

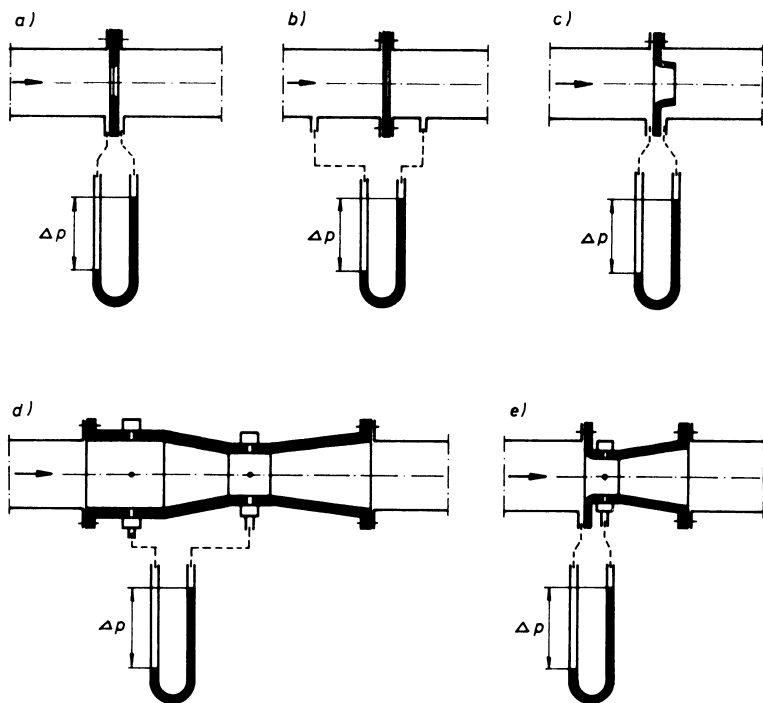
Ćw. 3 PRZEPLYWOMIERZE ZWĘŻKOWE

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest: a) zapoznanie się z zasadą pomiaru wydatku przepływomierzami zwężkowymi, b) wzorcowanie zwężki Venturiego oraz kryzy zastosowanych do pomiaru wydatku wody, c) wyznaczenie wydatku masowego powietrza za pomocą zwężki Venturiego.

2. Podstawy teoretyczne

Przepływomierze zwężkowe służą do wyznaczania natężenia przepływu (wydatku) płynu na podstawie pomiaru różnicy ciśnień na zwężce.



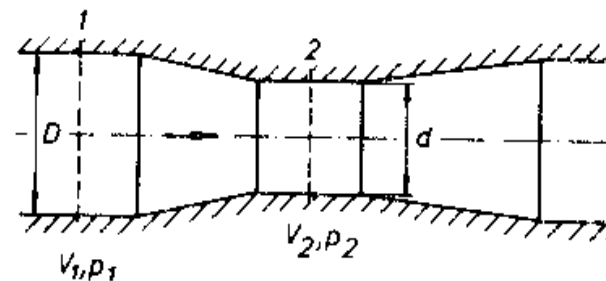
Rys. 3.1. Przepływomierze zwężkowe: a) kryza ISA z pomiarem przytarczowym, b) kryza ISA z pomiarem "vena contracta" (łąc. struga przewężona), c) dysza przepływowa ISA, d) zwężka Venturiego, e) dysza Venturiego.

Należą do nich (rys. 3.1): a) kryza ISA z pomiarem przytarczowym, b) kryza ISA z pomiarem "vena contracta" (łąc. struga przewężona), c) dysza

przepływowa ISA, d) zwężka Venturiego, e) dysza Venturiego. Ponadto pomiaru natężenia przepływu płynu można dokonywać za pomocą przepływowej kryzy segmentowej (z prostoliniową krawędzią wlotową), dopływowej kryzy ISA lub dyszy ISA, wypływowej kryzy ISA, dyszy ISA czy kryzy segmentowej.

