

Ćwiczenie numer 1	Pomiar natężenia przepływu
--------------------------	-----------------------------------

1. Wprowadzenie

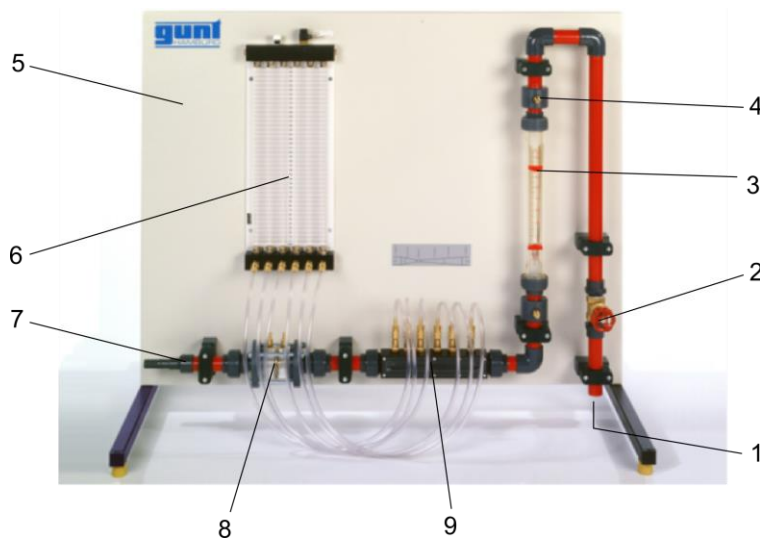
Stanowisko ma na celu zapoznanie się z różnymi metodami pomiaru objętościowego natężenia przepływu.

2. Opis układu eksperymentalnego

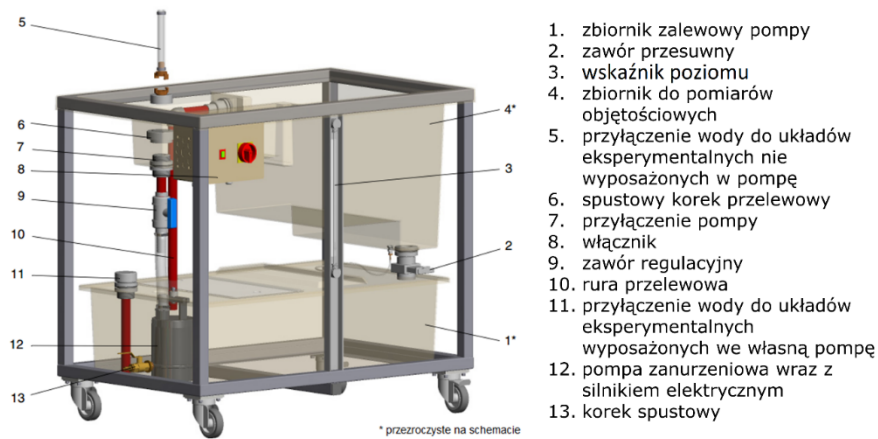
Przez układ pomiarowy, przedstawiony na Rysunku 1, przepływa woda: wpływa przez wlot (7), następnie przepływa przez dyszę (8), zwężkę Venturiego (9) i rotametr (3) (uwaga, rotametr jest nieskalibrowany!). Wylotem (1) woda opuszcza układ, trafiając do modułu bazowego. Różnicę ciśnienia między dwoma wyznaczonymi punktami można zmierzyć z wykorzystaniem złączy pomiarowych (4), łącząc je gumowymi przewodami z manometrem cieczowym (6). Wydatek przepływu regulowany jest za pomocą zaworu regulacyjnego (2).

Układ pomiarowy jest umieszczony na module bazowym, który przedstawiono na Rysunku 2. Moduł bazowy wyposażony jest w pompę (12), może być wykorzystany także do pomiaru objętościowego strumienia przepływu za pomocą zbiornika (4) (przy zamkniętym zaworze przesuwным (2)). Do odczytywania objętości wody w zbiorniku służy wskaźnik poziomy (3).

Zawór regulacyjny (9) nie powinien być przestawiany w trakcie wykonywania ćwiczenia.



