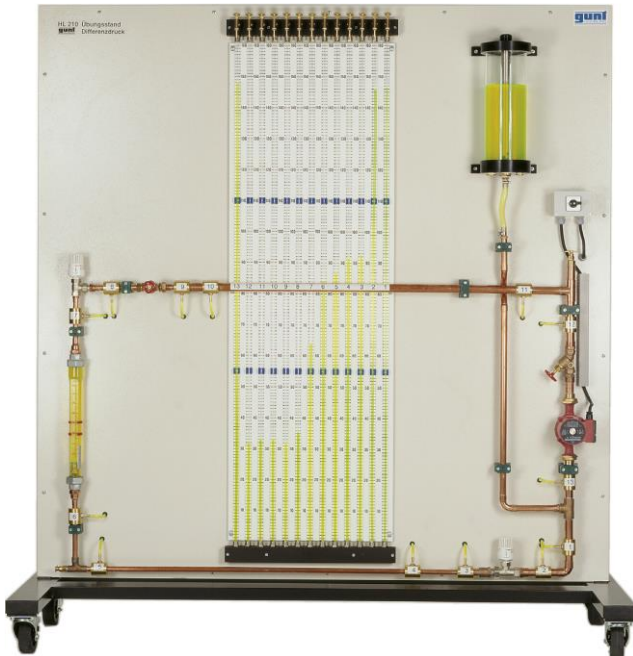




Ćwiczenie 4

Pomiar współczynnika oporu lokalnego

Sygnatura stanowiska: **HL210**

Mechanika Płynów, Ćwiczenia Laboratoryjne.
Katedra Podstawowych Problemów Energetyki,
Wydział Energetyki i Paliw, AGH
v1.0b, 2024

Streszczenie

- Wykonanie ćwiczenie polega na pomiarze **strat ciśnienia** (ΔP) na różnych elementach układu pomiarowego, w zależności od natężenia przepływu ($\dot{V}$).
- Straty ciśnienia wyznacza się mierząc ciśnienie przed i za badanym elementem, a następnie je odejmując.
- Określane są straty:
 - liniowe** (na dwóch rurach o różnej średnicy)
 - miejscowe** (na zaworach, zwężkach, kolankach etc.).
- Celem ćwiczenia jest wyznaczenie **współczynników oporów** na podstawie strat ciśnienia (dla każdego z badanych elementów).
- Układ pozwala także na wyznaczenie **charakterystyki** różnych zaworów (jak zmienia się spadek ciśnienia oraz natężenie przepływu wraz ze stopniowym zamykaniem zaworu).

Spis treści

Wstęp	1
Stanowisko pomiarowe	4
Analiza wyników i sprawozdanie	10
Dodatki	19

1. Wstęp

Wyobraźmy sobie, że nasza firma ma zaprojektować instalację centralnego ogrzewania (C.O.) w małym domu jednorodzinny. Na projekt składa się dobór rur, złączy, kolanek, zaworów itd. oraz pompy. Każdy płyn, który przepływa przez taką instalację napotyka opory, które powodują straty ciśnienia. Pompa, aby wymusić odpowiedni obieg wody (natężenie przepływu) musi je pokonać. Straty te dzielą się na straty liniowe oraz straty miejscowe.

My otrzymaliśmy zadanie obliczenia całkowitych strat ciśnienia w projektowanej instalacji oraz podania orientacyjnego kosztu energii związanej z tymi stratami. Dodatkowo dział projektowy chce od nas informacji na temat charakterystyki jednego z zaworów.

Do wyznaczenia strat potrzebne są współczynniki oporów, które wyznaczane są za pomocą badań eksperymentalnych. Wartości te możemy otrzymać od producenta lub (jako wartości szacunkowe) z tablic czy też wzorów empirycznych (korelacji). W naszym przypadku sami musimy te wartości pomierzyć i wyznaczyć (na stanowisku pomiarowym). Pozostałe źródła wykorzystamy do porównania i oceny uzyskanych przez nas wyników.

Po wyznaczeniu współczynników oporów możemy policzyć całkowite straty ciśnienia (sumaryczne) w projektowanej instalacji a następnie określić związany z nimi koszt.

Cele ogólne:

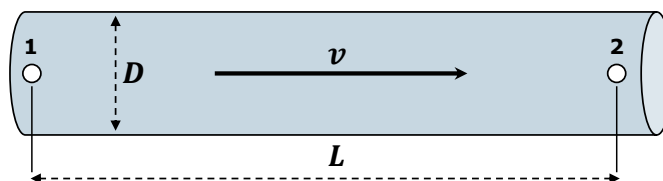
- Pomiar strat ciśnienia na elementach stanowiska pomiarowego.
- Wyznaczenie współczynników oporów (liniowych i miejscowych).
- Wyznaczenie charakterystyki zaworu.
- Analiza otrzymanych wyników.
- Obliczenie strat całkowitych w projektowanej instalacji C.O. wraz z kosztami.

Straty liniowe i miejscowe

Przepływ przez kanały zamknięte (jak rury czy przewody wentylacyjne) oraz elementy takie jak przykładowo zawory, zwężki i kolanka, powoduje straty, które są przez nas obserwowane jako spadek ciśnienia płynu. Źródłem strat jest tarcie cząstek płynu o siebie oraz występowanie w przepływie wirów, oderwań i intensywnego mieszania. Wszystkie te zjawiska rozpraszają energię (mechaniczną) jako ciepło.

Straty liniowe

O stratach liniowych mówimy w przypadku przepływu płynu przez rury czy kanały o przekroju innym niż okrągły (np. przewody wentylacyjne).



Natężenie przepływu inaczej wydatek objętościowy lub strumień objętościowy $\dot{V}$ – objętość przepływającego płynu na jednostkę czasu, np. litry/h, m^3/h , m^3/s itd.

Natężenie przepływu jest stałe (nie zmienia się) w całej instalacji, ale prędkość średnia może być różna (zależy od pola przekroju).

Korelacja (wzory empiryczne) idea ta w skrócie polega na przeprowadzeniu serii pomiarów a następnie dopasowanie wzoru do uzyskanych wyników, tak aby był im jak najbliższy.

Liczba Reynoldsa jest jedną z bezwymiarowych liczb podobieństwa. Pozwala na porównywanie przepływów pomiędzy sobą (hydrodynamicznie), pozwala także na określenie charakteru przepływu – czy jest on laminarny czy turbulentny.

Ciśnienie w punkcie 2 będzie mniejsze niż w punkcie 1, jest to spadek ciśnienia, czyli straty. Źródłem strat liniowych jest lepkość (tarcie cząstek płynu o siebie). Straty te zależą od średnicy rury, jej długości i prędkości średniej, a wyznacza się je za pomocą wzoru (równanie *Darcy'ego-Weisbacha*):

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \text{ [Pa]} \quad (1)$$

gdzie: ΔP jest różnicą ciśnień statycznych pomiędzy punktem 1 i 2, Pa; L jest długością rury, m; D jest średnicą rury, m; ρ jest gęstością płynu, kg/m³; v jest prędkością średnią płynu; λ jest współczynnikiem strat liniowych.

Współczynnik strat liniowych (symbol: λ lub f , bez jednostki) dla przepływu laminarnego zależy od liczby Reynoldsa, a dla przepływu turbulentnego od liczby Reynoldsa i chropowatości.

Straty miejscowe/lokalne

O stratach miejscowych mówimy w przypadku przepływu przez elementy układu, takie jak zawory, kolanka, trójniki, zwężki itd. (ogólne te części instalacji, które nie są rurami).



Ciśnienie w punkcie 2 będzie mniejsze niż w punkcie 1, jest to spadek ciśnienia, czyli straty. Przepływ w takim elemencie jest bardzo skomplikowany, nie analizuje się dokładnie przepływu, a jedynie uwzględnia całościowy efekt. Dominującym źródłem strat są wiry, odrywania oraz intensywne mieszanie. Straty te zależą głównie od prędkości i wyznacza się je za pomocą wzoru:

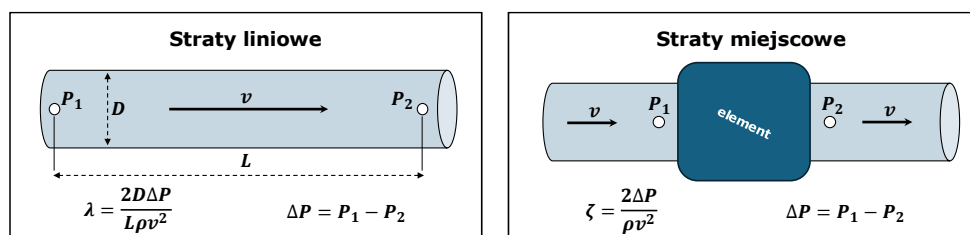
$$\Delta P = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

gdzie: ΔP jest różnicą ciśnień statycznych pomiędzy punktem 1 i 2, Pa; ρ jest gęstością płynu, kg/m³; v jest prędkością średnią płynu; ζ jest współczynnikiem strat miejscowych.

Współczynnik strat miejscowych (symbol: ζ (zeta) lub K , bez jednostki) zależy głównie od geometrii danego element (od liczby Reynoldsa także, ale często pomija się ten wpływ).

Jak wyznacza się współczynniki z badań eksperymentalnych?

Wyznaczenie współczynników oporu sprowadza się do zmierzenia ciśnienia (ciśnienie statyczne) przez i za elementem lub na początku i na końcu rury, a następnie przekształcenia wzoru (1) lub (2).



Prędkość można wyznaczyć znając natężenie przepływu (też z pomiaru).

