

Ćwiczenie 2

Wyznaczanie rozkładu prędkości przy przepływie przez kanał

Sygnatura stanowiska: **HM150.07**

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

Streszczenie

- Ćwiczenie polega na pomiarze ciśnienia **statycznego** (P_s) oraz **dynamicznego** (P_D) w zwężce Venturiego, dla różnych wartości natężenia przepływu (\dot{V}).
- Pozwala to zaobserwować działanie prawa **Bernoulliego**.
- Celem ćwiczenia jest **wyznaczenie rozkładu prędkości** wzdłuż zwężki Venturiego przy pomocy:
 - Ciśnienia statycznego i dynamicznego (z prawa *Bernoulliego*)
 - Równania ciągłości
- Dodatkowo należy wyznaczyć rozkład ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego.

Spis treści

Wstęp	1
Stanowisko pomiarowe	4
Analiza wyników i sprawozdanie	10
Dodatki	14

1. Wstęp

Do pomiaru prędkości samolotu w czasie lotu wykorzystuje się rurkę *Pitota*. Wyznaczenie prędkości za jej pomocą odbywa się poprzez zmierzenie ciśnienia statycznego i dynamicznego, a następnie skorzystaniu z równania *Bernoulliego*. Równanie *Bernoulliego* jest pewnym uproszczeniem wiążącym prędkość, ciśnienie i wysokość odniesienia w przepływach stacjonarnych, nieściśliwych w których nie występują straty tarcia. Równanie to ze względu na swoją prostotę często wykorzystywane jest w przepływach rzeczywistych. Jednakże wiąże się to z pewnymi różnicami, które chcielibyśmy poznać i określić. Przeprowadzając pomiary w kontrolowanym środowisku będziemy mieli szansę o tym się przekonać.

Przepływ w pełni rozwinięty oznacza, że profil prędkości płynu w kanale nie zmienia się wzdłuż jego długości.

Przepływ stacjonarny oznacza, że prędkość płynu w danym miejscu nie zmienia się z czasem.

Płyn nieściśliwy oznacza, że gęstość płynu nie zmienia się pod wpływem ciśnienia. Ciecze uważamy za nieściśliwe, natomiast gazy dla liczby Macha poniżej 0.3 traktuje się jako nieściśliwe.

Cele ogólne:

- Pomiar ciśnienia statycznego i dynamicznego przepływającej wody w sześciu różnych miejscach zwężki *Venturiego*, dla różnych natężeń przepływu.
- Wyliczenie rozkładu prędkości wzdłuż zwężki *Venturiego* na podstawie pomiarów eksperymentalnych i równania *Bernoulliego*.
- Wyznaczenie rozkładu prędkości wzdłuż zwężki *Venturiego* z równania ciągłości i porównanie otrzymanych wyników w celu określenia różnic.
- Wyliczenie wartości ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego wzdłuż zwężki *Venturiego* oraz określenie strat.

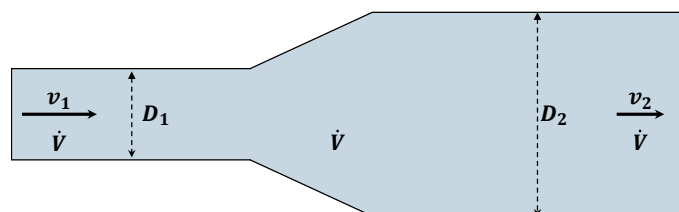
Równanie ciągłości

Równanie ciągłości dla przepływu stacjonarnego i nieściśliwego przez kanał zamknięty zapisać można w następującej formie:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho \dot{V}_1 = \rho \dot{V}_2 \rightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (1)$$

gdzie: \dot{m} jest strumieniem masy kg/s; ρ jest gęstością płynu, kg/m³; \dot{V} jest objętościowym natężeniem przepływu, m³/s; v jest prędkością średnią płynu, m/s; A jest polem przekroju kanału, przez który płynie, m².

Dla płynu nieściśliwego oznacza to, że objętościowe natężenie przepływu musi być stałe, więc jego znajomość pozwala na wyliczenie prędkości średniej w każdym przekroju kanału, dla którego znamy jego pole przekroju (dla rury oznacza, że musimy znać jej średnicę, aby wyliczyć prędkość).



$$v_1 = \frac{4\dot{V}}{\pi D_1^2} \text{ lub } v_1 = v_2 \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

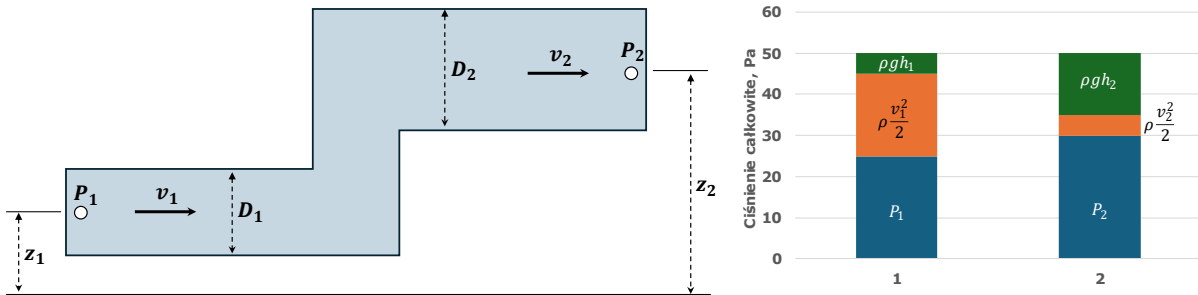
$$v_2 = \frac{4\dot{V}}{\pi D_2^2} \text{ lub } v_2 = v_1 \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

Równanie *Bernoulliego*

Równanie *Bernoulliego* definiujemy następująco:

$$P + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g z = const \quad (2)$$

gdzie: P jest ciśnieniem statycznym płynu, Pa; ρ jest gęstością płynu, kg/m^3 ; v jest prędkością średnią płynu, m/s ; g jest przyspieszeniem grawitacyjnym, $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; z jest wysokością odniesienia na jakiej znajduje się płyn, m.