Przepływomierze zwężkowe są przedmiotem normy PN-65/M-53950. Przepływomierz wykonany, zainstalowany i stosowany zgodnie z normą nie podlega wzorcowaniu.

Zasadę działania przepływomierza zwężkowego rozpatrzmy na przykładzie klasycznej zwężki Venturiego (rys. 3.2).



Rys. 3.2 Zwężka Venturiego

Jeśli przepływającym płynem jest ciecz, to przyjmując model płynu nieściśliwego ($\rho = \text{const}$ i nielepkiego (brak strat hydraulicznych) oraz zakładając, że przepływ jest jednowymiarowy można wykorzystać równanie ciągłości i energii w postaci

$$V_1 D^2 = V_2 d^2 \quad (3.1)$$

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (3.2)$$

Wprowadzając tzw. moduł zwężki

$$m = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (3.3)$$

otrzymany z równań (3.1) i (3.2) wyrażenie na wydatek teoretyczny (objętościowy) Q_t w postaci

$$Q_t = \frac{m}{\sqrt{1 - m^2}} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (3.4)$$

gdzie: $\Delta p = p_1 - p_2$.

Jeśli płynem przepływającym przez zwężkę jest gaz (płyn ściśliwy) to odpowiednie równania ciągłości i energii przybierają postać

$$\rho_1 V_1 D^2 = \rho_2 V_2 d^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (3.6)$$

gdzie $k = \frac{c_p}{c_v}$ stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i objętości.

Wykorzystując równanie izentropy (przepływ bez strat) dla przekrojów 1 i 2

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k}, \quad (3.7)$$

otrzymamy po przekształceniach zależność na wydatek objętościowy w postaci

$$Q_t = m \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] / \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{k}} - m^2 \right]} \quad (3.8)$$

Wprowadzając oznaczenie $\Delta p = p_1 - p_2$ można wzór (3.8) przekształcić do postaci analogicznej do wzoru (3.4):

$$Q_t = \frac{m}{\sqrt{1-m^2}} \frac{\pi D^2}{4} \varepsilon \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}} \quad (3.9)$$

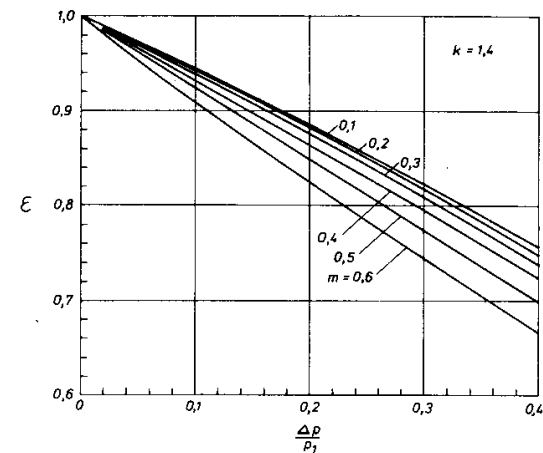
gdzie liczba ekspansji ε wyraża wpływ ściśliwości gazu i wynosi

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{k}{k-1} \frac{1}{\frac{\Delta p}{p_1}} \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \frac{1-m^2}{1-m^2 \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}}}} \quad (3.10)$$

Zależność $\varepsilon = f \left(m, \frac{\Delta p}{p_1} \right)$ dla powietrza ($k = 1,4$) pokazano na rys.

3.3. Należy zaznaczyć, że wzór (3.10), oprócz zwężki Venturiego, jest słuszny także dla dyszy ISA i dyszy Venturiego. W przypadku kryzy ISA z pomiarem przytarczowym liczba ekspansji ε może być wyznaczona ze wzoru empirycznego

$$\varepsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184 m^2) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right]^{0,935} \quad (3.11)$$



Rys. 3.3. Zależność liczby ekspansji od różnicy ciśnień w zwężce

Należy przypomnieć, że przy wyprowadzaniu zależności (3.4) i (3.9) nie uwzględniono strat przepływu oraz niejednorodnego rozkładu prędkości. Z tych powodów objętościowy wydatek rzeczywisty płynu przepływającego przez zwężkę jest mniejszy od teoretycznego i wynosi

$$Q = K Q_t \quad (3.12)$$

gdzie K jest współczynnikiem zwężki.

