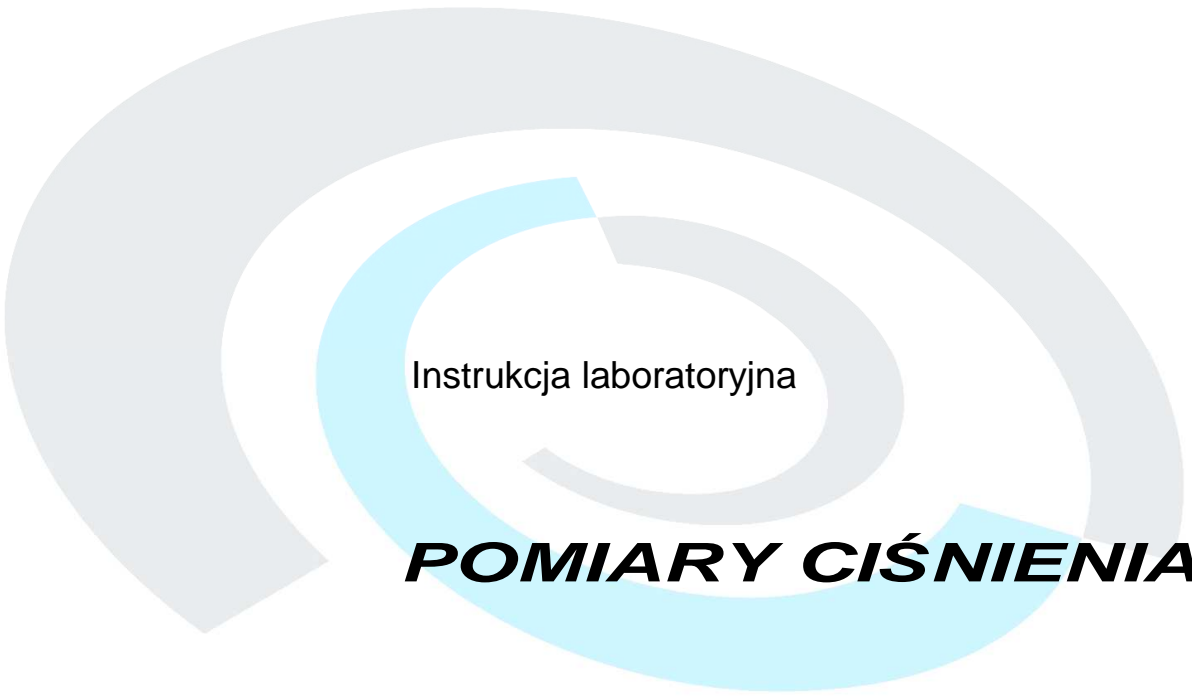


Politechnika Lubelska

Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów

i Napędów Lotniczych



Instrukcja laboratoryjna

POMIARY CIŚNIENIA

Pomiary ciśnienia

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodyką pomiarów ciśnienia statycznego i całkowitego płynów za pomocą różnych manometrów oraz oznaczenie ciśnienia statycznego i dynamicznego strugi przepływającego powietrza.

II. Podstawy teoretyczne

1. Pojęcia podstawowe

Ciśnienie p definiuje się jako granicę stosunku siły normalnej do powierzchni do pola tej powierzchni, gdy wartość pola powierzchni dąży do zera:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_1}{\Delta A} = \left(\frac{\partial F_1}{\partial A} \right) \quad (1)$$

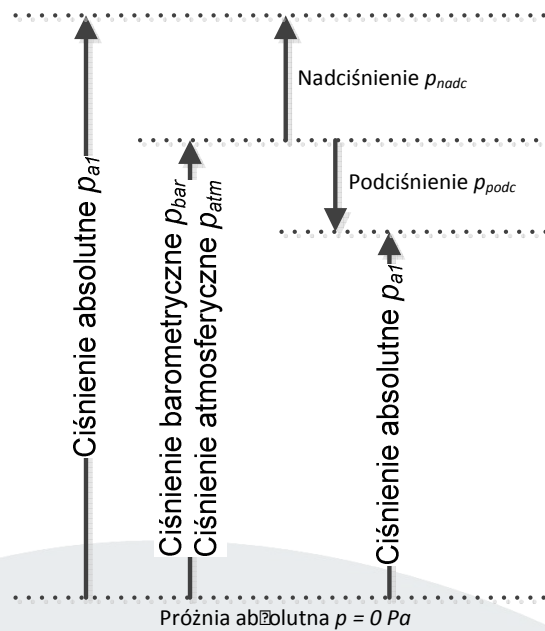
gdzie:

F_n - składowa siły prostopadła do powierzchni,
 A - pole powierzchni.

Gdy siła F_n rozłożona jest równomiernie na powierzchni (na przykład w płynach) wówczas wartość ciśnienia możemy określić wzorem:

$$p = \frac{F_n}{A} \quad (2)$$

Ciśnienie mierzone w porównaniu z próżnią absolutną nosi, nazwę ciśnienia absolutnego (bezwzględnego), przy czym ciśnienie absolutne atmosfery przyjęto nazywać ciśnieniem barometrycznym p_b . Rodzaje ciśnień przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Techniczna skala ciśnień

Gdy rozpatrzy się ciśnienie płynu znajdującego się w ruchu ustalonym, to wówczas ciśnienie całkowite p_c w dowolnym punkcie jest sumą ciśnienia płynu nieruchomego p_s w tym punkcie (ciśnienia statycznego) oraz ciśnienia prędkości p_d (ciśnienia dynamicznego):

$$p_c = p_s + p_d \quad (3)$$

ciśnienie całkowite = ciśnienie statyczne + ciśnienie dynamiczne

gdzie:

$$p_d = \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

v – prędkość strumienia

ρ – gęstość strumienia

Ciśnienie statyczne można interpretować jako ciśnienie, które pokazałby przyrząd pomiarowy poruszający się z prędkością strumienia i w jego kierunku, zaś ciśnienie dynamiczne to przyrost ciśnienia na płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przepływu strumienia, wyhamowując całkowicie ten przepływ.

Znając ciśnienie dynamiczne (różnicę pomiędzy ciśnieniem całkowitym a statycznym) można wyznaczyć prędkość przepływu. W samolotach używa się rurki Prandtla. Jest to przyrząd do pomiaru prędkości przepływu płynu poprzez pomiar ciśnienia w przepływającym płynie (cieczy oraz gazów). Składa się on z dwóch osadzonych w sobie rurek, z czego pierwsza wewnętrzna służy do badania ciśnienia całkowitego płynu, natomiast zewnętrzna do badania ciśnienia statycznego.