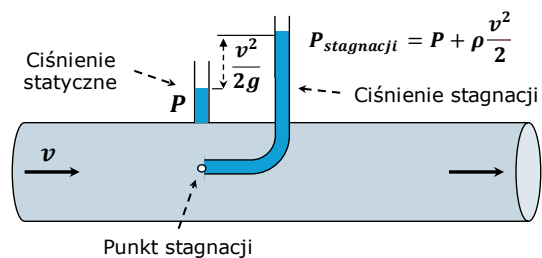
Oznacza ono, że dla przepływu stacjonarnego, nieściśliwego, nielepkiego i bezwirowego, na którym nie ma wykonywanej żadnej dodatkowej pracy (np. pompa) i nie ma transportu ciepła, to ciśnienie całkowite jest stałe. Ciśnienie całkowite jest to suma ciśnienia statycznego, dynamicznego i hydrodynamicznego, zdefiniowanego odpowiednio przez poszczególne człony:

- Człon pierwszy (P) jest to ciśnienie statyczne płynu, czyli jego ciśnienie termodynamiczne – to które można spotkać w tabelach z właściwościami materiałowymi.
- Człon drugi ($\rho \frac{v^2}{2}$) jest to ciśnienie dynamiczne płynu, związane z jego prędkością. To ciśnienie jest „odczuwane”, gdy płyn o jakiejś prędkości zostanie zatrzymany (izentropowo).
- Człon trzeci ($\rho g z$) jest to tzw. ciśnienie „hydrostatyczne”, związane z punktem odniesienia – ze wzrostem punktu odniesienia ten człon będzie wzrastał (np. transport płynu pionową rurą w górę).

W trakcie przepływu poszczególne człony mogą zmieniać swoje wartości, ale ich suma zawsze wynosić będzie tyle samo (w rzeczywistości ciśnienie całkowite będzie spadać przez straty).

Rurka Pitota

Do pomiaru prędkości płynu wykorzystuje się rurkę Pitota, pozwala ona na zmierzenie ciśnienia stagnacji – czyli sumy ciśnienia dynamicznego i statycznego, które reprezentuje ciśnienie odczuwane przy całkowitym zatrzymaniu płynu (izentropowo) – przykładowo podstawiając dłoń pod wypływającą wodę z kranu odczuwamy to ciśnienie.



$$P_{stagnacji} = P + \rho \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

Wykonując dodatkowy pomiar ciśnienia statycznego i przekształcając wzór (3) otrzymujemy równanie na prędkość przepływu:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{stagnacji} - P)}{\rho}} \quad (4)$$

Rurka Pitota przyczepiona do skrzydła samolotu:



Punkt stagnacji jest to miejsce, w którym płyn ulega zatrzymaniu.

Materiały pomocnicze

- **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications** - Yunus Cengel, John Cimbala
 - Gęstość, strona: 39
 - Lepkość, strona: 50
 - Ciśnienie, strona: 76
 - Pomiar ciśnienia, strona: 81
 - równanie *Bernoulliego*, strona: 199
 - Pomiar objętościowego natężenia przepływu i prędkości, strona: 391
 - rurka *Pitota*, strona: 399
 - równanie ciągłości, strona: 438
- **Fluid Mechanics** - Frank M. White
 - Równanie *Bernoulliego*, strona: 174
 - Równanie ciągłości, strona: 220
- http://www.strzelecki.net.pl/media/pliki/hih/skrypt_z_plynow.pdf
- https://www.gunt.de/images/download/hydrodynamics_english.pdf
- https://www.gunt.de/images/download/Steady-flow-of-incompressible-fluids_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/2020/08/Simple-Approximations-of-Fluid-Flows-Lesson2-Handout.pdf>
- [Równanie Bernoulliego](#)
- [rurka Pitota](#)

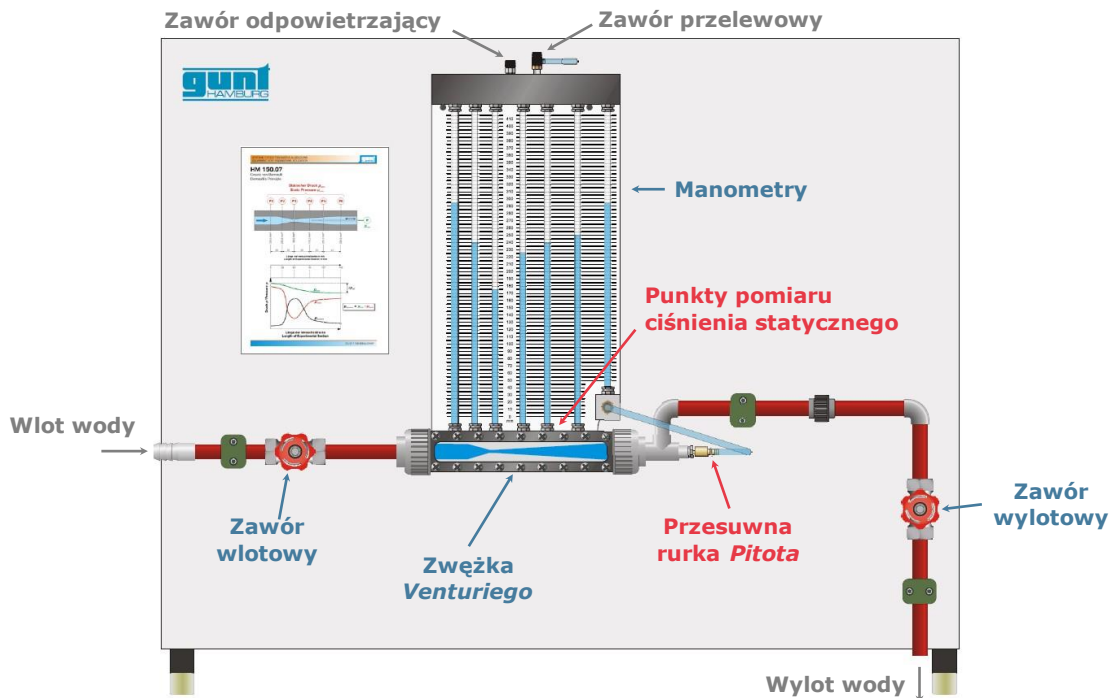
Zagadnienia teoretyczne:

- objętościowy wydatek przepływu (natężenie przepływu)
- przepływomierze
- zwężka *Venturiego*
- rurka *Pitota*
- rurka *Prandtla*
- równanie *Bernoulliego*
- równanie ciągłości

2. Stanowisko pomiarowe

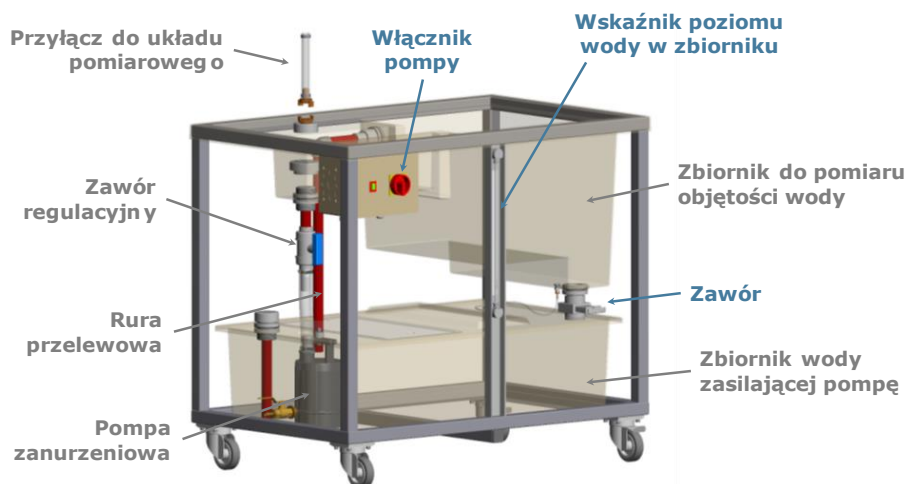
Schemat układu i jego elementy pomiarowe

Układ pomiarowy HM150.7:



Układ pomiarowy znajduje się na wózku (moduł bazowy), który zawiera pompę, przyłączki doprowadzające wodę do układu pomiarowego, zbiornik na wodę wypływającą z układu pomiarowego oraz zbiornik i aparaturę do pomiaru natężenia przepływu.

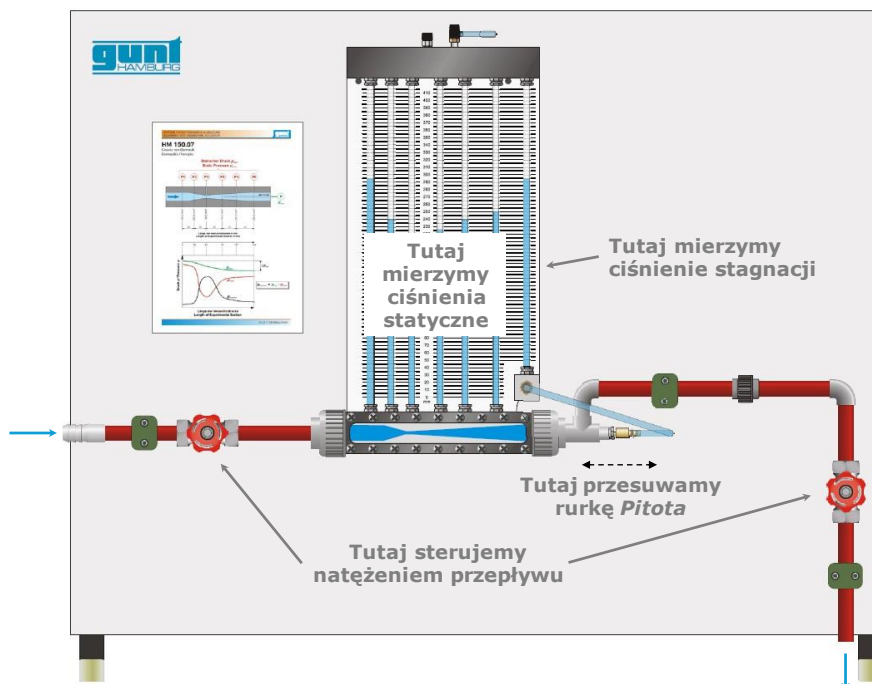
Zwężka Venturiego jest to dysza zbieżno-rozbieżna, zaprojektowana w taki sposób, aby minimalizować straty przepływu.



Co należy zrobić w trakcie zajęć laboratoryjnych?

- Na ćwiczenie składa się:
 - Przygotowanie układu pomiarowego,
 - Wykonanie czterech serii pomiarowych (każda dla innego natężenia przepływu).
- W ramach jednej serii należy odczytać ciśnienie statyczne i ciśnienie stagnacji dla sześciu punktów pomiarowych, oraz zmierzyć objętościowe natężenie przepływu.

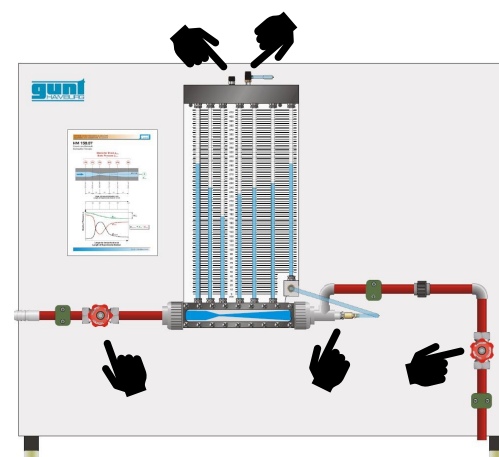
Szczegóły są uzgadniane na początku wykonania ćwiczenia z prowadzącym.



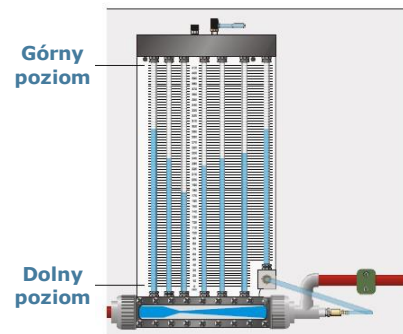
Pomiary

Jak przygotowujemy układ pomiarowy?

