

Ćwiczenie nr 3:

Wyznaczanie współczynnika oporów liniowych i współczynnika strat miejscowych w ruchu turbulentnym

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z laboratoryjną metodą wyznaczenia wartości współczynników oporów liniowych oraz współczynnika strat miejscowych w ruchu turbulentnym.

1. Wprowadzenie

1.1. Straty wysokości ciśnienia w przewodach prosto osiowych (liniowe)

Straty energii mechanicznej wywołane oporami przy przepływie wzdłuż odcinka przewodu, noszą nazwę oporów liniowych lub oporów na długości. Wysokość strat opisuje równanie *Darcy-Weisbacha*:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

gdzie:

- Δh** - wysokość straty ciśnienia piezometrycznego; [m H₂O],
- λ** - współczynnik strat liniowych (liniowych oporów tarcia); [-],
- l** - długość przewodu; [m],
- d** - średnica wewnętrzna przewodu; [m],
- v** - średnia prędkość przepływu; [m/s],
- g** - przyspieszenie ziemskie; 9,81 [m/s²].

Współczynnik strat liniowych λ uzależniony jest od dwóch parametrów: chropowatości względnej **e** oraz liczby Reynoldsa **Re** . Chropowatość względna definiowana jest następująco:

$$e = \frac{k}{d} \quad (2)$$

gdzie:

- k** - chropowatość (zastępcza chropowatość piaskowa); [m],
- d** - średnica wewnętrzna przewodu; [m],

Chropowatość **k** utożsamiana jest ze średnią wysokością nierówności na wewnętrznej powierzchni rury, precyzyjnie należałoby ją określić, jako miarę rzeczywistego "stanu powierzchni" przewodu wynikającego nie tylko z wielkości, ale również rozmieszczenia nierówności wynikających z materiału przewodu, nagromadzonych osadów, ale również niedokładności kołowego kształtu przewodu, strat miejscowych na połączeniach rur wynikających z technologii montażu itp.

Liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

gdzie:

- v** - średnia prędkość przepływu; [m/s],
- d** - średnica wewnętrzna przewodu; [m],

ν – kinematyczny współczynnik lepkości; [m²/s].

Dla izotermicznych przepływów turbulentnych mających praktyczne znaczenie w przewodach wodociągowych (dla $Re > 4000$) przepływ może odbywać się w trzech strefach:

A - strefie przewodów hydraulicznie gładkich, $\lambda = f(Re)$,

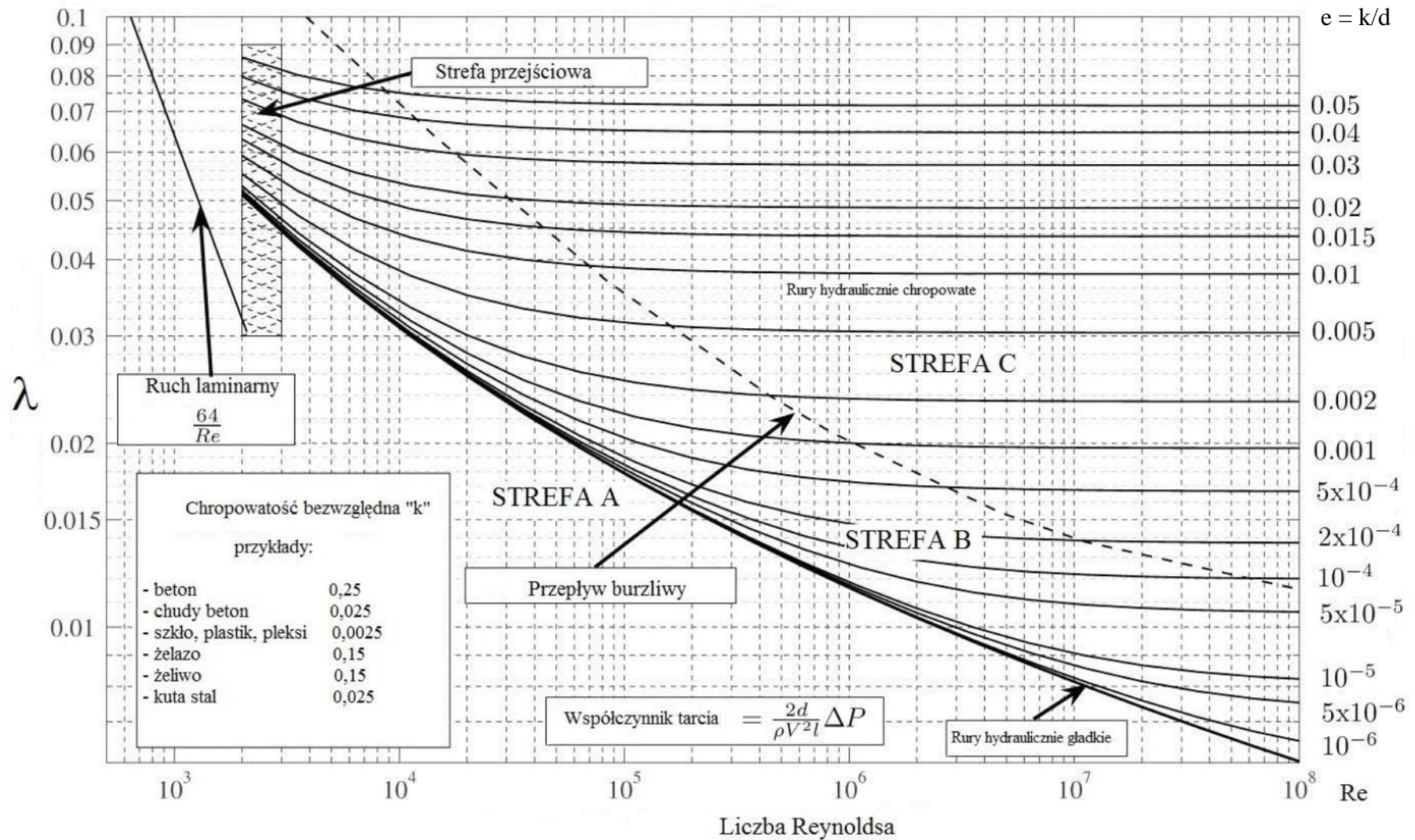
B - strefie przejściowej (o zmiennej chropowatości), $\lambda = f(Re, e)$,