Rys. 2. Schemat rurki Prandtla

2. Jednostki ciśnienia

W układzie SI jednostką podstawową jest $\left[\frac{N}{m^2}\right]$, zwany Pascalem (Pa). Zgodnie z definicją 1 Pa jest to ciśnienie, które wywiera siła 1 N działająca równomiernie na powierzchnię o polu 1 m². Ponieważ Pascal jest jednostką bardzo małą w praktyce używane są jednostki wielokrotnie większe:

- 1 kPa = 10³ Pa,
- 1 MPa = 10⁶ Pa.

Oprócz jednostek wyżej wymienionych stosowane są także jednostki niespójne, tzw. poza układowe:

- 1 bar = 10⁵ Pa,
- 1 Tor = 1 mmHg = 133,322 Pa – wysokość słupa rtęci
- 1 mm H₂O = 9,80665 Pa – wysokość słupa wody
- 1 atm = 101325 Pa,
- 1 kG/cm² = at = 98066,5 Pa

3. Przyrządy do pomiaru ciśnienia

Przyrządy do pomiaru ciśnienia można klasyfikować według różnych kryteriów. Ze względu na zasadę działania można je podzielić na cieczowe, sprężyste i parametryczne.

W zależności od przeznaczenia rozróżniamy:

- manometry - do pomiaru nadciśnienia,
- wakuometry - do pomiaru podciśnienia,

- manowakuometry - do pomiaru nadciśnienia i podciśnienia,
- ciągomierze - do pomiaru małych podciśnień,
- mikromanometry - do pomiaru małych wartości nadciśnienia lub podciśnienia,
- manometry różnicowe - do pomiaru różnicy ciśnień,
- barometry - do pomiaru ciśnienia barometrycznego.

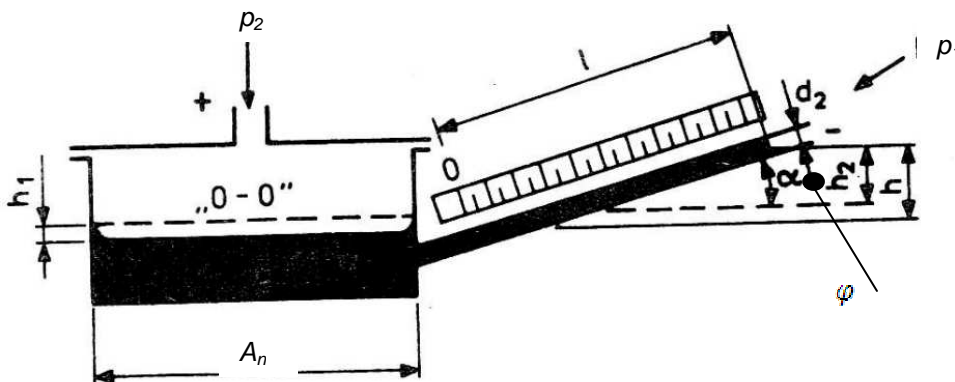
Ze względu na przeznaczenie przyrządów do pomiaru ciśnienia można dokonać również innej klasyfikacji. Mianowicie w grupie manometrów możemy wyróżnić:

- manometry techniczne,
- manometry kontrolne,
- manometry laboratoryjne,
- manometry wzorcowe.

3.1. Manometry cieczowe

Zasada pomiaru polega na samoczynnym ustaleniu się równowagi stałej między ciśnieniem mierzonym, a ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy manometrycznej w manometrze stanowiącym naczynia połączone. Do tego typu manometrów należą: U-rurka (manometr cieczowy dwuramienny manometr jednoramienny, manometry z rurką pochyłą i manometr pierścieniowy.

W pomiarach laboratoryjnych często stosowane są manometry z rurką pochyłą, w których nie dokonuje się pomiaru różnicy poziomów cieczy w naczyniach połączonych, lecz mierzy się długość słupka cieczy w pochyłym ramieniu manometru. Taki sposób pozwala zwiększyć dokładność pomiaru szczególnie w przypadku niewielkich ciśnień. Ideowy schemat takiego manometru pokazuje rysunek 2.



Rys. 3. Manometr cieczowy z rurką pochyłą

Zgodnie z prawem Pascala ciśnienie możemy określić wg wzoru:

$$p_2 - p_1 = \rho_m \cdot g \cdot h \quad (5)$$

gdzie:

- ρ_m - gęstość cieczy manometrycznej w temperaturze pomiaru,
- g - przyspieszenie ziemskie.

Wartość h wyznaczamy z równania:

$$h = l \left(\frac{A_r}{A_n} + \sin \varphi \right) \quad (6)$$

gdzie:

- A_r - pole przekroju rurki,
- A_n - pole przekroju naczynia,
- l - długość słupa cieczy manometrycznej.

Dla każdego kąta pochylenia rurki podana jest wartość tzw. przełożenia manometru i :

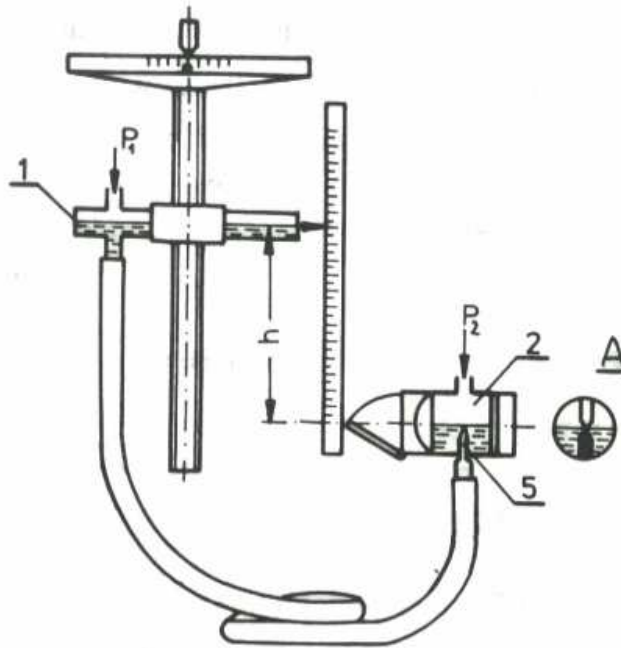
$$i = \left(\frac{A_r}{A_n} + \sin \varphi \right) \quad (7)$$

Wprowadzając tę wielkość do wzoru (5) otrzymamy:

$$\Delta p = l i \rho_m g \quad (8)$$

Przełożenie manometru można zmieniać poprzez zmianę kąta pochylenia rurki. Manometr o zmiennym położeniu nazywa się mikromanometrem Recknagla. Przy stosowaniu tego manometru należy zwrócić szczególną uwagę na dokładne poziomowanie podstawy, bowiem niedokładne poziomowanie może być przyczyną znacznych błędów pomiarowych, których wartość wzrasta przy zmniejszaniu kąta nachylenia ramienia [1].