Materiały pomocnicze

- **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications** - Yunus Cengel, John Cimbala
 - Ciśnienie, strona: 76
 - Pomiar ciśnienia, strona: 81
 - Straty miejscowe, strona: 374
 - Pomiar objętościowego natężenia przepływu i prędkości, strona: 391
 - Pompy, strona: 790
- **Fluid Mechanics** - Frank M. White
 - Straty miejscowe, strona: 367
- http://www.strzelecki.net.pl/media/pliki/hih/skrypt_z_plynow.pdf
- https://www.gunt.de/images/download/flow-in-pipes-and-fittings_english.pdf
- <https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/06/Fluid-Statics-Lesson3-Barometers-and-Manometers-Handout.pdf>
- <https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/09/Lesson-4-Minor-Losses-in-Pipes-and-Ducts-Handout.pdf>
- [Równanie Bernoulliego](#)
- https://www.viessmann.edu.pl/wp-content/uploads/OIR3_BD17_SEO_Obliczenia_inst_rurowych_cz3_AJT_24_04_2019.pdf

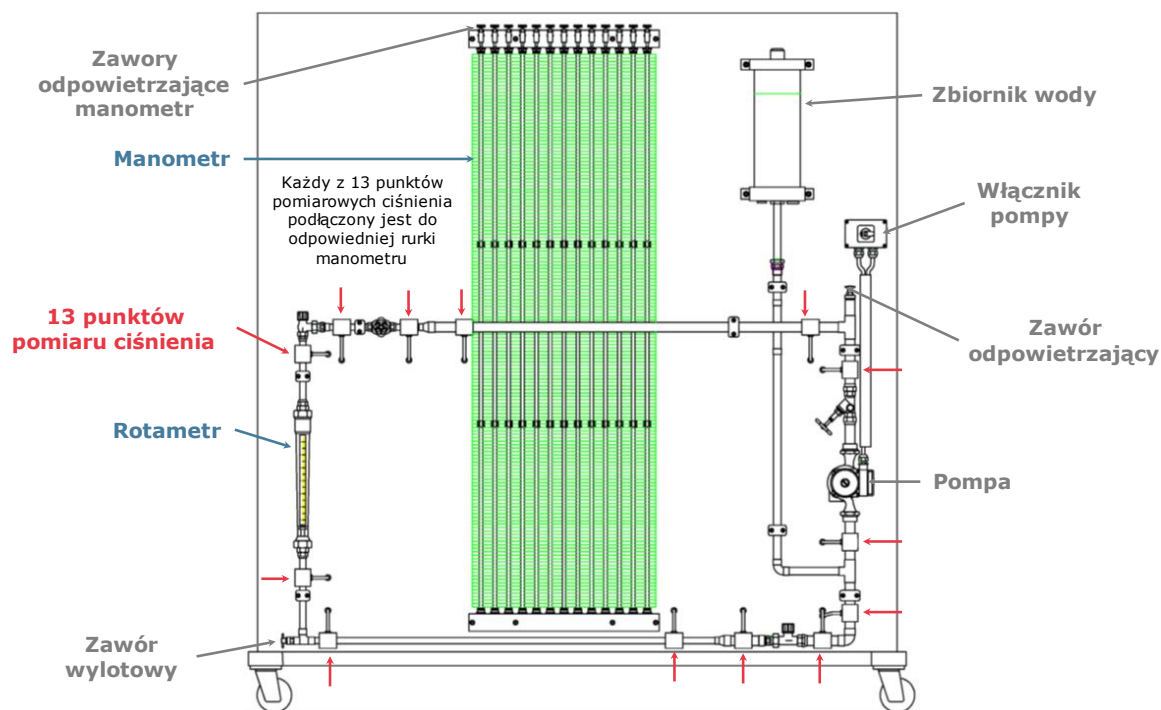
Zagadnienia teoretyczne:

- Objętościowy wydatek przepływu (natężenie przepływu)
- Równanie *Darcy'ego-Weisbacha*
- współczynnik oporu lokalnego
- krzywe charakterystyczne pompy

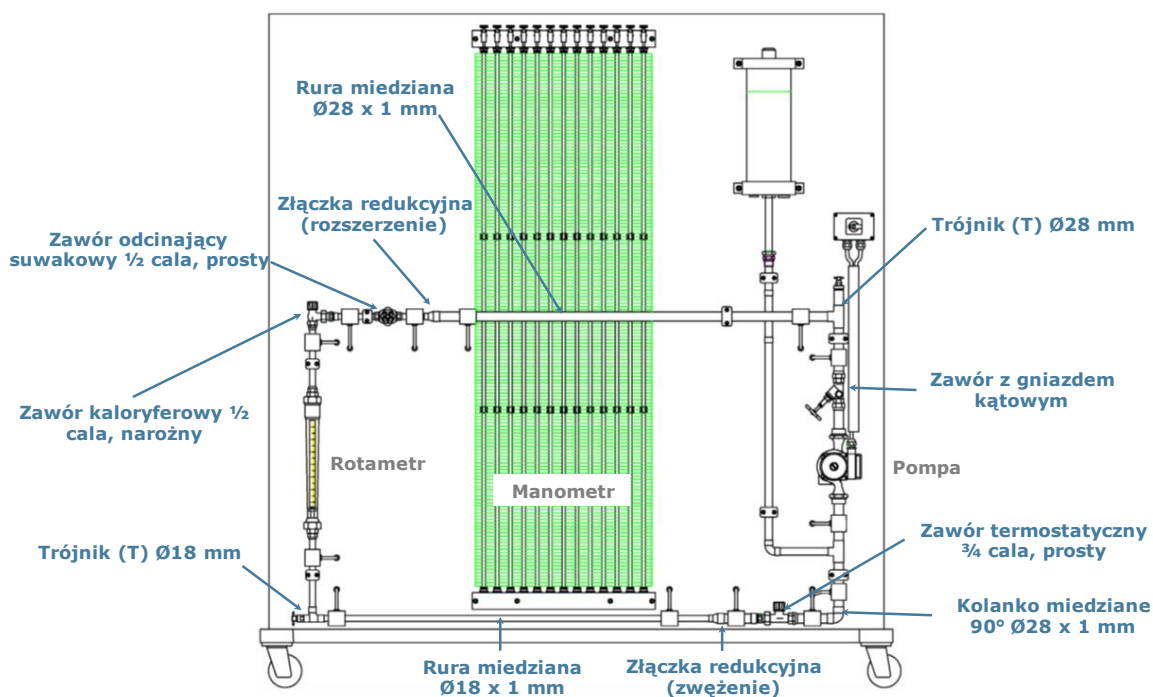
2. Stanowisko pomiarowe

Schemat układu i jego elementy pomiarowe

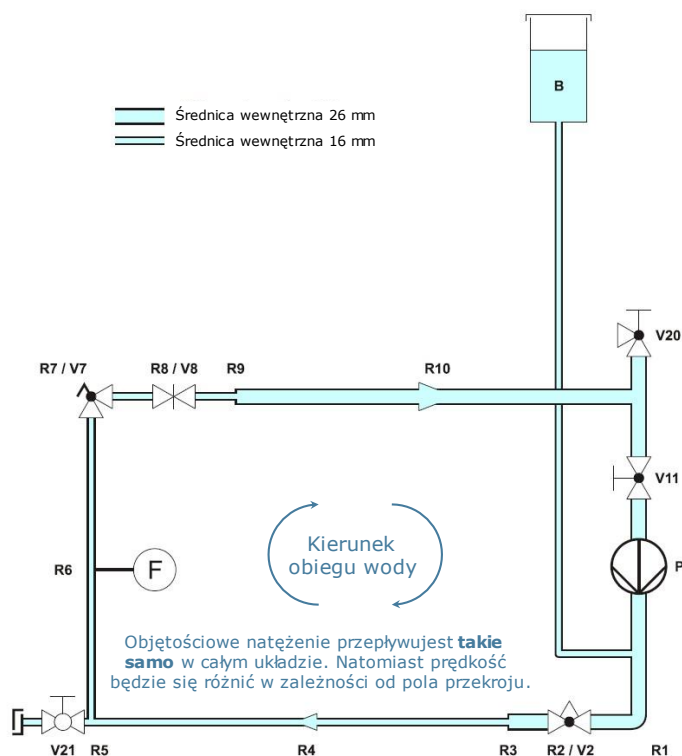
Układ pomiarowy HL210:



Elementy pomiarowe i ich umiejscowienie:



Schemat układu pomiarowego z oznaczeniami:

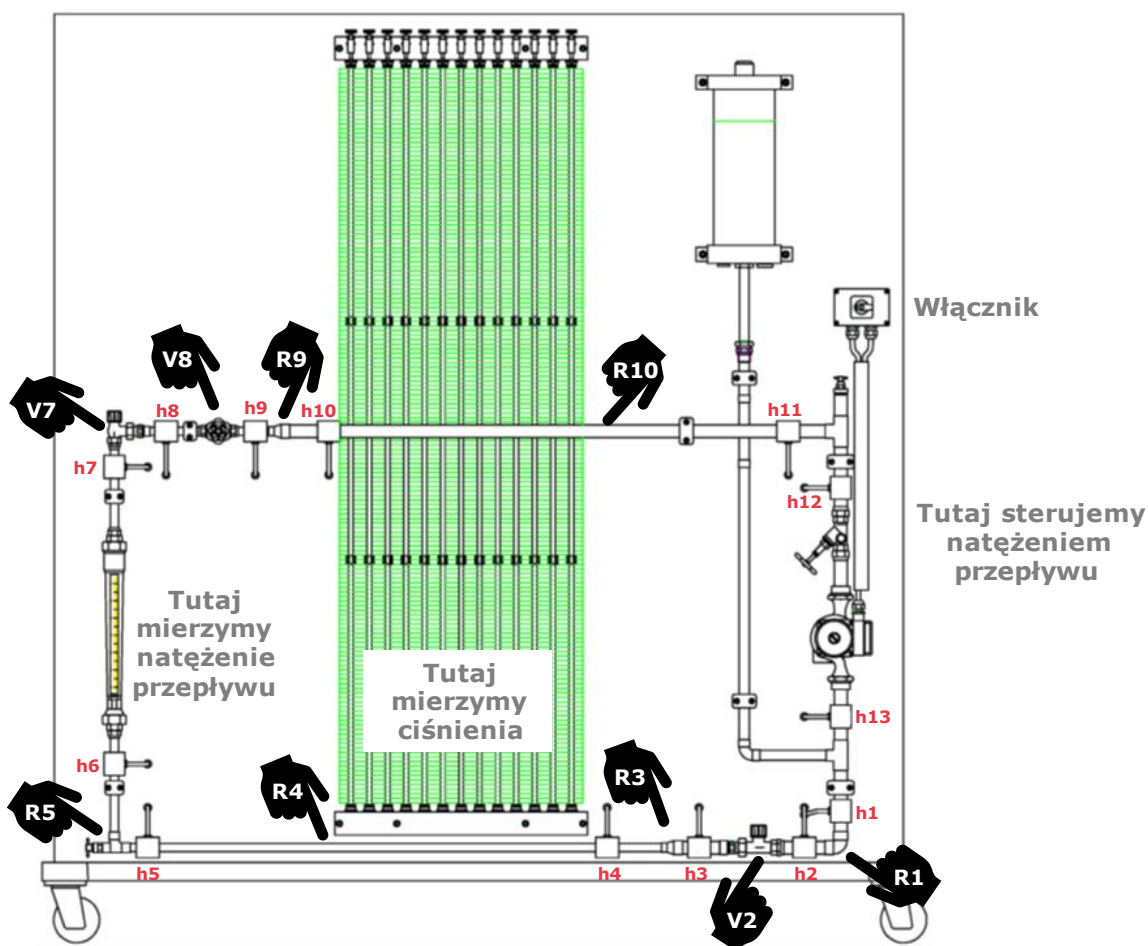


B	Zbiornik wody
P	Pompa
R1	Kolanko miedziane 90°
R2 / V2	Zawór termostatyczny 3/4 cala
R3	Złączka redukcyjna (zwężenie)
R4	Rura miedziana Ø18x1, L = 1 m
R5	Trójnik (T) Ø18
R6 / F	Rotametr
R7 / V7	Zawór kaloryferowy 1/2 cala, narożny
R8 / V8	Zawór odcinający suwakowy 1/2 cala, prosty
R9	Złączka redukcyjna (rozszerzenie)
R10	Rura miedziana Ø28x1, L = 1 m
V11	Zawór z gniazdem kątowym
V20	Zawór odpowietrzający
V21	Zawór wylotowy

Co należy zrobić w trakcie zajęć laboratoryjnych?

- Część I polega na wyznaczaniu charakterystyki wybranego zaworu (V2/V7/V8), czyli jak zmienia się natężenie przepływu i spadek ciśnienia wraz ze stopniem zamknięcia zaworu (od w pełni otwartego do zamkniętego).
- Część II polega na wykonaniu co najmniej dwóch serii pomiarowych.
- Jedna seria pomiarowa powinna być wykonana dla 5 różnych natężeń przepływu.
- Druga seria pomiarowa polega na powtórzeniu pomiarów z pierwszej.
- Seria pomiarowa – dla każdego natężenia przepływu mierzymy ciśnienie (przed i za) na wszystkich elementach pomiarowych:
 - Rura większa (R10) i mniejsza (R4),
 - Złączka redukcyjna – zwężenie (R3) i rozszerzenie (R9),
 - Kolanko 90° (R1),
 - Trójnik (T) (R5),
 - Zawór odcinający (R8/V8), termostatyczny (R2/V2), kaloryferowy (R7/V7),
 - Mierzymy także całkowity spadek ciśnienia (przed i za pompą).

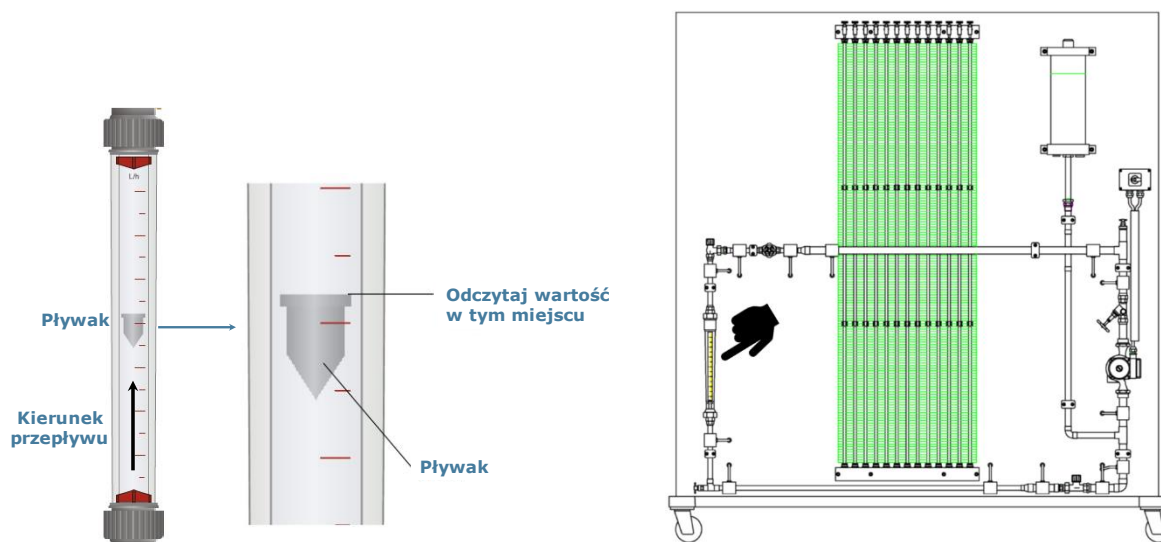
Szczegóły (początkowe natężenie przepływu, wybór zaworu) są uzgadniane na początku wykonania ćwiczenia z prowadzącym.



Pomiary i opis elementów pomiarowych

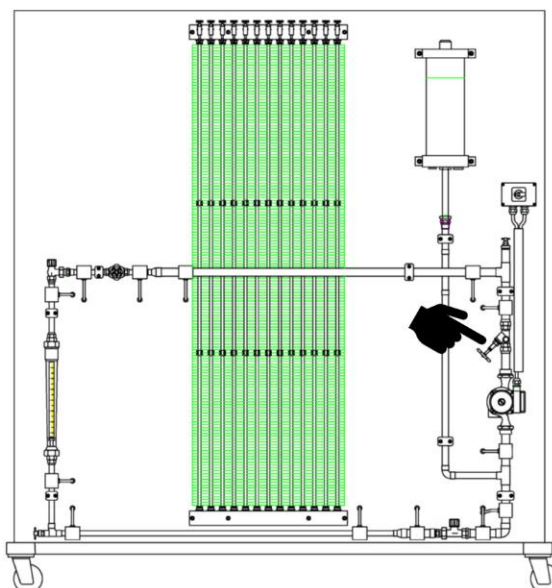
Jak mierzymy natężenie przepływu?

Do mierzenia objętościowego natężenia przepływu ($\dot{V}$) służy rotametr. Woda w rotametrze przepływa od dołu do góry. Przy przepływającej wodzie pływak zatrzymuje się w miejscu, gdzie siła ciężkości pływak, siła wyporu i siła oporu się równoważą. Skala jest tak skalibrowana, że miejsce, w którym zatrzymał się pływak pozwala nam odczytać bezpośrednio objętościowe natężenie przepływu. Rotametr podaje objętościowe natężenie przepływu w L/h i ma zakres pomiarowy od 0 do 1600 L/h.



Jak zmieniamy natężenie przepływu?

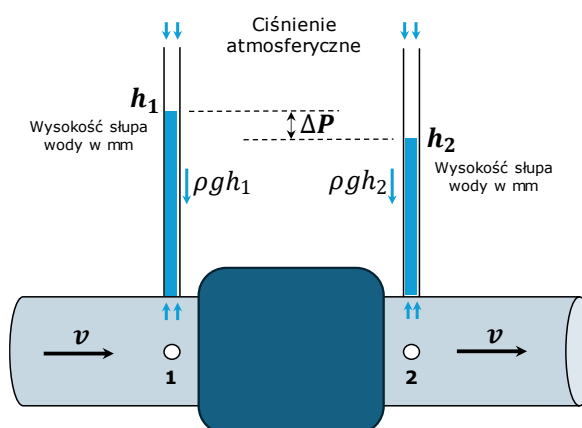
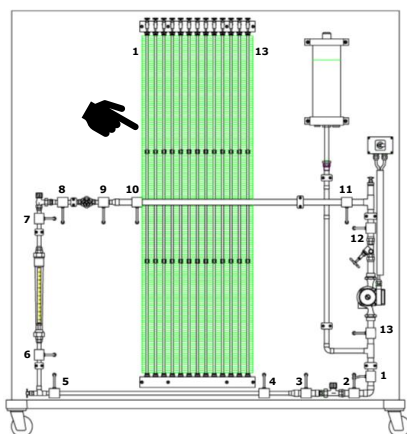
Natężenie przepływu zmieniamy za pomocą zaworu z gniazdem kątowym (V11). Należy uważać, aby nie odkręcić zaworu maksymalnie, gdyż zwiększone ciśnienie w układzie może doprowadzić do wylania się wody przez zawory odpowietrzające manometru (góra).



Jak mierzymy ciśnienie?

Ciśnienie (statyczne) mierzymy za pomocą manometru. Każda z 13 rurek manometru podłączona jest jednym końcem do miejsc pomiarowych, drugi koniec jest otwarty do otoczenia (górną manometru – zawory odpowietrzające). Rurki manometru mają taką samą numerację jak punkty pomiarowe (od 1 do 13) – numeracja jest zaznaczona na stanowisku pomiarowym. Przepływający przez kanał płyn napiera na płyn znajdujący się w rurce manometru. Poziom płynu w rurce będzie się podnosił, dopóki ciśnienie atmosferyczne plus ciśnienie hydrostatyczne słupa wody w manometrze nie będzie równe ciśnieniu statycznemu wody przepływającej przez kanał.

Pomiar dokonujemy poprzez odczytanie wysokości słupa wody w mm, w każdej rurce manometru – inaczej na jakiej wysokości znajduje się zwierciadło wody. Do każdej rurki dołączona jest skala w milimetrach.



Mierzone w jednej rurce manometru ciśnienie jest ciśnieniem względnym (nadciśnieniem) – czyli pokazuje o ile ciśnienie płynu jest większe niż ciśnienie atmosferyczne.

Procedura pomiarowa

Przygotowanie układu



- Upewnij się, że **poziom płynu** w rurkach manometrycznych **jest równy (pompa ma być wyłączona)**. Jeżeli poziom nie jest równy **zgłoś prowadzącemu** – oznacza to, że układ jest zapowietrzony i trzeba go odpowietrzyć.
- Sprawdź, czy urządzenie jest podłączone do prądu.
- Sprawdź i zapisz wartość temperatury panującej w pomieszczeniu.

