

Termodynamika techniczna

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Ekologiczne Źródła Energii II rok

Pomiar ciśnienia
Instrukcja do ćwiczenia

1. INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO

1.1 Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przyrządami oraz metodami służącymi do pomiaru zarówno małych ciśnień (do kilku kPa) jak i ciśnień dużych, rzędu kilkunastu MPa. Stąd też ćwiczenie jest podzielone na dwie części, obejmujące te zagadnienia.

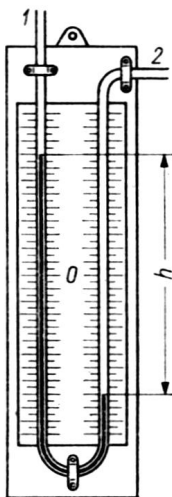
1.2 Stanowisko laboratoryjne i opis przyrządów pomiarowych

Na stanowisku laboratoryjnym znajdują się następujące przyrządy pomiarowe:

- manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka) z wodą,
- manometr cieczowy dwuramienny (U-rurka) z alkoholem,
- manometr cieczowy z rurką pochyłą (manometr Recknagla),
- mikromanometr kompensacyjny,
- manometr z czujnikiem piezoelektrycznym.

Manometr cieczowy dwuramienny

Manometr dwuramienny, zwany również U-rurką, służy do pomiaru nadciśnienia, podciśnienia oraz różnicy ciśnień. Gdy mierzymy nadciśnienie lub podciśnienie jeden z końców rurki przyłączony jest do przestrzeni o mierzonym ciśnieniu p_1 , a drugi króciec połączony jest z atmosferą. Zatem zawsze ciśnienie atmosferyczne jest jednym z porównywanych ciśnień. W przypadku pomiaru różnicy ciśnień oba końce rurki są połączone z przestrzeniami mierzonych ciśnień p_1 i p_2 .



Rys.1. Manometr cieczowy dwuramienny [1]

Wiedząc, że bezwzględny błąd odczytu na podziałce milimetrowej wynosi w granicach $0,25 \div 0,5$ mm, błąd dwóch odczytów, potrzebnych do określenia różnicy ciśnień, będzie miał wartość $0,5 \div 1$ mm. Zatem jeśli chcemy dokonać odczytu z dokładnością nie mniejszą niż 1%, to wysokość słupa cieczy musi wynosić co najmniej $h = 100$ mm. Dla konkretnej różnicy ciśnień, wysokość h będzie zależęć tylko od gęstości cieczy manometrycznej:

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

Dlatego do mierzenia niewysokich ciśnień (różnic ciśnień), w celu zminimalizowania błędu odczytu, powinno używać się cieczy o małej gęstości.

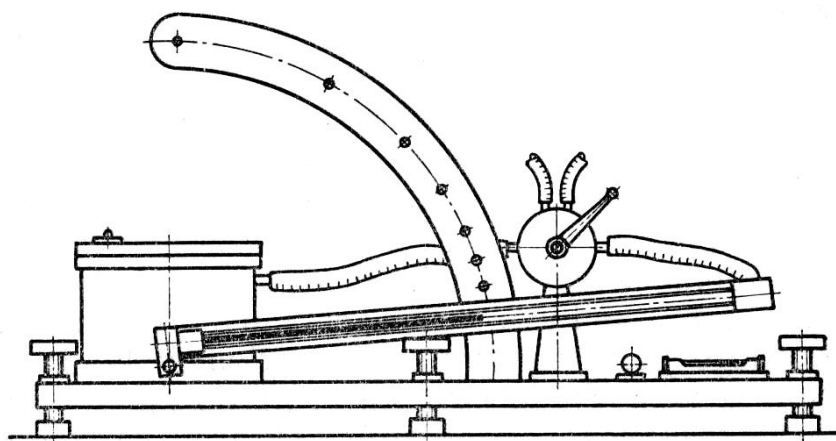
Manometr Recknagla (z rurką pochyłą)

Manometr z rurką pochyłą służy do pomiaru małych ciśnień, których pomiar manometrami o rurkach pionowych, jest obciążony zbyt dużym względnym błędem odczytu. Zwiększenie dokładności pomiaru osiągnięto przez zastosowanie rurki pochylonej o kąt φ od poziomu i pomiar długości słupa cieczy l . Im mniejszy kąt nachylenia rurki, tym większą dokładność odczytu otrzymujemy.

