

## 5. POMIAR NATĘŻENIA PRZEPŁYWU W RUROCIĄGACH

### 5.1. WSTĘP

Rurociągi, przez które przetłaczane są różnego rodzaju ciecze i gazy, spotyka się na co dzień w wielu dziedzinach działalności człowieka. Bardzo często zachodzi konieczność pomiaru natężenia przepływu czynnika płynącego przez rurociąg.

Poniższe ćwiczenie ma na celu zapoznanie studentów z kilkoma wybranymi, najczęściej stosowanymi metodami pomiaru natężenia przepływu lub objętości przepływającej przez rurociąg cieczy.

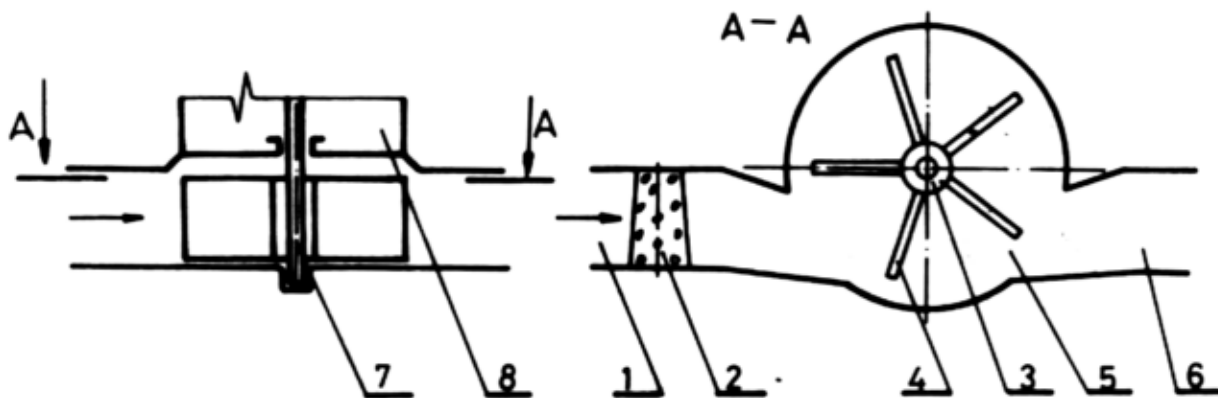
### 5.2. PRZEPŁYWOMIERZE WIRNIKOWE

Zasada pomiaru natężenia przepływu (lub objętości przepływającej cieczy) za pomocą przepływomierzy wirnikowych opiera się na proporcjonalności prędkości obrotowej wirnika przepływomierza do prędkości przepływu cieczy, a tym samym do natężenia przepływu. Mechanizmy zliczające przekształcają wynik pomiaru na objętościowe natężenie przepływu lub objętość przepływającej cieczy. W chwili obecnej istnieje szereg rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy wirnikowych. W omawianym ćwiczeniu wykorzystane są dwa ich typy: przepływomierz skrzydełkowy oraz śrubowy (turbiny).

#### 5.2.1. Przepływomierz skrzydełkowy

W ćwiczeniu wykorzystywany jest przepływomierz jednostrumieniowy z mechanicznym urządzeniem zliczającym. Cechą charakterystyczną tego typu przepływomierzy jest prostopadłe ustawienie osi wirnika w stosunku do kierunku przepływu wody.

Woda dopływa do przepływomierza (rys. 5.1) kanałem dolotowym 1 poprzez filtr siatkowy 2 i napływa na wirnik 3 umieszczony w komorze wirnikowej 5, zaopatrzony w łopatki 4, a następnie wypływa kanałem wypływowym 6. Jak widać na rysunku, wirnik przepływomierza zasilany jest niesymetrycznie, zatem napór hydrauliczny wody powoduje obrót wirnika. Obroty wirnika, poprzez wałek 7, przenoszone są do urządzenia zliczającego, umieszczonego w obudowie 8. Przepływomierz zaopatrzony jest w licznik wskazówkowy wskazujący objętość przepływającej cieczy (rys. 5.2, wskazanie: 263. 52 m<sup>3</sup>).



Rys. 5.1

Średnie objętościowe natężenie przepływu można określić mierząc czas, w którym przez przepływomierz przepłynie określona ilość cieczy.

Oprócz omówionej, istnieją inne odmiany konstrukcyjne przepływomierzy skrzydełkowych.

Ciecz dopływa do przepływomierza z prędkością proporcjonalną do chwilowego objętościowego natężenia przepływu. Ponieważ prędkość kątowna wirnika jest proporcjonalna do prędkości przepływu cieczy, jest zatem także proporcjonalna do natężenia prze-

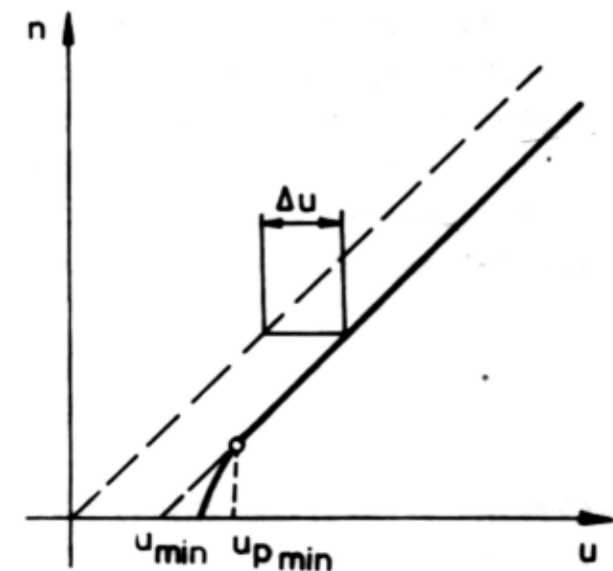


Rys. 5.2

pływu. Ilość obrotów wykonanych przez wirnik jest więc proporcjonalna do do objętości cieczy, która przepłynęła przez przepływomierz. Przekładnia

mechaniczna uwzględnia wszystkie współczynniki proporcjonalności, umożliwiając wyskalowanie przyrządu w jednostkach objętości. Ponieważ wszystkie współczynniki proporcjonalności są stałe, charakterystyka przyrządu jest w zakresie pomiarowym linią prostą (rys. 5.3).

Przesunięcie charakterystyki w stosunku do linii do niej równoległej, wychodzącej z początku układu współrzędnych, o wartość  $u_{min}$  spowodowane jest występowaniem oporów mechanicznych w urządzeniu zliczającym i w dławnicy uszczelniającej oś wirnika.



Rys. 5.3

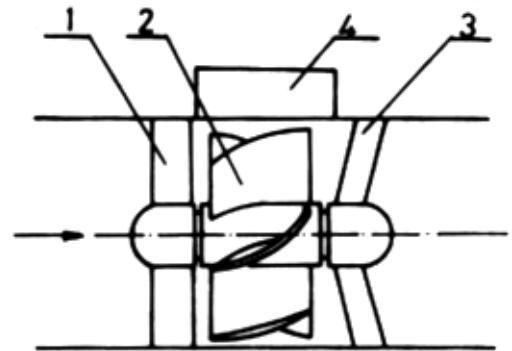
W zakresie od  $u_{min}$  do  $u_{pmin}$  charakterystyka jest nieliniowa, zaś zakres pomiarowy zaczyna się od wartości  $u_{pmin}$  (początek zakresu proporcjonalności). Wartość  $\Delta u$  jest miarą błędu systematycznego wynikającego z przesunięcia charakterystyki (opory tarcia).