Do pomiaru bardzo małych ciśnień stosowane są mikromanometry kompensacyjne (np. mikromanometr Askania), w których mierzoną różnicę ciśnień kompensuje się przez bardzo precyzyjne zmiany położenia specjalnego naczynia z cieczą manometryczną. Pomiar ciśnienia jest dokonywany przez odczyt ze śruby mikrometrycznej zmian położenia naczynia.



Rys. 4. Mikromanometr cieczowy Ascania

Do pomiarów rzędu tysięcznych części Pa stosuje się tzw. mikromanometry sprężające. Zasada pomiaru oparta jest na prawie Boyle'a - Mariotte'a. Gaz o znanej objętości początkowej V spręża się do objętości V_0 , przez podniesienie poziomu cieczy manometrycznej o gęstości ρ . Wartość mierzonego ciśnienia oznacza się ze wzoru:

$$\rho = \frac{V_0}{V - V_0} h \rho g \quad (9)$$

Do pomiaru wysokich ciśnień stosuje się manometry tłokowe. Pomiar ciśnienia odbywa się przez ustalenie równowagi tłoka poruszającego się w cylindrze wypełnionym olejem. Stan równowagi osiąga się poprzez przeciwstawienie parciu cieczy na powierzchnię tłoka siły jego ciężaru i nakładanych nań obciążników. Przyrząd jest często stosowany do skalowania innych manometrów jako tzw. grawitacyjny wzorzec ciśnienia [2].

W poprzednio opisywanych manometrach cieczowych pomiar ciśnienia wymagał określenia wartości różnicy poziomów cieczy manometrycznej. Jest to kłopotliwe szczególnie wtedy, gdy wymagany jest ciągły pomiar ciśnienia. Niedogodność ta została wyeliminowana w pływakowych manometrach cieczowych. W tego typu manometrach pływak unoszący się na powierzchni cieczy manometrycznej przekazuje zmiany jej poziomu do członu wskazującego za pośrednictwem układu przekładni. Schemat takiego manometru przedstawia rysunek 3.

Pływakowe manometry cieczowe stosowane są najczęściej jako elementy pomiarowe przepływomierzy zwężkowych [1]

Na dokładność pomiaru manometrami cieczowymi w głównej mierze ma wpływ:

- zmiana temperatury otoczenia,
- włoskowatość,
- zmiana gęstości cieczy manometrycznej,
- poziom zamocowania manometru,
- niedokładność ustawienia pionu rurek manometrycznych oraz dla niektórych typów manometrów złe ustawienie zera.

Jeżeli temperatura otoczenia, przy której dokonano pomiaru ciśnienia wynosi T , temperatura skali cechowania T_s , zaś wskazania manometru należy zredukować do temperatur T_n , to poprawkę na wpływ temperatury można wyznaczyć ze wzoru:

$$h_0 = h [1 + \beta (T - T_s) - \alpha (T - T_n)] \quad (8)$$

gdzie:

- h_0 - wysokość słupa cieczy wyrażona w działkach o wielkości nominalnej, jaką wykazałby manometr, gdyby pomiar odbywał się w temperaturze T_n ,
- h - zmierzona wysokość słupa cieczy,
- β - współczynnik rozszerzalności skali,
- α - współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy manometrycznej.

W praktyce zazwyczaj człon zawierający współczynnik rozszerzalności skali β jest pomijany.

W manometrach cieczowych wskutek włoskowatości następuje dodatkowe podniesienie lub obniżenie poziomu cieczy (w zależności od tego, czy ciecz manometryczna zwilża ścianki naczynia czy też nie). Jeżeli rurka ma stałą średnicę, to poprawkę na włoskowatości wyznacza się z przybliżonego wzoru:

$$h_w = \frac{4 \delta}{\rho g d} \cos \varphi \quad (11)$$

gdzie:

- δ - napięcie powierzchniowe $\left[\frac{N}{m^2} \right]$,
- ρ - gęstość cieczy $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$,
- g - przyspieszenie ziemskie $\left[\frac{m}{s^2} \right]$,
- d - średnica rurki [m],
- φ - kąt brzegowy (między styczną do powierzchni cieczy a tworzącą rurki), zależny od rodzaju cieczy oraz rodzaju i stanu powierzchni rurki.

Wpływ włoskowatości na dokładność pomiaru można ograniczyć poprzez stosowanie odpowiednio dużych średnic wewnętrznych rurek. Dla wody przyjmuje się minimalną średnicę $d = 10$ mm, a dla alkoholu około 4 mm. Jednak ogólnie przyjęto założenie, że przy dokładnych pomiarach nie należy stosować wody jako cieczy manometrycznej.

Przy stosowaniu manometrów typu U-rurki, poprawki na włoskowatość nie uwzględnia się pod warunkiem, że średnica rurek stanowiących oba ramiona jest taka sama, bowiem w tym wypadku kapilarne wzniesienia lub obniżenia poziomu cieczy w obu ramionach kompensują się. Dla manometrów o pionowych, szklanych rurek poprawkę na włoskowatość dla cieczy graniczącej z powietrzem wyznacza się ze wzoru empirycznego:

$$h_w = \frac{A}{d} \quad (12)$$

gdzie:

$A = 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ dla wody,
 $A = -10^{-5} \text{ m}^2$ dla rtęci,
 $A = 10^{-5} \text{ m}^2$ dla alkoholu etylowego,
 d - średnica rurki.

Aby manometr pokazywał ciśnienie panujące w miejscu przyłączenia, musi być umieszczony na odpowiedniej wysokości:

- w przypadku pomiaru nadciśnienia, na poziomie miejsca odbioru musi znaleźć się dolny poziom cieczy manometrycznej,
- w przypadku pomiaru podciśnienia, na poziomie miejsca odbioru musi znaleźć się górny poziom cieczy manometrycznej.

Jeżeli manometr jest umieszczony na innym poziomie niż poziom przyłączenia i pokazuje ciśnienie p_0 , a różnica poziomów wynosi H , to rzeczywiste ciśnienie w punkcie odbioru wynosi:

$$p = p_0 \pm \rho g H \quad (12)$$

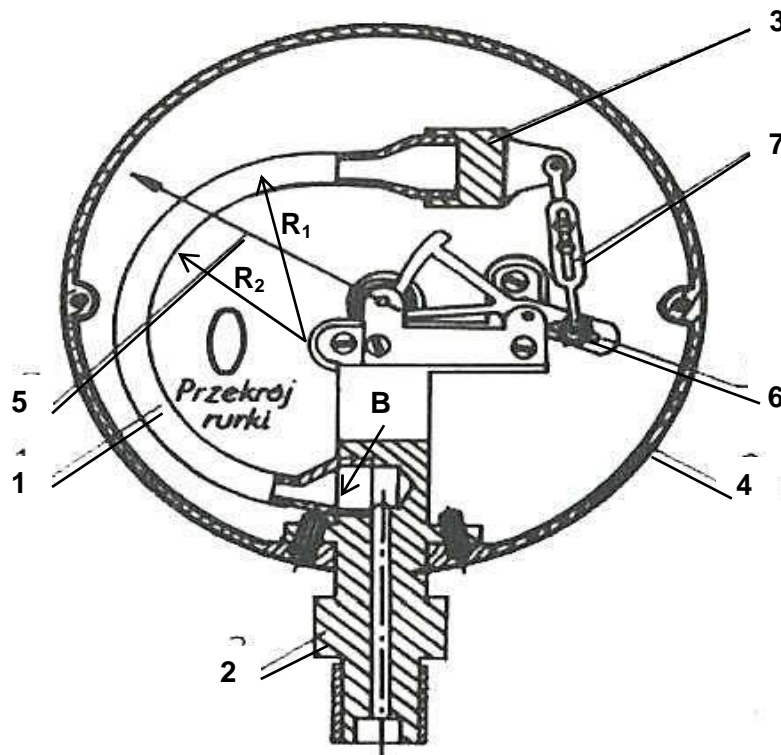
gdzie:

znak „-” - odnosi się do przypadku, gdy manometr umieszczony jest za nisko,
znak „+” - za wysoko,
 ρ - gęstość czynnika wypełniającego rurkę połączeniową [2].

3.2. Manometry sprężyste

Przyrządy tego typu jako zasadniczy element mają zbiornik pomiarowy, który doznaje odkształceń sprężystych i którego ściany podlegają nieznacznym przemieszczeniom. Siłą równoważącą parcie pochodzi od naprężeń sprężystych w

ściankach zbiornika lub elementach wewnętrznych. Do tej grupy manometrów należy manometr z rurką sprężystą. Jego zasadniczym elementem jest metalowa rurka o spłaszczonym przekroju poprzecznym (tzw. rurka Bourdone'a) zwinęta w kształt łuku koła. Jeden koniec rurki jest sztywno zamocowany w króćcu, a drugi jest zamknięty korkiem. Jeżeli wewnątrz rurki panuje ciśnienie wyższe od zewnętrznego, rurka stara się rozwinąć, zwiększając swój promień krzywizny, co powoduje przesunięcie jej swobodnego końca. Do swobodnego końca rurki przymocowana jest wskazówka (poprzez system dźwigni i przekładni), która przemieszczając się na skali pozwala odczytać zmierzone ciśnienie. Gdy wymagana jest duża czułość manometru przy pomiarach wysokich ciśnień, stosuje się rurki grubościennie i kąty zwinęcia większe od 360° , przy czym rurka może mieć postać sprężyny spiralnej lub śrubowej. Takie rozwiązanie jest również stosowane w manometrach do pomiaru różnicy ciśnień oraz ciśnienia absolutnego. Różnicę odchyżeń rurek tworzy się przez zastosowanie odpowiedniego mechanizmu różnicowego lub sztywne łączenie ze sobą rurek tak, że ich wychylenie jest działaniem wypadkowym porównywanych ciśnień [2].



Rys. 5. Manometr z rurką sprężystą (Bourdona)

- R1 - promień zewnętrznej powierzchni rurki sprężystej,
 R2 - promień wewnętrznej powierzchni rurki sprężystej,
 1 - Rurka zgięta, 2. Króciec, 3 - Koniec zgiętej rurki zamkniętej korkiem,
 4 - Obudowa, 5. - Wskazówka, 6., 7. - Elementy mechanizmu

Zasada działania manometrów z rurką sprężystą (rysunek 5) polega na tym, że siła wywierana przez płyn na powierzchnię zewnętrzną rurki jest równa $F_1 = p A_1 = p R_1 \phi$, a siła wywierana na powierzchnię wewnętrzną wynosi

$F_2 = p A_2 = p R_2^2 \varphi$ 0,5 φ „. Ponieważ $R_1 > R_2$, więc $F_1 > F_2$, powstaje moment obrotowy względem punktu „B”. Moment ten stara się „wprostować” rurkę. Warunkiem równowagi jest równość momentu spowodowanego ciśnieniem i momentu sprężystości na skutek odkształcenia rurki. Wielkość odkształcenia jest zależna od ciśnienia i jego zmierzanie jest równoznaczne ze zmierzaniem ciśnienia.

Do tej samej grupy przyrządów należą także manometry z elementami powierzchniowymi odkształcanymi sprężystości. Czujnikiem ciśnienia jest element sprężysty w postaci przepony. Sprężysta przepona zamocowana jest na obwodzie pomiędzy kołnierzem górnej i dolnej części obudowy przyrządu. Sygnał mierzonego ciśnienia jest doprowadzany do jednej z komór utworzonych przez przeponę i obudowę czujnika. Ugięcie środkowej części przepony jest przekazywane poprzez układ dźwigni i przekładni zębatej na wskazówkę, której wychylenie jest miarą ciśnienia. Aby uzyskać liniową zależność pomiędzy odkształceniami a działającym ciśnieniem stosuje się przepony z wytłaczanymi fałami. W celu zwiększenia ugięcia przepony, w manometrach do pomiaru małych ciśnień, przepony łączy się w puszkę.

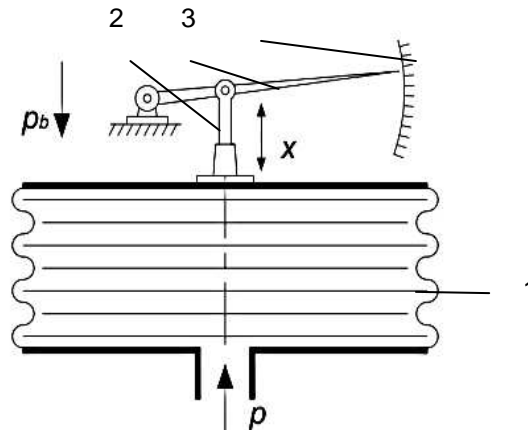
Manometry przeponowe najczęściej stosowane są do pomiarów podciśnień oraz różnic ciśnień. Są szczególnie zalecane do pomiaru ciśnienia płynów agresywnych po wykonaniu dodatkowej przepony z materiału odpornego na korozję i stanowiącą izolację przepony pomiarowej od strony czynnika agresywnego [1].

W manometrach mieszkowych czujnikiem pomiarowym jest cylindryczne naczynie cienkościenne z pierścieniowymi korbami, które pod działaniem ciśnienia odkształca się. Czujnik tego typu jest najczulszym z elementów sprężystych. Schemat manometru mieszkowego pokazano na rysunku 6. Mieszek 1 rozpręża się pod wpływem ciśnienia działającego od wewnątrz i za pośrednictwem układu dźwigniowego 2 przesuwają drążek 3, który rejestruje zmiany ciśnienia na tarczy 4 [1].

