

**POLITECHNIKA**



**BIAŁOSTOCKA**

**WYDZIAŁ**



**INŻYNIERII  
ZARZĄDZANIA**

**KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ**

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

## ***Podstawy techniki i technologii***

Kod przedmiotu: ISO02123, INO02123

### **Ćwiczenie Nr 17**

# **POMIAR ROZKŁADU PRĘDKOŚCI I CIŚNIENIA POWIETRZA W KANAŁE WENTYLACYJNYM**

Opracował:

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2023

*Wszystkie prawa zastrzeżone*

*Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.*

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się studentów z metodami pomiaru prędkości i ciśnienia powietrza oraz zbadanie rozkładu tych parametrów w wybranych miejscach kanału wentylacyjnego.

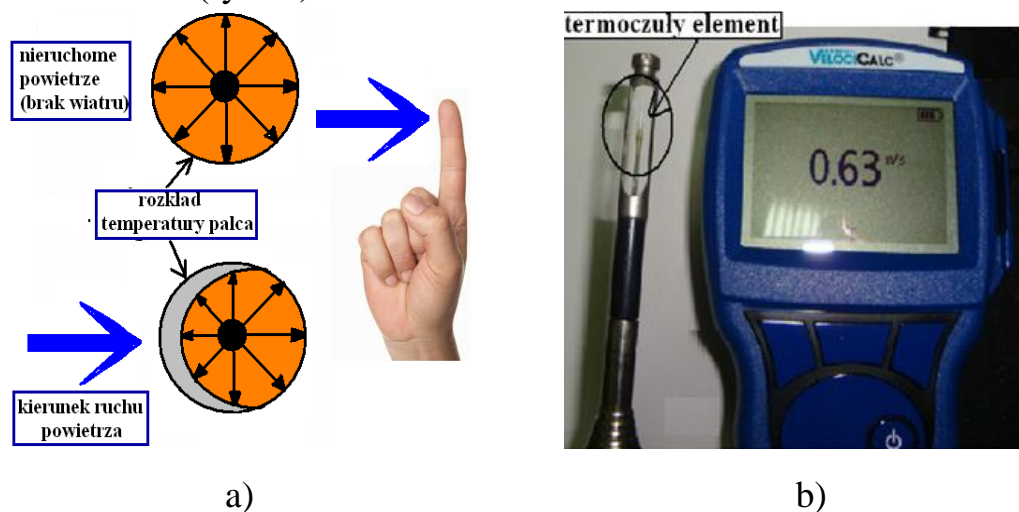
## 1. WPROWADZENIE

Pomiary parametrów przepływu gazów i płynów są wszechobecne w naszym życiu i mają bardzo ważne znaczenie. Przykładowo:

- dokładność pomiaru zużycia wody, gazu w gospodarstwach domowych wpływają na wielkość naszych wydatków w budżecie domowym;
- dokładność pomiaru parametrów przepływu wody i powietrza w stacjach hydro- i meteorologicznych ma wpływ na precyzyjność przewidywania pogody, a więc i zagrożeń powodziowych itp.;
- poprawny pomiar parametrów przepływu powietrza w systemach wentylacyjnych zapewnia komfort i bezpieczeństwo pracy, czy też wypoczynku;

Do pomiaru prędkości przepływu używa się anemometrów: obrotowych (czasowe, wiatrakowe), wychyłowych, termooanemometrów, ciśnieniowych (rurka Pitota), dopplerowskich i ultradźwiękowych.