1. Upewnij się, że w zbiorniku wody zasilającej pompę, lustro wody jest nie niżej, niż 10 cm od górnej krawędzi zbiornika
2. Upewnij się, że układ pomiarowy podłączony jest do prądu
3. Wsuń rurkę Pitota do układu
4. Otwórz całkowicie zawory wlotowy i wylotowy
5. Zamknij zawór odpowietrzający na manometrze
6. Otwórz zawór przelewowy na manometrze
7. Włącz pompę
8. Przelewaj wodę przez układ, aż do pozbycia się pęcherzy powietrza (przy dużym przepływie w zwężce mogą pojawiać się pęcherze gazu, ale jest to spowodowane innym zjawiskiem (kawitacja) i powinny zaniknąć przy zmniejszeniu natężenia przepływu)



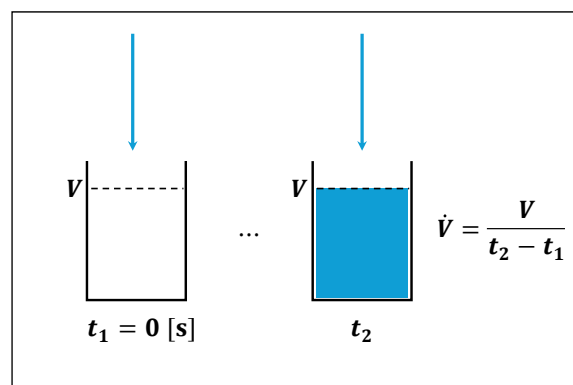
9. Zamykaj zawór wylotowy do momentu, aż rurki manometru będą wypełnione wodą i woda będzie przepływać przez rurkę przelewową
10. Otwórz zawór wylotowy (nie trzeba całkowicie otwierać zaworu wylotowego, wystarczy, żeby z wylotu płynęła woda)
11. Otwórz zawór odpowietrzający
 - a. Z zaworu odpowietrzającego przy dużym zdławieniu wylotu może chlapać woda
 - b. Można bardziej odkręcić zawór wylotowy albo zakręcić trochę zawór wlotowy, by obniżyć ciśnienie
 - c. W przypadku manipulacji zaworem wlotowym z wylotu cały czas musi płynąć woda
12. Zamknij zawór przelewowy
13. Jednocześnie kręć zaworem wlotowym i wylotowym tak, aby poziom wody w rurkach manometru nie przekraczał ani górnego, ani dolnego poziomu (z wylotu cały czas musi płynąć woda)
14. W trakcie ćwiczenia nie wyłączaj pompy, jeżeli pompa zostanie wyłączona, czynności przygotowawcze trzeba powtórzyć
15. Poziom wody w rurkach należy kontrolować w ciągu całego eksperymentu
16. Jeżeli w trakcie ćwiczenia poziom wody w którejkolwiek z rurek spadnie poniżej lub wzrośnie powyżej skali, należy rozpocząć ćwiczenie od początku!



Jak mierzymy natężenie przepływu?

Do pomiaru objętościowego natężenia przepływu \dot{V} wykorzystuje się zbiornik (w module bazowym) oraz stoper. Pomiar polega na odmierzeniu czasu potrzebnego do zapełnienia określonej przez nas objętości wodą. W module bazowym należy zamknąć zawór a następnie za pomocą stopera zmierzyć czas potrzebny do napełnienia zbiornika pomiarowego od 10 l do 20 l (wskaźnik poziomu wody). Po zakończeniu pomiaru otwieramy ten zawór.

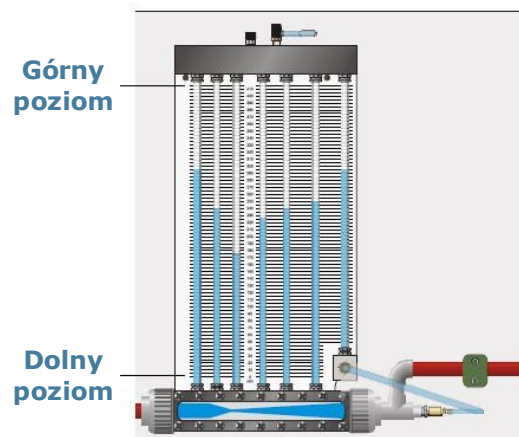
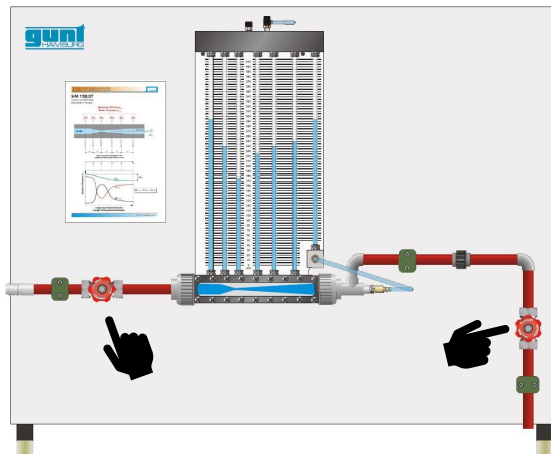
Natężenie przepływu inaczej wydatek objętościowy lub strumień objętościowy \dot{V} – objętość przepływającego płynu na jednostkę czasu, np. litry/h, m³/h, m³/s itd.



Jak zmieniamy natężenie przepływu?

Natężenie przepływu zmieniamy za pomocą zaworów wlotowego i wylotowego, należy pamiętać, żeby przepływ był stabilny – poziom wody w rurkach manometrycznych powinien