Przy zbyt małych kątach nachylenia φ , menisk staje się niewyraźny, pomimo zastosowania rurki o średnicy wewnętrznej 1,5÷2 mm i cieczy manometrycznej o małej lepkości (np. alkoholu).

Manometry z rurką pochyłą wykonywane są w dwóch wariantach, jako manometr z rurką o stałym kącie nachylenia (manometr Krella) oraz o zmiennym kącie nachylenia (manometr Recknagla).

Ważne jest aby podczas pomiaru manometry te były wypoziomowane. Dlatego wyposaża się je w poziomice. Błąd wynikający z nieodpowiedniego ustawienia przyrządu rośnie wraz ze zmniejszaniem się kąta nachylenia rurki φ . Na rysunku 2 pokazano konstrukcję manometru Recknagla z rurką pochyłą.



Rys.2 Manometr Recknagla [1]

Przy założeniu, że przekrój naczynia z cieczą manometryczną jest wielokrotnie większy od przekroju rurki kapilarnej, można napisać, iż wysokość pionowego słupa cieczy manometrycznej względem poziomu cieczy w zbiorniczku, wynosi:

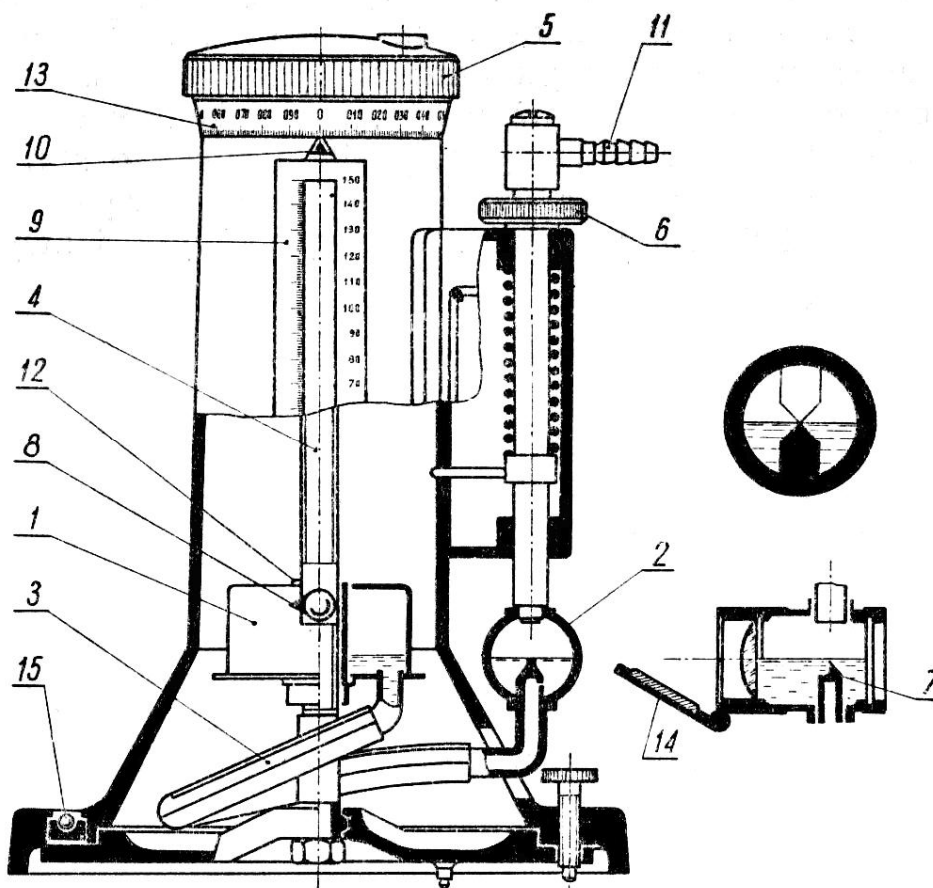
$$h = l \cdot \sin\varphi \quad (2)$$

Manometry o stałym kącie nachylenia skaluje się dla konkretnych cieczy manometrycznych. Dla manometrów o zmiennym kącie nachylenia rurki, skalę wykonuje się dla jednego z ustawień kąta φ . Dla innych ustawień podaje się tzw. przełożenie manometru i , zaznaczone na manometrze dla każdego z ustawień, i wtedy:

$$h = \frac{l}{i} \quad (3)$$

Mikromanometr kompensacyjny

Mikromanometrem kompensacyjnym możemy mierzyć bardzo niskie ciśnienia, przy zachowaniu dużej dokładności pomiaru. Mikromanometry pozwalają na dokonanie pomiaru różnicy ciśnień z dokładnością do $0,01 \div 0,05 \text{ mm H}_2\text{O}$. Szczególną uwagę należy zwrócić na odpowiednio dokładne wypoziomowanie przyrządu. Konstrukcję mikromanometru pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Mikromanometr kompensacyjny [1]