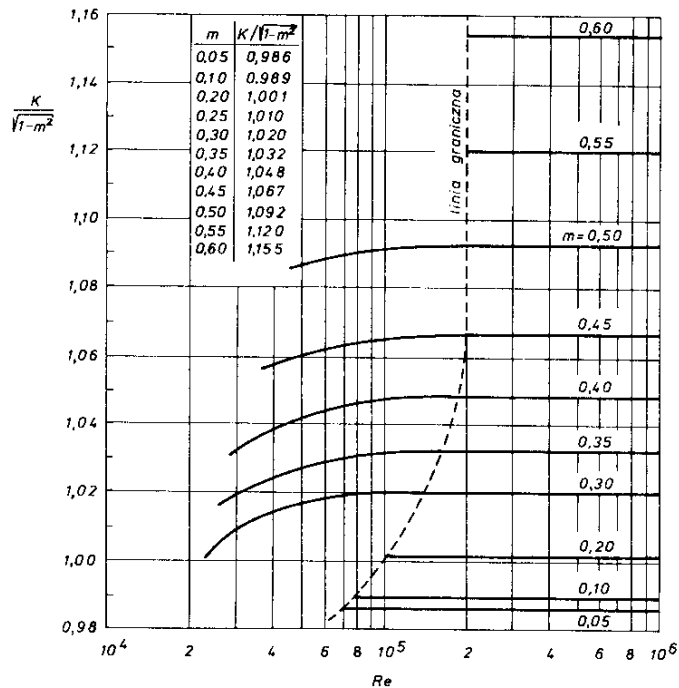
Odpowiednio wydatek masowy wyrazi się zależnością

$$Q_m = K \rho_1 Q_t \quad (3.13)$$

W ogólnym przypadku K zależy od rodzaju i modułu zwężki oraz liczby Reynoldsa.

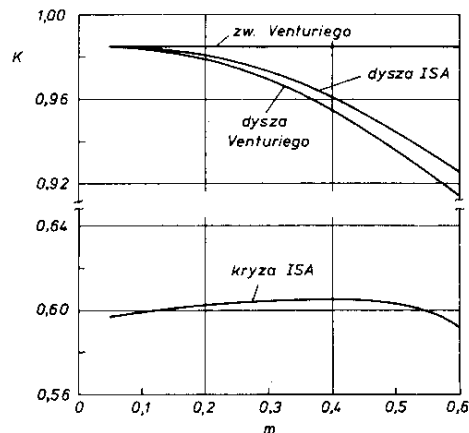
$$K = f(\text{rodzaj zwężki}, m, Re)$$

Przykładową zależność dla dyszy Venturiego pokazano na rys. 3.4 (wielkość $K / \sqrt{1 - m^2}$ zamiast K pozwala na uzyskanie lepszej rozdzielczości wykresu). Jak widać, powyżej pewnej wartości granicznej $Re_{gr} = f(m)$ wartość K nie zależy od Re (lub może być przyjęta za stałą w przypadku innych zwężek). Stąd te wymiary instalacji pomiarowej dobiera się tak, aby spełnić warunek $Re > Re_{gr}$. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to do wyznaczenia wartości $K / \sqrt{1 - m^2}$ należy zastosować procedurę kolejnych przybliżeń.