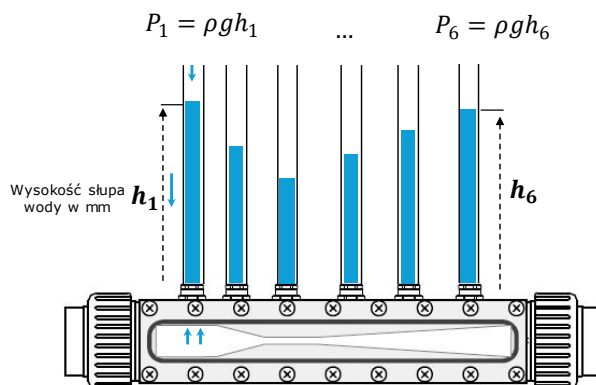
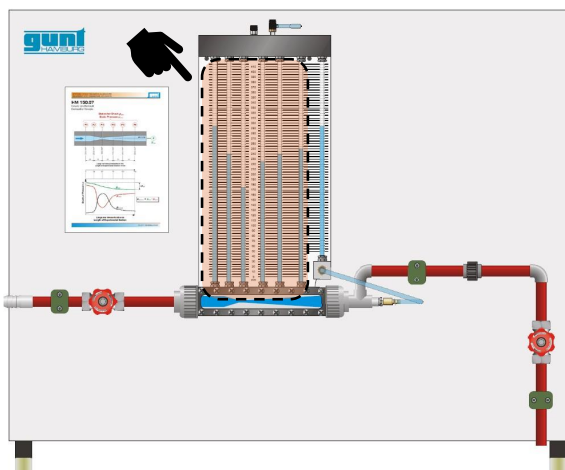
się ustabilizować, nie powinien spadać ani rosnąć. Poziom wody w rurkach manometrycznych nie może przekraczać górnego i dolnego poziomu!



Jak mierzymy ciśnienie statyczne?

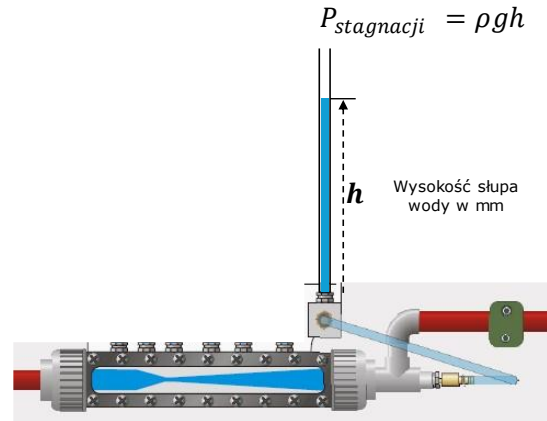
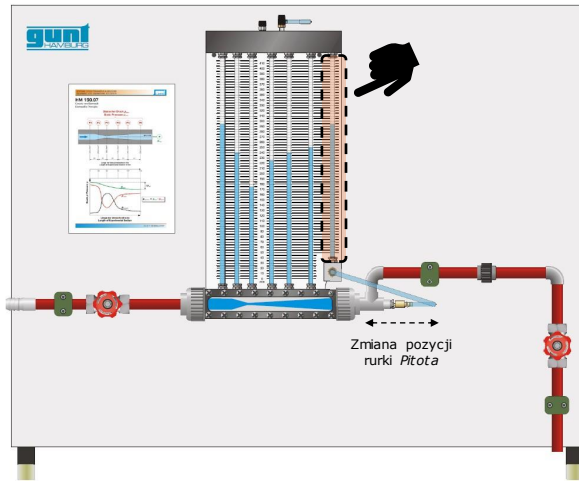
Przepływająca przez rurę woda napiera na wodę znajdującą się w rurkach manometru. Poziom wody w rurce manometrycznej będzie się podnosił, dopóki ciśnienie atmosferyczne plus ciśnienie hydrostatyczne słupa wody w manometrze nie będzie równe ciśnieniu statycznemu wody przepływającej przez rurę.

Pomiar dokonujemy poprzez odczytanie wysokości słupa wody w mm w każdej z sześciu rurek manometrycznych. Do każdej rurki dołączona jest skala w milimetrach. Zakres pomiarowy 0 – 410 mmH₂O. Uwaga, do dalszych obliczeń należy zamienić jednostki.

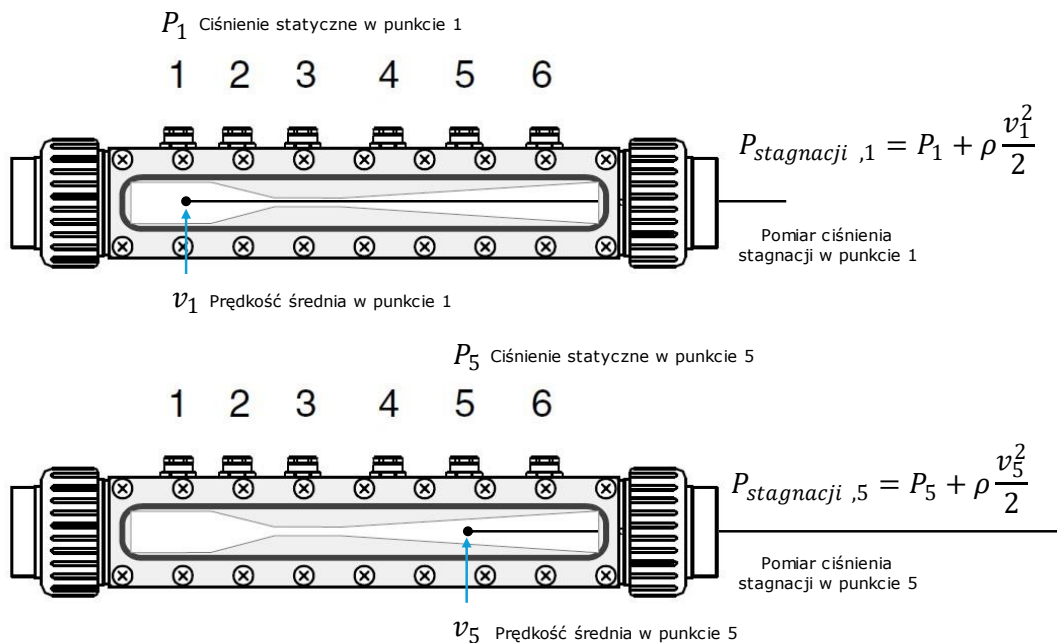


Jak mierzymy ciśnienie stagnacji (całkowite)

Do pomiaru ciśnienia stagnacji (ciśnienia całkowitego) wykorzystuje się ruchomą rurkę Pitota. Rurka ta posiada mały otwór, przez który wpada przepływający płyn i napiera na wodę znajdującą się w przyłączonym do niej manometrze. Wzrost poziomu wody w manometrze jest sumą działania ciśnienia statycznego oraz impetu wody związanej z jej prędkością (ciśnienia dynamicznego). Suma tych dwóch ciśnień nazywana jest ciśnieniem stagnacji lub ciśnieniem całkowitym.