Zakres pomiarowy manometrów mieszkowych dobiera się tak, aby odkształcenie mieszka było proporcjonalne do działającego ciśnienia. Podstawową wadą mieszków jest lustro oraz niestabilność charakterystyki. Aby temu przeciwdziałać, wewnątrz mieszka umieszcza się cylindryczną sprężynę usztywniającą.

Manometry mieszkowe wykorzystywane są najczęściej do pomiaru ciśnień rzędu 0,05 - 0,5 MPa i różnic ciśnień oraz jako wakuometry i barometry. Klasa dokładności tych urządzeń wynosi 1, 6 lub 2,5. Do pomiaru ciśnień zmiennych, przy dużych wartościach amplitudy stosowane są specjalne rozwiązania czujników z przeponą lub membraną zamocowaną na obwodzie w szczelnej obudowie. Do rozwiązań powszechnie stosowanych należy manometr piezoelektryczny. Parcie wywołane różnicą ciśnień działających na przeponę jest równoważone naprężeniami w kryształach piezoelektrycznym. Wykorzystano tu zjawisko pojawiania się ładunków elektrycznych na krawędziach pewnych ciał krystalicznych pod wpływem sił mechanicznych działających na kryształ. Powstający ładunek elektryczny jest wprost proporcjonalny do odkształcenia kryształu. Zaletą tego typu przyrządów jest

możliwość miniaturyzacji czujnika oraz łatwa rejestracja przebiegu ciśnienia [2].



Rys. 6. Schemat manometru mieszkowego

Do pomiaru ciśnień zmiennych o wysokiej częstotliwości stosuje się także rozwiązania manometrów z membraną, na którą naniesiono tensometry rezystancyjne lub półprzewodnikowe. Odczyt i rejestracja wskazań tych czujników odbywa się w dwóch układach: potencjometrycznym lub częściej mostkowym [2].

Podstawowymi przyczynami błędów pomiarowych występujących podczas pomiarów ciśnienia za pomocą manometrów z elementami sprężystymi są:

- zmiany temperatury czujnika pomiarowego,
- histereza odkształceń sprężystych,
- tarcie w mechanicznym układzie przenoszenia odkształceń czujnika.

Wartość błędu temperaturowego można wyznaczyć ze wzoru:

$$\delta p_t = k p \Delta t \quad [\text{kPa}] \quad (14)$$

gdzie:

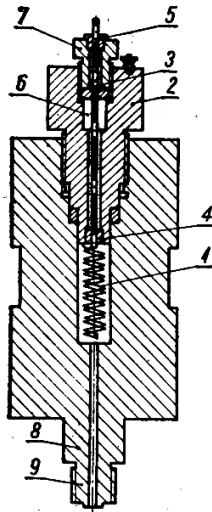
- k - współczynnik zależny od rodzaju elementu sprężystego ,
 p - ciśnienie wskazywane przez manometr [kPa],
 Δt - różnica pomiędzy temperaturą pomiaru a temperaturą wzorcowania manometru [K].

Wartość błędu temperaturowego odejmuje się od wartości ciśnienia wskazywanej przez manometr. Wartość błędu wynikającego ze zjawiska histerezy jak również wartości pozostałych błędów nie można określić na drodze analitycznej. Mogą być one wyznaczone wyłącznie w wyniku wzorcowania manometru.

3.3. Manometry parametryczne

Przyrządy tej grupy w celu określenia ciśnienia mierzą określony parametr czynnika zależny od ciśnienia. Najbardziej popularne są manometry wykorzystujące zmiany wraz z ciśnieniem:

- rezystancji przewodnika,
- przewodności cieplnej,
- lepkości.



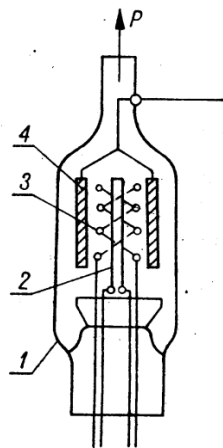
Rys. 7. Oporowy czujnik manometryczny

W manometrach rezystancyjnych wykorzystuje się zjawisko zmiany oporu elektrycznego przewodników, spowodowane działaniem ciśnienia zewnętrznego. Zjawisko to jest wywołane zmianą geometrycznych wymiarów przewodnika oraz zmianą jego przewodności właściwej [1].

W oporowym czujniku manometrycznym (rysunek 7) rezystor 1 stanowiący czujnik manometru wykonany jest zwykle z manganianu, ze względu na jego małą zależność od temperatury. Jeden koniec uzwojenia czujnika jest przylutowany do nakrętki 2, a drugi do miedzianego trzpienia 3. Tulejki ebonitowe 4 i 5 zapewniają osiowe położenie trzpienia w kanale obudowy 6. Uszczelnienie trzpienia stanowią podkładki z fibry lub gumy, dociskane nakrętką 7. Nakrętka 2 wkręcona jest w korpus. Sygnał ciśnienia doprowadzany jest do czujnika za pomocą króćca 9 [1].

Manometry oporowe stosuje się do pomiaru ciśnień bardzo wysokich rzędu setek MPa. Wadą ich jest błąd opóźnienia wskazań w stosunku do mierzonego impulsu i niestabilność wskazań w czasie [2].

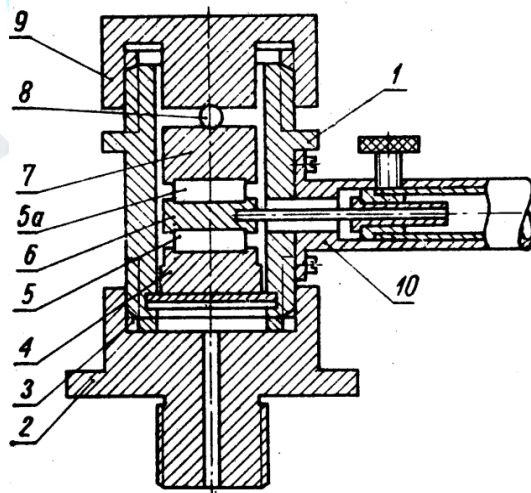
Zależność przewodności cieplnej gazów od gęstości (po ustaleniu innych parametrów od ciśnienia) wykorzystano przy budowie manometrów ciepło-przewodnościowych. W termostatowanej główicy stanowiącej czujnik pomiarowy jest umieszczony grzejnik elektryczny zasilany stabilizowanym prądem (rysunek 8). Im wyższa jest temperatura grzejnika, tym mniejsza przewodność cieplna gazu wypełniającego główicę i niższe ciśnienie. Pomiar ciśnienia sprowadza się do pomiaru rezystancji drucika bądź też napięcia lub natężenia prądu zasilającego grzejnik. Wadą tego typu przyrządów jest konieczność cechowania dla każdego rodzaju gazu. Zakres stosowania zawiera się w granicach $10 \div 10^2$ Pa.