Po przekroczeniu wartości  $u_{pmin}$ , maksymalny błąd pomiaru zawiera się w granicach  $\pm 2\%$ .

### 5.2.2. Przepływomierz śrubowy (turbinowy)

Cechą charakterystyczną tego typu przepływomierzy jest równoległe usytuowanie osi wirnika w stosunku do kierunku napływu cieczy. Zasada działania jest podobna do zasady działania turbiny śmigłowej.

Ciecz, przepływając przez promieniową kierownicę 1 (rys. 5.4), napływa na wirnik 2, łożyskowany w dwóch łożyskach ślizgowych umieszczonych w opływce kierownicy 1 i wsporczej 3. Prędkość obrotowa wirnika, proporcjonalna do objętościowego natężenia przepływu, mierzona jest w urządzeniu zliczającym 4. Charakterystyka przyrządu jest podobna do opisanej wcześniej charakterystyki przepływomierza skrzydełkowego.



Rys. 5.4

W starszych modelach przepływomierzy urządzenie zliczające 4 wykonane jest w postaci przekładni zębatej. W ówczesnym wykorzystywany jest przepływomierz śrubowy nowego typu, PMB-3000. Obudowa przyrządu wykonana jest z niemagnetycznej stali stopowej, natomiast wirnik - z materiału magnetycznie miękkiego (permalloju). Wirnik ułożyskowany jest w tulejkach teflonowych. Urządzenie zliczające 4 zbudowane jest w postaci cewki elektrycznej, nawiniętej na rdzeniu z magnesu trwałego. Obrót wirnika, wywołany przepływem cieczy, powoduje okresowe zmiany indukcji magnetycznej w szczelinie pomiędzy łopatkami wirnika a rdzeniem cewki. Dzięki temu, na zaciskach cewki generuje się siła elektromotoryczna, której częstotliwość jest proporcjonalna do liczby łopatek wirnika i jego prędkości kątowej. Ponieważ prędkość kątowa wirnika jest proporcjonalna do natężenia przepływu cieczy, zatem częstotliwość sygnału jest wprost proporcjonalna do natężenia przepływu. Impulsy zliczane są za pomocą miernika elektronicznego i wyświetlane w postaci częstotliwości sygnału, natężenia przepływu lub objętości przepływającej w danym czasie cieczy. Charakterystykę miernika przedstawiono na rys. 5.5.

Dane techniczne przepływomierza

PMB-3000:

Zakres natężeń przepływu:

$$Q = 5-50 \text{ l/min } (8 \cdot 10^{-5} \div 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})$$

Częstotliwość sygnału:

$$f = 100-1000 \text{ Hz}$$

Max opór hydrauliczny:

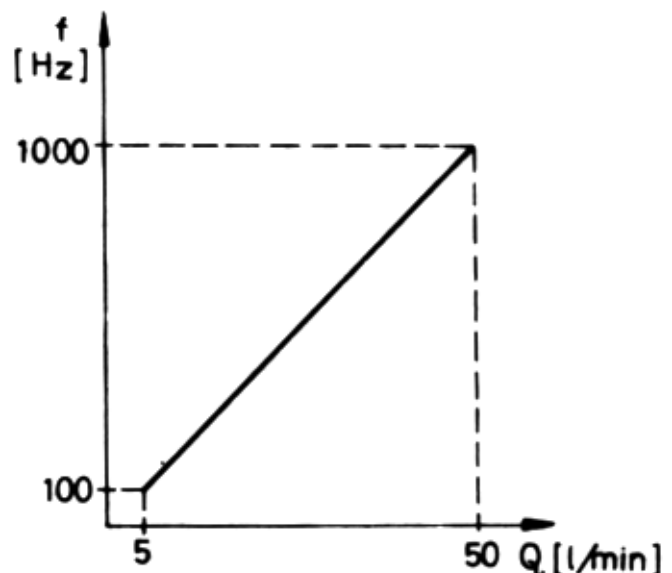
$$p_0 = 0,048 \text{ MPa}$$

Max ciśnienie robocze:

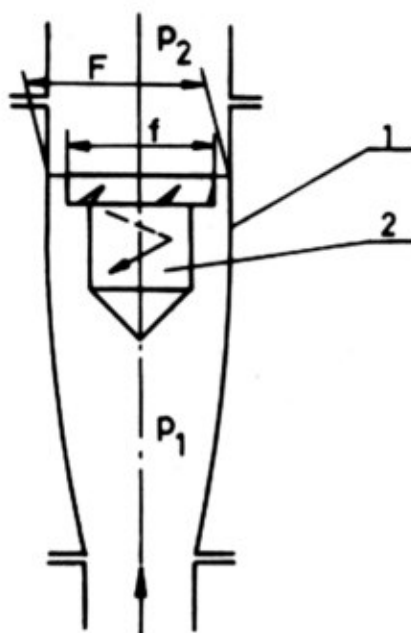
$$p_{\text{max}} = 32 \text{ MPa}$$

Temperatura pracy:  $t = -60 \div +80 \text{ }^\circ\text{C}$

Lepkość cieczy:  $\nu < 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$



Rys. 5.5



Rys. 5.6

Typowym przedstawicielem grupy przepływomierzy pływakowych jest rotametr. W przezroczystej rurce 1 (rys. 5.6) rozszerzającej się ku górze unosi się swobodnie pływak 2.

W celu stabilizacji pływaka, nadaje mu się ruch obrotowy poprzez nacięcie na jego górnej części skośnych rowków. Woda przepływa przez rotametr od dołu do góry przez szczelinę między pływakiem a wewnętrzną powierzchnią rurki. Miarą natężenia przepływu jest wysokość, na jaką unosi się pływak. Pływak, zanurzony całkowicie w cieczy, utrzymuje się w równowadze pod działaniem siły ciężkości działającej w dół oraz sił wyporu i naporu hydrodynamicznego - działających do góry.

$$(p_1 - p_2)f + V\delta = V\delta_p \quad (5.1)$$

gdzie:  $p_1$  - ciśnienie pod pływakiem,  
 $p_2$  - ciśnienie nad pływakiem,  
 $f$  - największe pole przekroju poprzecznego pływaka,  
 $V$  - objętość pływaka,  
 $\delta$  - ciężar właściwy cieczy,  
 $\delta_p$  - ciężar właściwy materiału, z którego wykonany jest pływak.

Zależność (5.1) można przedstawić w postaci:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{V}{f} (\delta_p - \delta) \quad (5.2)$$

z której wynika, że różnica ciśnień nad i pod pływakiem jest stała, niezależnie od natężenia przepływu. Prędkość przepływu cieczy przez szczelinę między pływakiem a rurą można wyznaczyć z zależności:

$$u = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (5.3)$$

Objętościowe natężenie przepływu wyraża się zależnością:

$$Q = \mu F_0 u = \mu F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{V}{f} (\delta_p - \delta)} \quad (5.4)$$

gdzie:  $\mu$  - współczynnik natężenia przepływu,  
 $F_0$  - pole przekroju szczeliny ( $F_0 = F - f$ ).

Wartość współczynnika  $\mu$  zależy od kształtu pływaka i wewnętrznej powierzchni rurki, ich chropowatości oraz od liczby Reynoldsa.