Część I – wyznaczenie charakterystyki zaworu

- 1 Upewnij się, że zawory termostatyczny (V2), kaloryferowy (V7) i odcinający (V8) są otwarte.
- 2 Włącz pompę. Za pomocą zaworu z gniazdem kątowym (V11) ustaw odpowiednie natężenie przepływu, zapisz je.

Zawór termostatyczny $\frac{3}{4}$ cala (R2/V2)

- 3 Zamknij zawory odpowietrzające na górze manometru o numerach od 4 do 12. Odczytaj i zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienie przez i za zaworem.
- 4 Zmniejsz stopień otwarcia zaworu o $\frac{1}{4}$ na skali. Zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienia przez i za zaworem dla każdego stopnia otwarcia. Powtarzaj procedurę aż do zatrzymania przepływu.

Zawór kaloryferowy $\frac{1}{2}$ cala, narożny (R7/V7)

- 3 Zamknij zawory odpowietrzające na górze manometru o numerach: od 9 do 12. Odczytaj i zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienie przez i za zaworem.
- 4 Zmniejsz stopień otwarcia zaworu o $\frac{1}{4}$ na skali. Zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienia przez i za zaworem dla każdego stopnia otwarcia. Powtarzaj procedurę aż do zatrzymania przepływu.

Zawór odcinający suwakowy $\frac{1}{2}$ cala, prosty (R8/V8)

- 3 Zamknij zawory odpowietrzające na górze manometru o numerach od 10 do 12. Odczytaj i zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienie przez i za zaworem.
- 4 Zmniejsz stopień otwarcia zaworu o $\frac{1}{4}$ obrotu. Zapisz natężenie przepływu oraz ciśnienia przez i za zaworem dla każdego stopnia otwarcia. Powtarzaj procedurę aż do zatrzymania przepływu.
- 5 Po zakończeniu pomiarów wyłącz pompę oraz otwórz badany zawór.

Część II – pomiar ciśnienia (strat) na elementach układu pomiarowego

- 1 Upewnij się, że zawory termostatyczny (V2), kaloryferowy (V7) i odcinający (V8) są otwarte.
- 2 Włącz pompę.

I seria pomiarowa

- 3 Za pomocą zaworu z gniazdem kątowym (V11) ustaw odpowiednie natężenie przepływu, zapisz je.
- 4 Odczytaj wysokości słupów wody w każdej rurce manometru, zapisz je.
- 5 Zmień wartość natężenia przepływu.
- 6 Powtarzaj punkty 3, 4 i 5, aż do uzyskania wyników dla 5 różnych natężeń przepływu.

II seria pomiarowa

- 7 Ustaw natężenie przepływu do wartości początkowej (takiej jak w I serii).
- 8 Pomiar wykonuj analogicznie jak w serii I – dla tych samych natężeń przepływu.
- 9 Po zakończeniu pomiarów wyłącz pompę.

3. Analiza wyników i sprawozdanie

Co należy zrobić?

1. Wyliczyć prędkości, spadki ciśnień oraz współczynniki oporu dla wszystkich elementów układu pomiarowego (dla każdej serii pomiarowej osobno).
2. Przeprowadzić analizę niepewności pomiarowych.
3. Porównać otrzymane wyniki z danymi wzorcowymi. Przeanalizować otrzymane różnice.
4. Wyznaczyć charakterystykę zaworu.
5. Wyliczyć całkowitą stratę ciśnienia dla projektowanej instalacji C.O. bazując na współczynnikach wyznaczonych z pomiarów eksperymentalnych. Policzyć dodatkowy koszt energii związanej z tymi stratami.
6. Zaprezentować analizę oraz wyniki w formie sprawozdania.

Wzory ogólne

Natężenie przepływu i prędkość średnia

Rotametr podaje objętościowe natężenie przepływu ($\dot{V}$) w L/h, należy pamiętać o zamianie jednostek w dalszych obliczeniach – na m^3/s . Natężenie przepływu jest stałe i takie same w całym układzie (woda jest płynem nieściśliwym). Prędkość płynu będzie się zmieniać w zależności od pola przekroju elementów instalacji. Do wyznaczenia pola przekroju wykorzystujemy średnicę wewnętrzną (ponieważ to ją „widzi” płyn). Prędkość średnią wyznaczamy z natężenia przepływu przekształcając wzór:

$$\dot{V} = vA \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

gdzie: $\dot{V}$ jest natężeniem przepływu, m^3/s ; v jest prędkością średnią, m/s ; A jest polem przekroju kanału, m^2 (przykładowo, dla rury $A = \frac{\pi D^2}{4}$); D jest średnicą wewnętrzną, m .

Ciśnienie

Z manometru odczytujemy ciśnienie w postaci wysokość słupa wody w mmH_2O , do dalszej pracy musimy zamienić te jednostki na metry słupa wody mH_2O .

Do wyznaczania współczynników oporu możemy korzystać z równania (1) i (2), ale wtedy ciśnienie odczytane jako wysokość słupa wody h musimy zamienić najpierw na Pa – korzystając ze wzoru na ciśnienie hydrostatyczne:

$$P = \rho g h \text{ [Pa]} \quad (4)$$

gdzie: ρ jest gęstością płynu w manometrze (woda), kg/m^3 ; g jest przyspieszeniem ziemskim, 9.81 m/s^2 ; h jest wysokością słupa wody, m .

Po policzeniu różnicy ciśnień ($\Delta P = P_{\text{przed}} - P_{\text{za}}$) należy ją podstawić do wzoru (1) i (2).

Lepszym podejściem jest od razu przekształcić wzory (1) i (2) dzieląc je obustronnie przez ρg , otrzymujemy wtedy równania, w których używamy bezpośrednio wysokości słupa wody:

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \text{ [m]} \quad (5)$$

$$\Delta h = \zeta \frac{v^2}{2g} \text{ [m]} \quad (6)$$

gdzie: Δh jest różnicą wysokości słupa wody w rurkach manometrycznych ($\Delta h = h_{przed} - h_{za}$), m; g jest przyspieszeniem grawitacyjnym, 9.81 m/s^2 ; v jest prędkością średnią, m/s; L jest długością rury, m; D jest średnicą rury, m; λ jest współczynnikiem strat liniowych; ζ jest współczynnikiem strat lokalnych.

Całkowite straty ciśnienia i oszacowanie kosztów

Jeżeli znamy wszystkie współczynniki oporów liniowych i miejscowych to całkowite straty wyznaczane są z następującego wzoru (sumujemy straty z każdego elementu instalacji):

$$\Delta P_{całkowite} = \left(\sum \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} + \sum \zeta \frac{\rho v^2}{2} \right) \text{ [Pa]} \quad (7)$$

Należy pamiętać, że występujące we wzorze prędkości średnie v będą różne w zależności od danego elementu instalacji bądź rury.

Dodatkowa moc pompy potrzebna na pokonanie strat przepływu wynosi:

$$W = \frac{\dot{V} \Delta P}{\eta} \text{ [W]} \quad (8)$$

gdzie: $\eta = 0.7$ jest sprawnością pompy; $\dot{V}$ jest objętościowym natężeniem przepływu w projektowanej instalacji, m^3/s ; ΔP są całkowitymi stratami ciśnienia w instalacji, Pa. Średni koszt energii elektrycznej wynosi 1 zł/kWh .

Obliczenia współczynników oporu dla poszczególnych elementów układu pomiarowego

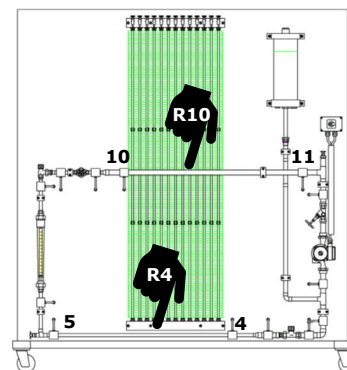
Wyliczone wartości współczynników możemy porównać z wartościami wzorcowymi, wartościami uzyskanymi ze wzorów empirycznych (korelacji), jak i odnieść je do typowych wartości dla danego elementu. Pozwoli nam to sprawdzić czy nasze wyniki są akceptowalne.

Rurki

Współczynniki strat liniowych wyznaczamy dla dwóch rurek:

- Rurka miedziana o większej średnicy (R10). Średnica wewnętrzna $D = 26 \text{ mm}$, długość $L = 1 \text{ m}$.
- Rurka miedziana o mniejszej średnicy (R4). Średnica wewnętrzna $D = 16 \text{ mm}$, długość $L = 1 \text{ m}$.

Do wyznaczenia współczynnika strat liniowych wykorzystujemy wzór (5). Prędkość średnią wyliczamy dla każdej rury osobno (różne średnice – różne prędkości średnie). Musimy pamiętać, że Δh w tym wzorze musi być w metrach. Do obliczeń używamy zawsze średnicy wewnętrznej (czyli tej która styka się bezpośrednio z płynem). Współczynnik strat liniowych jest funkcją liczby Reynoldsa, w tym ćwiczeniu uprościmy analizę wyznaczając jego wartość średnią dla badanego zakresu natężenia przepływu, pełnoprawna analiza strat liniowych jest tematem Ćwiczenia 3.



Wartość wzorcowa średnia:

- rurka (R10): $\lambda = 0.0587$
- rurka (R4): $\lambda = 0.0319$

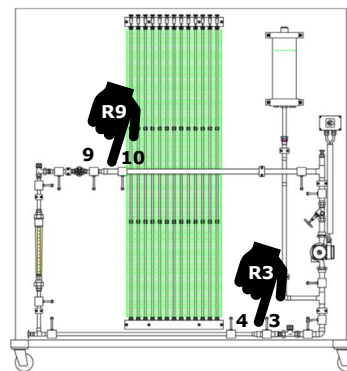
W przypadku oporów liniowych trudno mówić o typowych wartościach, gdyż współczynnik nie zależy od geometrii, a od liczby Reynoldsa i chropowatości rury. Natomiast można zastosować pewne uproszczenie – porównać otrzymane wartości z uśrednionymi wartościami wzorcowymi dla badanego zakresu natężenia przepływu.

Źródłem strat jest tarcie (lepkość).