Przed dokonaniem pomiaru ciśnienia przyrząd należy ustawić w pionie według poziomicy 15. Przy odłączonych źródłach ciśnienia należy wyzerować wskazanie początkowe mikromanometru. W tym celu, ustawiamy zerowe wskazanie podziałki 13 znajdującej się na pokrętle 5 śruby mikrometrycznej 4, a wskaźnik 8 ustawiamy na zerze skali zgrubnej 9.

Następnie musimy doprowadzić do tego, aby wierzchołek ostrza 7 znajdował się na tym samym poziomie, co lustro cieczy w naczyniu 2. Dokonujemy tego poprzez kręcenie pokrętkiem 6. Powinniśmy wtedy w zwierciadle 14 zaobserwować obraz ostrza 7, pokazany na rys. 3. Po wyzerowaniu przyrządu możemy przystąpić do pomiaru różnicy ciśnień pamiętając o tym, że wyższe ciśnienie doprowadzamy do króćca 11, a niższe do króćca 12.

Wskutek doprowadzenia różnych ciśnień, ciecz manometryczna przepłynie przez przewód elastyczny 3 i nastąpi podniesienie się poziomu cieczy w naczyniu 1 oraz obniżenie w naczyniu 2. Kręcąc głowicą 5, podnosimy naczynie 1, aż do przywrócenia poprzedniego stanu w naczyniu 2 (ponowne zaobserwowanie obrazu pokazanego na rys. 3.10). Odczytana na zgrubnej 9 oraz dokładnej podziałce 13 wartość, odpowiada wysokości słupa cieczy manometrycznej kompensującego różnicę ciśnień.

1.3 Tok postępowania podczas badania

1. Źródłem ciśnienia badanego jest strzykawka, połączona rurką giętką z przyrządami pomiarowymi.
2. Wszystkie manometry należy podłączyć tak, aby mierzyły tą samą różnicę ciśnień (jednym z ciśnień może być ciśnienie atmosferyczne).
3. Wypoziomować oraz tam, gdzie to konieczne, wyzerować manometry.
4. Po wciśnięciu tłoka strzykawki należy najpierw dokonać wyzerowania manometru kompensacyjnego, a następnie dokonać jego odczytu i odczytu pozostałych przyrządów.
5. Dokonać odczytów wskazań manometrów dla kilku punktów pomiarowych.
6. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli pomiarowej 1.