Rysunek 1. Schemat układu eksperymentalnego: 1 — wylot wody, 2 — zawór regulacyjny, 3 — rotametr, 4 — złącza pomiarowe, 5 — podstawa, 6 — manometr, 7 — wlot wody, 8 — dysza, 9 — zwężka Venturiego



Rysunek 2. Schemat modułu bazowego

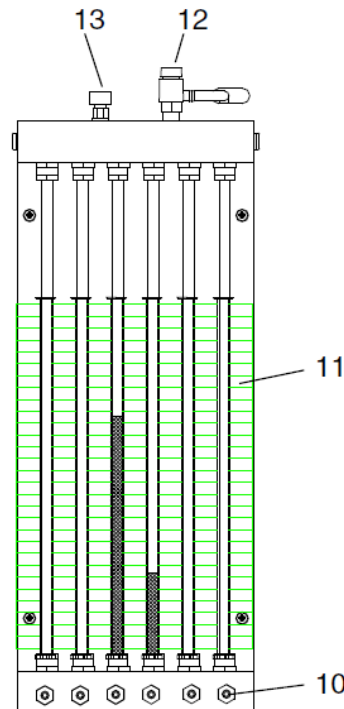
3. Zasady pomiaru ciśnienia w układzie

3.1 Panel manometru

Panel manometru, pokazany na Rysunku 3, składa się z sześciu przezroczystych rurek (11) ze skalą milimetrową do pomiaru wysokości słupa wody.

Rurki (11) są ze sobą połączone w górnej części panelu, gdzie znajduje się zawór przelewowy (12) i wentylacyjny (13). Różnica ciśnienia między dwoma punktami w układzie mierzona jest przy zamkniętym zaworze wentylacyjnym (13) i przelewowym (12), natomiast ciśnienie względne (nadcisnienie, podcisnienie) może zostać zmierzone jest przy otwartym zaworze wentylacyjnym (13).

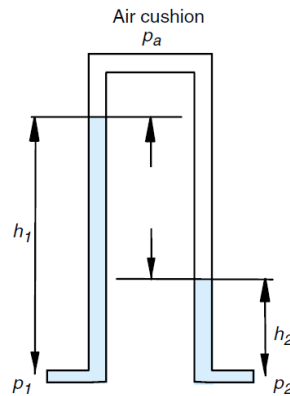
W tym ćwiczeniu wykonuje się wyłącznie pomiar różnicy ciśnienia.



Rysunek 3. Schemat manometru: 10 — złącza pomiarowe, 11 — rurki manometryczne, 12 — zawór przelewowy, 13 — zawór wentylacyjny

3.2 Pomiar różnicy ciśnienia

Schemat pomiaru różnicy ciśnienia został przedstawiony na Rysunku 4.



Rysunek 4. Pomiar różnicy ciśnienia

Po zamknięciu zaworu wentylacyjnego (13) i przelewowego (12) w rurkach manometru, powyżej cieczy, znajduje się pewna ilość powietrza pod ciśnieniem p_a .

Ciśnienia w dwóch punktach 1 i 2 układu można zapisać jako:

$$p_1 = p_a + h_1 \rho g$$

$$p_2 = p_a + h_2 \rho g$$

gdzie: p_1, p_2 – ciśnienie (Pa), p_a – ciśnienie powietrza zamkniętego w rurkach (Pa), h_1, h_2 – wysokości słupa cieczy (m), ρ – gęstość cieczy w manometrze (kg / m^3), g – przyspieszenie ziemskie (m / s^2).

Różnica ciśnienia:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_a + h_1 \rho g - p_a - h_2 \rho g$$

Po uproszczeniu można zapisać:

$$\Delta p = \Delta h \rho g$$

przy czym:

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

Jak widać, znajomość ciśnienia powietrza zamkniętego w rurkach nie jest konieczna do wyznaczenia różnicy ciśnienia, zależy ona tylko od rodzaju cieczy (gęstość) i różnicy wysokości słupów cieczy.

Ciśnienie zamkniętego w rurkach powietrza p_a można regulować pomocą zaworu wentylacyjnego (13) – przy wyłączonej pompie należy delikatnie go otworzyć i zamknąć, część wody w rurkach manometru zostanie wtłoczona do układu (jej poziom obniży się).