W celu wykonania pomiaru najpierw przesuwamy rurkę Pitota do danego punktu pomiarowego w zwężce Venturiego (końcówka rurki powinna być równo z białą linią), a następnie odczytujemy wysokość słupa wody w mm w ostatniej rurce manometrycznej (połączonej z rurką Pitota). Odczytana wysokość słupa wody reprezentuje wartość ciśnienia stagnacji (całkowitego) w tym miejscu. Po dokonaniu pomiaru przesuwamy rurkę Pitota w następne miejsce i odczytujemy wysokość słupa wody, czynność tę kontynuujemy aż nie odczytamy ciśnienia stagnacji dla wszystkich sześciu punktów pomiarowych. Zakres pomiarowy to 50 – 410 mmH₂O. Trzeba uważać, aby nie wyjąć całkowicie rurki Pitota!



Procedura pomiarowa

Przygotowanie układu

- Upewnij się, że w zbiorniku wody zasilającej pompę, poziom wody jest nie niżej, niż 10 cm od górnej krawędzi zbiornika (pompa musi być zanurzona w wodzie), jeżeli nie jest **zgiłoś prowadzącemu**.
- Sprawdź, czy urządzenie jest połączone do prądu.
- Przygotuj układ pomiarowy (procedura opisana jest powyżej)

Pomiary

- 1 Wsuń rurkę *Pitota* poza badane przekroje zwężki *Venturiego* (nie wyjmuj jej całkowicie ze zwężki).
- 2 Zapisz wysokości słupa wody odpowiadające ciśnieniu statycznemu w kolejnych punktach pomiarowych.
- 3 Wsuń rurkę *Pitota* do pierwszego z przekrojów zaznaczonych na dyszy (końcówka rurki *Pitota* powinna być równo z białą linią). Poczekaj chwilę (ok. 1 min) na stabilizację poziomu wody w rurce manometrycznej, która jest połączona z rurką *Pitota*. Zapisz wysokość słupa wody odpowiadającą ciśnieniu całkowitemu (stagnacji).
- 4 Przesuwaj rurkę *Pitota* do kolejnych przekrojów i powtórz krok 3.
- 5 Wsuń rurkę *Pitota* poza badane przekroje zwężki *Venturiego* (nie wyjmuj jej całkowicie ze zwężki). Zamknij zawór w zbiorniku na wodę do pompy.
- 6 Za pomocą stopera zmierz czas potrzebny do napełnienia zbiornika pomiarowego od 10 l do 20 l (pomiar objętości mniejszych od 10 l za pomocą tego układu jest niedokładny).
- 7 Po zakończeniu pomiaru natężenia przepływu otwórz ten zawór (w zbiorniku na wodę do pompy).
- 8 Wykonaj łącznie cztery serie pomiarowe, dla każdej serii zmień natężenie przepływu (za pomocą zaworów wlotowego i wylotowego). Po zmianie natężenia przepływu wykonuj kroki 1 – 7.
- 9 Po zakończeniu pomiarów wyłącz pompę i otwórz zawory wlotowy, wylotowy, przelewowy i odpowietrzający. Wsuń rurkę *Pitota* do końca. Posprzątaj miejsce pracy i najbliższe okolice.

3. Analiza wyników i sprawozdanie

Co należy zrobić?

1. Wyliczyć wartości ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego w zwężce Venturiego (w sześciu punktach pomiarowych), dla każdego badanego natężenia przepływu (serii pomiarowej).
2. Określić straty ciśnienia w zwężce Venturiego, dla każdego badanego natężenia przepływu.
3. Wyliczyć wartości prędkości wody w sześciu punktach pomiarowych w zwężce Venturiego przy pomocy dwóch metod: z równania ciągłości i z prawa Bernoulliego, dla każdego badanego natężenia przepływu.
4. Porównać prędkości uzyskane za pomocą tych dwóch metod.
5. Zaprezentować analizę oraz wyniki w formie sprawozdania.

Wzory ogólne

Natężenie przepływu

Objęściowe natężenie przepływu (wody przepływającej przez zwężkę Venturiego) określamy mierząc czas potrzebny do wypełnienia określonej objętości zbiornika w module bazowym, a następnie używając wzoru:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (5)$$

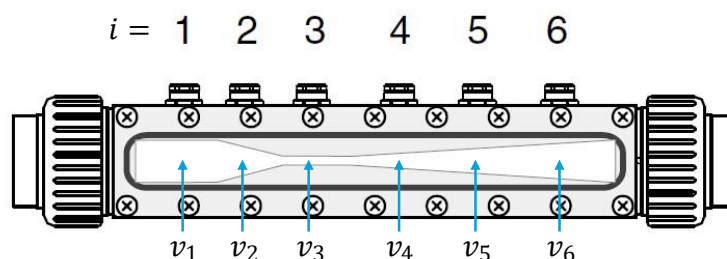
gdzie: V jest objętością w zbiorniku pomiarowym, m^3 ; t jest czasem potrzebnym do jego napełnienia, s. Uwaga na jednostki!

Prędkość z równania ciągłości

Pomiar natężenia przepływu (\dot{V}) umożliwia nam wyliczenie prędkości średniej wody przepływającej przez zwężkę. Natężenie przepływu jest stałe i takie same w całym układzie (woda jest płynem nieściśliwym). Do wyliczenia prędkości pierwszą metodą przekształcamy wzór:

$$\dot{V} = v_i A_i \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (6)$$

gdzie: v jest prędkością średnią w danym punkcie i , m/s; A jest polem przekroju zwężki w danym punkcie i , m^2 .