C - strefie kwadratowej zależności oporów, $\lambda = f(e)$.

Zależność $\lambda = f(Re, e)$ obrazuje rysunek 1, będący wygodną metodą wyznaczania współczynnika oporów liniowych.

Wg. normy PN-76/M-34034 Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia. zaleca dla wszystkich stref wyznaczanie współczynnika oporów liniowych λ ze wzoru *Colebrooka-White'a*:

$$\lambda = \left[-2 \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{e}{3,72} \right) \right]^{-2} \quad (4)$$



Rys. 1. Zależność współczynnika oporów liniowych λ od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej

1.2. Obliczanie strat miejscowych

Miejscowe straty energii mechanicznej w rurociągach, są to straty wywołane różnego rodzaju przeszkodami umieszczonymi w przewodach. Wysokość strat miejscowych opisuje równanie:

$$\Delta h = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

gdzie:

Δh - wysokość strat energii mechanicznej; [m H₂O],

ζ - współczynnik strat miejscowych, obliczany dla prędkości za stratą miejscową; [-],

v - średnia prędkość przepływu; [m/s],

g - przyspieszenie ziemskie; 9,81 [m/s²].

W instalacjach i systemach transportujących różne ciecze straty miejscowe występują na różnego rodzaju armaturze lub kształtkach np. zawory, filtry, kryzy, wodomierze, przepływomierze, manometry, kolanka, trójniki, czwórniki, łuki, redukcje, wloty itd.

Wartości współczynników miejscowych powinny być określone doświadczalnie na podstawie pomiarów. W tabeli 1 przedstawiono orientacyjne wartości współczynników oporów miejscowych dla wybranych elementów.

Tabela 1. Współczynniki oporów miejscowych

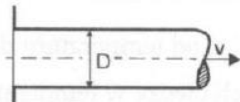
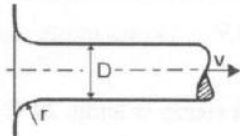
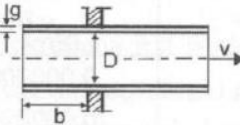
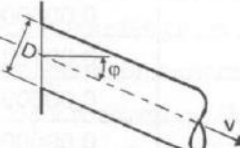
| Lp. | Nazwa przeszkody | Kształt | Współczynnik oporów miejscowych ζ | | | | | | | |
|-----|---|---|--|----------|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | |
| 1 | Wlot o ostrych krawędziach |  | 0,5 | | | | | | | |
| 2 | Wlot prosty zaokrąglony |  | $\frac{r}{D}$ | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,10 | 0,16 | 0,20 |
| | | | ζ | 0,5 | 0,43 | 0,36 | 0,22 | 0,12 | 0,06 | 0,03 |
| 3 | Wlot w rurę wsuniętą przez otwór w ścianie do wnętrza zbiornika |  | $0,5 \leq \zeta = \zeta\left(\frac{b}{D}, \frac{g}{D}\right) \leq 1,0$ | | | | | | | |
| 4 | Wlot do rury pod kątem (ze zbiornika) |  | $\zeta = 0,5 + 0,3 \cdot \sin\phi + 0,2 \cdot \sin^2\phi$ | | | | | | | |
| | | | ϕ | 10 | 20 | 30 | 45 | 60 | 70 | 80 |
| | | | Rd | $\pi/18$ | $\pi/9$ | $\pi/6$ | $\pi/4$ | $\pi/3$ | $7\pi/18$ | $4\pi/9$ |
| | | | ζ | 0,558 | 0,626 | 0,7 | 0,812 | 0,91 | 0,959 | 0,99 |