4. Metody pomiaru natężenia przepływu

4.1 Zbiornik i stoper

Najbardziej podstawową metodą pomiaru objętościowego wydatku przepływu jest wykorzystanie definicji:

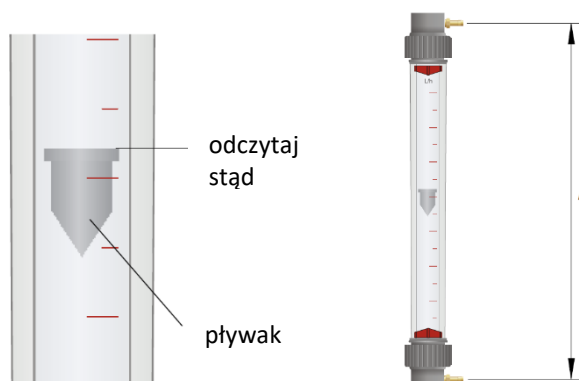
$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t},$$

która mówi, że natężenie przepływu jest równe objętości ΔV , która przepłynęła przez dany przekrój w czasie Δt . Wystarczy zmierzyć, jak długo zajęło napełnienie naczynia o zadanej objętości. Ponieważ w przypadku przepływu płynu nieściśliwego wydatek objętościowy jest taki sam w każdym przekroju, pomiar w jednym punkcie informuje o strumieniu w całym układzie.

4.2 Rotametr

Rotametr to urządzenie pomiarowe służące do pomiaru natężenia przepływu. Schemat rotametru przedstawiono na Rysunku 5. Ten rodzaj rotametru składa się z pionowej części pomiarowej, przez którą z dołu do góry przepływa ciecz. Wewnątrz rotametru znajduje się pływak o odpowiednio dobranym ciężarze, który porusza się unoszony przez ciecz. Podczas przepływu osiągnąony jest stan równowagi, w którym ciężar pływaka, siła tarcia i siła wyporu równoważą się.

Ze względu na zasadę działania, wiarygodny zakres wartości rotametru zaczyna się od 5–10% maksymalnej mierzalnej wielkości przepływu. Wielkość błędu pomiaru wynosi od 1 do 3%. Odczyt natężenia przepływu wykonuje się poprzez odczytanie wartości przy górnej krawędzi pływaka.

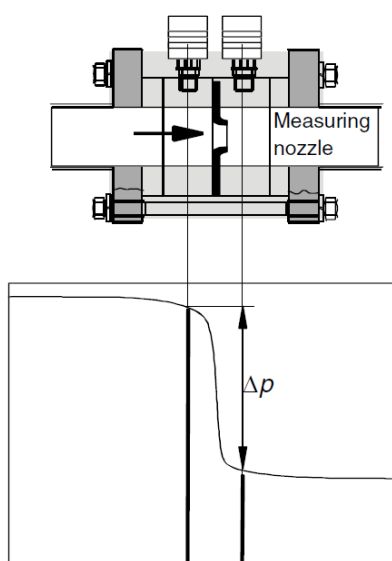


Rysunek 5. Schemat rotametru

Uwaga: pęcherzyki powietrza lub inne nieczystości powodują niedokładności pomiaru. W celu ich zapobiegania przepłucz układ przed pomiarem przez pełne otwarcie wszystkich zaworów.

4.3 Dysza

Dysza, schematycznie przedstawiona na Rysunku 6, to w tym układzie tarcza z otworem w środku i elementem pozwalającym sterować kierunkiem przepływu. Zmniejszenie przekroju przepływu powoduje wzrost prędkości przepływającego płynu, zgodnie z równaniem ciągłości. Efektem jest pewien spadek ciśnienia Δp pomiędzy wejściowym przekrojem A_b , przed wlotem, a zmniejszonym przekrojem A_d dyszy. Strata ciśnienia Δp może zostać przeliczona na objętościowy wydatek przepływu.