Tab.1 Tabela pomiarowa.

Rodzaj ciśnieniomierza	Wskazania przyrządów (mm słupa cieczy manometrycznej lub Pa)						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Mikromanometr kompensacyjny							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

1.4 Analiza wyników badań

Z uwagi na dużą dokładność, manometrem wzorcowym dla prowadzonych pomiarów jest manometr kompensacyjny. Na podstawie prowadzonych badań zostanie określony błąd bezwzględny oraz względny dla pozostałych manometrów.

W pierwszym kroku należy przeliczyć wskazania przyrządów na wartość ciśnienia w paskalach. Jako przyspieszenie ziemskie przyjmujemy $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Wyniki przeliczeń notujemy w tabeli 2:

Tab.2 Tabela z wartościami zmierzonych ciśnień

Rodzaj ciśnieniomierza	Wskazania przyrządów przeliczone na Pa						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Mikromanometr kompensacyjny							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

Następnie przechodzimy do obliczenia bezwzględnych błędów pomiaru dla badanych manometrów:

$$\Delta p = |p - p_{ref}| \text{ [Pa]} \quad (4)$$

gdzie:

p_{ref} – wskazanie manometru wzorcowego, [Pa]

p – wskazanie manometru badanego, [Pa].

Względny błąd pomiaru badanego manometru:

$$\delta_p = \frac{|p - p_{ref}|}{|p_{ref}|} [\%] \quad (5)$$

Tab. 3 Tabela z wartościami błędów względnych

Rodzaj ciśnieniomierza	Względny błąd pomiaru δ_p [%]						
	1	2	3	4	5	6	7
U-rurka z wodą							
U-rurka z alkoholem							
Manometr Recknagla							
Manometr z czujnikiem piezoelektrycznym							

2. POMIAR HISTEREZY MANOMETRU

2.1 Cel i zakres ćwiczenia

Druga część ćwiczenia obejmuje zapoznanie się z przyrządami oraz metodami służącymi do pomiaru dużych ciśnień, rzędu megapaskali. Zakres ćwiczenia obejmuje sprawdzenie dokładności oraz histerezy manometru sprężystego (z rurką Bourdona) na prasie hydraulicznej z użyciem zintegrowanego przetwornika ciśnienia.

2.2 Stanowisko laboratoryjne

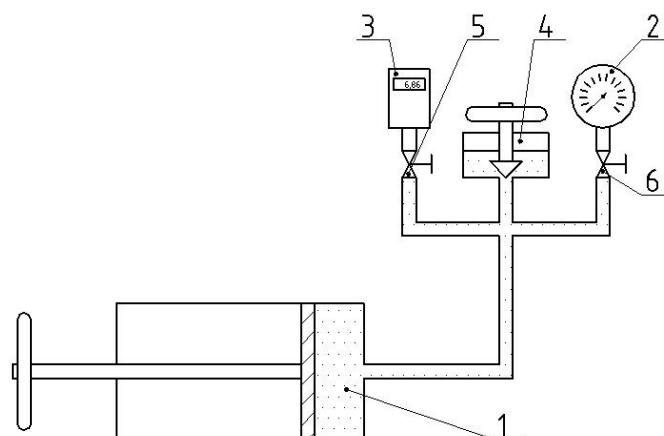


Rys.4. Stanowisko do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów

Stanowisko przedstawione na rysunku 4 przeznaczone jest do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów z wykorzystaniem zintegrowanego (tensometrycznego) przetwornika ciśnienia.

Elementy składowe stanowiska to:

1. hydrauliczny sprawdzian manometrów, zakres: $0 \div 500 \text{ kg/cm}^2$,
2. zintegrowany tensometryczny przetwornik ciśnienia; typ AR 057-C, zakres: $0 \div 20 \text{ MPa}$, klasa dokładności: 0,5,
3. manometr badany, zakres: $0 \div 16 \text{ MPa}$, klasa dokładności: 2,5.



