

Ćwiczenie 3:

BADANIE OPORÓW PRZEPIYU PLYNÓW W PRZEWODACH

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wartości liniowych i miejscowych oporów przepływu w rurze w zależności od wielkości strumienia przepływającego powietrza oraz określenie współczynników miejscowych oporów przepływu dla różnych elementów armatury i ich długości zastępczych.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Podczas transportu płynów rurociągami występują zawsze straty ciśnienia płynu. Wartość tych strat rzutuje na zapotrzebowanie energii zużywanej na transport płynów, a tym samym wpływa na wartość kosztów eksploatacyjnych całej instalacji przesyłowej. Na wartość całkowitej straty ciśnienia płynu jednofazowego w przewodzie o stałym przekroju poprzecznym mają wpływ:

- a) straty ciśnienia związane z liniowymi oporami przepływu, ΔP_l ;
- b) straty ciśnienia związane z miejscowymi oporami przepływu, ΔP_m ;
- c) straty ciśnienia związane z różnicą poziomów pomiędzy położeniem wlotu i wylotu płynu z rurociągu, ΔP_h .

Sumaryczną stratę ciśnienia można zatem przedstawić w postaci

$$\Delta P = \Delta P_l + \Delta P_m \pm \Delta P_h \quad (1)$$

2.1. LINIOWE OPORY PRZEPIYU ΔP_l

W odniesieniu do płynów nieściśliwych (cieczy), liniowe opory ich przepływu przez rurociąg można wyznaczyć na podstawie równania Darcy-Weisbacha

$$\Delta P_l = \lambda \frac{w^2 \rho}{2} \frac{L}{d}, \quad (2)$$

w którym poszczególne symbole oznaczają:

λ - liczba oporu przepływu;

w - średnia prędkość przepływu płynu, m/s;

ρ - gęstość płynu, kg/m³;

L - długość przewodu, m;

d - średnica przewodu, m.

W przypadku płynów ściśliwych (gazów), przy stosunkowo małym oporze ich przepływu, równanie (1) przyjmuje postać

$$\Delta P_1 = \lambda \frac{g_T^2}{2} v_m \frac{L}{d} \quad (3)$$

gdzie: g_T - gęstość strumienia masy płynu ściśliwego, kg/(m²·s);

v_m - objętość właściwa płynu przy średnim ciśnieniu w przewodzie, m³/kg.

W praktyce, przy stosowaniu równań (2) lub (3), najbardziej złożonym zagadnieniem jest wyznaczenie wartości liczby oporu przepływu.

W przypadku przepływu laminarnego ($Re < 2100$) wartość liczby oporu przepływu obliczać należy z równania

$$\lambda = \frac{a}{Re} \quad (4)$$

w którym stała a jest zależna od kształtu przewodu i wynosi dla przekroju:

- kołowego $\rightarrow 64$
- kwadratowego $\rightarrow 57$
- pierścieniowego $\rightarrow 95$
- prostokątnego, przy $h/b = 0,2$ $\rightarrow 76$, przy $h/b = 0,5$ $\rightarrow 62$

Liczba Reynoldsa w równaniu (4) definiowana jest jako

$$Re = \frac{w d_e \rho}{\eta} = \frac{g_T d_e}{\eta} \quad (5)$$

przy czym: η - współczynnik dynamiczny lepkości płynu, Pa·s

d_e - ekwiwalentna średnica przewodu, m.

W przypadku przepływu turbulentnego, przez rury gładkie, liczbę oporu przepływu można wyznaczyć na podstawie różnych wzorów empirycznych podawanych w literaturze, np. [1].

Najbardziej rozpowszechnione z nich są:

- w zakresie zmian $Re = (2,3 \cdot 10^3 \div 10^5)$ - równanie Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (6)$$

- w zakresie $Re > 10^5$ - równanie Nikuradsego

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (7)$$

W przypadku turbulentnego przepływu płynu przez przewód o szorstkich ściankach, liczba oporu przepływu zależy także od szorstkości względnej ścian kanału

$$\varepsilon = \frac{k}{d}, \quad (8)$$

gdzie k oznacza średnią wysokość nierówności powierzchni. Wartości liczbowe k można znaleźć w literaturze, np. [2]. W przypadku rur szorstkich liczba oporu przepływu może być wyznaczona np. w oparciu o równanie Colebrooka-White'a