Tabela 1.(cd.) Współczynniki oporów miejscowych

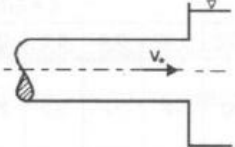
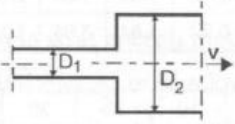
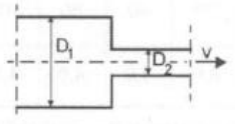
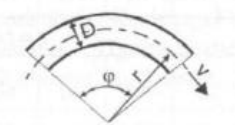
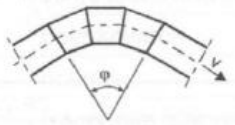
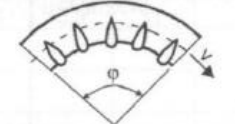
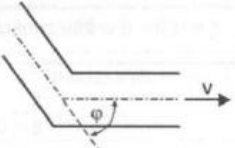
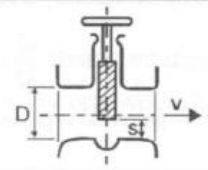
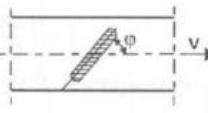
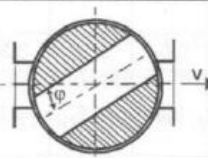
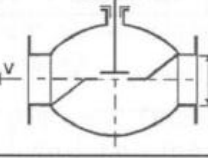
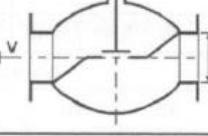
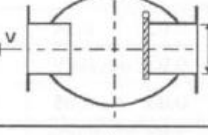
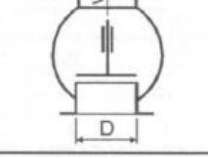
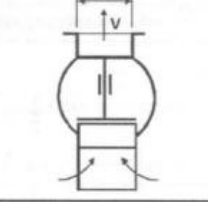
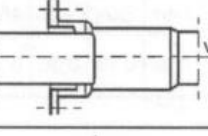
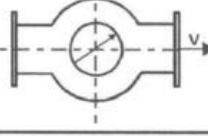
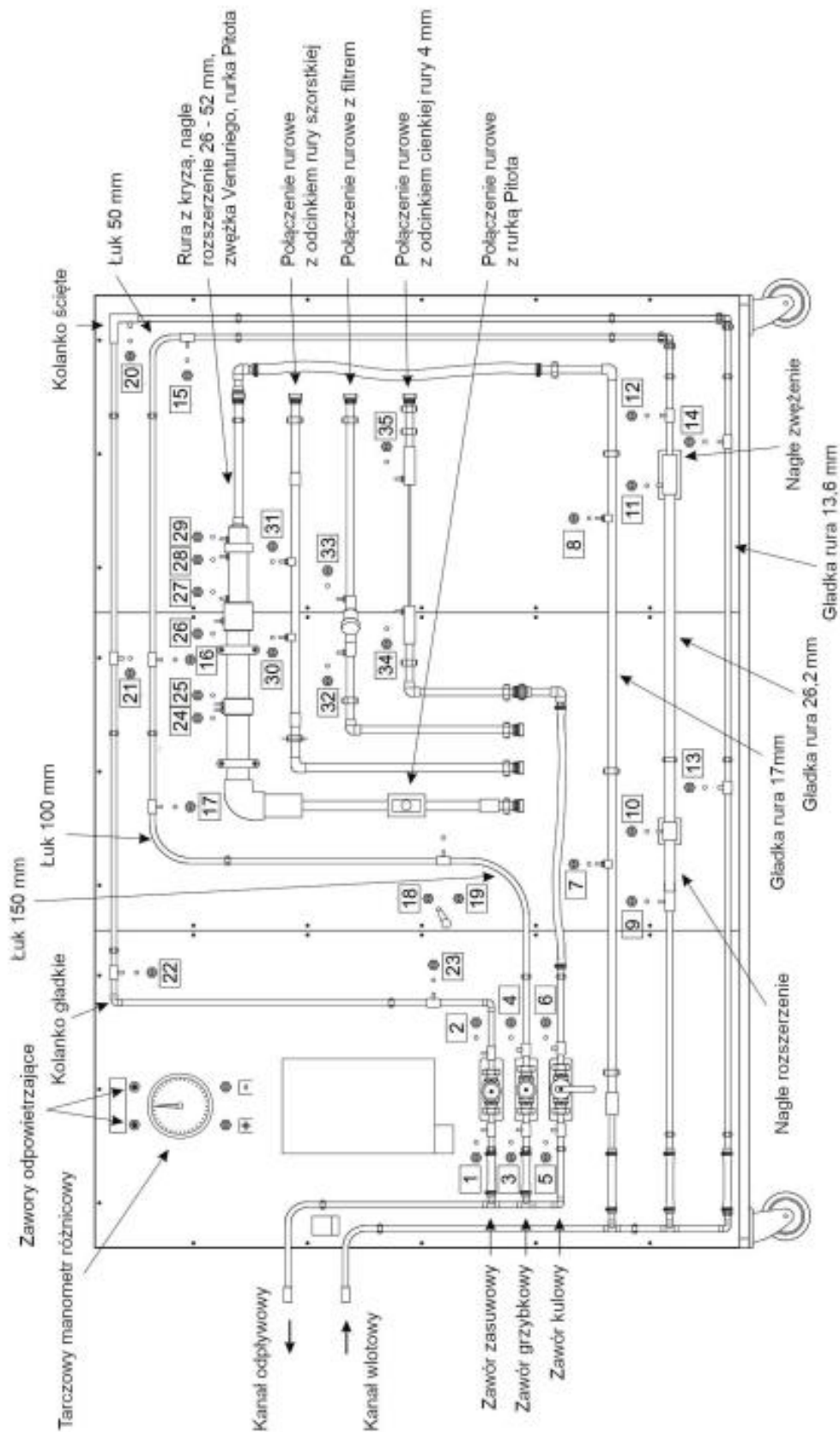
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | |
|---------|---|---|--|----------|----------|---------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|-----|
| 5 | Wlot z przewodu do zbiornika |  | $h_{str} = \zeta \frac{v_0^2}{2g}, \quad \zeta = 1$ <p>v_0 – prędkość w przewodzie (przed przeszkodą)</p> | | | | | | | | | | |
| 6 | Nagle rozszerzenie przekroju $Re \geq 3500$ |  | $\zeta = \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right]^2$ | | | | | | | | | | |
| | | | $\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$ | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,5 | | | | |
| | | | ζ | 0,04 | 0,16 | 0,36 | 0,64 | 1,0 | 2,25 | | | | |
| | | | $\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$ | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | | | | | |
| ζ | 4,0 | 6,25 | 9,0 | 16,0 | 25,0 | | | | | | | | |