Rys. 5. Schemat stanowiska do sprawdzania dokładności i histerezy manometrów; 1 – prasa hydrauliczna, 2 – manometr badany, 3 – zintegrowany przetwornik ciśnienia (wzorcowy), 4 – zbiornik oleju, 5, 6 – zawory odcinające

2.3 Tok postępowania podczas badania

1. Przed założeniem przyrządów do pomiaru ciśnienia należy dokładnie odpowietrzyć układ (czynność wykonana wcześniej).
2. Należy odkręcić zawory odcinające 5, 6 i zakręcić zawór odcinający zbiornika 4.
3. Kręcąc śrubą prasy hydraulicznej 1 w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek zegara), wytworzyć ciśnienie w układzie i dokonać odczytu ciśnienia (na manometrze badanym 2 i wzorcowym 3) po uprzednim lekkim opukaniu palcem obudowy manometru wskazówkowego 2.
4. Czynność z punktu 3. wykonać dla wyznaczonych punktów pomiarowych w całym zakresie manometru badanego/wzorcowego.
5. Po osiągnięciu ostatniego punktu pomiarowego (maksymalna wartość ciśnienia manometru badanego/wzorcowego) dokonać pomiarów przy zmniejszającym się ciśnieniu, kręcąc śrubą prasy hydraulicznej 1 w lewo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Pomiar należy wykonać dla tych samych ciśnień, co przy zwiększaniu ciśnienia.

2.4 Badanie histerezy manometru

Temperatura odniesienia badań: 20°C. Dla badań ciśnieniomierzy klasy 1; 1,6; 2,5; oraz 4, temperatura odniesienia może odbiegać o $\pm 5^\circ\text{C}$. Dla pozostałych, dokładniejszych klas – o $\pm 2^\circ\text{C}$.

Badanie możemy wykonywać w dwóch wariantach:

1. porównanie wskazań ciśnieniomierza badanego i wzorcowego według wskazań ustawianych na przyrządzie badanym,
2. porównanie wskazań ciśnieniomierza badanego i wzorcowego według wskazań ustawianych na przyrządzie wzorcowym.

Wygodniejsze jest porównywanie wskazań manometrów według wskazań ustawianych na ciśnieniomierzu badanym. Unikamy w ten sposób konieczności interpolacji wskazań manometrów wskazówkowych. Według normy, minimalna liczba punktów sprawdzenia dla manometrów klasy 1, 1,6 oraz 2,5 wynosi pięć punktów.

Tabela 4 jest przykładową tabelą pomiarowo-obliczeniową, służącą do gromadzenia danych pomiarowych i wyników obliczeń.

Tab.4. Tabela do gromadzenia wyników badania według wskazań ustawianych na manometrze badanym

Lp.	Wskazanie manometru badanego p	Wskazanie manometru wzorcowego		Bezwzględne błędy pomiaru manometru badanego		
		p_{ros}	p_{mal}	Δp_{ros}	Δp_{mal}	Δp_{hist}
1						
2						
3						
4						
5						

Bezwzględny błąd pomiaru badanego manometru przy wzrastającym ciśnieniu:

$$\Delta p_{ros} = |p - p_{ros}| \quad (1)$$

gdzie:

p_{ros} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy rosnącym ciśnieniu,
 p – wskazanie manometru badanego (wzorcowego).

Bezwzględny błąd pomiaru badanego manometru przy malejącym ciśnieniu:

$$\Delta p_{mal} = |p - p_{mal}| \quad (2)$$

gdzie:

p_{mal} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy malejącym ciśnieniu,
 p – wskazanie manometru badanego (wzorcowego).

Histereza pomiarowa:

$$\Delta p_{hist} = |p_{mal} - p_{ros}| \quad (3)$$

gdzie:

p_{mal} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy malejącym ciśnieniu,
 p_{ros} – wskazanie manometru wzorcowego (badanego) przy rosnącym ciśnieniu.