Ponieważ prędkość przepływu cieczy, wynikająca z różnicy ciśnień, jest stała, zatem aby umożliwić pomiar różnych natężeń przepływu, pole szcze-

liny  $F_0$  musi się zmieniać. Uzyskuje się to poprzez odpowiednie ukształtowanie wewnętrznej powierzchni rury. Objętościowe natężenie przepływu jest proporcjonalne do prędkości cieczy  $u$ , natomiast różnica ciśnień nad i pod pływakiem jest proporcjonalna do kwadratu prędkości (wzór 5.3). Zatem aby podziałka naniesiona na zewnętrznej powierzchni rury była proporcjonalna, powierzchni wewnętrznej nadaje się kształt paraboloidy obrotowej. Zwiększenie natężenia przepływu cieczy przepływającej przez rotametr zmusza pływak do zwiększenia pola powierzchni szczeliny i powoduje jego uniesienie się ku górze. Zmniejszenie natężenia przepływu powoduje opadanie pływaka i zmniejszenie pola powierzchni szczeliny.

Rotametry są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia, które osiadając na pływaku zmieniają jego masę oraz chropowatość powierzchni. Zmiana masy wpływa na zmianę różnicy ciśnień  $\Delta p$ , a zmiana chropowatości na zmianę współczynnika  $\mu$ , co prowadzi do błędów pomiarowych. Zmiana temperatury płynu powoduje zmianę lepkości i gęstości, czyniąc podziałkę przyrządu bezużyteczną. Rotametry powinny być wzorcowane dla danego rodzaju płynu i dla temperatury, w jakiej będą eksploatowane. Ze względu na zanieczyszczenia cieczy, rotametr należy utrzymywać w czystości i po zakończeniu serii pomiarów powinno się wykonać wzorcowanie kontrolne. Dla zachowania symetrii przepływu, oś rotametu powinna być pionowa.

Mimo wielu wad, rotametry znalazły dość duże zastosowanie w pomiarach natężenia przepływu, szczególnie tam, gdzie wymaga się jedynie określenia jego orientacyjnej wartości. Dokładność pomiaru w przypadku ścisłego przestrzegania warunków pomiarów wynosi około  $\pm 1\%$ , natomiast w przypadku pomiarów technicznych (złagodzone warunki przeprowadzania pomiarów) wynosi  $\pm 2\%$ .

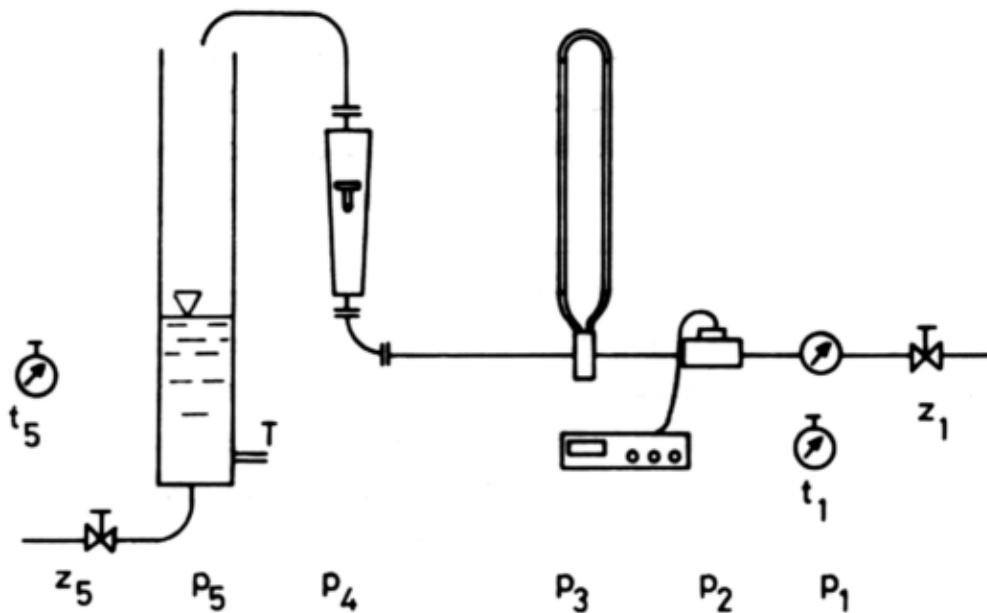
## 5.4. OPIS ĆWICZENIA

### 5.4.1. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów zainstalowanych na wspólnym rurociągu (rys. 5.7):

- Z1 - zawór regulacyjny,
- P1 - przepływomierz skrzydełkowy,
- P2 - przepływomierz turbiny (śrubowy),
- P3 - przepływomierz zwężkowy (kryza ISA z pomiarem przytarczowym),
- P4 - przepływomierz pływakowy (rotametr),
- P5 - zbiornik pomiarowy,
- Z5 - zawór odpływowy,
- T - termometr,
- $t_1, t_5$  - stoper.

Zawór regulacyjny służy do regulacji natężenia przepływu wody płynącej przez rurociąg. Zawór odpływowy służy do opróżniania zbiornika po zakończeniu pomiaru.



Rys. 5.7

#### 5.4.2. Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wykonanie pomiaru natężenia przepływu kilkoma wybranymi metodami i porównanie dokładności różnego rodzaju przepływomierzy oraz łatwości wykonywania pomiaru za ich pomocą. Pomiar wykonuje się niezależnie na poszczególnych stanowiskach pomiarowych.

Za pomocą przepływomierza skrzydełkowego P1 należy zmierzyć objętość wody, która przepłynie przez przepływomierz w określonym czasie. W tym celu uruchamia się stoper  $t_1$ , dokonując jednocześnie odczytu początkowego wskazania przyrządu. Po otrzymaniu sygnału zakończenia pomiaru, zatrzymuje się stoper, odczytując jednocześnie końcowe wskazanie przepływomierza.

Przepływomierz turbinowy P2 podłączony jest do miernika elektronicznego pokazującego częstotliwość sygnału lub do miernika wskazującego od razu natężenie przepływu i ilość wody przepływającej przez przepływomierz w danym czasie. W trakcie pomiaru należy odczytać średnie wskazanie przyrządu.

Przepływomierz zwężkowy P3 wskazuje na manometrze U-rurkowym różnicę ciśnień przed i za zwężką. W czasie pomiaru należy odczytać średnią różnicę ciśnień.

Posługując się rotametrem P4 należy odczytać średnie wskazanie przyrządu w czasie trwania pomiaru. Odczytu dokonuje się na podziałce naniesionej na zewnętrznej powierzchni rury, na wysokości górnej powierzchni pływaka.

Zbiornik pomiarowy P5 jest przyrządem służącym do wzorcowania przepływomierzy. W czasie pomiaru mierzy się za pomocą stopera czas napełniania zbiornika, podając pozostałym uczestnikom ćwiczenia sygnał początku i końca pomiaru.

W czasie ćwiczenia wykonuje się kilka pomiarów dla różnych natężeń przepływu, zmieniając je za pomocą zaworu regulacyjnego Z1.

5.5.1. Sposób obliczeń

Zbiornik pomiarowy:

Pomiar ten traktowany jest jako wzorcowy. Błędy pomiaru natężenia przepływu innymi przepływomierzami odnosimy do pomiaru wykonanego przy użyciu zbiornika.

Wysokości słupa wody w zbiorniku równej 0,01928 m odpowiada objętość 0,001 m<sup>3</sup>.