| 7 | Nagle zmniejszenie przekroju |  | $\zeta = 0,5 \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right]$ | | | | | | | | | | |
| | | | $\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2$ | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | | |
| | | | ζ | 0,50 | 0,45 | 0,40 | 0,38 | 0,35 | 0,30 | 0,20 | 0,10 | | |
| 8 | Kolana gięte |  | ϕ | gładkie | | | | chropowate | | | | | |
| | | | r/D | 15 | 45 | 60 | 90 | 90 | | | | | |
| | | | rd | $5\pi/6$ | $\pi/4$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ | $\pi/2$ | | | | | |
| | | | 1 | 0,03 | 0,14 | 0,19 | 0,21 | 0,51 | | | | | |
| | | | 2 | 0,03 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,30 | | | | | |
| | | | 4 | 0,03 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,23 | | | | | |
| | | | 6 | 0,03 | 0,075 | 0,09 | 0,09 | 0,18 | | | | | |
| | | | 10 | 0,03 | 0,07 | 0,07 | 0,11 | 0,20 | | | | | |
| 9 | Kolana segmentowe |  | ϕ | 15 | 30 | 45 | 60 | 90 | | | | | |
| | | | rd | $5\pi/6$ | $\pi/6$ | $\pi/4$ | $\pi/3$ | $\pi/2$ | | | | | |
| | | | S | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | | | | | |
| | | | ζ | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | | | | | |
| | | | S - liczba segmentów w kolanie | | | | | | | | | | |
| 10 | Kolana półfaliste |  | $\phi = \frac{\pi}{2} \text{ rd} \quad \zeta = 0,4$ | | | | | | | | | | |
| 11 | Załamanie przewodu |  | $\zeta = \zeta(\phi)$ | | | | | | | | | | |
| | | | ϕ | $^\circ$ | 20 | 40 | 60 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| | | | rd | $1/9\pi$ | $2/9\pi$ | $\pi/3$ | $4/9\pi$ | $\pi/2$ | $5/9\pi$ | $2/3\pi$ | $7/9\pi$ | $8/9\pi$ | |
| ζ | | 0,04 | 0,14 | 0,36 | 0,74 | 0,98 | 1,26 | 1,86 | 2,43 | 2,85 | | | |