Złączki redukcyjne

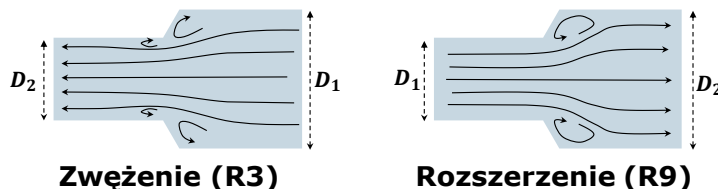
Współczynniki strat miejscowych wyznaczamy dla:

- Złączki redukcyjnej (R3). Zwężenie ze średnicy $D_1 = 26$ mm na średnicę $D_2 = 16$ mm (obie średnice są średnicami wewnętrznymi).
- Złączki redukcyjnej (R9). Rozszerzenie ze średnicy $D_1 = 16$ mm na średnicę $D_2 = 26$ mm (obie średnice są średnicami wewnętrznymi).



Do wyznaczenia współczynników oporu miejscowego na tych elementach bazujemy na równaniu (6). Nie możemy użyć go bezpośrednio, wcześniej należy dokonać pewnej modyfikacji. Zmiana średnicy (poła przekroju) zwężek wpływa na prędkość (zgodnie z równaniem ciągłości – natężenie przepływu jest takie samo, ale prędkość dla jednej i drugiej średnicy będzie inna). Zmiana prędkości zgodnie z równaniem *Bernoulliego* wpływa na zmianę ciśnienia statycznego (mierzonego przez nas):

- Przy przejściu z większej średnicy na mniejszą (R3) prędkość wzrośnie (ciśnienie dynamiczne), co spowoduje spadek ciśnienia statycznego (jest to dodatkowy spadek poza samymi stratami).
- Przy przejściu z mniejszej średnicy na większą (R9) prędkość maleje (ciśnienie dynamiczne), co spowoduje wzrost ciśnienia statycznego (wzrost ciśnienia poza spadkiem spowodowanym stratami).



Odczyt z manometru będzie podawał całkowitą zmianę ciśnienia statycznego (spowodowaną stratami i zmianą ciśnienia dynamicznego). Do wyznaczenia strat (a następnie współczynnika) musimy uwzględnić ten efekt (wyprowadzenie wzoru znajduje się w [Dodatku](#)):

$$\Delta h = \zeta \frac{v_2^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (9)$$

$$\Delta h = \zeta \frac{v_1^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (10)$$

gdzie: $\zeta \frac{v_2^2}{2g}$ jest stratą ciśnienia na tym elemencie (wybieramy prędkość większą – czyli tę z rurki o mniejszej średnicy, jest to pewna przyjęta konwencja); $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$ jest zmianą ciśnienia spowodowaną zmianą prędkości (zmiana ciśnienia dynamicznego); indeksy 1 i 2 oznaczają symbolicznie punkty przed i za redukcją. Równanie (9) używamy dla zwężenia, a równanie (10) dla rozszerzenia.

Wartość wzorcowa:

- zwężenie (R3): $\zeta = 0.6651$
- rozszerzanie (R9): $\zeta = 0.5494$

Korelacja:

- zwężenie (R3): $\zeta \approx 0.42 \left(1 - \frac{D_{\text{mniejsza}}^2}{D_{\text{większa}}^2}\right)$
- rozszerzanie (R9): $\zeta = \left(1 - \frac{D_{\text{mniejsza}}^2}{D_{\text{większa}}^2}\right)^2$

Przy nagłym zwężeniu i rozszerzeniu współczynnik strat zależy głównie od geometrii – szczególnie od stosunku pól przekroju przed i za zwężeniem/rozszerzeniem. Wzory spotykane w literaturze mogą się trochę różnić – zależy to od wyboru prędkości odniesienia.

W przypadku złązek redakcyjnych (nagłe rozszerzenie lub zwężenie) obserwujemy znacznie większe straty niż w przypadku stopniowej zmiany przekroju. Płyn nie jest w stanie zrobić nagłego skrętu 90° szczególnie przy dużych prędkościach. Powoduje to oderwania i powstawanie stref recyrkulacji.

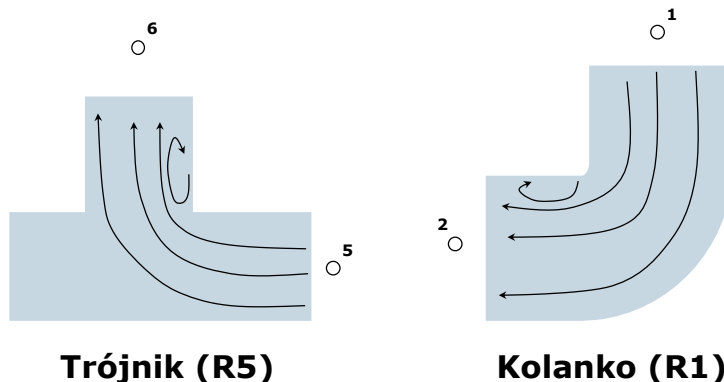
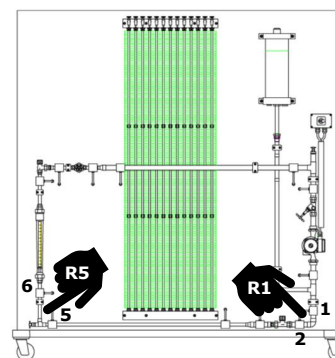
Dla nagłego zwężenia płyn wpływający do kanału o mniejszej średnicy ulega przewężeniu (kontrakcja strugi), następnie rozszerza się. Dla nagłego rozszerzenia struga wpływająca do kanału o większej średnicy, stopniowo go wypełnia – powstają strefy recyrkulacji. Dla nagłego rozszerzenia straty przepływu są większe niż dla nagłego zwężenia (dla tego samego stosunku średnic).

Kolanko i trójnik

Współczynniki strat miejscowych wyznaczamy dla:

- Trójnik (T) (R5). Punkty pomiarowe (5) i (6) znajdują się na rurce o średnicy wewnętrznej $D = 16$ mm.
- Kolanko miedziane 90° (R1). Punkty pomiarowe (1) i (2) znajdują się na rurce o średnicy wewnętrznej $D = 26$ mm.

Do wyznaczenia współczynników oporu miejscowego na tych elementach korzystamy z równania (6).



Trójnik (R5)

Kolanko (R1)

Wartość wzorcowa:

- trójnik (R5): $\zeta = 1.1$
- kolanko (R1): $\zeta = 2.8$

Zakres wartości typowych (z literatury):

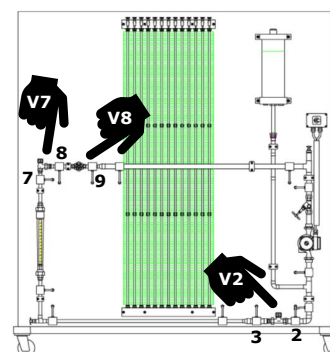
- trójnik (R5): $\zeta \approx 0.3 - 1.5$
- kolanko (R1): $\zeta \approx 1 - 2$

W przypadku przepływu przez elementy zakrzywione – w których następuje zmiana kierunku przepływu, poza stratami tarcia (jak w rurach) występują straty spowodowane oderwaniem (gdy płyn nie może nadążyć za zmianą krzywizny) i wirami powstającymi przez działanie siły dośrodkowej. Współczynnik strat zależy od stosunku średnicy rury do promienia krzywizny, liczby Reynoldsa, chropowatości i kąta zmiany kierunku przepływu.

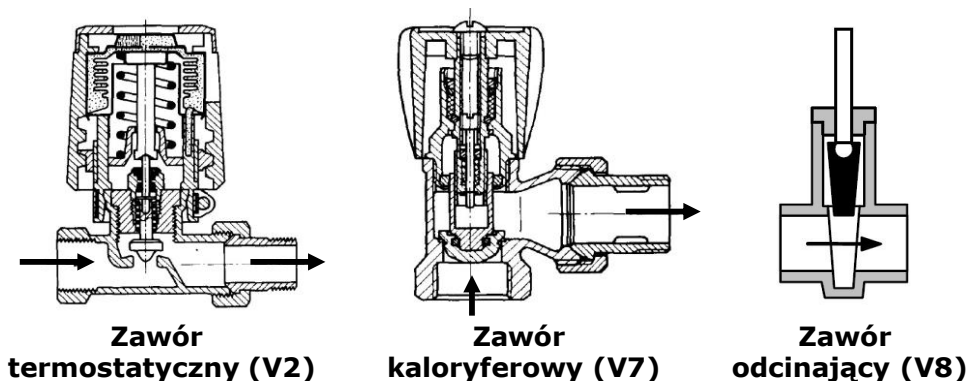
Zawory

Współczynniki strat miejscowych wyznaczamy dla:

- Zawór termostatyczny 3/4 cala, prosty (V2). Punkty pomiaru (2) i (3) znajdują się na rurce o średnicy wewnętrznej $D = 26$ mm.
- Zawór kaloryferowy 1/2 cala, narożny (V7). Punkty pomiaru (7) i (8) znajdują się na rurce o średnicy wewnętrznej $D = 16$ mm.
- Zawór odcinający suwakowy 1/2 cala, prosty (V8). Punkty pomiaru (8) i (9) znajdują się na rurce o średnicy wewnętrznej $D = 16$ mm.



Do wyznaczenia współczynników oporu miejscowego na zaworach używamy równania (6).



Wartość wzorcowa:

- termostatyczny (V2): $\zeta = 1.64$
- kaloryferowy (V7): $\zeta = 7.9$
- odcinający (V8): $\zeta = 0.87$

Zakres wartości typowych (z literatury):

- termostatyczny (V2): $\zeta \approx 4 - 6$
- kaloryferowy (V7): $\zeta \approx 2 - 3$
- odcinający (V8): $\zeta \approx 0.2 - 1$

Wartości współczynników w przypadku zaworów są orientacyjne – zależą od geometrii i wykonania, 'taki sam' zawór wyprodukowany przez różnych producentów może mieć znacznie różne współczynniki oporu.

Uwaga

Praktycznie dla każdego elementu w instalacji eksperymentalnej punkty pomiarowe nie są bezpośrednio za i przed danym elementem – zawierają kawałki rur. Oznacza to, że mierzone przez nas straty nie pochodzą tylko od strat miejscowych, ale także liniowych. Należałoby to uwzględnić, w celu poprawy współczynników oporu. Od wyliczonego współczynnika oporu miejscowego ζ należałoby odjąć człon strat liniowych $\lambda \frac{L}{D}$, gdzie L jest odległością pomiędzy punktami pomiarowymi, m; D jest średnicą rury, na której znajdują się elementy pomiarowe, m; λ jest współczynnikiem oporu liniowego – nie mamy, jak go zmierzyć bezpośrednio, ale możemy użyć współczynnika wyznaczonego dla rurki większej i mniejszej (odpowiednio). W tym ćwiczeniu pomijamy ten wpływ, należy jednak o nim pamiętać.