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left(\frac{2,51 \sqrt{\lambda}}{\lambda \text{Re}} + \frac{k}{3,71d} \right) \sqrt{\lambda} \quad (9)$$

lub też na podstawie wykresu znanego szeroko w literaturze, np. [2]

W przypadku przepływu płynu przez rurociąg o przekroju niekołowym lub niepełnym przekrojem kołowym, w miejsce średnicy w równaniach (1), (2) i (5) należy podstawić średnicę ekwiwalentną (tzw. hydrauliczną) przewodu

$$d_e = \frac{4F}{O} \quad (10)$$

gdzie: F - pole przekroju poprzecznego strumienia płynu, m^2 ;
 O - obwód przewodu zwilżany przez płyn, m .

Średnica ekwiwalentna dla przewodów o różnym kształcie przekroju poprzecznego jest równa:

- dla przekroju kołowego o średnicy d $\rightarrow d_e = d$;
- dla przekroju kwadratowego o boku a $\rightarrow d_e = a$;
- dla przekroju prostokątnego o bokach h i b $\rightarrow d_e = \frac{2hb}{h+b}$;
- dla przekroju pierścieniowego o średnicach D i d $\rightarrow d_e = D - d$.

2.2. MIEJSCOWE OPORY PRZEPIYWU ΔP_m

Straty energii płynu, wywołane jego ekspansją lub kontrakcją oraz zawirowaniami związanymi ze zmianą przekroju i kierunku przepływu, noszą nazwę miejscowych oporów przepływu.

Opory te występują głównie w miejscach zmiany średnicy przewodu, na kolanach rurociągów i łukach węzownic oraz różnych elementach armatury np. zaworach, zasuwach, kurkach, rozgałęzieniach itp. Wartość miejscowych oporów przepływu można wyznaczyć na podstawie zależności

$$\Delta P_m = \xi \frac{w^2 \rho}{2},$$

(11)

w której ξ określane jest mianem liczby oporu miejscowego.

Wartości liczby oporu miejscowego (wyznaczanej eksperymentalnie) są funkcją kształtu danego elementu rurociągu. Niekiedy wartość ξ uzależniona jest również od charakteru przepływu płynu przez dany element. Charakter ten określany jest na podstawie wartości liczby Reynoldsa. Wartości liczby oporu przepływu dla różnego rodzaju elementów armatury szeroko podaje literatura, np. [2], przy czym należy zwrócić uwagę na sposób określania prędkości występującej w równaniach (5) i (11).

Niekiedy, w celu upodobnienia oporów miejscowych do liniowych, wprowadza się pojęcie zastępczej długości rury dla oporu miejscowego. Wielkość ta oznacza taką długość poziomej rury prostoosiowej w której przepływający płyn wywołuje opory liniowe równe co do wartości oporom miejscowym w rozpatrywanym elemencie rurociągu.

Porównując zależności (2) i (11) otrzymuje się

$$\xi = \lambda \frac{L}{d},$$

(12)

a zatem można zdefiniować zastępczą długość rury dla oporu miejscowego jako

$$L_z = \frac{\xi}{\lambda} d.$$

(13)

Wartości L_z podaje literatura, np. [2], a przy wykorzystaniu tej wielkości, sumę oporów liniowych i miejscowych dla danego rurociągu można zapisać w postaci

$$\Delta P_{l+m} = \lambda \frac{w^2 \rho}{2} \frac{L + \sum L_z}{d}.$$

(14)

2.3. STRATY CIŚNIENIA ZWIĄZANE Z RÓŻNICĄ POŁOŻENIA WLOTU I WYLOTU RUROCIĄGU ΔP_h

W przypadku rurociągu którego wlot i wylot różnią się poziomem położenia, różnica ciśnienia płynu na obu jego końcach jest związana również z jego ciśnieniem hydrostatycznym. Można zatem napisać

$$\Delta P_h = \rho \mathfrak{g} h,$$

(15)