Tabela 1.(cd.) Współczynniki oporów miejscowych

| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | |
|----|-------------------------------------|---|--|------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 12 | Zawór zasuwowy równoprzelotowy |  | $\zeta = \zeta(S/D)$ | | | | | | | | | |
| | | | S/D | 0,25 | 0,30 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| | | | ζ | 30 | 22 | 12 | 5,3 | 2,8 | 1,5 | 0,8 | 0,3 | 0,15 |
| 13 | Zawór motylkowy (kłapowy, dławiący) |  | $\zeta = \zeta(\varphi)$ | | | | | | | | | |
| | | | φ | ° | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 90 |
| | | | rd | | $1/18\pi$ | $1/9\pi$ | $1/6\pi$ | $2/9\pi$ | $5/18\pi$ | $1/3\pi$ | $7/18\pi$ | $1/2\pi$ |
| | | | ζ | 0,52 | 1,54 | 3,91 | 10,8 | 32,6 | 118 | 751 | ∞ | |
| 14 | Zawór kurkowy (kurek gazowy) |  | $\zeta = \zeta(\varphi)$ | | | | | | | | | |
| | | | φ | ° | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 55 | 67 | |
| | | | rd | | $1/18\pi$ | $1/9\pi$ | $1/6\pi$ | $2/9\pi$ | $5/10\pi$ | 0,96 | 1,17 | |
| | | | ζ | 0,31 | 1,84 | 6,15 | 20,7 | 95 | 275 | ∞ | | |
| 15 | Zawór grzybkowy normalny |  | $\zeta = \zeta(D)$ | | | | | | | | | |
| | | | D [mm] | 20 | 40 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | |
| | | | ζ | 8,0 | 4,9 | 4,0 | 4,1 | 4,4 | 4,7 | 5,1 | 5,4 | |
| 16 | Zawór zwrotny grzybkowy normalny |  | $\zeta = \zeta(D)$ | | | | | | | | | |
| | | | D [mm] | 25 | 32 | 40 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | |
| | | | ζ | 4,5 | 4,8 | 5,3 | 6,0 | 7,4 | 7,6 | 6,0 | 4,5 | |
| 17 | Zawór zwrotny kłapowy |  | $\zeta = \zeta(D)$ | | | | | | | | | |
| | | | D [mm] | 25 | 32 | 40 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | |
| | | | ζ | 1,9 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 0,9 | 0,8 | |
| 18 | Zawór zwrotny grzybkowy osiowy |  | $\zeta = \zeta(D) = 2,2 \div 2,5$ | | | | | | | | | |
| 19 | Kosz z zaworem zwrotnym |  | $\zeta = \zeta(D)$ | | | | | | | | | |
| | | | D[mm] | 40 | 70 | 100 | 200 | 300 | 500 | | | |
| | | | ζ | 12 | 8,5 | 7,0 | 4,7 | 3,7 | 2,5 | | | |
| 20 | Kosz bez zaworu zwrotnego | | $\zeta = 0,9 \div 6$ w zależności od konstrukcji kosza | | | | | | | | | |
| 21 | Kompensator dławi-kowy |  | $\zeta \cong 0,2$ | | | | | | | | | |
| 22 | Wodomierz |  | Tłoczkowy $\zeta = 12$ Płytkowy $\zeta = 8$ Skrętowy $\zeta = 6$ | | | | | | | | | |

2. Opis stanowiska badawczego

Na rysunku 2 przedstawiono schemat stanowiska badawczego.