Uwaga!

Pozycje w nawiasach dotyczą badania według wskazań ustawianych na manometrze wzorcowym.

3. POMIAR CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGO

W tej części ćwiczenia należy dokonać odczytu ciśnienia atmosferycznego mierzonego za pomocą dwóch przyrządów. Pierwszy z nich, to barometr okrętowy BO-863 "Horn" znajdujący się na ścianie pomieszczenia laboratorium. Podczas odczytu należy zwrócić na jednostki fizyczne, ponieważ przyrząd posiada dwie skale pomiarowe.

Drugi przyrząd to podobnej konstrukcji barometr laboratoryjny.

Barometr 1:

Barometr 2:

Data i godzina pomiaru:

Dla porównania należy sprawdzić w wybranym serwisie meteorologicznym (np. meteo.pl) wartość ciśnienia atmosferycznego dla stacji meteorologicznej Kraków Balice o tej samej porze, co dokonywane pomiary w laboratorium.

4. WYKONANIE SPRAWOZDANIA I ZALICZENIE ĆWICZENIA

4.1 Sprawozdanie

Sprawozdanie należy przygotować ręcznie na papierze kratkowanym formatu A4. W sprawozdaniu należy zamieścić kolejno, zgodnie z opisem zawartym w niniejszej instrukcji:

1. Tabelkę tytułową,
2. Krótki wstęp teoretyczny i przedstawić cel ćwiczenia,
3. Opis przeprowadzonych badań dla kolejnych punktów, pomiary i dodatkowe obliczenia zgodnie z niniejszą instrukcją, tj.:
 - 3.1 Pomiar małych ciśnień wg p. 1 oraz p. 2, tabele 1, 2, 3 wraz z obliczeniami.
 - 3.2 Pomiar histerezy manometru wg p. 2 oraz dodatkowo wykres zależności Δp_{hist} w funkcji ciśnienia manometru badanego lub wzorcowego.
 - 3.3 Pomiar ciśnienia atmosferycznego według punktu 3.

Wykresy można przygotować na papierze milimetrowym lub komputerowo (w arkuszu kalkulacyjnym).

Tabelkę tytułową należy wykonać i czytelnie wypełnić wg poniższego wzoru. Wielkość tabelki jest orientacyjna.

Termodynamika techniczna - Laboratorium		
Pomiar ciśnienia		
Nazwisko, Imię	Data wyk.	Grupa. (np. 8A)

4.2 Zagadnienia do kolokwium zaliczeniowego po wykonaniu ćwiczenia

Warunkiem zaliczenia ćwiczenia jest zaliczenie sprawozdania oraz zaliczenie kolokwium z oceną pozytywną. Poniżej podano zagadnienia do kolokwium zaliczeniowego:

1. Ciśnienie: definicja i jednostki ciśnienia, przeliczanie różnych jednostek ciśnienia. Poziomy odniesienia w pomiarach ciśnienia (ciśnienie względne, bezwzględne, manometryczne, absolutne).
2. Budowa i zasada działania manometru cieczowego dwuramiennego (U-rurki). Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
3. Budowa i zasada działania manometru cieczowego jednoramiennego. Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
4. Budowa i zasada działania manometru cieczowego jednoramiennego z pochyłym ramieniem (Recknagla). Wyprowadzenie wzoru na mierzoną różnicę ciśnień.
5. Omów i opisz zjawisko histerezy w manometrach. Na czym ono polega i gdzie występuje?

4.3 Literatura

Krystyna Bakinowska (i in.), Pomiary cieplne. Cz. 1, Podstawowe pomiary cieplne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993

Rysunki zaczerpnięto z: Komecki Tadeusz: Pomiar ciśnienia. Red. Feliks Kotlewski i Marian Mieszkowski. W: Pomiary w technice cieplnej. Wyd. 2. Warszawa: WNT, 1974.