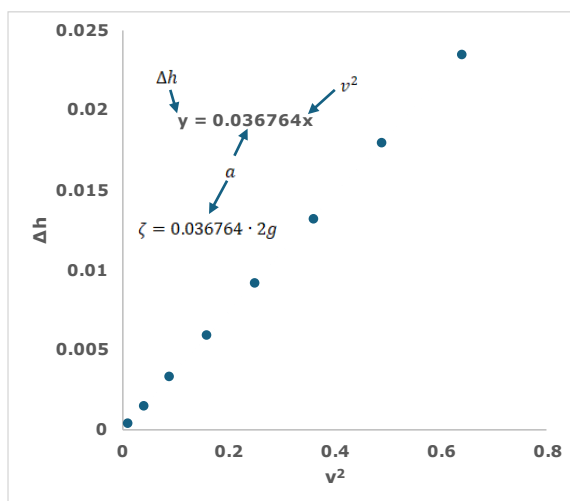
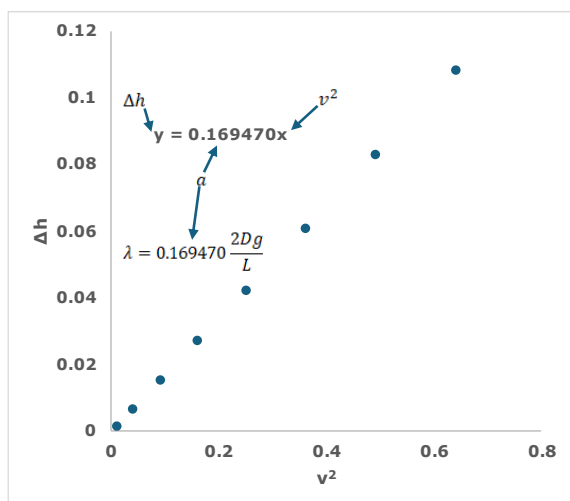
Uśrednianie wyników

W tym ćwiczeniu wszystkie wartości współczynników oporu uśredniamy dla badanego zakresu natężenia przepływu. Dla strat miejscowych nie ma problemu, gdyż współczynnik strat jest praktycznie tylko funkcją geometrii, natomiast dla współczynnika strat liniowych będzie to uproszczenie.

W celu uśrednienia wyników wykorzystamy aproksymację średniokwadratową (z wykorzystaniem linii trendu w Excelu). W tym celu należy przygotować wykresy spadku ciśnienia Δh od prędkości do kwadratu, dla każdego badanego elementu osobno – równania (5) i (6). Po tym kroku dodajemy linię trendu w postaci funkcji liniowej (trzeba ustawić w opcjach punkt przecięcia na wartość 0):

$$y = ax$$

gdzie y jest spadkiem ciśnienia Δh , x jest prędkością do kwadratu v^2 , natomiast a jest szukaną stałą, która dla strat liniowych wynosi: $a = \frac{\lambda L}{2Dg}$, a dla strat miejscowych: $a = \frac{\zeta}{2g}$. Po określeniu stałej a , należy przekształcić wzór, aby otrzymać uśredniony współczynnik strat. Uwaga dla strat ciśnienia wyznaczanych ze wzorów (9) i (10) wartość spadku ciśnienia Δh należy odpowiednio zmodyfikować (zmniejszyć/zwiększyć).



Charakterystyka zaworu

Charakterystykę wybranego zaworu wykonamy na dwa sposoby:

1. liczymy i przedstawimy, jak zmienia się współczynnik oporu ζ wybranego zaworu wraz ze stopniem jego otwarcia – tak jak do tej pory, wykorzystując równanie (6). Wyniki przedstawimy na wykresie – na osi y będzie współczynnik oporu ζ , natomiast na osi x stopień otwarcia zaworu. Na wykresie należy umieścić niepewność współczynnika oporu (jako słupek błędów).
2. liczymy i przedstawimy, jak zmienia się współczynnik przepływu K_v wybranego zaworu wraz ze stopniem jego otwarcia. Wyniki przedstawimy na wykresie – na osi y będzie współczynnik przepływu K_v , podzielony przez jego maksymalną wartość wyrażoną w procentach (maksymalna wartość jest dla zaworu w pełni otwartego, K_{vs} zwanego inaczej nominalnym współczynnikiem przepływu). Na osi x znajdzie się stopień otwarcia zaworu podzielony przez jego maksymalną wartość w procentach (czyli wartość jaką skala zaworu pokazuje, gdy jest otwarty maksymalnie). W przypadku współczynnika przepływu liczenie niepewności pominiemy.

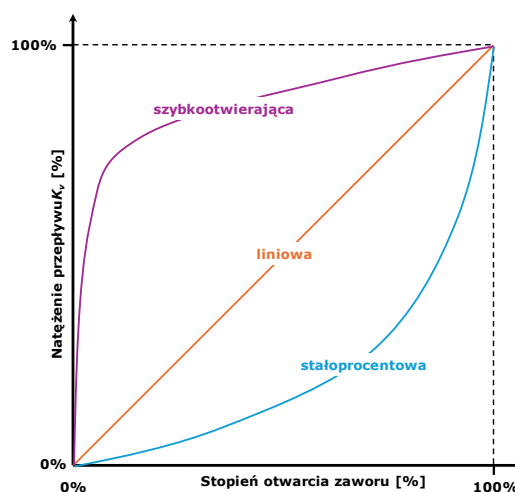
Współczynnik przepływu definiujemy następująco (dla wody):

$$K_v = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta P}} \quad (11)$$

gdzie: $\dot{V}$ jest objętościowym natężeniem przepływu, m^3/h ; ΔP jest różnicą ciśnień, bar. Należy uważać na jednostki!

Współczynnik przepływu K_v interpretuje się następująco – jest to natężenie przepływu w m^3/h przez zawór, gdy różnica ciśnień wynosi 1 bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$). Jednostka K_v nie jest zgodna z jego definicją – jest to pewna konwencja. Przykładowe charakterystyki zaworów są następujące:

- *szybkootwierająca* – niewielka zmiana stopnia otwarcia zaworu (na początku) powoduje dużą zmianę natężenia przepływu.



pp. oznacza punkt procentowy.

- *liniowa* – natężenie przepływu jest wprost proporcjonalne do zmiany stopnia otwarcia zaworu. Np. zmiana stopnia otwarcia o 50 pp. powoduje zmianę natężenia też o 50 pp.
- *stałoprocentowa* – zmiana stopnia otwarcia zaworu o 1 pp. zawsze powoduje zmianę natężenia przepływu o 1% w porównaniu do wartości poprzedniej. Na początku otwierania zmiany natężenia są niewielkie, ale wzrastają ze stopniem otwarcia zaworu.

Niepewności pomiarowe

W trakcie przeprowadzania eksperymentu bezpośrednio mierzymy:

- natężenie przepływu $\dot{V}$ l/h,
- wysokość słupa wody h mm w manometrze.

Związane są z nimi niepewności pomiarowe, to odpowiednio $u(\dot{V})$ i $u(h)$. Podczas wykonywania pomiaru jak i przygotowywania sprawozdania należy się nad nimi zastanowić i je określić. Musimy się także zastanowić czy w trakcie dokonywania pomiarów występują inne niepewności i czy powinniśmy je wziąć pod uwagę.

Pozostałe zmienne, takie jak:

- prędkość średnia v ,
- współczynniki oporu λ/ζ

nie są mierzone bezpośrednio, wynikają z wcześniej wspomnianych dwóch parametrów $\dot{V}$ i h . Nie jesteśmy w stanie określić tych niepewności bezpośrednio, bo ich nie mierzymy. Natomiast musimy je znać i w tym celu wykorzystamy prawo przenoszenia niepewności. Niepewność spadku ciśnienia zgodnie z prawem przenoszenia niepewności wynosi: $u(\Delta h) = u(h)\sqrt{2}$. Po ich wyliczeniu ($u(v)$, $u(Re)$, $u(\lambda)$, $u(\zeta)$) musimy uwzględnić je w analizie – czy to jako wartości liczbowe w tabelach czy w postaci słupków błędów na wykresach. Analiza wyników bez określenia niepewności pomiarowych jest nieakceptowalna.

Sprawozdanie

- Sprawozdanie należy przygotować w dostępnym szablonie sprawozdania.
- Sprawozdanie musi przedstawiać:
 - wyliczone współczynniki oporu (wraz z niepewnościami),
 - analizę i komentarz do tych wyników (porównanie wartości średnich),
 - charakterystykę zaworu,
 - wyliczenie całkowitych strat ciśnienia dla projektowanej instalacji oraz koszt.
- Do każdego obliczenia należy podać wzór, który był użyty wraz z opisem symboli i jednostkami oraz przykład obliczeniowy – wzór z podstawionymi wartościami liczbowymi i wynikiem.
- Wyliczone wartości (jak spadek ciśnienia, prędkości, współczynniki oporu, i ich niepewności) należy przedstawić w formie tabelarycznej lub za pomocą wykresów.
- Sprawozdanie musi zawierać analizę niepewności pomiarowych wraz z równaniami jakie zostały użyte.
- Dane pomiarowe (np. zdjęcie) może być dołączone pod sprawozdaniem w formie dodatku.

Prezentacja wyników

- Wykresy strat ciśnienia od prędkości średniej dla każdego badanego elementu.

Wykresy te pomogą nam w sprawdzeniu czy straty ciśnienia faktycznie zależą od kwadratu prędkości średniej, jakie są niepewności wyliczonych wartości oraz jak wyglądają różnice pomiędzy seriami pomiarowymi. Najlepiej, aby każdy element był na osobnym wykresie (różne prędkości średnie – różne średnice). Obie serie pomiarowe prezentujemy w ramach jednego wykresu. Wykresy w formie punktów, należy do każdego dodać słupki błędów – z analizy niepewności. Excel – wykres XY (punktowy).