Rys. 2. Schemat stanowiska do badania wartości strat liniowych i miejscowych

Stanowisko posiada trzy obwody oznaczone różnymi kolorami, z których każdy wyposażony jest w osobny zawór regulacyjny oraz wybrane rury i złącza rurowe. Jeden z obwodów umożliwia wymianę elementów instalacji na inne spośród wybranych dodatkowych elementów rurowych. We wszystkich istotnych punktach zamontowane są ponumerowane zawory ciśnieniowe, które służą do pomiaru zmiany ciśnienia wzdłuż każdego odcinka rury lub jej złączy. Każdy zawór ciśnieniowy posiada specjalny mechanizm samouszczelniający. Aby zmierzyć zmianę ciśnienia w każdym odcinku lub części składowej rurociągu, dostarczany jest wolnostojący trójpunktowy zespół piezometru. Większe różnice ciśnienia na zaworach lub filtrze można zmierzyć za pomocą tarczowego manometru różnicowego, który umieszczono w jednostce głównej. Stanowisko współpracuje z Cyfrową jednostką wolumetryczną, która dostarcza zasilanie wody i wykonuje pomiar natężenia przepływu. W przypadku pomiaru bardzo małych przepływów, cylinder pomiarowy o pojemności 1000 ml umożliwia dokładniejszy pomiar metodą objętościowo-czasową.

Na stanowisku można badać straty liniowe lub miejscowe dla elementów takich jak:

- Rurę szorstką i rury gładkie o różnych średnicach wewnętrznych;
- Łuki, kolanka gładkie i kolanka skośne;
- Trzy różne typy zaworów (kulowy, grzybkowy, zasuwowy);
- Kryza i zwężka Venturiego;
- Filtr z dwoma różnymi wkładkami;
- Złącza z nagłym rozszerzaniem lub kurczeniem przekroju przepływu.

3. Przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie zostało podzielone na 3 części (badanie strat liniowych, badanie strat miejscowych, badanie strat na zaworze), obejmujące 4 serie pomiarowe. W każdej serii pomiarowej wykonuje się pomiary dla 3 badanych elementów przy 3 różnych wartościach przepływu. Celem ćwiczenia jest pomiar wartości straty ciśnienia i wyznaczenie na jego podstawie współczynnika strat liniowych λ oraz współczynnika strat miejscowych ξ .

Odpowietrzenie układu testowego:

1) Podłączyć źródło zimnej wody i odkręcić zawór tak, aby uzyskać maksymalne natężenie przepływu. Następnie otworzyć zawór odpływowy testowanego obwodu i poczekać, aż uwięzione powietrze zostanie wyparte z obwodu. Po odpowietrzeniu zamknąć zawór odpływowy.

2) W między czasie przygotować rurki ciśnieniowe o odpowiednich długościach. Następnie umieścić jeden koniec każdej z nich w wiadrze, a drugi koniec podłączyć do gniazd zaworów pomiaru ciśnienia, które chcesz użyć. Poczekać, aż całe powietrze zostanie wypchnięte z rurki, a potem szybko podłączyć wolny koniec z wiadra do gniazda w piezometrze, który chcesz użyć.

3) Po podłączeniu rurek ciśnieniowych, otworzyć zawór kolektora piezometru (na samej górze) i napełnić piezometr wodą po czym zakręcić zawór. Zmniejszyć dopływ zimnej wody do niskiego natężenia przepływu i otworzyć zawór odpływowy testowanego obwodu. Otworzyć ponownie zawór na piezometrze i wyrównać ciśnienie w rurkach. Zakręcić zawór na piezometrze. W razie potrzeby wyrównać poziom w piezometrach za pomocą pompki ręcznej.

Seria pomiarowa S1:

- 1) Odpowietrzyć układ ciemnoszary z zaworem kulowym (5 i 6). Podłączyć rurki ciśnieniowe do gniazd 7 i 8 (rura gładka), 30 i 31 (rura szorstka) oraz 5 i 6 (zawór kulowy) i je odpowietrzyć. Po odpowietrzeniu podłączyć do piezometrów i wyrównać poziom wody.
- 2) Ustalić dużą wartość przepływu Q tak by możliwe było odczytanie wyników z piezometru. Dla badanych elementów zapisać wartości h_1 i h_2 obserwowane na piezometrze. Ich różnica odpowiada stracie ciśnienia Δh na danym elemencie.
- 3) Za pomocą zaworu kulowego zmniejszyć natężenie przepływu Q i powtórzyć pomiary. Po zakończeniu pomiarów zamknąć zawór kulowy.
- 4) Wszystkie wartości zmierzone wprowadzić do tabeli wyników (Załącznik 1).