Rys. 8. Ideowy schemat czujnika manometru ciepłoprzewodnościowego
1. Naczynie, 2. Element grzejny, 3. Termopara, 4. Osłony

Do pomiaru ciśnień zmiennych w zakresie od Hz do MHz , przy dużych nieraz wartościach amplitudy stosuje się specjalne rozwiązania czujników np. manometry piezoelektryczne. W czujnikach tych manometrów wykorzystano zjawisko powstawania ładunków elektrycznych na powierzchni niektórych kryształów pod działaniem siły ściskającej działającej w kierunku tzw. osi elektrycznej (zjawisko piezoelektryczne). Właściwości piezoelektryczne mają m.in. kryształy kwarcu, turmalinu, soli Seignette'a i tytanianu baru [1].

Kwarcowy czujnik manometru piezoelektrycznego przedstawia rysunek 10.



Rys. 9. Piezoelektryczny czujnik manometryczny

Poprzez króciec 2 doprowadzany jest sygnał mierzonego ciśnienia. W dolnej części kadłuba na przeponie 3, spoczywa krążek 4 z wgłębieniem na płytce kwarcowej 5, która jest oddzielona krążkiem 6 od drugiej płytki kwarcowej 5a. Płytkę 5a dociskana jest do krążka 6 za pomocą krążka 7, kulki 8 i nakrętki 9. Do krążka 6 przyłutowany jest przewód elektryczny wyprowadzony na zewnątrz poprzez

przepust 10. Płytki kwarcowe są tak ułożone, że na powierzchniach ku sobie skierowanych powstają ładunki jednoimienne. Pomiaru wielkości ładunków elektrycznych dokonuje się przyrządami, które nie powodują elektrycznego obciążenia czujnika (np. lampowe woltomierze prądu stałego współpracujące z oscylografem pętlicowym lub katodowym oraz woltomierze elektrostatyczne) [1].

Zjawisko piezoelektryczne odznacza się brakiem bezwładności, dlatego manometry piezoelektryczne są szczególnie przydatne do pomiaru ciśnień szybkozmiennych. Ich zaletą jest możliwość miniaturyzacji czujnika oraz łatwa rejestracja przebiegu ciśnienia, wadą - trudności z jednoznacznym wycechowaniem [2].

3.4. Przetworniki ciśnienia

Jeżeli mierzone ciśnienie stanowi wielkość wejściową dla układów automatycznej regulacji występuje konieczność zastosowania przetworników ciśnienia. Przetworniki ciśnienia zamieniają impuls ciśnienia na sygnał elektryczny, który może być przekazywany na dowolną odległość, bądź też rejestrowany. Najbardziej znaną firmą produkującą przetworniki wielkości fizycznych jest austriacka firma *Honeywell*. Wykonywane przez ten koncern przetworniki ciśnienia i różnicy ciśnień np. serii *ST3000* charakteryzują się dokładnością $\pm 0,0 : 5\%$ i stabilnością zbliżoną do wymaganej od wzorców. Istnieje ponadto możliwość zdalnego zmieniania zakresu pomiarowego w stosunku 400 : 1. Przetwornik *ST3000* posiada piezorezystancyjny czujnik współpracujący z mikroprocesorem i może być używany do pomiaru ciśnienia różnicowego, nadciśnienia i ciśnienia absolutnego. Mikroprocesor umożliwia zwiększenie dokładności przetwornika zapewniając kompensację wpływu zmian temperatury oraz ciśnienia statycznego. Przetwornik *ST3000* zaprojektowano w taki sposób, aby mógł być stosowany jako bezpośredni zamiennik przetworników analogowych, wykorzystując istniejące okablowanie. Posiada ponadto możliwość prowadzenia zdalnej diagnostyki i wprowadzenia wszystkich parametrów pracy przetwornika. Firma *Honeywell* produkuje także przetworniki różnicy ciśnień typu *MCR* i *CR* przeznaczone do pomiaru różnicy ciśnień gazów nieagresywnych w stosunku do krzemu (elementem przetwarzającym ciśnienie jest element krzemowy). Ciśnienie statyczne mierzonego medium nie może przekraczać $0,1 \div 1$ MPa, w zależności od zakresu pomiarowego różnicy ciśnienia. Do pomiaru ciśnienia absolutnego lub ciśnienia względnego w ciężkich warunkach przemysłowych stosowane są przemysłowe przetworniki ciśnienia z membraną izolującą. Produkowane są w wielu rozwiązaniach, pozwalających optymalizować koszty pomiaru ciśnienia poprzez dobór wersji o stopniu odporności nie większym niż niezbędna w punkcie pomiaru.

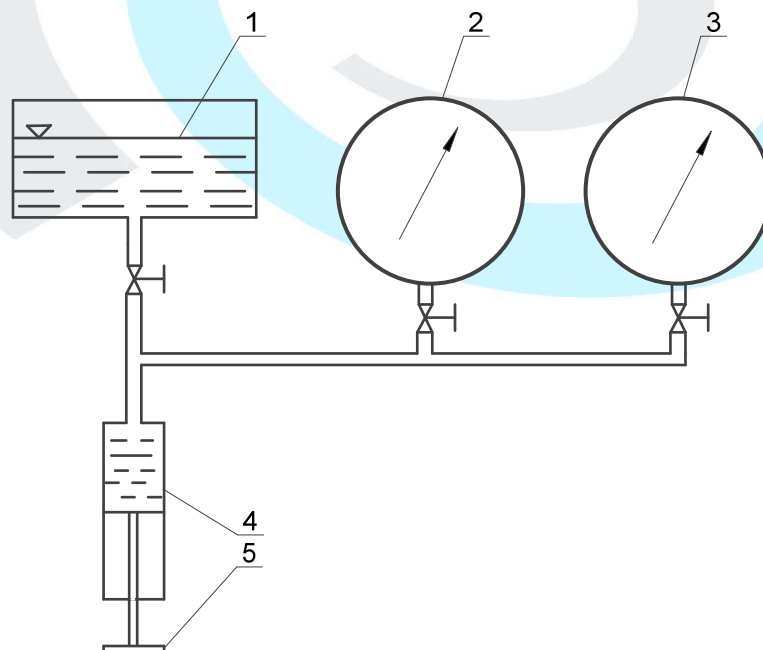
4. Skalowanie przyrządów do pomiaru ciśnienia

Przyrządy do pomiaru ciśnienia skaluje się metodą bezpośrednią, przez porównanie ich wskazań z wzorcami ciśnienia lub metodą pośrednią, porównując ze wskazaniami przyrządu uznanego za wzorcowy i mierzącego ciśnienia z tego samego źródła co miernik badany [2].