- Wykresy współczynnika strat od prędkości średniej dla każdego badanego elementu.

Wykresy pomogą w sprawdzeniu jak różnią się wyniki między sobą, jak różnią się od wartości uśrednionych, wzorcowych itd. Umożliwi on także sprawdzenie czy współczynniki strat zależą od prędkości. Dla każdego elementu najlepiej zrobić osobne rysunki (obie serie pomiarowe prezentujemy w ramach jednego) Na wykresy nanosimy wartości współczynnika oporu od prędkości, wraz z niepewnościami (jako słupki błędów), a dodatkowo wartości średnie (z aproksymacji – linia trendu), wzorcowe/wyznaczone z korelacji (w formie linii ciągłej, może być kreskowana) – umożliwi to lepsze porównanie wyników. Wykresy w formie punktów, należy do każdego dodać słupki błędów – z analizy niepewności.

- Wykresy charakterystyki wybranego zaworu – współczynnika oporu i współczynnika przepływu (dwa osobne wykresy obok siebie).
- Przedstawić sposób obliczeń i wynik wyznaczenia całkowitych strat ciśnienia dla projektowanej instalacji C.O. oraz podania kosztu.

Co powinna zawierać analiza wyników i dyskusja?

Poniżej przedstawiono pytania, na które odpowiedzi pomogą wykonać dobrą analizę wyników:

- Jak zmieniają się straty ciśnienia w układzie ze zmianą natężenia przepływu? Czy ma to sens i jest zgodne z naszą wiedzą oraz intuicją? Czy straty ciśnienia zależą od prędkości średniej do kwadratu (czy kształt otrzymanej krzywej jest funkcją kwadratową)? Co na to wskazuje?
- Jaki jest wpływ średnicy na straty ciśnienia w rurkach?
- Czy można zaobserwować, że współczynnik oporu miejscowego jest praktycznie tylko funkcją geometrii (zależy tylko od danego typu elementu)? Co na to wskazuje?
- Czy obie serie pomiarowe są zgodne ze sobą (biorąc pod uwagę niepewności pomiarowe)? Jeżeli nie, co mogło spowodować taką sytuację? Czy wykonanie większej ilości pomiarów w ramach jednej serii miałoby sens? Czy należałoby wykonać więcej serii pomiarowych?
- Czy można zaobserwować w wynikach jakieś anomalie (czy któreś wyniki znacznie odbiegają od pozostałych, albo od teorii)? Jakże może być ich źródło?
- Która niepewność pomiarowa ma największy wpływ na wyniki? Czy poprawa dokładności tego pomiaru przełoży się znacznie na jakość wyników? Dlaczego i jak? Czy jakieś inne niepewności mogą wpływać na wyniki, a nie zostały uwzględnione?
- Jak otrzymane wyniki współczynników oporu mają się do wartości wzorcowych/korelacji, czy też typowych zakresów? Jakie są różnice procentowe pomiędzy tymi wartościami? Czy różnice są w zakresie niepewności pomiarowych? Czy różnice są akceptowalne?
- Jak zmienia się współczynnik oporu zaworu wraz z jego stopniem otwarcia? Czy przypomina to jakąś funkcję? Czy charakterystyka zaworu w postaci współczynnika przepływu pasuje do jednego z typowych charakterystyk? Jak tak to do której?
- Jakże współczynniki wybrać do wyznaczenia strat ciśnienia w projektowanym układzie? Czy z serii I czy II, średnią, czy jakaś inna opcja? Dlaczego?
- Biorąc pod uwagę całą analizę, czy można zaufać i wykorzystać prezentowane wyniki? Dlaczego i co na to wskazuje?
- Który z elementów układu powoduje największe straty (ma największy współczynnik)? Dlaczego akurat on? Czy dałoby się go zastąpić czymś co będzie miało mniejszy współczynnik oporu?

- Jakiego będą całkowite straty ciśnienia w projektowanym układzie C.O.? Jaki dodatkowy roczny koszt w złotych spowodują straty całkowite (zakładając, że pompa działa cały czas przez pół roku)? Czy do strat całkowitych i dodatkowego kosztu nimi spowodowanego można wyliczyć niepewności i przedstawić wyniki jako zakres? Jeżeli tak, to jak?

Podsumowanie, uwagi końcowe i porady

- Dane najlepiej wprowadzić do arkusza kalkulacyjnego (np. *Excel*)
- Od razu zamienić jednostki i na nie uważać
- Kroki:
 - wyliczyć prędkości i spadki ciśnień dla każdego elementu
 - wyliczyć współczynniki oporu
 - wyliczyć niepewności pomiarowe
 - uśrednić otrzymane współczynniki i porównać wyniki z wartościami wzorcowymi/korelacjami/wartościami typowymi
 - wyliczyć dane potrzebne do otrzymania charakterystyki zaworu

4. Dodatki

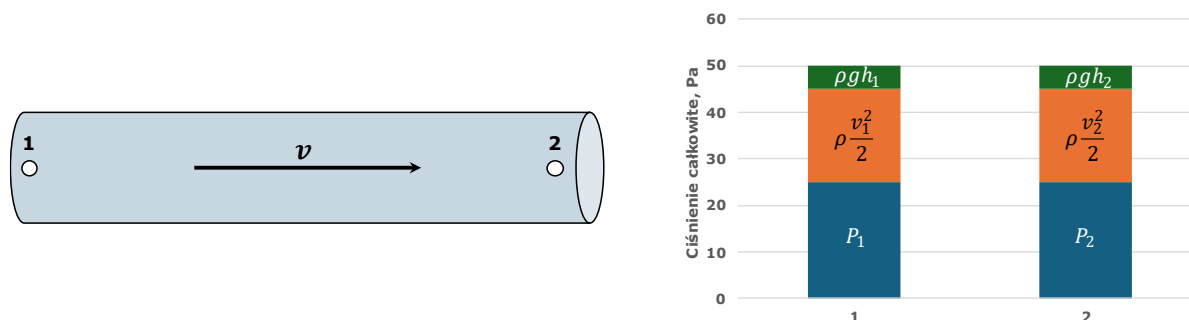
Wyprowadzenie wzorów

W przypadku przepływu bez strat (przy założeniach, że płyn jest nieściśliwy, nielepki, oraz przepływ jest stacjonarny i bezwirowy, nie ma wykonywanej dodatkowej pracy na układzie oraz nie ma transportu ciepła), równanie *Bernoulliego* definiujemy następująco:

$$P + \rho \frac{v^2}{2} + \rho gh = \text{const} \quad (12)$$

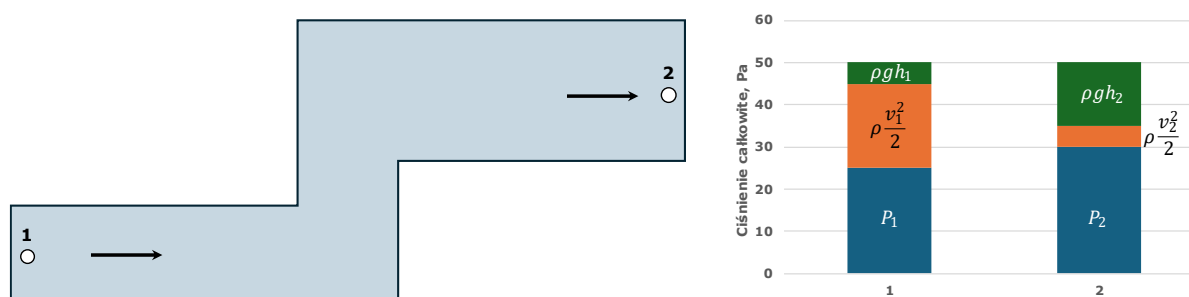
gdzie: P jest ciśnieniem statycznym płynu, Pa; ρ jest gęstością płynu, kg/m³; v jest prędkością średnią płynu, m/s; g jest przyśpieszeniem grawitacyjnym, $g = 9.81 \text{ [}\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\text{]}$; h jest wysokością odniesienia na jakiej znajduje się płyn, m.

Równanie to składa się z trzech członów, kolejno – ciśnienia statycznego, ciśnienia dynamicznego oraz ciśnienia hydrostatycznego. *Const* oznacza, że wszystkie te człony mogą się zmieniać, ale ich suma (ciśnienie całkowite) pozostaje bez zmian (inaczej zasada zachowania energii mechanicznej). Tak więc dla przepływu przez rurę:



$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho gh_1 = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho gh_2$$

prędkości w punkcie (1) i (2) są takie same, wysokości w punkcie (1) i (2) się nie zmieniają, więc i ciśnienie statyczne pozostaje bez zmian. Dla przepływu przez taki ogólny kształt:



prędkości się zmieniają (bo zmienia się pole przekroju), wysokości też będą inne, tym samym ciśnienia statyczne muszą się zmieniać. Poszczególne człony (statyczny, dynamiczny i hydrodynamiczny) będą się zmieniać – natomiast ich suma (ciśnienie całkowite) pozostaje bez zmian.

Dla przepływu, gdzie straty występują możemy zmodyfikować równanie (12) tak aby je uwzględniło. Dokładamy po prawej stronie człon związany ze stratami – wtedy całe równanie się bilansuje:

$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g h_2 + \Delta P \quad (13)$$

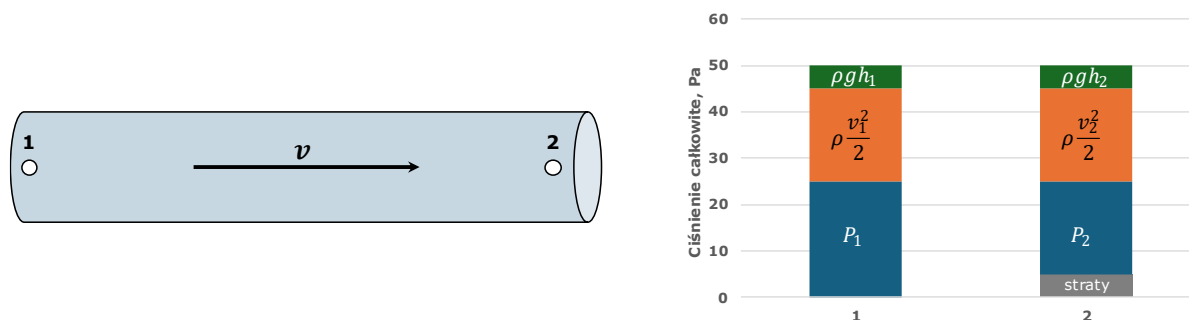
gdzie: ΔP oznacza spadek ciśnienia (straty), Pa. Wzór ten możemy dalej przekształcić, tak aby otrzymać równanie do wyznaczenia strat:

$$\Delta P = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(h_1 - h_2) \quad (14)$$

gdzie: $P_1 - P_2$ jest różnicą ciśnienia statycznego, którą możemy zmierzyć za pomocą manometru; $\frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2)$ jest różnicą ciśnienia dynamicznego; $\rho g(h_1 - h_2)$ jest różnicą ciśnienia hydrostatycznego. Równanie to pokazuje, że zmiana ciśnienia statycznego nie jest związana jedynie ze stratami, ale może wynikać także, ze zmiany wysokości i prędkości płynu.