Seria pomiarowa S2:

- 1) Odpowietrzyć układ ciemnoniebieski z zaworem zasuwowym (1 i 2). Podłączyć rurki ciśnieniowe do gniazd 13 i 14 (rura gładka), 20 i 21 (kolano ścięte) oraz 22 i 23 (kolano gładkie) i je odpowietrzyć. Po odpowietrzeniu podłączyć do piezometrów i wyrównać poziom wody.
- 2) Ustalić dużą wartość przepływu Q tak by możliwe było odczytanie wyników z piezometru. Dla badanych elementów zapisać wartości h_1 i h_2 obserwowane na piezometrze. Ich różnica odpowiada stracie ciśnienia Δh na danym elemencie.
- 3) Za pomocą zaworu zasuwowego zmniejszyć natężenie przepływu Q i powtórzyć pomiary. Po zakończeniu pomiarów zamknąć zawór zasuwowy.
- 4) Wszystkie wartości zmierzone wprowadzić do tabeli wyników (Załącznik 1).

Seria pomiarowa S3:

- 1) Odpowietrzyć układ jasnoniebieski z zaworem grzybkowym (3 i 4). Podłączyć rurki ciśnieniowe do gniazd 3 i 4 (zawór grzybkowy), 15 i 16 (łuk 50mm) oraz 17 i 18 (łuk 100mm) i je odpowietrzyć. Po odpowietrzeniu podłączyć do piezometrów i wyrównać poziom wody.
- 2) Ustalić dużą wartość przepływu Q tak by możliwe było odczytanie wyników z piezometru. Dla badanych elementów zapisać wartości h_1 i h_2 obserwowane na piezometrze. Ich różnica odpowiada stracie ciśnienia Δh na danym elemencie.
- 3) Za pomocą zaworu grzybkowego zmniejszyć natężenie przepływu Q i powtórzyć pomiary. Po zakończeniu pomiarów zamknąć zawór grzybkowy.
- 4) Wszystkie wartości zmierzone wprowadzić do tabeli wyników (Załącznik 1).

Seria pomiarowa S4:

- 1) Odpowietrzyć układ jasnoniebieski z zaworem grzybkowym (3 i 4). Podłączyć rurki ciśnieniowe do gniazd 3 i 4 (zawór grzybkowy).
- 2) Wykonać pomiary straty ciśnienia Δh dla pełnego otwarcia zaworu grzybkowego. Następnie w 5 krokach zamykać zawór i powtarzać pomiary.
- 3) Obserwowane wartości Q h_1 i h_2 notować w tabeli wyników (Załącznik 1).
- 4) Po zakończeniu pomiarów zamknąć zawór doprowadzający i odprowadzający wodę.

4. Sprawozdanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, należy wykonać sprawozdanie wg. wzoru poniżej:

- Przebieg ćwiczenia (krótki, wypunktowany)
- Opis badanych wielkości (zastosowane wzory + objaśnienia)
- Przykład obliczeń (dla każdej z badanych wielkości)
- Wyniki (uzupełniona tabela wyników)
- Wnioski

Załącznik 1. Tabela wyników

A. Opory liniowe

| Seria pomiarowa | Straty liniowe | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------|---|----|-----------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|----|----------------|----------------|
| | Piezometry | Element | LP | Q [m ³ /s] | h ₁ [m] | h ₂ [m] | Δh [m] | u [m/s] | Re | λ _D | λ _T |
| S2 | 13 i 14 | Rura gładka d=13,6 mm L=0,912 m F=..... m ² | 1 | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | |
| S1 | 7 i 8 | Rura gładka d=17 mm L=0,912 m F=..... m ² | 1 | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | |
| S1 | 30 i 31 | Rura szorstka (d=17mm); d _e =14,0 mm L=0,2 m F=..... m ² | 1 | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | |

$$T = \dots\dots\dots [^{\circ}\text{C}], \nu = \dots\dots\dots [\text{m}^2/\text{s}], F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [\text{m}^2], e = \frac{k}{d} [-], u = \frac{Q}{F} [\text{m/s}], \text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} [-]$$

$$\lambda_D = \frac{\Delta h \cdot d \cdot 2g}{L \cdot u^2} [-], \lambda_T = 4 \cdot 0,079 \cdot (\text{Re})^{-1/4} [-] \text{ lub } \lambda_T \text{ z wykresu (dla rury szorstkiej)}$$