Do przeprowadzenia skalowania metodą bezpośrednią wykorzystuje się wzorce ciśnienia:

- cieplne (termiczne), w których poziom ciśnienia jest określany przez ustalenie ściśle określonych temperatur,
- grawitacyjno-cieczowe, które stanowią dokładne manometry cieczowe,
- grawitacyjno-obciążnikowe.

Skalowanie metodą pośrednią przeprowadza się używając prasek powietrzno-olejowych jako źródła ciśnienia mierzonego przyrządem skalowanym i wzorcowym. Prasa składa się ze zbiornika oleju 1 połączonego z cylindrem 4 i manometrami: kontrolnym 2 i sprawdzanym 3. Tłok porusza się w cylindrze za pomocą pokrętła 5. Sprawdzanie manometru rozpoczyna się od wyznaczenia wartości ciśnienia rozruchu, przy którym wskazówka badanego manometru oderwie się od kołka oporowego. Następnie odczytuje się wskazania manometrów dla pięciu wartości ciśnienia w równomiernie rozłożonych punktach przy wzroście i obniżaniu ciśnienia. Błąd wskazań manometru stanowi różnica pomiędzy wskazaniami manometru sprawdzanego i kontrolnego [1].



Rys. 10. Schemat ideowy olejowej prasy manometrycznej

W celu sprawdzenia przyrządów do pomiarów bardzo małych ciśnień konieczne jest dysponowanie ośrodkiem o tzw. wysokiej próżni, a jako przyrządy

wzorcowe wykorzystywane są mikromanometry cieczowe sprężające [2].

Manometr badany nie spełnia stawianych mu wymagań, jeśli różnica wskazań manometru badanego i wzorcowego w dowolnym miejscu skali jest większa od odchyłki wynikającej z klasy dokładności manometru badanego (zarówno dla ciśnień rosnących, jak i malejących):

$$\Delta P_a > \Delta P_{\max}$$

gdzie: $\Delta P_a = P_0 - P_w$ - różnica wskazań manometru badanego i wzorcowego,

P_0 - ciśnienie odczytane z manometru badanego.

P_w - ciśnienie wzorcowe (rzeczywiste),

ΔP_{\max} - błąd charakterystyczny (graniczny) manometru badanego wynikający z klasy dokładności:

$$\Delta P_{\max} = \frac{\text{klasa} \cdot \text{zakres}}{100}$$

4.1. Klasy dokładności

Klasa przyrządu pomiarowego określa wartość błędu maksymalnego, jaki może wystąpić podczas wykonywanego nim pomiaru. Określana jest jako błąd procentowy w stosunku do pełnego zakresu pomiarowego. Zgodnie z Polskimi Normami klasy dokładności urządzeń ustala się wybierając oznaczenie z ciągu liczb w [%]:

- a) 0,010; 0,016; 0,025; 0,04; 0,06; 0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,60; 1,0; 1,6; 2,5;
- b) 0,15; 0,02; 0,05; 0,15; 0,2; 0,5; 1,5; 2,0.

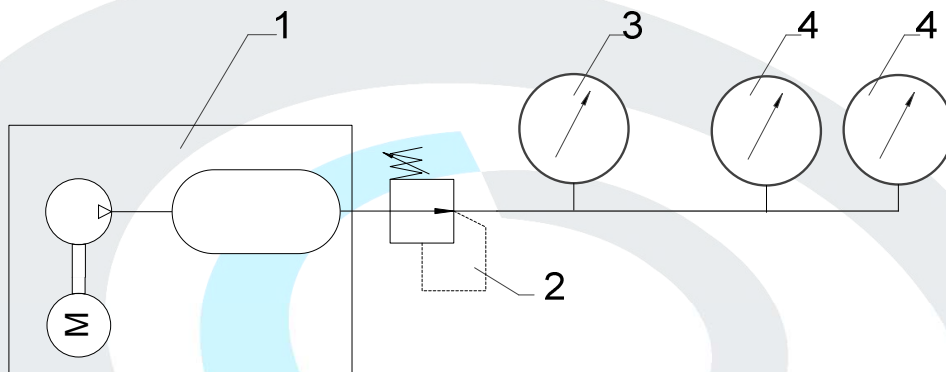
Przyrząd pomiarowy	Klasa dokładności	Zastosowanie
Wskaźniki	2,5 - 5	Zgrubne oszacowane mierzonej wielkości
Miernik techniczny	1 – 1.5	Typowe zastosowania przemysłowe
Miernik laboratoryjny	0,5	
Przyrząd wzorcowy	0,05, 0,1, 0,2	Do skalowania i kalibrowania innych mierników

III. Opis ćwiczenia

Ćwiczenie składa się z dwóch części. Część pierwszą stanowi sprawdzenie manometrów za pomocą prasek sprężarki z regulowanym reduktorem jako źródła ciśnienia mierzonego przyrządem skalowanym i wzorcowym. W części drugiej należy określić ciśnienie statyczne, dynamiczne i całkowite strugi przepływającego powietrza przy użyciu rurki Prandtla.

1. Sprawdzanie manometrów

1.1. Schemat stanowiska pomiarowego

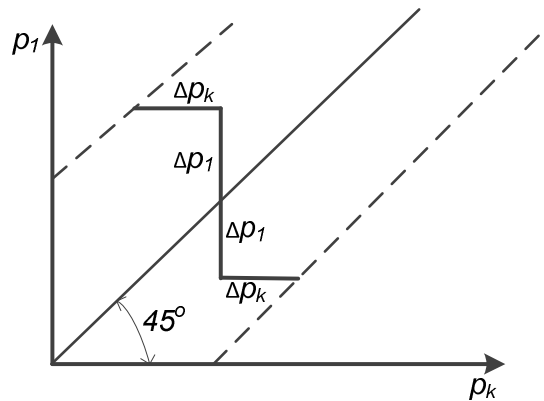


Rys. 11. Schemat stanowiska pomiarowego

1. sprężarka ze zbiornikiem, 2. regulowany reduktor ciśnienia, 3. Manometr wzorcowy, 4. Manometry sprawdzane.

1.2. Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

Sprawdzone będą dwa manometry techniczne. Włączamy sprężarkę, tak by ciśnienie w układzie osiągnęło maksymalną wartość. Następnie kolejno podwyższamy ciśnienie za pomocą pokrętki reduktora i zapisując ciśnienie na manometrze wzorcowym p_k oraz na manometrach sprawdzanych p_1 i p_2 . Następnie za pomocą pokrętki reduktora zmniejszamy kolejno ciśnienie. Sporządzamy wykres $p = f(p_k)$ dla każdego z badanych manometrów.