Natężenie przepływu wyznacza się z zależności:

$$Q_5 = \frac{V}{t_5} \quad (5.5)$$

Przepływomierz skrzydełkowy:

Przepływomierz wyskalowany jest w m<sup>3</sup>. Objętość cieczy, która przepłynęła przez przepływomierz w czasie t<sub>1</sub>, jest równa różnicy wskazań końcowego i początkowego, a natężenie przepływu:

$$Q_1 = \frac{\Delta V}{t_1} \quad (5.6)$$

Zwężka pomiarowa:

Sposób obliczania natężenia przepływu za pomocą zwężki podano w rozdziale „Pomiar natężenia przepływu za pomocą zwężek”. W obliczeniach należy przyjąć średnicę rurociągu d<sub>r</sub> = 0,041 m, średnicę otworu zwężki d<sub>o</sub> = 0,024 m, promień zaokrąglenia krawędzi zwężki r = 5·10<sup>-5</sup> m. Rurociąg jest stalowy, o zardzewiałej powierzchni wewnętrznej. W ćwiczeniu należy przyjąć pierwsze przybliżenie obliczenia wartości objętościowego natężenia przepływu.

Błąd pomiaru natężenia przepływu poszczególnymi metodami należy wyznaczyć z zależności:

$$\Delta Q_1 = \frac{Q_5 - Q_1}{Q_5} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

5.5.2. Tabela pomiarów i wyników

*prz. turbinek* T a b e l a 5.1

Lp.	P1 wodomierz					P2		P3		
	stan licznika		t <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	ΔQ <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	ΔQ <sub>2</sub>	Δh	Q <sub>3</sub>	ΔQ <sub>3</sub>
	pocz.	końc.								
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	s	m <sup>3</sup> /s	%	m <sup>3</sup> /s	%	mmH <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup> /s	%

działka element.	P4		P5			t
	poziom wody		V	t <sub>5</sub>	Q <sub>5</sub>	
	pocz.	końc.				
	m	m	m <sup>3</sup>	s	m <sup>3</sup> /s	°C

### 5.5.3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. schemat stanowiska pomiarowego,
2. tabelę pomiarów i obliczeń,
3. przykład obliczeń,
4. wykres skalowania rotametry. Na osi odciętych należy nanieść działkę elementarną rotametry, na osi rzędnych - natężenie przepływu,
5. wnioski.

Wnioski powinny zawierać porównanie dokładności poszczególnych przyrządów pomiarowych oraz uwagi o łatwości posługiwania się i możliwości zastosowania poszczególnych przepływomierzy.

### 5.6. LITERATURA

1. K o ł o d z i e j c z y k L., R u b i k M., M a ń k o w s k i S.: Pomiary w inżynierii sanitarnej. Warszawa: Arkady 1974.
2. T r o s k o l a ń s k i A.T.: Hydromechanika techniczna, t. III, Pomiary wodne. Warszawa: PWT 1957.



## 6. POMIAR NATĘŻENIA PRZEPŁYWU PŁYNÓW ZA POMOCĄ ZWĘŻEK

### 6.1. WSTĘP

Jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów pomiaru natężenia przepływu płynów jest pomiar za pomocą różnego typu zwężek pomiarowych. Warunki, w jakich powinny być wykonywane pomiary, wymiary i kształt zwężek oraz sposób ich zabudowy w rurociągi określa norma PN-65/M-53950 „Pomiar strumienia przepływu płynów za pomocą zwężek”. Przy ścisłym przestrzeganiu zaleceń normy możliwe jest osiągnięcie dokładności pomiaru rzędu 0,5% bez konieczności wcześniejszego wzorcowania zwężki. Dalsza część niniejszego rozdziału oparta jest na wydaniu VI (z 1980 r.) wyżej wymienionej normy.

### 6.2. POJĘCIA PODSTAWOWE

Przepływomierz zwężkowy jest to urządzenie służące do pomiaru strumienia przepływu, w skład którego wchodzi: zwężka pomiarowa wbudowana w prosty odcinek rurociągu, przewody impulsowe wraz z armaturą oraz manometr różnicowy z ewentualnym przetwornikiem i miernikiem wtórnym.

Zwężka pomiarowa jest to element dławiący wraz z obudową obejmującą otwory impulsowe.

Zwężka przepływowa jest to zwężka pomiarowa wbudowana między dopływową i odpływową częścią prostego odcinka rurociągu.

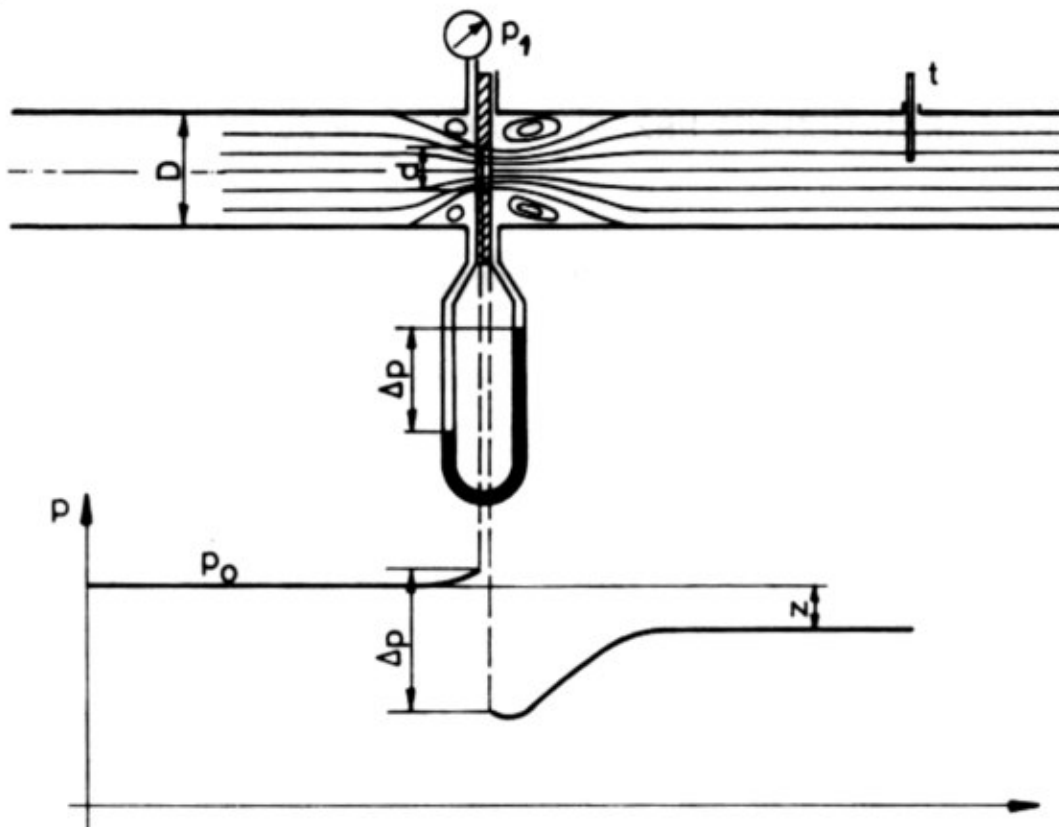
Otwory impulsowe są to otwory służące do przyściennego pomiaru ciśnienia, wykonane w rurociągu lub zwężce.