B. Opory miejscowe

| Seria pomiarowa | Straty miejscowe | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------------|--|----|-----------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|----|----------------|---------------------|---------------------|---|
| | Piezometry | Element | LP | Q [m ³ /s] | h ₁ [m] | h ₂ [m] | Δh [m] | u [m/s] | Re | λ _T | Δh _R [m] | Δh _K [m] | ξ |
| S2 | 22 i 23 | Kolano gładkie d = 13,6mm L _R = 0,919 m | 1 | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |
| S2 | 20 i 21 | Kolano ścięte d = 13,6mm L _R = 0,94m | 1 | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |
| S3 | 17 i 18 | Łuk 100mm L _R = 0,864 m | 1 | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |
| S3 | 15 i 16 | Łuk 50mm L _R = 0,92m | 1 | | | | | | | | | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |
| S1 | 5 i 6 | Zawór kulowy | 1 | | | | | | | | - | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |
| S3 | 3 i 4 | Zawór grzybkowy | 1 | | | | | | | | - | | |
| | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | | | 3 | | | | | | | | | | |

$$\lambda_T = 4 \cdot 0,083 \cdot (Re)^{-\frac{1}{4}}, \quad \Delta h_R = \frac{\lambda_T \cdot L \cdot u^2}{2 \cdot g \cdot d}, \quad \Delta h_K = \Delta h - \Delta h_R, \quad \xi = \frac{\Delta h_K \cdot 2 \cdot g}{u^2}$$

C. Badanie strat ciśnienia przy stopniowo zamykanym zaworze

| Seria pomiarowa | Badanie strat w zaworze przy różnym stopniu otwarcia | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|-----------------|----|----------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------|---------|----|---|
| | Piezometry | Element | LP | Otwarcie | Q [m ³ /s] | h ₁ [m] | h ₂ [m] | Δh [m] | u [m/s] | Re | ξ |
| S4 | 3 i 4 | Zawór grzybkowy | 1 | 100% | | | | | | | |
| | | | 2 | 75% | | | | | | | |
| | | | 3 | 50% | | | | | | | |
| | | | 4 | 25% | | | | | | | |
| | | | 5 | 12% | | | | | | | |

$$\xi = \frac{\Delta h \cdot 2 \cdot g}{u^2}$$

Załącznik 2. Kinematyczny współczynnik lepkości wody w zależności od temperatury.

| Temperatura | Kinematyczny współczynnik lepkości - ν | Temperatura | Kinematyczny współczynnik lepkości - ν |
|--------------------|--|--------------------|--|
| [°C] | [m²/s] | [°C] | [m²/s] |
| 0 | $1,7923 \cdot 10^{-6}$ | 20 | $1,0068 \cdot 10^{-6}$ |
| 1 | $1,7314 \cdot 10^{-6}$ | 21 | $0,9829 \cdot 10^{-6}$ |
| 2 | $1,6728 \cdot 10^{-6}$ | 22 | $0,9600 \cdot 10^{-6}$ |
| 3 | $1,6191 \cdot 10^{-6}$ | 23 | $0,9381 \cdot 10^{-6}$ |
| 4 | $1,5674 \cdot 10^{-6}$ | 24 | $0,9167 \cdot 10^{-6}$ |
| 5 | $1,5188 \cdot 10^{-6}$ | 25 | $0,8963 \cdot 10^{-6}$ |
| 6 | $1,4728 \cdot 10^{-6}$ | 26 | $0,8765 \cdot 10^{-6}$ |
| 7 | $1,4285 \cdot 10^{-6}$ | 27 | $0,8575 \cdot 10^{-6}$ |
| 8 | $1,3862 \cdot 10^{-6}$ | 28 | $0,8391 \cdot 10^{-6}$ |
| 9 | $1,3465 \cdot 10^{-6}$ | 29 | $0,8213 \cdot 10^{-6}$ |
| 10 | $1,3081 \cdot 10^{-6}$ | 30 | $0,8042 \cdot 10^{-6}$ |
| 11 | $1,2718 \cdot 10^{-6}$ | 35 | $0,7268 \cdot 10^{-6}$ |
| 12 | $1,2369 \cdot 10^{-6}$ | 40 | $0,6612 \cdot 10^{-6}$ |
| 13 | $1,2035 \cdot 10^{-6}$ | 45 | $0,6046 \cdot 10^{-6}$ |
| 14 | $1,1717 \cdot 10^{-6}$ | 50 | $0,556 \cdot 10^{-6}$ |
| 15 | $1,1414 \cdot 10^{-6}$ | 55 | $0,5138 \cdot 10^{-6}$ |
| 16 | $1,1122 \cdot 10^{-6}$ | 60 | $0,4768 \cdot 10^{-6}$ |
| 17 | $1,0841 \cdot 10^{-6}$ | 70 | $0,4151 \cdot 10^{-6}$ |
| 18 | $1,0574 \cdot 10^{-6}$ | 80 | $0,3668 \cdot 10^{-6}$ |
| 19 | $1,0315 \cdot 10^{-6}$ | 90 | $0,3279 \cdot 10^{-6}$ |
| 20 | $1,0068 \cdot 10^{-6}$ | 100 | $0,2961 \cdot 10^{-6}$ |