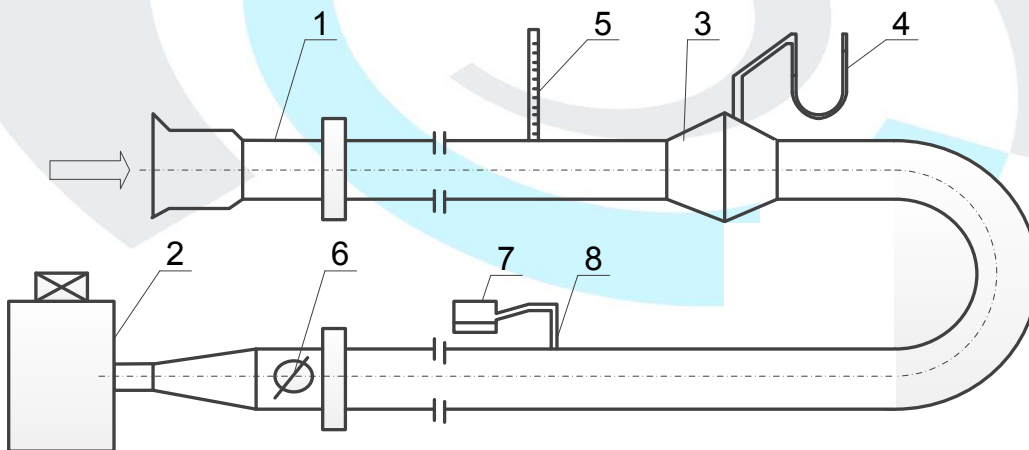


Rys. 12. Wyznaczanie przedziału ufności manometru badanego

Na wykres należy nanieść wyniki pomiarów. Znaleźć równania prostych aproksymujących wyniki pomiarów (metoda najmniejszych kwadratów). Jeżeli proste zawierają się w wyznaczonym przez nas przedziale oznacza to, że manometry mieszczą się w swoich klasach.

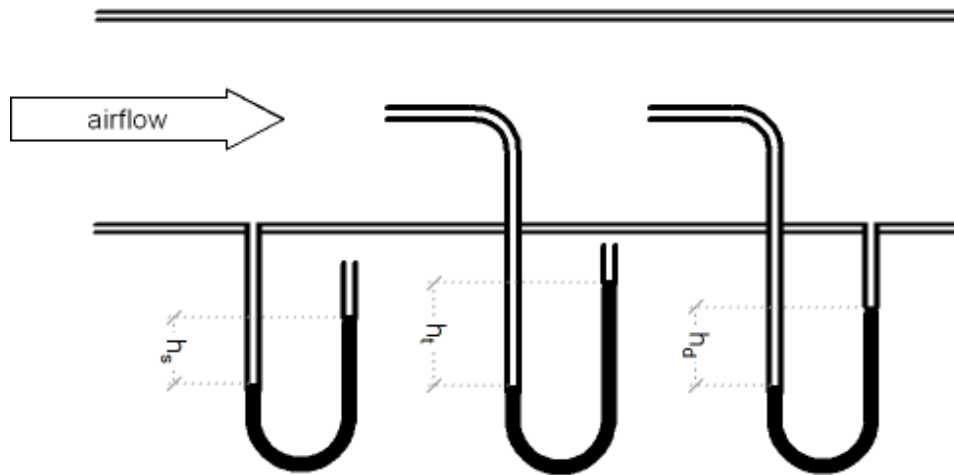
2. Wyznaczanie ciśnienia statycznego i dynamicznego strugi przepływającego powietrza

2.1. Schemat stanowiska pomiarowego i podłączenia manometrów



Rys. 13. Schemat stanowiska pomiarowego

1. Rurociąg ssawny, 2. Wentylator ssący, 3. Dysza ISA, 4. Manometr różnicowy,
5. Termometr, 6. Przesłona dławiąca, 7. Manometr Recknagla. 8. Rurka Prandta.



Rys. 14. Schemat pomiaru ciśnienia statycznego p_s , dynamicznego p_d i całkowitego p_c zdefiniowanego wysokością słupa cieczy h_i .

2.2. Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

Po włączeniu ciągu dokonuje się odczytu długości l słupa cieczy manometrycznej w manometrze Recknagla i przełożenie n_1 . Wyznaczamy wartość ciśnienia dynamicznego ze wzoru:

$$p_d = \rho_c \cdot g \cdot l \cdot n_1$$

gdzie:

ρ_c - gęstość cieczy manometrycznej (czerwona) $871 \text{ kg/m}^3 @ 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Równocześnie odczytuje się różnicę wysokości słupów cieczy manometrycznej w manometrze różnicowym (baterijnym) $l_1 - l_2$, i jego przełożenie n_2 . Manometr różnicowy mierzy różnicę między ciśnieniem statycznym a barometrycznym p_b . Z powyższego równania wyznaczamy p_{st} :

$$p_{st} = p_b - \Delta p$$

gdzie:

$$\Delta p = n \cdot \rho_z \cdot g \cdot (l_1 - l_2)$$

ρ_z - gęstość cieczy manometrycznej (żółta) 1000 kg/m^3

Wartość ciśnienia barometrycznego odczytujemy z barometru mieszkowego.

Następnie wyznacza się ciśnienie całkowite według wzoru:

$$p_c = p_{st} + p_d$$

Uwaga: Alternatywnie można zamiast w/w manometrów (Rectangla i bateryjnego), użyć mikromanometru Ascania i odczytać ciśnienia p_d i Δp korzystając z zależności.

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Zależność gęstości ρ od temperatury dla wody przedstawia tabela 2.

Tab. 1. Zależność gęstości od temperatury wody

t [°C]	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
15	999
16	998,9
17	998,7
18	998,5
19	998,4
20	998,2
21	997,9
22	997,71
23	997,51
24	997,21
25	997,01

3. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać krótki opis przeprowadzonego ćwiczenia, wyznaczenie wartości ciśnienia statycznego, dynamicznego i całkowitego wraz z wykresem oraz sprawdzenie czy sprawdzane manometry mieszczą się w swoich klasach.

Literatura:

- [1] L. Kołodziejczyk, S. Mańkowski, M. Rubik: "Pomiary w inżynierii sanitarnej". Arkady Warszawa 1980.
- [2] M. Miskowski, "Pomiary cieplne i energetyczne", WNT, Warszawa 1981"

Przykładowe zagadnienia:

1. Co to jest ciśnienie: podać jednostkę podstawową.
2. Zdefiniować ciśnienie statyczne, dynamiczne, całkowite.
3. Co to jest rurka Prandtla (rysunek, do czego się stosuje)
4. Wzór na ciśnienie słupa cieczy.

5. Klasyfikacja przyrządów do pomiaru ciśnienia.
6. Przykładowe obliczenia maksymalnego błędu wskazania wynikającego z klasy dokładności.
6. Omówić zasadę działania manometrów cieczowych.
7. Co to jest przełożenie manometru.
8. Omówić zasadę działania manometrów z elementem sprężystym.
9. Podać przykłady manometrów elektrycznych.
10. Omówić cel i sposób wykonania ćwiczenia.