Rysunek 6. Schemat dyszy i spadek ciśnienia na elemencie

Objętościowe natężenie przepływu można obliczyć z poniższej zależności, wynikającej z równania Bernoulliego i równania ciągłości:

$$\dot{V} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

gdzie: β - współczynnik przewężenia zwężki (stosunek średnicy otworu w dyszy do średnicy kanału d / D), d - średnica otworu w dyszy (m^2), ρ - gęstość płynu przed dyszą (kg / m^3), Δp - zmierzona różnica ciśnienia (Pa).

Równanie powyższe jest wyprowadzone dla przepływu płynu doskonałego i płaskiego profilu prędkości, jednak w przypadku przepływu płynu rzeczywistego występuje tarcie płynu o ścianki, powstają wiry itp., a profil prędkości jest paraboliczny. Do powyższego równania można wprowadzić współczynnik przepływu α w celu ilościowego uwzględnienia tych zjawisk.

W przypadku przepływu płynu ściśliwego (gazy) do równania wprowadza się współczynnik ekspansji ε , dla cieczy jednak $\varepsilon = 1$.

Podajemy równanie ze współczynnikami przepływu i ekspansji:

$$\dot{V} = \frac{\alpha}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

Współczynnik przepływu można wyznaczyć przekształcając powyższe równanie, jeżeli wydatek objętościowy jest znany skądinąd.

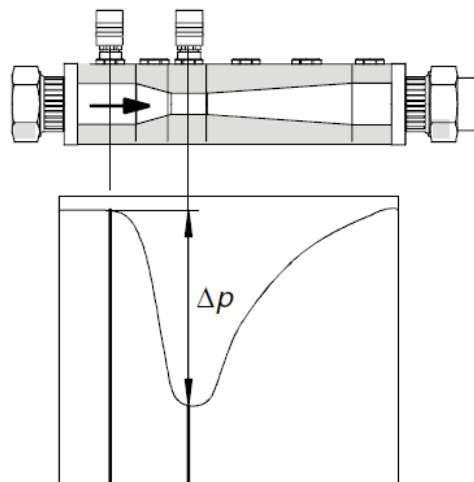
W zastosowaniach inżynierskich można spotkać się z zapisem:

$$\dot{V} = K \sqrt{\Delta p},$$

gdzie K to współczynnik korekcji (jednostka zależy od metody jego wyznaczenia, w niniejszej instrukcji podane są współczynniki korekcji dla elementów pomiarowych w jednostkach $\frac{L}{h\sqrt{bar}}$). W ten sposób można łatwo obliczyć wydatek przepływu znając wyłącznie spadek ciśnienia.

4.4 Zwężka Venturiego

Zwężka Venturiego, której schemat przedstawiono na Rysunku 7, jest kolejnym elementem, który może posłużyć do pomiaru natężenia przepływu. W tym ćwiczeniu zwężka podzielona jest na 3 segmenty o różnych przekrojach poprzecznych. Wlotowa część odpowiada dyszy, w której występuje jedynie zwężenie. Za nią znajduje się segment o stałej średnicy, a następnie dyfuzor o zdefiniowanym kącie φ .



Rysunek 7. Schemat zwężki Venturiego i spadek ciśnienia na elemencie

Strata ciśnienia Δp pomiędzy przekrojem poprzecznym na wlocie A_D a przekrojem poprzecznym w zwężonej części A_d jest mniejsza niż w przypadku kryzy. Zazwyczaj różnica powierzchni przekroju jest zgodna z relacją:

$$m = A_D / A_d = 0.1 - 0.6,$$

natomiast kąt φ zazwyczaj jest mniejszy od 30° .

Objętościowy wydatek przepływu, współczynnik przepływu i współczynnik korekcji oblicza się w taki sam sposób, jak dla dyszy.