Do wyznaczenia prędkości w każdym w sześciu punktów w zwężce musimy znać pola przekroju w tych miejscach. Podstawiając do przekształconego równania (6) zmierzone natężenie przepływu oraz odpowiednie pole przekroju otrzymujemy wartość prędkości w tym miejscu. Alternatywnie można także wyznaczyć prędkość w jednym miejscu z

równania (6) a następnie używać równania (1) do wyliczenia prędkości w kolejnych punktach. Pola przekrojów dla sześciu punktów pomiarowych wyglądają następująco:

Punkt pomiarowy	1	2	3	4	5	6
Pole przekroju A [mm]	338.6	233.5	84.6	170.2	255.2	338.6

Ciśnienie statyczne, dynamiczne, całkowite oraz straty ciśnienia

Ciśnienie można podawać jako h w mH₂O lub też jako P w Pa:

$$P = \rho gh \text{ [Pa]} \quad (7)$$

gdzie: ρ jest gęstością płynu w manometrze (woda), kg/m³; g jest przyśpieszeniem ziemskim, 9.81 m/s²; h jest wysokością słupa wody w manometrach, m. Uwaga na jednostki!

Ciśnienie statyczne h_i dla każdego punktu pomiarowego i mierzymy bezpośrednio przy pomocy manometrów. Tak samo ciśnienie całkowite (stagnacji) $h_{stagnacji,i}$ lub $h_{całkowite,i}$ mierzymy bezpośrednio przy pomocy rurki Pitota i podłączonego do niej manometru. Należy pamiętać o jednostkach, pomiar odbywa się w mm słupa wody.

Ciśnienie dynamiczne $h_{dyn,i}$ w każdym punkcie pomiarowym i nie jest mierzone bezpośrednio, ale stanowi różnicę pomiędzy ciśnieniem całkowitym a ciśnieniem statycznym (w tym punkcie i). Przekształcając równanie (2) otrzymujemy równanie (3), które możemy użyć lub zostawiamy jednostki mH₂O i używamy równania:

$$h_{dyn,i} = h_{całkowite,i} - h_i \text{ [mH}_2\text{O]} \quad (8)$$

Strate ciśnienia Δh wyliczamy odejmując od ciśnienie całkowitego na początku, w punkcie ($i = 1$) ciśnienie całkowite na końcu, w punkcie ($i = 6$):

$$\Delta h = h_{całkowite,1} - h_{całkowite,6} \text{ [mH}_2\text{O]} \quad (9)$$

Prędkość z prawa Bernoulliego

Do wyznaczenia prędkości drugą metodą w każdym z sześciu punktów pomiarowych i wykorzystujemy równanie (4) bezpośrednio, lub po przekształceniu:

$$v_{B,i} = \sqrt{2gh_{dyn,i}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (10)$$

Dla każdego punktu i w zwężce podstawiamy wyliczone wcześniej jego ciśnienie dynamiczne $h_{dyn,i}$, uwaga na jednostki.

Niepewności pomiarowe

W trakcie przeprowadzania eksperymentu mierzymy bezpośrednio:

- czas potrzebny do napełnienia zbiornika pomiarowego t ,
- objętość wody w zbiorniku pomiarowym V ,
- ciśnienie statyczne h_i oraz ciśnienie stagnacji (całkowite) $h_{stagnacji,i}$ w każdym z sześciu punktów pomiarowych i .

Związane z nimi niepewności pomiarowe to odpowiednio: $u(t)$, $u(V)$, $u(h)$, $u(h_{stagnacji})$. 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:

- objętościowe natężenie przepływu \dot{V} ,
- prędkość v_i i $v_{B,i}$ (uwaga, niepewność prędkości będzie liczona dwa razy – bo jest wyznaczana dwoma metodami, raz z równania ciągłości, a raz z prawa *Bernoulliego*),
- ciśnienie dynamiczne $h_{dyn,i}$,
- spadek ciśnienia Δh

nie są mierzone bezpośrednio – tylko pośrednio, wynikają z wcześniej wspomnianych parametrów t , V , h_i , $h_{stagnacji,i}$. Nie jesteśmy w stanie określić tych wartości (niepewności) bezpośrednio, bo ich nie mierzymy. Natomiast musimy je znać i w tym celu wykorzystamy prawo przenoszenia niepewności. Po ich wyliczeniu ($u(\dot{V})$, $u(v_i)$, $u(v_{B,i})$, $u(h_{dyn,i})$, $u(\Delta h)$) 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 dla każdej serii pomiarowej:
 - obliczone prędkości wody w sześciu punktach za pomocą dwóch metod: z równania ciągłości oraz z prawa *Bernoulliego*
 - analizę i komentarz do tych wyników (porównanie wyników między tymi dwoma metodami),
 - ciśnienie statyczne, dynamiczne i całkowite wzdłuż zwężki,
 - stratę ciśnienia.
- 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 prędkości i ciśnień 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 rozkładu prędkości wody wzdłuż zwężki dla dwóch analizowanych metod

Wykres ten pokaże, jak różnią się wartości prędkości wzdłuż zwężki wyliczone dwoma metodami. Dodatkowo zobaczymy, jak prezentują się niepewności pomiarowe. Na rysunku należy przedstawić wartości prędkości wyliczone z wzoru (6) i (10), na osi x powinny się znajdować numery punktów pomiarowych dla których te prędkości zostały wyliczone. Wykres w formie punktów, należy do każdego dodać słupki błędów – z analizy niepewności. Dla każdej serii pomiarowej przygotowujemy osobny wykres.

- Wykresy rozkładu ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego wody wzdłuż zwężki.

Wykres ten pokaże, jak zmienia się ciśnienie statyczne, dynamiczne i całkowite wzdłuż zwężki i zobrazuje działanie prawa *Bernoulliego*. Na jednym wykresie należy przedstawić wszystkie trzy ciśnienia, na osi x powinny się znajdować numery punktów pomiarowych dla których te ciśnienia zostały wyliczone/zmierzone.

Wykres w formie punktów, należy do każdego dodać słupki błędów – z analizy niepewności. Dla każdej serii pomiarowej przygotowujemy osobny wykres.

Co powinna zawierać analiza wyników i dyskusja?