### 6.3. ZASADA POMIARU

Zwężkę pomiarową wbudowuje się w prosty odcinek rurociągu o określonej długości minimalnej. Na skutek przewężenia strumienia przepływającego płynu, powstaje różnica ciśnień statycznych przed i za zwężką. Rys. 6.1 przedstawia zwężkę pomiarową zabudowaną w rurociąg wraz z manometrem mierzącym ciśnienie statyczne przed zwężką  $p_1$ , manometrem różnicowym mierzącym różnicę ciśnień przed i za zwężką  $\Delta p$  oraz termometrem mierzącym temperaturę płynu  $t$ .

W pewnej odległości za zwężką ciśnienie ustala się i jest niższe od ciśnienia  $p_1$  panującego przed zwężką o stałą stratę ciśnienia  $z$ . Mia-

rażą natężenia przepływu jest różnica ciśnień  $\Delta p$ . Wykres rozkładu ciśnienia statycznego mierzonego przy ściance rurociągu przedstawiono na rys. 6.1.



Rys. 6.1

Norma PN-65/M-53950 przewiduje dwa rodzaje pomiarów:

- dokładne (I) - wykonywane w niezmiennych i stale kontrolowanych warunkach. Wymagania normy muszą być ściśle przestrzegane. Błąd pomiaru zawiera się wówczas w granicach 0,5-1,0%;
- techniczne (II) - wykonywane jako ciągłe pomiary eksploatacyjne (przemysłowe). Norma dopuszcza w tym przypadku pewne złagodzenie warunków pomiaru, dopuszczając zarazem do większego błędu pomiaru. Złagodzone warunki pomiaru umożliwiają wyskalowanie manometru różnicowego bezpośrednio w jednostkach masowego natężenia przepływu, co znacznie upraszcza procedurę pomiarową.

#### 6.4. WYBRANE RODZAJE ZWĘŻEK POMIAROWYCH

Poniżej przedstawiono kilka wybranych, najczęściej stosowanych rodzajów zwężek pomiarowych. Oprócz omówionych, istnieje kilka innych, dopuszczonych przez normę do stosowania w specyficznych warunkach pomiarowych.

##### 6.4.1. Wybrane rodzaje elementów dławiących

Kryza ISA jest to element dławiący wykonany w kształcie cienkościennej tarczy z kołowym otworem współosiowym z rurociągiem, o prostokątnej (w przekroju) krawędzi wlotowej.

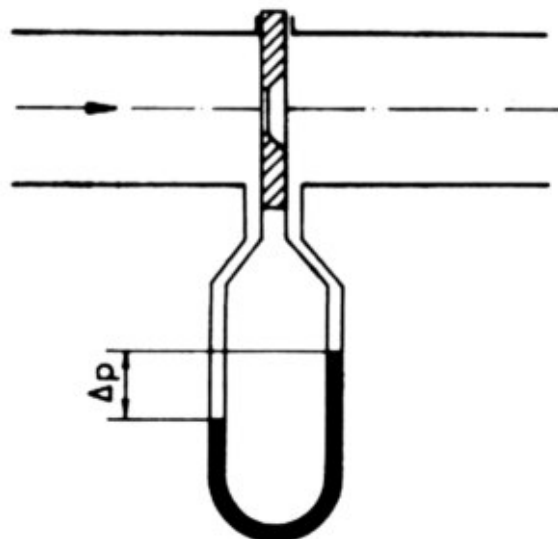
Dysza ISA jest to zbieżny element dławiący osiowo symetryczny, zakończony częścią cylindryczną.

Zwężka Venturiego jest to zwężka ze zbieżną częścią wlotową, środkową częścią cylindryczną oraz z rozbieżną stożkową częścią wylotową.

Stosując różny sposób zabudowy wymienionych elementów dławiących w rurociągu, uzyskuje się różne rodzaje przepływomierzy. Wszystkie wyżej wymienione elementy muszą się odznaczać dużą dokładnością wykonania.

#### 6.4.2. Kryza ISA z pomiarem przytarczowym

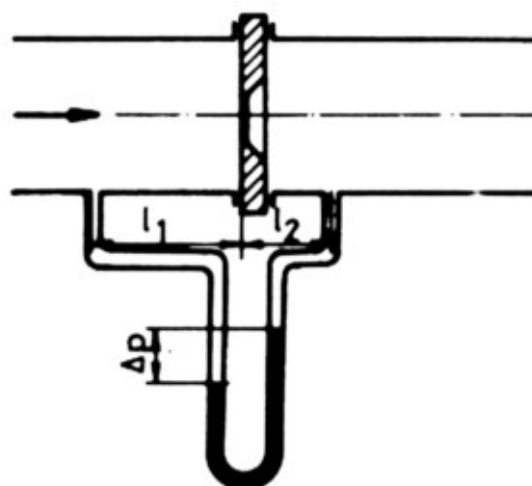
Jest to przepływowa zwężka pomiarowa składająca się z kryzy ISA i obudowy zawierającej otwory impulsowe do przytarczowego pomiaru ciśnienia różnicowego. Kryza zapewnia dużą dokładność pomiarów. Powoduje ona jednak największą stratę ciśnienia w porównaniu z innymi zwężkami, przy takiej samej wartości ciśnienia różnicowego. Jest to podstawowy typ zwężki do wykonywania pomiarów technicznych, przy których dopuszczalna jest powstająca w niej strata ciśnienia i istnieje dostatecznie długi odcinek pomiarowy (prosty odcinek rurociągu o stałej średnicy przed i za zwężką).



Rys. 6.2

#### 6.4.3. Kryza ISA z pomiarem „vena contracta”

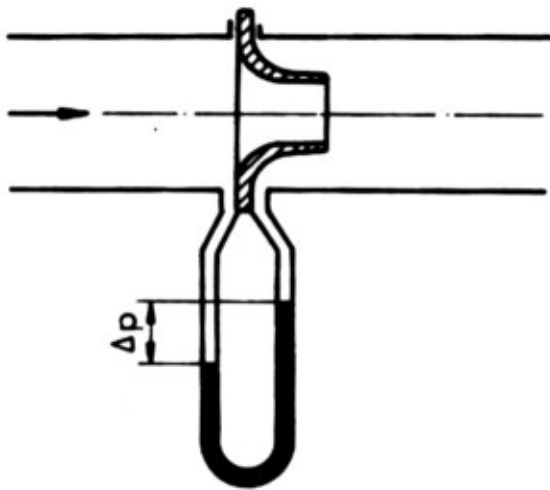
Kryzę wbudowuje się bezpośrednio między kołnierze rurociągu, otwory impulsowe umieszcza się w odległościach  $l_1$  i  $l_2$  ściśle określonych przez normę. Odległość  $l_1$  równa jest wewnętrznej średnicy rurociągu, zaś odległość  $l_2$  wypada w miejscu największego przewężenia strumienia płynu przepływającego przez zwężkę. Stąd wzięła się nazwa pomiaru „vena contracta” oznaczająca „przekrój przewężony” (strugi cieczy). Takie umiejscowienie otworów impulsowych zapewnia pomiar największej różnicy ciśnień  $\Delta p$ . Wadą jest duża strata ciśnienia, podobnie jak w przypadku kryzy ISA z pomiarem przytarczowym, oraz konieczność stosowania długich odcinków pomiarowych. Kryzy ISA z pomiarem „vena contracta” zalecane są do stosowania w przypadku pomiarów dokładnych.