5. Przeprowadzanie eksperymentów

5.1 Przygotowanie układu eksperymentalnego

1. Upewnij się, że w zbiorniku (1) (Rysunek 2), lustro wody jest nie niżej, niż 10 cm od górnej krawędzi zbiornika.
2. Upewnij się, że układ pomiarowy podłączony jest do prądu.
3. Przyłącz za pomocą gumowych przewodów 6 pierwszych złączy pomiarowych do manometru (dwa do dyszy i cztery do zwężki Venturiego)
 - Jeżeli w kolejnych krokach pęcherze powietrza będą dostawać się przez złączki do manometru, należy powtórzyć krok 3, poprawiając połączenia przewodów bądź wymieniając przewody.
 - Jeżeli przewody pomiarowe były podłączone przed rozpoczęciem ćwiczenia, nie odpinaj ich!
4. Otwórz całkowicie zawór regulacyjny (2 na Rysunku 1).
 - Zaworu regulacyjnego na module bazowym (9 na Rysunku 2) nie wykorzystuje się w tym ćwiczeniu, zawsze jak jest mowa o zaworze regulacyjnym chodzi o element (2) z Rysunku 1.
5. Zamknij zawór wentylacyjny na manometrze.
6. Otwórz zawór przelewowy na manometrze.
7. Włącz pompę na module bazowym.
8. Przelewaj wodę przez układ, aż do pozbycia się pęcherzy powietrza.
9. Zamknij zawór regulacyjny.
10. Przepłukuj manometr do momentu, aż znikną pęcherze powietrza.
 - Spróbuj poruszać przewodami pomiarowymi w celu pozbycia się pęcherzy powietrza.
11. Zamknij zawór przelewowy i od razu wyłącz pompę.
 - W tym momencie zamknięte są wszystkie odpływy, dalsze przepuszczanie wody przez układ powoduje rozszczelnienie się złączy pomiarowych, więc nie można pozwolić, by pompa pracowała. Postępuj według poniższej procedury.
 - a. Zamknij zawór przelewowy mniej więcej do połowy.
 - b. Wyłącz pompę.
 - c. Szybko zakręć zawór przelewowy do końca, zanim do manometru dostanie się powietrze.
 - Do momentu ponownego włączenia pompy należy wykonywać kolejne czynności szybko, gdyż z powodu nieszczelności układ może zapowietrzyć się.
 - W przypadku zauważenia nieszczelności (pęcherze powietrza dostają się przez złącze pomiarowe do układu) wróć do punktu 3.
 - W przypadku, gdy nieszczelność okazuje się trudna do wyeliminowania mimo kilkukrotnego powtórzenia można (do momentu ponownego włączenia pompy) delikatnie dociskać ręcznie przewody pomiarowe do złączy pomiarowych.

12. Delikatnie otwieraj i zamykaj zawór wentylacyjny tak, aby poziom wody ustabilizował się na poziomie 50 mm słupa wody lub mniejszym na skali manometru.
 - Po obniżeniu poziomu wody zawór wentylacyjny pozostaw zamknięty.
 - Jeżeli podczas wpuszczania powietrza w którejś z rurek manometru poziom wody spadnie poniżej skali, należy wrócić do punktu 4.
 - Jeżeli do momentu ponownego włączenia pompy poziom wody w którejś z rurek manometrycznych znacząco się zmieni, należy wrócić do punktu 4.
13. Zweryfikuj, czy przy wyłączonej pompie poziom wody we wszystkich rurkach manometrycznych jest mniej więcej taki sam.
14. Ostrożnie otwieraj zawór regulacyjny
 - W momencie, gdy w rotametrze zauważysz pęcherze powietrza lub poziom wody w rotametrze zacznie się obniżać, natychmiast włącz pompę i szybko wyreguluj za pomocą zaworu regulacyjnego przepływ ok. 200 l / h (na skali rotametrze).
15. Zweryfikuj, czy poziom wody w każdej z rurek manometru znajduje się między minimum a maksimum skali.
16. Dostosuj przepływ wody za pomocą zaworu regulacyjnego, zadaj początkową wartość objętościowego natężenia przepływu równą 150 l / h (na skali rotametrze).
 - W trakcie ćwiczenia nie wyłączaj pompy, jeżeli pompa zostanie wyłączona, czynności przygotowawcze trzeba powtórzyć.
 - Kontroluj poziom wody w manometrze co jakiś czas w trakcie wykonywania ćwiczenia.
 - Jeżeli w trakcie ćwiczenia poziom wody w którejkolwiek z rurek spadnie poniżej lub wzrośnie powyżej skali, należy rozpocząć ćwiczenie od początku!