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

- Jak wygląda rozkład prędkości w zwężce wyliczony za pomocą tych dwóch metod? Czy wartości te odpowiadają sobie? Jakie są różnice procentowe? Czy mieszczą się w niepewnościach pomiarowych? Która z tych dwóch metod wydaje się bardziej godna zaufania? Dlaczego?
- Jak zmieniają się ciśnienie statyczne i dynamiczne wzdłuż zwężki? Czy ciśnienie całkowite jest stałe? Jeżeli nie, to dlaczego? Czy zmiany prędkości i ciśnień wzdłuż zwężki opowiadają sobie (czy można te zmiany wytłumaczyć prawem *Bernoulliego*)?
- W którym miejscu występuje największa prędkość, i dlaczego tam? Jakie w tym miejscu są wartości ciśnień?
- Czy można zaobserwować straty ciśnienia w przepływie? Jeżeli tak, to ile one wynoszą i jak się one mają do stosowania prawa *Bernoulliego*? Jak zmieniają się straty wraz ze zmianą natężenia przepływu?
- Czy można zaobserwować w wynikach jakies anomalie (czy któreś wyniki/serie pomiarowe znacznie odbiegają od pozostałych)? Jak 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?
- Biorąc pod uwagę całą analizę, czy można zaufać i wykorzystać prezentowane wyniki? Dlaczego i co na to wskazuje? Która z obydwu metod wydaje się lepsza? Czy możemy ufać pomiarom prędkości przy pomocy rurki *Pitota*?

Podsumowanie, uwagi końcowe i porady

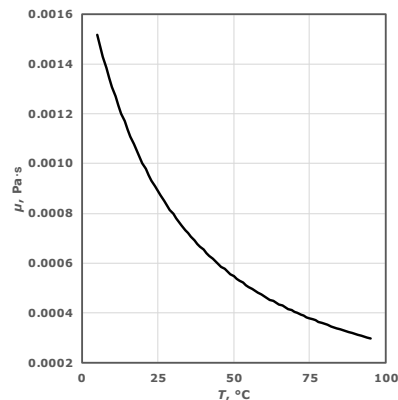
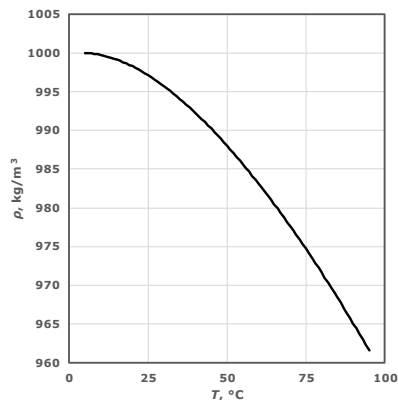
- Dane najlepiej wprowadzić do arkusza kalkulacyjnego (np. *Excel*)
- Od razu zamienić jednostki i na nie uważać
- Kroki:
 - wyliczyć ciśnienie dynamiczne
 - wyliczyć prędkości z obu metod
 - wyliczyć spadki ciśnienia
 - wyliczyć niepewności pomiarowe
 - porównać wyniki

4. Dodatki

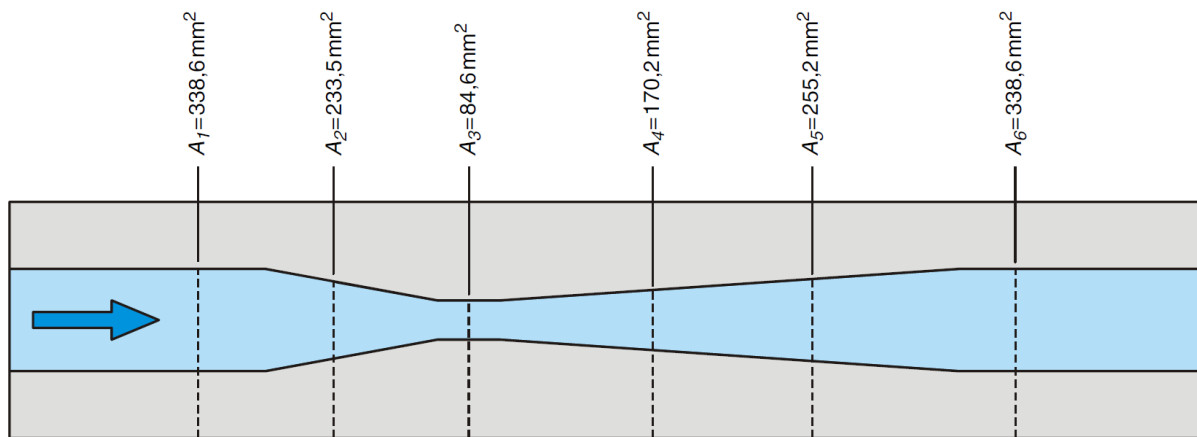
Dane materiałowe dla wody

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.



Zwężka Venturiego



Karta pomiarowa

Zespół:

Data:

I seria pomiarowa			
	Ciśnienie statyczne [mmH ₂ O]	Ciśnienie stagnacji (całkowite) [mmH ₂ O]	Pomiar natężenia przepływu (napełnianie zbiornika)
Punkt pomiarowy 1			Objętość: Czas:
Punkt pomiarowy 2			
Punkt pomiarowy 3			
Punkt pomiarowy 4			
Punkt pomiarowy 5			
Punkt pomiarowy 6			
II seria pomiarowa			
	Ciśnienie statyczne [mmH ₂ O]	Ciśnienie stagnacji (całkowite) [mmH ₂ O]	Pomiar natężenia przepływu (napełnianie zbiornika)
Punkt pomiarowy 1			Objętość: Czas:
Punkt pomiarowy 2			
Punkt pomiarowy 3			
Punkt pomiarowy 4			
Punkt pomiarowy 5			
Punkt pomiarowy 6			
III seria pomiarowa			
	Ciśnienie statyczne [mmH ₂ O]	Ciśnienie stagnacji (całkowite) [mmH ₂ O]	Pomiar natężenia przepływu (napełnianie zbiornika)
Punkt pomiarowy 1			Objętość: Czas:
Punkt pomiarowy 2			
Punkt pomiarowy 3			
Punkt pomiarowy 4			
Punkt pomiarowy 5			
Punkt pomiarowy 6			
IV seria pomiarowa			
	Ciśnienie statyczne [mmH ₂ O]	Ciśnienie stagnacji (całkowite) [mmH ₂ O]	Pomiar natężenia przepływu (napełnianie zbiornika)
Punkt pomiarowy 1			Objętość: Czas:
Punkt pomiarowy 2			
Punkt pomiarowy 3			
Punkt pomiarowy 4			
Punkt pomiarowy 5			
Punkt pomiarowy 6			