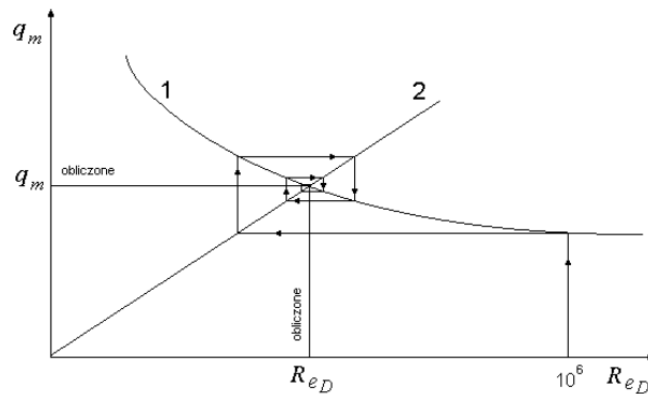
Rys.5 Modele przepływów: a) laminarnego, b) turbulentnego

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.

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \quad (6)$$

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. 10^6 . 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).

$$\mu = \mu_n \cdot \frac{1 + \frac{C_s}{273,15}}{1 + \frac{C_s}{T}} \cdot \sqrt{\frac{T}{273,15}} \quad (7)$$

gdzie: μ_n – lepkość dynamiczna w warunkach normalnych tj. w temperaturze 0°C i ciśnieniu $101,325 \text{ kPa}$. Dla powietrza $\mu_n = 17,08 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 T – temperatura termodynamiczna gazu w warunkach roboczych
 C_s – stała Sutherlanda, $C_s = 113$.

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

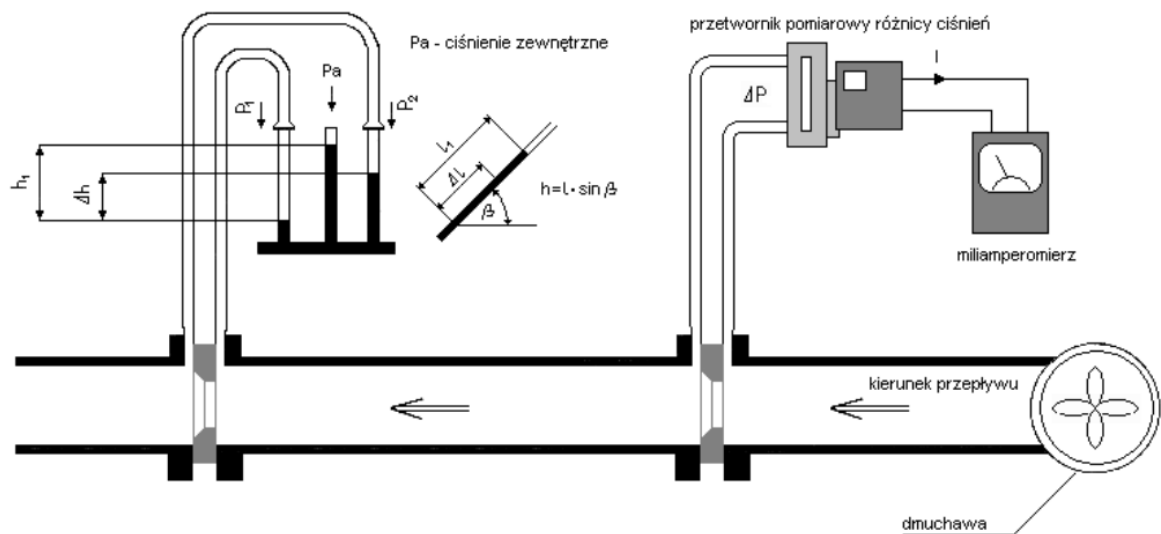
$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (8)$$

gdzie: Δp – różnica ciśnień [Pa],
 p_1 – ciśnienie po stronie dopływowej [Pa],
 κ – wykładnik izentropy [bezwymiarowy], dla powietrza $\kappa = 1,4$.
 β – przewężenie [bezwymiarowe].

Gęstość gazu wilgotnego (patrz norma PN-93... str. 30)

Parametry instalacji w stanowisku laboratoryjnym

- średnica rurociągu $D=106$ [mm]
- zwężka pomiarowa: kryza, średnica otworu $d=65,3$ [mm]
- czujniki temperatury Pt100 kl.1 (rezystory platynowe):
 $R_0=100$ [Ω],
 $\alpha_0=0,00385$ [K^{-1}]
- $c_p=1000$ [$Wskg^{-1}K^{-1}$] (powietrze suche)
- przewidywane maksymalne natężenie przepływu: $q_{m\ max}=0,15$ [$kg\ s^{-1}$]
- maksymalny prąd grzejnika: 5 [A].



Rys.7. Stanowisko do pomiaru natężenia przepływu powietrza

Pytania kontrolne:

1. Na czym polega istota pomiaru natężenia przepływu metodą zwężkową?
2. Opisać podstawowe typy zwężek.
3. Czy sposób montażu rurociągu i instalacji zwężki w rurociągu ma wpływ na poprawność pomiaru przepływu?
4. Jakie znaczenie ma liczba Reynolds'a na poprawność pomiaru przepływu?

Literatura

1. E. Romer, Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa, 1978
2. P.H. Sydenham, Podstawy metrologii – podstawy praktyczne, WKŁ, Warszawa, 1990
3. http://www.introl.pl/katalog/przeplywy/elementy_spietrzajace/zwezki_pomiarowe.html

Zestaw przyrządów pomiarowych

1. Przetwornik pomiarowy różnicy ciśnień typ EPA 14.00
2. Miernik typu Metex M-3860D
3. Ururka
4. Rurociąg

Opracowali: dr inż. Elżbieta Szul-Pietrzak

Mgr inż. Bogumil Głód