5.2 Kalibracja rotametrze

- W ćwiczeniu tym podziałka na rotametrze celowo nie pokazuje prawdziwych wartości natężenia przepływu. Należy rotametrz skalibrować, to znaczy ustalić zależność pomiędzy wartością natężenia przepływu wskazywaną przez rotametrz a „rzeczywistym” natężeniem przepływu (wyznaczonym na podstawie czasu napełniania zadanej objętości). Do obliczeń i porównań należy wykorzystywać wyłącznie rzeczywiste natężenie przepływu (choć będzie ono obliczone na podstawie wskazań rotametrza i funkcji kalibrującej).
1. Ustaw na rotametrze za pomocą zaworu regulacyjnego wartość natężenia przepływu podaną przez prowadzącego.
 2. Zapisz wartość wskazaną przez rotametrz.
 3. Zamknij zawór przesuwny (2 na Rysunku 2) i wlej do zbiornika pomiarowego 10 l wody
 - Pomiar objętości mniejszych od 10 l za pomocą tego układu jest niedokładny.
 4. Zmierz „rzeczywistą” wartość objętościowego natężenia przepływu: za pomocą stopera zmierz czas potrzebny do napełnienia zbiornika pomiarowego od 10 l do 20 l.
 - Wykonaj procedurę dla 6 różnych wartości natężenia przepływu na skali rotametrza (podane przez prowadzącego)
 - Kontroluj, czy przy wysokich wartościach natężenia przepływu na skali rotametrza poziom wody w manometrze nie jest zbyt wysoki / zbyt niski; jeżeli zauważysz, że nie da się wykonać kolejnego pomiaru, bo dalsze zwiększenie natężenia przepływu spowoduje przelanie się wody w manometrze, to nie wykonuj tego pomiaru!

5.3 Pomiar natężenia przepływu w kryzie oraz zwężce Venturiego

1. Ustaw na rotametrze za pomocą zaworu regulacyjnego wartość objętościowego natężenia przepływu równą 150 l / h (na skali rotametrza).
2. Zapisz wartość objętościowego natężenia przepływu (odczytaną z rotametrza).
 - Pamiętaj, aby przy opracowaniu wyników przeliczyć ją na „rzeczywistą” wartość wykorzystując wyniki uzyskane z procedury kalibracji.

3. Zapisz wysokość słupa wody w poszczególnych rurkach manometru.
4. Zwiększaj objętościowe natężenie przepływu o 50 l / h (na skali rotametru).
5. Zakończ pomiary, gdy zauważysz, że przy kolejnej zmianie natężenia przepływu woda w manometrze może się przelać.
6. Powtórz punkty 2 i 3, tym razem zmniejszając objętościowe natężenie przepływu o 50 l / h (na skali rotametru).
7. Zakończ pomiary

5.4 Zakończenie pracy

- Wyłącz pompę, otwórz zawór regulacyjny, przelewowy i wentylacyjny.
- Jeżeli przewody pomiarowe były podłączone przed rozpoczęciem ćwiczenia, nie odpinaj ich.
- Posprzątaj miejsce pracy i najbliższe okolice.

6. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno być przygotowane zgodnie z zaprezentowanym na zajęciach organizacyjnym wzorem. W sprawozdaniu należy umieścić przede wszystkim:

- 1) Wyniki kalibracji rotametru
 - Oblicz objętościowe natężenie przepływu w oparciu o zmierzony czas napełniania się zbiornika.
 - Zaprezentuj wyniki na wykresie: na osi odciętych zaznacz natężenie przepływu odczytane na rotametrze, a na osi rzędnych obliczone w punkcie wyżej.
 - Wyznacz za pomocą wykresu funkcję kalibrującą, tzn. pozwalającą przeliczyć wartość wskazaną przez rotometr na „rzeczywiste” natężenie przepływu.
- 2) Wyniki pomiarów natężenia przepływu za pomocą dyszy i zwężki Venturiego
 - Oblicz uzyskaną różnicę ciśnienia dla każdego zmierzonego przypadku (dla dyszy różnica między 1 i 2 rurką manometryczną, dla zwężki Venturiego różnica pomiędzy 3 a 5 rurką manometryczną).
 - Przedstaw na wykresie zależność pomiędzy różnicą ciśnienia Δp a natężeniem przepływu.
 - Wyznacz współczynnik przepływu dla obu elementów.
 - Oblicz natężenie objętościowe przepływu na podstawie wyników pomiarów wykonanych oboma elementami.
 - Oblicz współczynnik korekcyjny dla obu elementów pomiarowych i porównaj z wartościami podanymi w instrukcji.
 - Wykorzystaj współczynniki korekcyjny podane w instrukcji do obliczenia natężenia przepływu.
- 3) Porównaj wyniki uzyskane za pomocą wszystkich metod.