Rys. 6.3

Tą samą kryzą ISA można jednocześnie wykonywać pomiar metodą przytarczową i „vena contracta”, po wykonaniu w odpowiednich odległościach otworów impulsowych do pomiaru ciśnienia różnicowego.

#### 6.4.4. Przepływowa dysza ISA

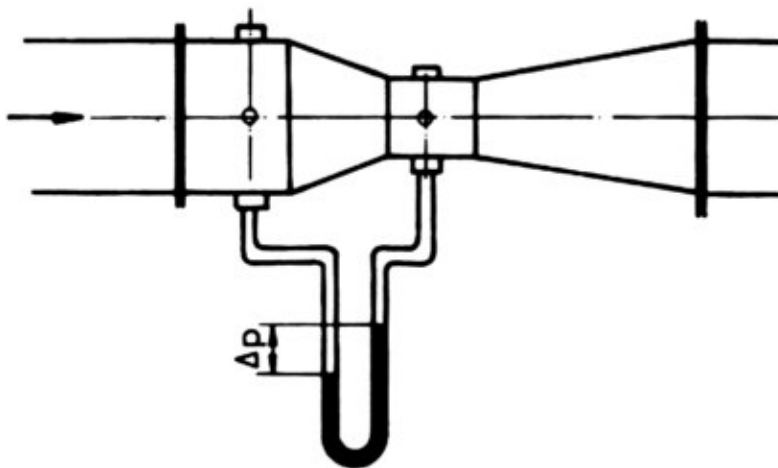


Rys. 6.4

W skład przepływomierza wchodzi dysza ISA oraz obudowa obejmująca otwory impulsowe do przytarczowego pomiaru ciśnienia różnicowego. Dokładność pomiaru jest rzędu dokładności kryz ISA, ale mierzona różnica ciśnień jest mniejsza o około 40%. Straty ciśnienia są w porównaniu z kryzami ISA mniejsze o 15-50%.

Ze względu na trudne wykonanie, zaleca się stosować dysze ISA tylko do pomiarów o dużej dokładności w przypadku, gdy nie jest dopuszczalna duża strata ciśnienia.

#### 6.4.5. Klasyczna zwężka Venturiego



Rys. 6.5

Klasyczna zwężka Venturi'ego składa się z cylindrycznej części wlotowej z otworami impulsowymi, stożkowej części zbieżnej (konfuzora), środkowej części cylindrycznej z otworami impulsowymi oraz stożkowego dyfuzora. Zwężka tego typu powoduje małą stratę ciśnienia (o około 70% niższą niż dysza ISA)

oraz wymaga 2 do 5 razy krótszego odcinka pomiarowego w porównaniu z kryzami i dyszami ISA.

Klasyczną zwężkę Venturi'ego zaleca się stosować do pomiarów mniej dokładnych (głównie technicznych) w przypadkach, gdy niedopuszczalna jest duża strata ciśnienia powodowana przez kryzę lub dyszę ISA.

### 6.5. PRZYKŁAD OBLICZENIA MASOWEGO NATĘŻENIA PRZEPŁYWU PRZEZ KRYŻĘ ISA Z POMIAREM PRZYTARCZOWYM

Przykład opracowano w oparciu o normę PN-65/M-53950.

Dane:

Rurociąg: stal węglowa

powierzchnia wewnętrzna nowa, walcowana

średnica w temperaturze 20°C,  $d_r = 50$  mm

Zwężka: stal nierdzewna

średnica otworu w temp. 20°C  $d_z = 30$  mm

promień zaokrąglenia krawędzi wlotowej  $r = 0.05$  mm

Płyn: woda o temperaturze  $t = 50^{\circ}\text{C}$   
ciśnienie różnicowe  $\Delta h = 500 \text{ mmH}_2\text{O}$   
nadciśnienie przed zwężką  $p = 0,1 \text{ MPa}$

Obliczenia:

Wysokość chropowatości wewnętrznej powierzchni rurociągu:

$$\Delta = 0,1 \text{ mm} \quad (\text{tabela 6.1})$$

Mnożnik poprawkowy rozszerzalności cieplnej rurociągu:

$$k_{tR} = 1 \quad (\text{rys. 6.6})$$

Średnica rurociągu w temperaturze  $t$ :

$$D_t = k_{tR} \cdot d_R = 1 \cdot 50 = 50 \text{ mm}$$

Mnożnik poprawkowy rozszerzalności cieplnej zwężki:

$$k_{tZ} = 1 \quad (\text{rys. 6.6})$$

Średnica otworu zwężki w temperaturze  $t$ :

$$d_t = k_{tZ} \cdot d_Z = 1 \cdot 30 = 30 \text{ mm}$$

Moduł zwężki:

$$m = \left[ \frac{d_t}{D_t} \right]^2 = \left[ \frac{30}{50} \right]^2 = 0,36$$

Gęstość wody w temperaturze  $t$ :

$$\rho = 988 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{tabela 6.2})$$

Ciśnienie różnicowe:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot g \Delta h}{1000} = \frac{988 \cdot 9,81 \cdot 500}{1000} = 4846 \text{ Pa}$$

Lepkość wody w temperaturze  $t$ :

$$\eta = 55 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (\text{tabela 6.3})$$

Liczba ekspansji:

$$\epsilon = 1 \quad (\text{dla cieczy; dla gazów } \epsilon < 1)$$

Wielkość pomocnicza:

$$\frac{Re}{\alpha} = \frac{1417 \epsilon m D_t}{\eta \cdot 10^6} \sqrt{\rho \Delta p} = \frac{1417 \cdot 1 \cdot 0,36 \cdot 50}{55 \cdot 10^{-5} \cdot 10^6} \sqrt{988 \cdot 4846} = 101473$$

Mnożnik poprawkowy lepkości płynu:

$$k_1 = 1,009 \quad (\text{rys. 6.7})$$

Mnożnik poprawkowy chropowatości rurociągu:

$$k_2 = 1 \quad (\text{pierwsze przybliżenie})$$

Mnożnik poprawkowy nieostrości krawędzi wlotowej kryzy:

$$k_3 = 1,01 \quad (\text{rys. 6.8})$$

Obliczeniowa liczba przepływu:

$$\alpha_0 = 0,648 \quad (\text{rys. 6.9})$$

$$Re' = 150\,000 \quad (\text{tabela 6.4})$$

$$Re_{\min} = 10\,000 \quad (\text{tabela 6.4})$$

Liczba przepływu:

$$\alpha = k_1 k_2 k_3 \alpha_0 = 1,009 \cdot 1 \cdot 1,01 \cdot 0,648 = 0,66$$

Objętościowe natężenie przepływu:

$$Q = 1,111 \cdot 10^{-6} \alpha \epsilon d_t^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = 1,111 \cdot 10^{-6} \cdot 0,66 \cdot 1 \cdot 30^2 \sqrt{\frac{4846}{988}} =$$
$$= 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Rzeczywista liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{1274,4 Q \rho}{d_t \eta} = \frac{1274,4 \cdot 988 \cdot 1,46 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 55 \cdot 10^{-5}} = 66\,847$$

Dla tak obliczonej wartości  $Re$  należy sprawdzić, czy wartości  $k_1$  i  $k_2$  ulegają zmianie (rys. 6.10 i 6.11). Jeśli tak, to należy skorygować wartość  $\alpha$ , obliczyć natężenie przepływu i ponownie sprawdzić  $Re$ ,  $k_1$  i  $k_2$ .