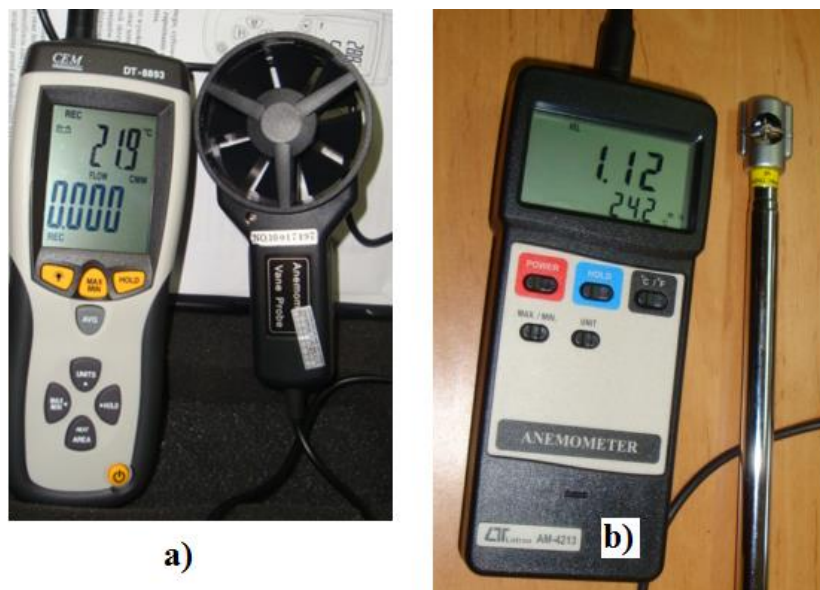
Zasadę działania *termooanemometru* można wyjaśnić w następujący sposób. Każdy człowiek ma wbudowany w sobie czuły termooanemometr i może go wykorzystać zwilżając palec i podnosząc go do góry. Wystawienie mokrego palca na działanie wiatru spowoduje jego oziębienie tym większe, im większa jest prędkość wiatru (rys.1a).



Rys.1. Termooanemometry: a) zasada działania; b) widok przyrządu VelociCalc.

Właśnie taka cecha tego zjawiska, czyli zależność intensywności wymiany ciepła od prędkości przepływu jest podstawą działania termooanemometru. Na tej samej zasadzie opiera się działanie przepływomierzy termicznych elektrycznych, czyli termooanemometry (rys.1b). Są to przyrządy do pomiaru prędkości przepływu, wykorzystujące zależność oddawania ciepła przez czuły element przetwornika od prędkości przepływu. Omywany przez przepływające medium sensor (rys. 1b) doznaje ochłodzenia, co powoduje zmianę jego rezystancji oraz straty ciepła. Dokonując pomiaru napięcia na elemencie rezystancyjnym oraz prądu w jego obwodzie, znając właściwości czujnika oraz wartości współczynników dotyczących wymiany ciepła, można wyznaczyć miejscową prędkość przepływu medium. Sensory wykorzystywane przy pomiarach przepływu, powinny charakteryzować się dużą wartością temperaturowego współczynnika rezystancji, stabilnymi właściwościami elektrycznymi i mechanicznymi. Materiały z jakich można wykonać takie czujniki to: wolfram, platyna, nikiel, miedź, platynorod, platynoiryd, a także materiały półprzewodnikowe.

Na rysunku 2 przedstawione zostały anemometry obrotowe.

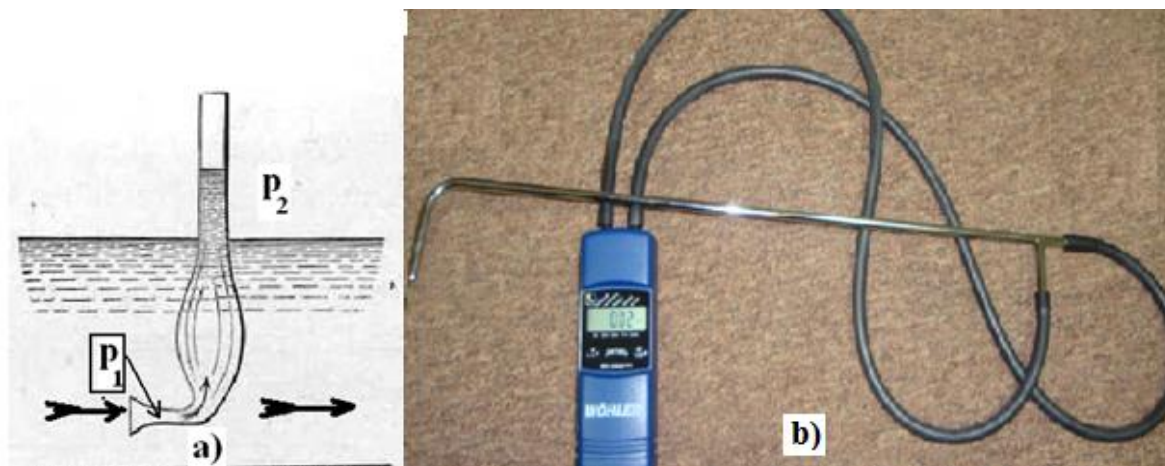


Rys.2. Anemometry: a) wiatraczkowy DT 8893; b) turbinkowy AM 4213.