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

- Jakie są problemy z wykonywaniem pomiarów na tym stanowisku, na czym one polegają i na co wpływają?
- Czy można zaobserwować w wynikach jakieś anomalie (czy któreś wyniki znacznie odbiegają od pozostałych)? 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 wykonanie większej ilości pomiarów w ramach jednej serii miałoby sens? Czy należałoby wykonać więcej serii pomiarowych?

- Czy wyznaczone wartości objętościowego natężenia przepływu są spójne pomiędzy różnymi metodami? Czy któraś znacznie odbiega od pozostałych? Czy różnice mieszczą się w niepewnościach pomiarowych?
- Która z badanych metod pomiaru natężenia przepływu wydaje się najbardziej dokładna i dlaczego?
- Gdyby wziąć pod uwagę czynniki, takie jak: dokładność, czas pomiaru, łatwość użytkowania, kto którą metodę pomiaru można zarekomendować? Jakie są jej wady i zalety?

7. Zagadnienia teoretyczne do opanowania:

objętościowy wydatek przepływu i metody jego pomiaru; pomiar ciśnienia manometrem; przepływomierze, zwężki pomiarowe, dysza, zwężka Venturiego; równanie Bernoulliego i równanie ciągłości; kalibracja; wszystkie nieznanne pojęcia z instrukcji

Arkuszy do zapisywania wyników pomiarów – do wydrukowania

Zespół nr	Osoby:
	1.
	2.
	3.
data	

Tab. 1. Kalibracja przepływomierza

Natężenie przepływu (odczyt z rotametry) [l / h]	Zmierzony czas [s]	Objętość wody [l]

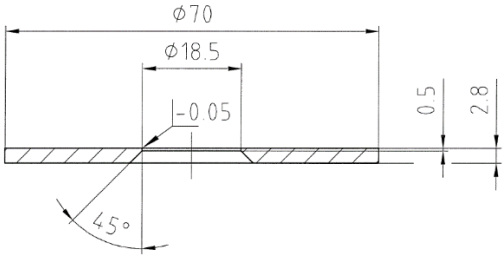
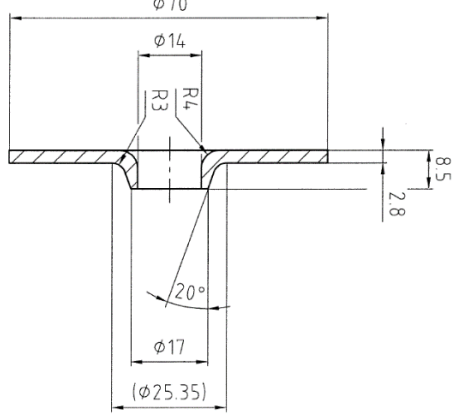
Tab. 2. Pomiar przepływu w dyszy i w zwężce Venturiego

Ciśnienie [mmH ₂ O]						Natężenie przepływu (odczyt z rotametry) [l / h]
Rurka 1	Rurka 2	Rurka 3	Rurka 4	Rurka 5	Rurka 6	

Tab. 3. Pomiar przepływu w dyszy i w zwężce Venturiego

Ciśnienie [mmH ₂ O]						Natężenie przepływu (odczyt z rotametry) [l / h]
Rurka 1	Rurka 2	Rurka 3	Rurka 4	Rurka 5	Rurka 6	

Przyrządy pomiarowe

Kryza, $K = 293 \frac{L}{\sqrt{h \cdot \text{bar}}}$	Dysza, $K = 231 \frac{L}{\sqrt{h \cdot \text{bar}}}$
	
<p>zwężka Venturiego, $K = 132 \frac{L}{\sqrt{h \cdot \text{bar}}}$</p>	