W przypadku pomiarów technicznych, gdy  $Re > Re'$ , można przyjąć, że  $\alpha = \text{const.}$

T a b e l a 6.1

Chropowatość  $\Delta$  (maksymalna wysokość nierówności)  
dla powierzchni wewnętrznej rurociągu

Materiał	Stan powierzchni wewnętrznej	$\Delta$ mm
Mosiądz Miedź Aluminium Tworzywa sztuczne Szkło	gładka, bez osadów	$< 0,03$
Stal	nowa, przeciągana na zimno, bez szwu	$< 0,03$
	nowa, przeciągana na gorąco, bez szwu nowa, walcowana, bez szwu nowa, spawana podłużnie	0,05-0,10
	nowa, spawana spiralnie	0,10

Materiał	Stan powierzchni wewnętrznej	$\Delta$ mm
	mało zardzewiała	0,10-0,20
	zardzewiała	0,20-0,30
	zanieczyszczona osadami	0,50-2,00
	z dużymi wżerami	>2,0
	nowa, wysmołowana	0,03-0,05
	wysmołowana- normalna	0,10-0,20
	ocynkowana	0,30
Żeliwo	nowa	0,25
	nowa, zardzewiała	1,0-1,5
	zanieczyszczona osadami	>1,5
	nowa, wysmołowana	0,10-0,15

T a b e l a 6.2

Gęstość wody w zależności od temperatury

Temperatura	Gęstość
$^{\circ}\text{C}$	$\text{kg/m}^3$
0	999,8
10	999,7
15	999,1
20	998,2
25	997,0
30	995,6
40	992,3
50	988,0

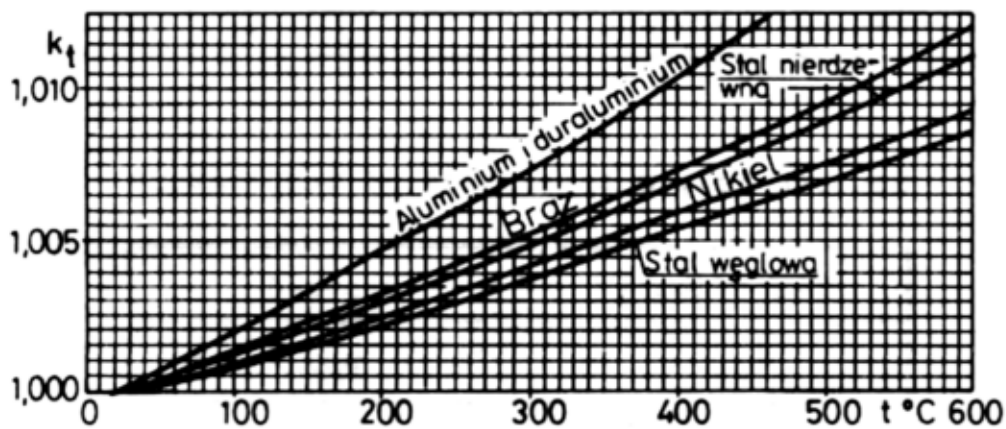
T a b e l a 6.3

Współczynnik lepkości wody w zależności od temperatury  
dla  $p = 0,1 \text{ MPa}$

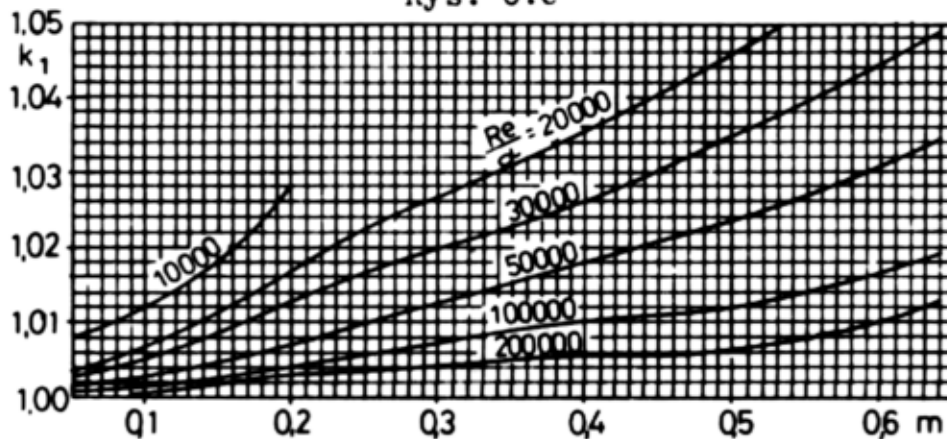
t	$\eta$	$\nu$
$^{\circ}\text{C}$	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{m}^2/\text{s}$
0	$179,2 \cdot 10^{-5}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$
10	$130,8 \cdot 10^{-5}$	$1,305 \cdot 10^{-6}$
20	$100,6 \cdot 10^{-5}$	$1,001 \cdot 10^{-6}$
30	$80,2 \cdot 10^{-5}$	$0,803 \cdot 10^{-6}$
40	$65,7 \cdot 10^{-5}$	$0,657 \cdot 10^{-6}$
50	$55,0 \cdot 10^{-5}$	$0,554 \cdot 10^{-6}$
60	$47,2 \cdot 10^{-5}$	$0,476 \cdot 10^{-6}$
70	$40,8 \cdot 10^{-5}$	$0,414 \cdot 10^{-6}$
80	$35,7 \cdot 10^{-5}$	$0,365 \cdot 10^{-6}$
90	$31,7 \cdot 10^{-5}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$

Zależność granicznych liczb Reynoldsa od modułu zwężki

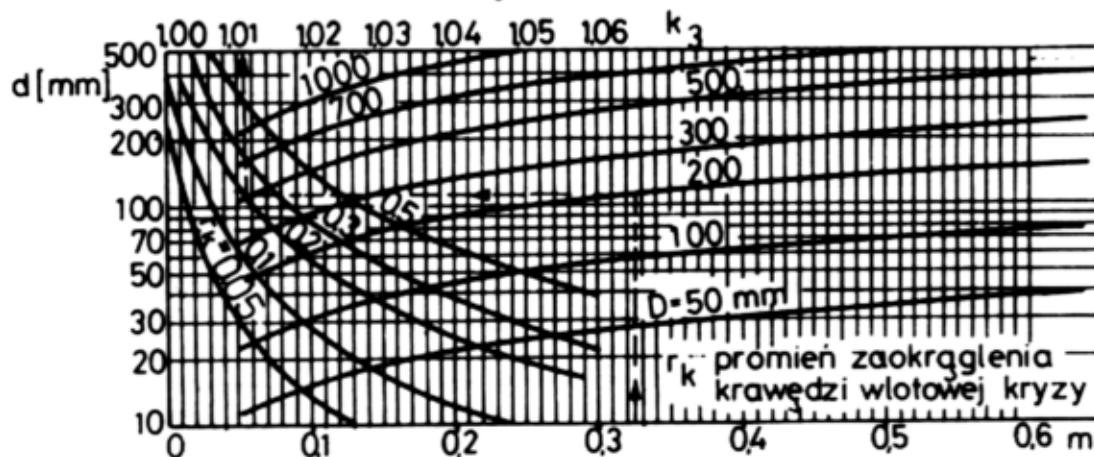
m	Re'	Re <sub>min</sub>
0,05	10 000	5 000
0,10	20 000	5 000
0,15	34 000	5 000
0,20	49 000	5 000
0,25	70 000	10 000
0,30	96 000	10 000
0,35	150 000	10 000
0,40	200 000	10 000
0,45	270 000	10 000
0,50	390 000	10 000
0,55	500 000	10 000
0,60	560 000	10 000
0,64	560 000	20 000