W tych anemometrach wielkość fizyczna (np. prędkość wiatru) zamieniana jest na drugą wielkość fizyczną, jaką jest prędkość obracającego się wiatraczka (zależną od prędkości wiatru). W rezultacie zmierzoną prędkość wirowania elementu ruchomego można zamienić na prędkość przepływu pod warunkiem znajomości

charakterystyki przetwarzania. Charakterystyka przetwarzania takiego przetwornika określana jest doświadczalnie, ponieważ zależy ona od konstrukcji oraz indywidualnych cech każdego egzemplarza anemometru. Wyznaczenie charakterystyki przetwarzania przetwornika nazywa się kalibracją lub wzorcowaniem przyrządu.

**Anemometr ciśnieniowy** (rys. 3a) po raz pierwszy skonstruował Henry Pitot w roku 1732. Rurka Pitota pierwotnie była stosowana do pomiaru prędkości nurtu rzek (rys.3a), natomiast obecnie w lotnictwie wykorzystuje się ją do pomiaru prędkości statków powietrznych.



Rys.3. Anemometr ciśnieniowy: a) zastosowanie rurki Pitota do pomiaru prędkości nurtu rzeki; b) anemometr firmy WÖHLER.

Prędkość przepływu wyznaczana jest z zależności:

$$v = \sqrt{\frac{2kRTg(1-(p_2/p_1)^{(k-1)/k})}{(k-1)}}$$

gdzie:  $v$  – mierzona prędkość;

$g$  – przyspieszenie ziemskie;

$R$  – stała gazowa w  $J/(mol \cdot deg)$ ;

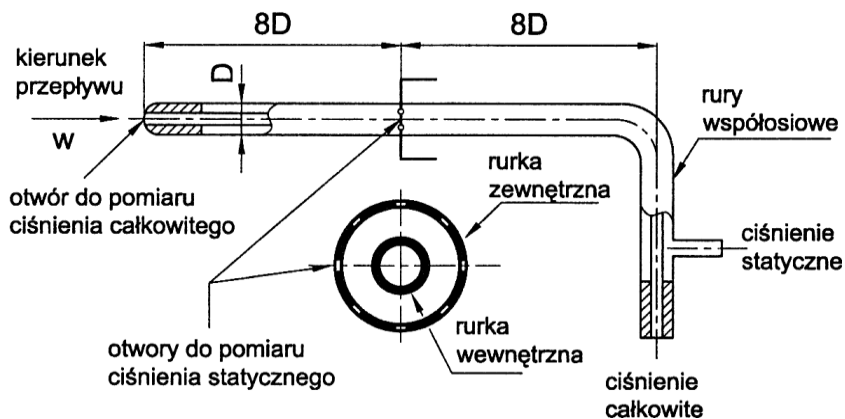
$T$  – temperatura gazu;

$k$  – wykładnik adiabaty (dla powietrza ok. 1,4);

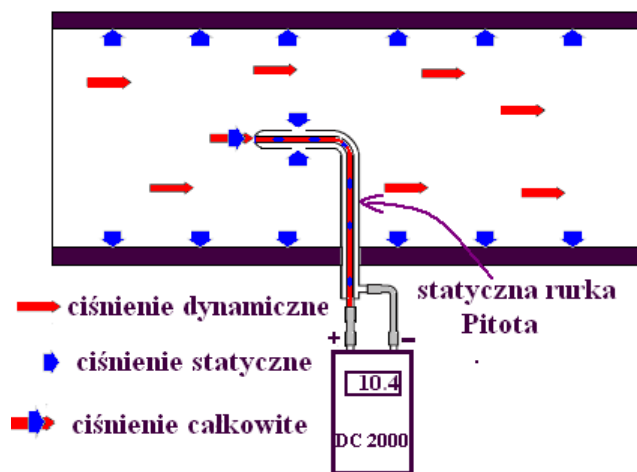
$p_1$  – ciśnienie spiętrzenia (dynamiczne);

$p_2$  – ciśnienie statyczne.

W laboratorium do pomiaru ciśnienia wykorzystany jest miernik DC 2000 firmy WÖHLER wyposażony w rurkę Pitota (rys. 4).



Rys. 4. Budowa statycznej rurki Pitota) [2].