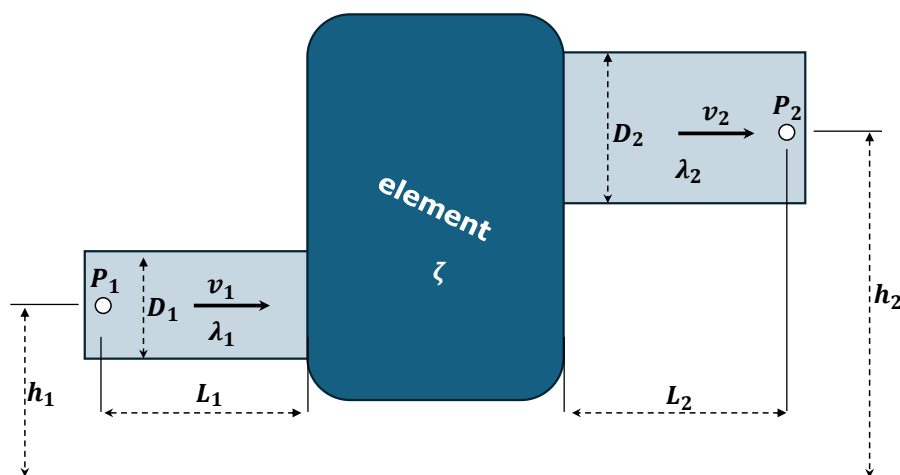
Przykładowo dla przepływu przez rurę (gdzie nie ma zmiany wysokości oraz średnica jest stała – prędkości średnie się nie zmieniają) otrzymujemy równanie (1):

$$\lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(h_1 - h_2)$$



Równanie (14) dla najbardziej ogólnego przypadku, gdzie uwzględnia się straty liniowe oraz miejscowe, zmianę prędkości i wysokości wygląda następująco:

$$\lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{\rho v_1^2}{2} + \lambda_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{\rho v_2^2}{2} + \zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(h_1 - h_2) \quad (15)$$



Jeżeli w członie $\zeta \frac{\rho v^2}{2}$ mamy dwie prędkości średnie do wyboru, to konwencja jest taka, że wybieramy tę większą (z rury o mniejszej średnicy).

Żeby wyznaczyć współczynnik oporu miejscowego ζ musimy znać prędkości oraz średnice, długości, zmianę wysokości, a dodatkowo współczynniki oporów liniowych λ dla danych fragmentów rury – przed i za badanym elementem:

$$\zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(h_1 - h_2) - \lambda_1 \frac{L_1 \rho v_1^2}{D_1} - \lambda_2 \frac{L_2 \rho v_2^2}{D_2} \quad (16)$$

Jeżeli pomijamy wpływ strat liniowych przed i za badanym elementem to równanie sprowadza się do postaci:

$$\zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(h_1 - h_2)$$

Dla elementu, w którym nie ma zmian prędkości i wysokości otrzymujemy równanie (2):

$$\zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(\cancel{v_1^2 - v_2^2}) + \rho g(\cancel{h_1 - h_2})$$

Gdy w układzie występuje zmiana prędkości bez zmian wysokości to dostajemy równanie (9)/(10):

$$\zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) + \rho g(\cancel{h_1 - h_2})$$

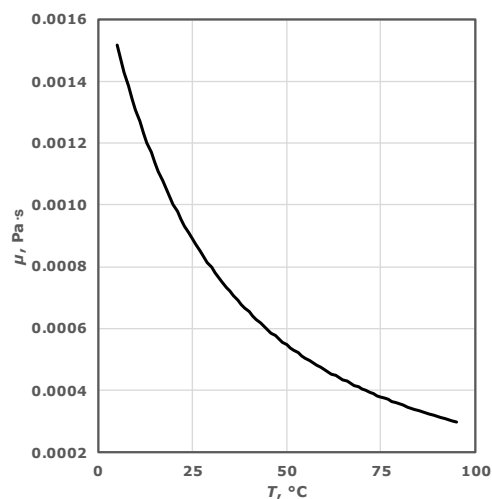
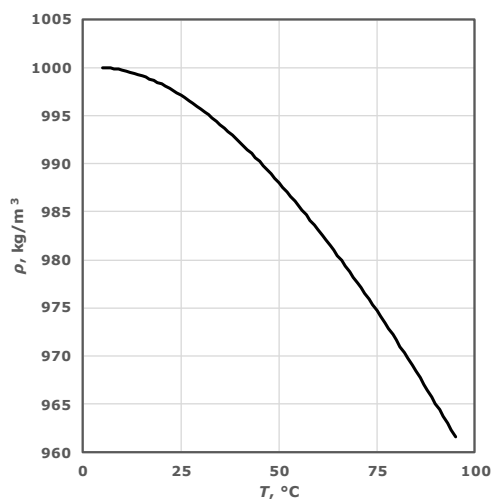
Natomiast jeżeli obserwujemy zmianę wysokości, a prędkość się nie zmienia to mamy równanie:

$$\zeta \frac{\rho v_1^2}{2} = P_1 - P_2 + \frac{\rho}{2}(\cancel{v_1^2 - v_2^2}) + \rho g(h_1 - h_2)$$

Dane materiałowe dla wody

T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa · s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa · s]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Pa · s]
5	1000.0	0.001520	36	993.73	0.000705	67	979.34	0.000422
6	999.99	0.001473	37	993.37	0.000692	68	978.78	0.000416
7	999.96	0.001429	38	993.00	0.000678	69	978.21	0.000410
8	999.91	0.001386	39	992.63	0.000666	70	977.63	0.000404
9	999.85	0.001346	40	992.25	0.000653	71	977.05	0.000399
10	999.77	0.001308	41	991.86	0.000641	72	976.47	0.000394
11	999.68	0.001271	42	991.46	0.000629	73	975.88	0.000388
12	999.58	0.001236	43	991.05	0.000618	74	975.28	0.000383
13	999.46	0.001202	44	990.64	0.000607	75	974.68	0.000378
14	999.33	0.001170	45	990.22	0.000596	76	974.08	0.000373
15	999.19	0.001139	46	989.80	0.000586	77	973.46	0.000369
16	999.03	0.001109	47	989.36	0.000576	78	972.85	0.000364
17	998.86	0.001081	48	988.92	0.000566	79	972.23	0.000359
18	998.68	0.001054	49	988.47	0.000556	80	971.60	0.000355
19	998.49	0.001028	50	988.02	0.000547	81	970.97	0.000351
20	998.29	0.001003	51	987.56	0.000538	82	970.33	0.000346
21	998.08	0.000979	52	987.09	0.000529	83	969.69	0.000342
22	997.86	0.000955	53	986.62	0.000521	84	969.04	0.000338
23	997.62	0.000933	54	986.14	0.000512	85	968.39	0.000334
24	997.38	0.000911	55	985.65	0.000504	86	967.73	0.000330
25	997.13	0.000891	56	985.16	0.000496	87	967.07	0.000326
26	996.86	0.000871	57	984.66	0.000489	88	966.41	0.000322
27	996.59	0.000852	58	984.16	0.000481	89	965.74	0.000319
28	996.31	0.000833	59	983.64	0.000474	90	965.06	0.000315
29	996.02	0.000815	60	983.13	0.000467	91	964.38	0.000311
30	995.71	0.000798	61	982.60	0.000460	92	963.70	0.000308
31	995.41	0.000781	62	982.07	0.000453	93	963.01	0.000304
32	995.09	0.000765	63	981.54	0.000447	94	962.31	0.000301
33	994.76	0.000749	64	981.00	0.000440	95	961.62	0.000298
34	994.43	0.000734	65	980.45	0.000434			
35	994.08	0.000720	66	979.90	0.000428			

Dla czystej wody pod ciśnieniem atmosferycznym. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* - Yunus Cengel, John Cimbala.



Karta pomiarowa

Zespół:

Data:

Projektowana instalacja C.O. składa się z:

- rur Ø28x1 (R10) o długości całkowitej
- rur Ø18x1 (R4) o długości całkowitej
- złączek redukcyjnych:
 - zwężenie (R3)
 - rozszerzenie (R9)
- kolanek 90° (R1)
- trójników (T) (R5)
- zaworów
 - odcinających (R8/V8)
 - termostatycznych (R2/V2)
 - kaloryferowych (R7/V7)

Seria pomiarowa I						
$\dot{V} \left[\frac{l}{h} \right]$						
$h_1 [mm]$						
$h_2 [mm]$						
$h_3 [mm]$						
$h_4 [mm]$						
$h_5 [mm]$						
$h_6 [mm]$						
$h_7 [mm]$						
$h_8 [mm]$						
$h_9 [mm]$						
$h_{10} [mm]$						
$h_{11} [mm]$						
$h_{12} [mm]$						
$h_{13} [mm]$						

Seria pomiarowa II						
$\dot{V} \left[\frac{l}{h} \right]$						
h_1 [mm]						
h_2 [mm]						
h_3 [mm]						
h_4 [mm]						
h_5 [mm]						
h_6 [mm]						
h_7 [mm]						
h_8 [mm]						
h_9 [mm]						
h_{10} [mm]						
h_{11} [mm]						
h_{12} [mm]						
h_{13} [mm]						

Charakterystyka zaworu:			
Stopień otwarcia zaworu	$\dot{V} \left[\frac{l}{h} \right]$	$h_{\square}$ [mm]	$h_{\square}$ [mm]