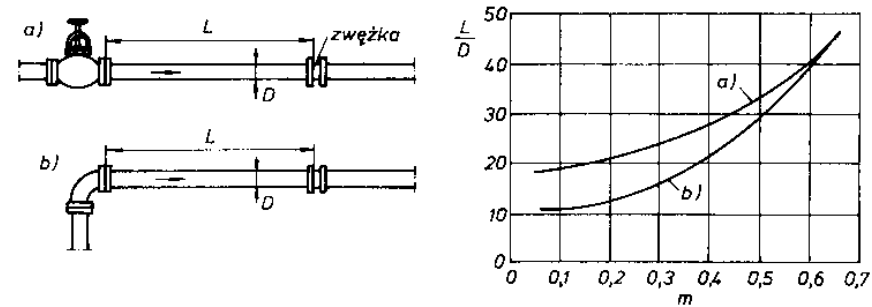
Rys. 3.4. Zależność współczynnika zwężki Venturiego od jej modułu i liczby Reynoldsa

Wartości $K = f(m)$ dla różnych zwęzek, odpowiadające zakresowi, w którym K nie zależy od Re pokazano na rys. 3.5. Zwraca uwagę mała wartość K (duże straty) dla kryzy ISA w porównaniu ze zwężką Venturiego (stała wartość $K = 0,985$), dyszą ISA i dyszą Venturiego.



Rys. 3.5. Zależność współczynnika zwężki od jej rodzaju oraz modułu

Oprócz dobrania wymiarów zwężki w zależności od zakresu pomiarowego, należy zapewnić odpowiednią długość odcinka przewodu przed zwężką (dla zapewnienia wyrównana rozkładów prędkości). Przykładowe wielkości L/D w zależności od m (dla instalacji z zaworem grzybkowym oraz za kolankiem) pokazano na rys. 3.6. Dla pomiarów technicznych wartości L/D mogą być o 50% mniejsze.

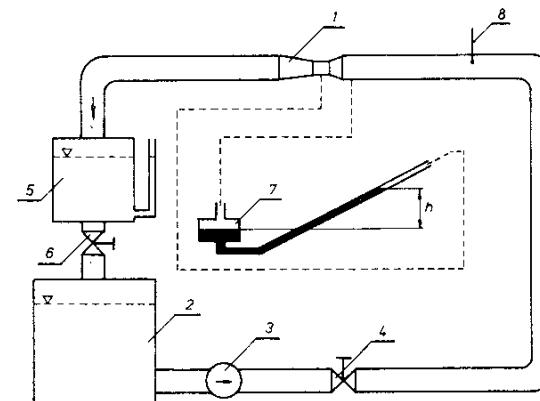


Rys. 3.6. Prawidłowe umiejscowienie zwężki na rurociągu

3. Stanowisko pomiarowe

3.1. Wzorcowanie zwężki lub kryzy dla cieczy

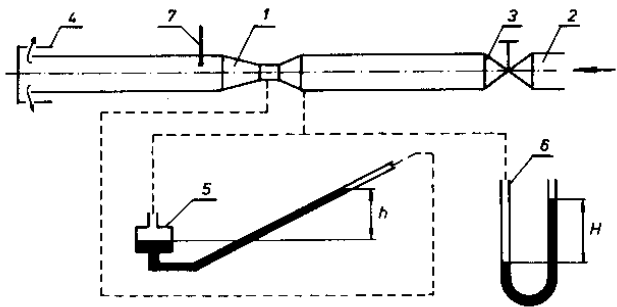
Stanowisko pomiarowe wykorzystywane do wzorcowania zwężki pomiarowej dla wody pokazano na rys. 3.7. Badana zwężka (lub kryza) 1 zasilana jest wodą ze zbiornika 2 pompą 3 poprzez zawór regulacyjny 4. Rzeczywisty wydatek wody mierzy się za pomocą zbiornika 5 zaopatrzonego w wodowskaz i zawór odcinający 6. Różnicę ciśnień na zwężce (lub kryzie) mierzy manometr rtęciowy 7, natomiast temperaturę wody wskazuje termometr 8.