Rys. 6.6

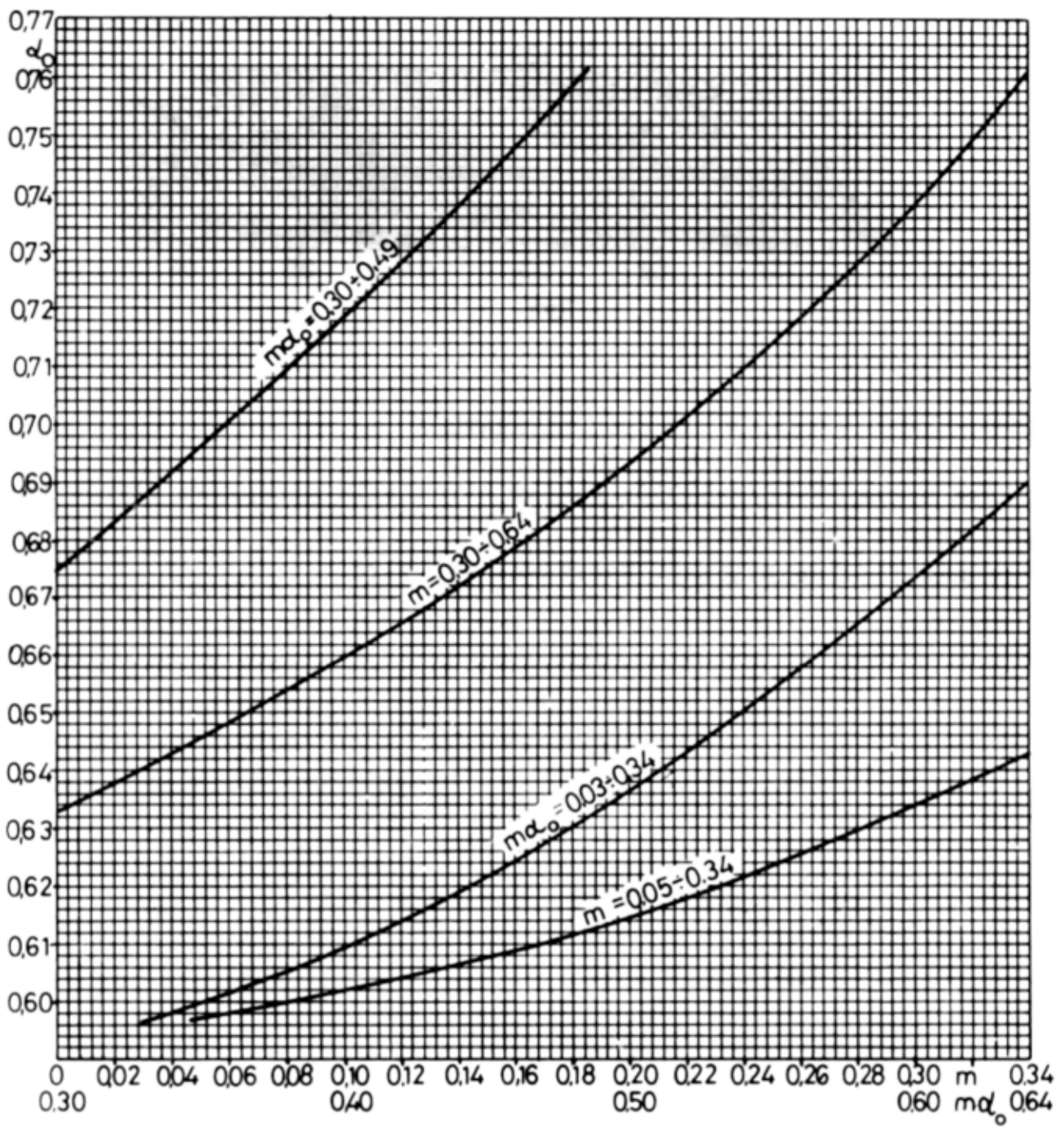


Rys. 6.7

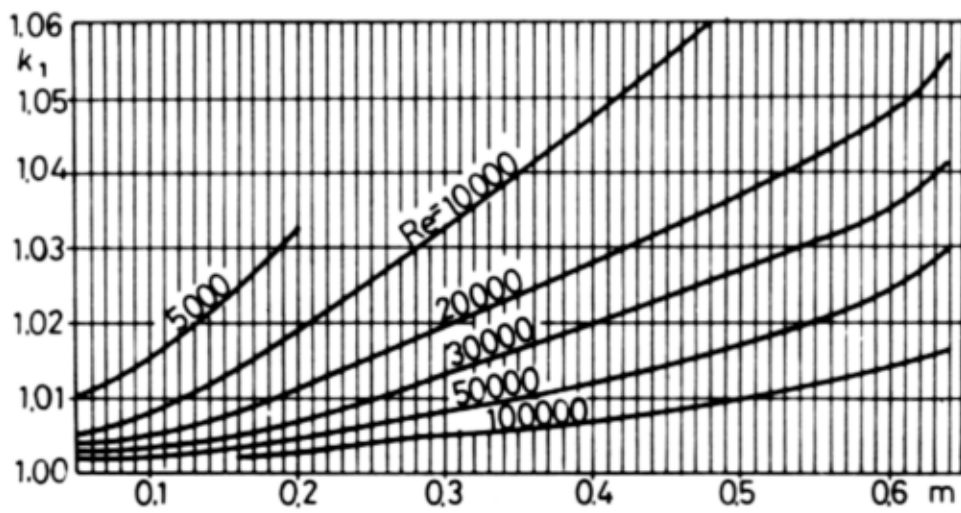


Rys. 6.8

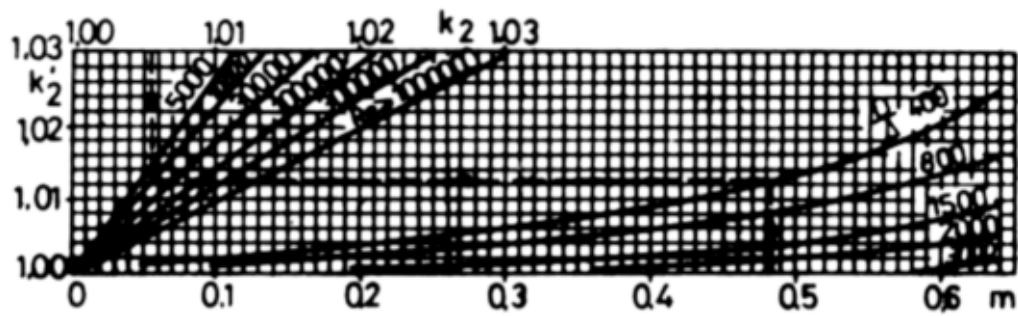




Rys. 6.9



Rys. 6.10



Rys. 6.11

## 6.6. LITERATURA

1. Polska norma PN-65/M-53950: Pomiar strumienia przepływu płynów za pomocą zwężek. Warszawa: WN 1980.
2. Poradnik fizykochemiczny. Warszawa: WNT 1974.