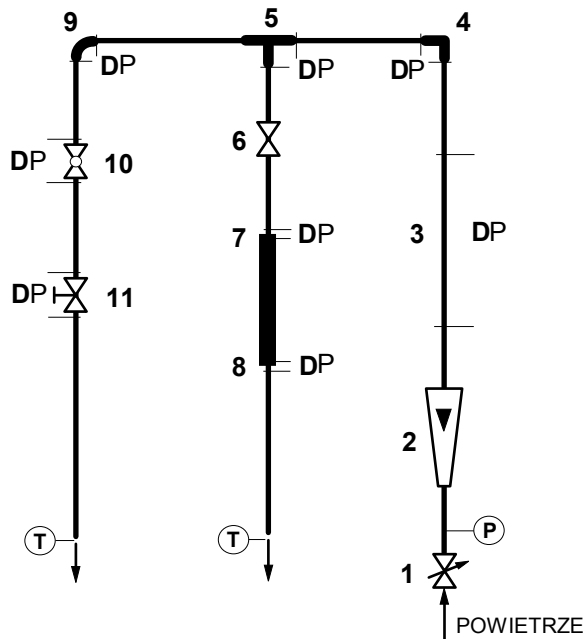
gdzie: ρ - gęstość płynu, kg/m^3 ;
 \mathfrak{g} - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ;

h - różnica poziomów między wlotem a wylotem z przewodu, m.

O ile wartość ΔP_h jest istotna w przypadku przepływu cieczy, o tyle przy transporcie gazów zwykle jest pomijana jako mała w stosunku do sumy liniowych i miejscowych strat ciśnienia.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

W omawianym ćwiczeniu, pomiary liniowych i miejscowych oporów przepływu powietrza prowadzone są na stanowisku przedstawionym schematycznie na rys. 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

1 - zawór regulacyjny, 2 - rotametr, 3 - prostoosiowy odcinek pomiarowy, 4 - kolano ostrokątne 90°, 5 - trójnik, 6 - zawór odcinający, 7 - skokowe zwiększenie przekroju rury, 8 - skokowe zmniejszenie przekroju rury, 9 - kolano łukowe 90°, 10 - zawór kulowy, 11 - zawór grzybkowy, T - termometr termo-elektryczny, P - manometr sprężynowy

Stanowisko wykonano ze stalowej ocynkowanej rury o średnicy wewnętrznej 22 mm, na której zamontowano różne elementy wywołujące miejscowe opory przepływu. Czynnikiem przepływającym przez instalację jest powietrze którego strumień, po przejściu przez zawór regulacyjny (1) jest mierzony rotametrem (2).

Po przejściu przez rotametr powietrze przepływa przez poszczególne elementy instalacji, na których za pomocą manometrów U - rurkowych wypełnionych wodą, mierzone są opory przepływu.

Poszczególne miejsca pomiarowe stanowią:

- prostoosiowy odcinek rury o długości 1m, (3);
- kolano ostrokątne 90°, (4);
- trójkąt, (5);
- skokowe zwiększenie przekroju rury, (7);
- skokowe zmniejszenie przekroju rury, (8);
- kolano łukowe 90°, (9);
- zawór kulowy, (10);
- zawór grzybkowy, (11).

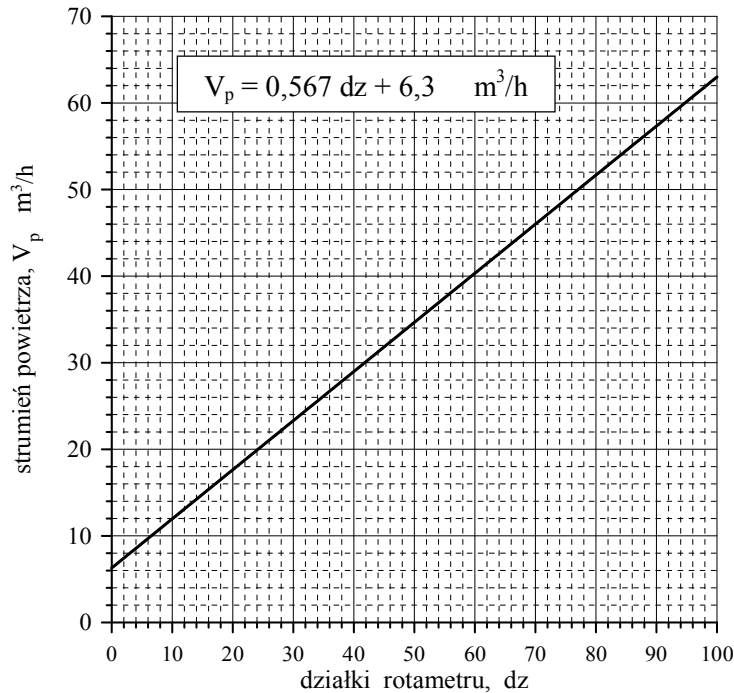
Przepływ przez elementy (3), (4), (5), (7) i (8), realizowany jest przy zamkniętym zaworze (10), a przez elementy (9), (10) i (11) przy zamkniętym zaworze (6). Temperatura powietrza mierzona jest termometrem termoelektrycznym T na wypływie gazu z instalacji. Manometr sprężynowy P umożliwia pomiar nadciśnienia powietrza na wlocie do instalacji. Średnie ciśnienie gazu równe jest w przybliżeniu