Rys. 3.7. Schemat stanowiska do wzorcowania zwężki dla cieczy

3.2 Wyznaczania wydatku powietrza przy pomocy zwężki Venturiego

Stanowisko do wyznaczania wydatku powietrza przedstawiono na rys. 3.8. Powietrze odprowadzane jest do zwężki 1 przewodem 2 zaopatrzonym w zawór 3. Rolę zaworu regulacyjnego spełnia nakrętka 4, posiadająca odpowiednie wycięcia. Różnicę ciśnień na zwężce mierzy manometr wodny 5 a do pomiaru ciśnienia powietrza p_1 wykorzystuje się manometr rtęciowy 6. Temperaturę powietrza wskazuje termometr 7.



Rys. 3.8. Schemat stanowiska do wyznaczania wydatku powietrza

4. Wykonanie ćwiczenia

4.1. Cechowanie zwężki lub kryzy dla wody

1. Zapisać wymiary zwężki lub kryzy do protokołu pomiarowego.
2. Włączyć pompę i zaworem 4 ustalić wydatek wody.
3. Odczytać wskazanie h manometru 7.
4. Zmierzyć czas τ napełniania zbiornika 5 (objętość $V_z = 5$ l).
5. Powtórzyć pomiary dla pięciu różnych wskazań manometru (wydatku wody).
6. Odczytać temperaturę wody.
7. Wyznaczyć wydatek teoretyczny ze wzoru (3.4). Różnicę ciśnień Δp obliczyć jako $\Delta p = (\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}) g h$, gdzie h wskazania manometru. Gęstość wody przyjąć $\rho = 10^3$ kg/m³.
8. Obliczyć wydatek rzeczywisty $Q = V_z / \tau$ a następnie współczynnik zwężki lub kryzy

$$K = \frac{Q}{Q_t} .$$

9. Obliczyć liczbę Reynoldsa

$$Re = \frac{V_l D}{\nu} = \frac{4 Q}{\pi D \nu}$$

(Współczynnik lepkości kinematycznej ν odczytać dla zmierzonej temperatury wody.)

10. Powtórzyć obliczenia (punkty 7 ÷ 9) dla pozostałych pomiarów.
11. Wykonać wykres $K = f(Re)$.

4.2. Wyznaczanie wydatku powietrza

1. Zapisać wymiary zwężki do protokołu.
2. Zapisać ciśnienie atmosferyczne p_a .
3. Odkręcić nakrętkę 4 a następnie zawór 3.
4. Ustawi wydatek za pomoc nakrętki 4, kierując się wskazaniem manometru 6.
5. Odczytać wskazania manometrów 5 (h) i 6 (H).
6. Odczytać wskazanie t termometru 7.
7. Powtórzyć czynności 4 ÷ 6 dla pięciu różnych wydatków.
8. Obliczyć wydatek teoretyczny wg wzoru (3.9) uwzględniając, że

$$\Delta p = \rho_{H_2O} g h \quad p_1 = \frac{p_1}{R T_1}$$

gdzie $p_1 = p_a + \Delta p$ $p_1 = p_a + \rho_{Hg} g H$,

$$T_1 = 273 + t$$

$$R = 287 \text{ m}^2 / (\text{s}^2 \text{ K}) .$$

Liczbę ekspansji ε obliczyć wg wzoru (3.10) lub odczytać z rys. 3.3.

9. Obliczyć wydatek rzeczywisty wg wzoru (3.12). Wartość K odczytać z rys. 3.6 lub rys. 3.5 dla $Re > Re_{gr}$.
 10. Obliczyć liczbę Reynoldsa
- $$Re = \frac{V_l D}{\nu} = \frac{4 Q}{\pi D \nu}$$
- Współczynnik ν odczytać z rys. 6.1 dla danej temperatury t .
11. Jeśli $Re < Re_{gr}$ powtórzyć obliczenia wg punktów 9 i 10 aż do uzyskania wystarczającej dokładności współczynnika zwężki K .
 12. Powtórzyć obliczenia wg punktów 8 ÷ 11 dla pozostałych pomiarów. Zestawić obliczone wartości w tablicy.