$$P_{\text{śr}} = P_{\text{ot}} + \frac{P}{2}, \quad (16)$$

gdzie: P_{ot} - ciśnienie atmosferyczne wskazywane przez barometr, Pa;

P - nadciśnienie wskazywane przez manometr sprężynowy, Pa.

Charakterystykę rotametu powietrza przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyka rotametru powietrza

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów oporów przepływu należy:

- otworzyć zawór odcinający dopływ powietrza z instalacji sprężonego powietrza;
- zamknąć zawór kulowy (10) i otworzyć zawór odcinający (6);
- za pomocą zaworu regulacyjnego (1) ustalić określony strumień powietrza mierzony rotametrem (2);
- odczytać wskazania manometrów U-rurkowych podłączonych do elementów (3), (4), (5), (7) i (8);
- powtarzać czynności wymienione w pkt. c) i d) zmieniając strumień powietrza wg założonego kroku do osiągnięcia jego wartości końcowej;
- zamknąć zawór odcinający (6) i częściowo otworzyć zawór kulowy (10);
- zmieniając strumień powietrza wg ustalonego kroku dokonywać odczytów oporów przepływu występujących na elementach (9), (10) i (11);
- wyniki każdorazowo notować w tabeli.

Badanie oporów przepływu płynu przez rurociąg

Temperatura powietrza: °C									
Średnica przewodu: 3/4 ”									
Strumień powietrza		Opór przepływu mierzony na elemencie							
działki rotametu	nadciśnienie na zasilaniu	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
-	kPa	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O	mm H ₂ O
10									
20									
...									

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

1. Wykreślić charakterystyki oporów przepływu w funkcji strumienia powietrza dla wszystkich mierzonych elementów.
2. Traktując rurę jako hydraulicznie gładką ($k \approx 0$) wykreślić dla jej prostoosiowego odcinka pomiarowego funkcję $\lambda_{zm} = f(\text{Re})$ i porównać jej przebieg z przebiegiem linii opisanej przy wykorzystaniu równań (4), (6) lub (7). Wartość λ_{zm} wynika z prostego przekształcenia równania (2)

$$\lambda_{zm} = \frac{2 \Delta P_{zm} d}{g_T^2 v_m L}$$

3. Wykorzystując przekształcone równanie (11), wykreślić charakterystyki $\xi_{zm} = f(\text{Re})$ dla elementów instalacji wywołujących miejscowe opory przepływu

$$\xi_{zm} = \frac{2 \Delta P_{zm}}{w^2 \rho}$$

Prędkość w powyższym równaniu należy liczyć dla średnicy 22mm.

4. Wykorzystując zależność

$$L_z = \frac{\Delta P_{zm,(i)}}{\Delta P_{zm,(3)}}$$

gdzie: $i = 4 \div 11$ - poszczególne elementy instalacji wywołujące opory miejscowe

wyznaczyć zastępcze długości odcinków prostoosiowych dla poszczególnych elementów armatury; uśredniając otrzymane wyniki.

5. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] KOCH R., NOWORYTA A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej, WNT W-wa 1992
- [2] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996

7. TEMATYKA ZAGADNIENÍ KONTROLNYCH

1. Przyczyny występowania strat ciśnienia płynu podczas przepływu.
2. Wielkości od których zależy wartość liniowych oporów przepływu.
3. Wielkości od których zależy wartość miejscowych oporów przepływu.
4. Zastępcza długość rurociągu dla oporów miejscowych.
5. Wpływ właściwości fizycznych płynów na ich opory przepływu.