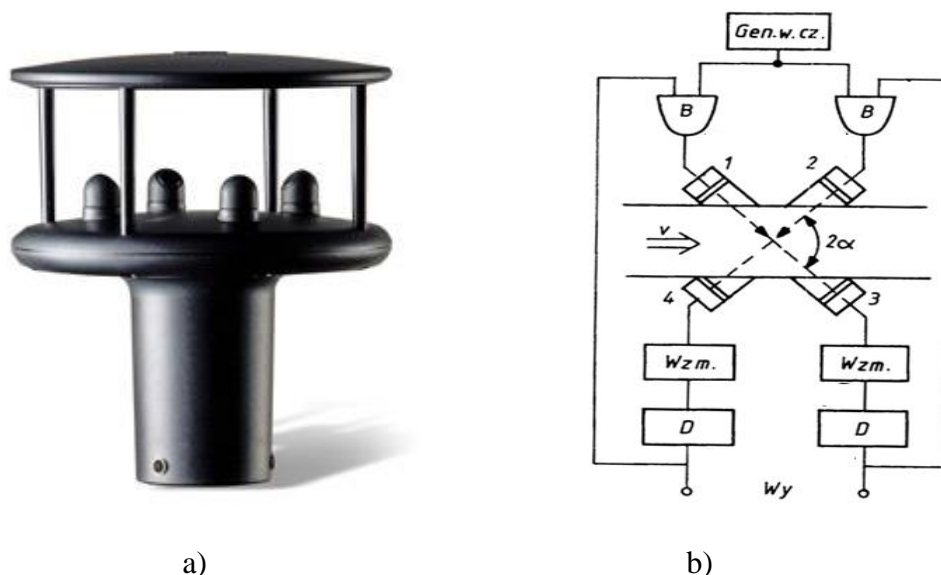
Rys. 5. Pomiar ciśnienia statyczną rurką Pitota.

Styczne rurki powszechnie wykorzystuje się do pomiaru prędkości i ciśnienia w kanałach wentylacyjnych. Jest to spowodowane dużo wyższą dokładnością w porównaniu z metodami fundamentalnymi. Gdyby ciśnienia statyczne wewnątrz i na zewnątrz kanału były równe to wystarczyłaby zwykła rurka wprowadzona do wnętrza kanału i skierowana czołem otworu do kierunku przepływu, aby odczytać ciśnienie dynamiczne (wejście „+” rys. 5). Jednak ciśnienie statyczne wewnątrz kanału jest wyższe od barometrycznego, co pogarsza dokładność pomiaru. Problem ten można wyeliminować poprzez oddzielne wyprowadzenie na zewnątrz ciśnienia statycznego i podłączenie do drugiego wejścia manometru (rys.5 – wejście „-“). Manometr wskazuje wtedy dokładnie wartość ciśnienia dynamicznego niezależnie od różnicy ciśnienia statycznego wewnątrz i na zewnątrz kanału.



## Anemometry ultradźwiękowe

Na rys. 6a przedstawiony jest anemometr ultradźwiękowy firmy Gill Wind Sonic [4], a na rys. 6b – schemat blokowy ilustrujący zasadę pomiaru prędkości przepływu przy pomocy ultradźwięków [3]. Anemometr taki zbudowany jest z dwóch głowic nadawczych (1 i 2) i dwóch odbiorczych (3 i 4 - rys. 6b) oraz niezbędnych układów elektronicznych (bramek, wzmacniaczy, liczników). Zasada



Rys. 6: a) widok anemometru firmy Gill Wind Sonic [4]; b) schemat blokowy anemometru ultradźwiękowego [3].

działania takiego anemometru jest następująca: dwie głowice nadawcze umieszczone są w pewnej odległości od siebie na rurze, w której przepływa np. powietrze. Fala ultradźwiękowa z głowicy 1 dotrze do głowicy odbiorczej 3 po czasie  $t_2$ , a fala z głowicy 2 zostanie odebrana przez głowicę 4 po czasie  $t_1$  (jest to spowodowane unoszeniem fal ultradźwiękowych przez badany ośrodek):

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha} ; t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha} ,$$

gdzie:  $L$  – odległość między głowicami nadawczą i odbiorczą;

$c$  – prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w badanym ośrodku;

$v$  – prędkość przepływu badanego ośrodku;

$\alpha$  – kąt wnikania fali ultradźwiękowej.

Ostatecznie prędkość przepływu  $v$  będzie proporcjonalna do różnicy impulsów  $\Delta f$  z generatora wysokiej częstotliwości i stałych konstrukcyjnych ( $L$  i  $\alpha$ ):

$$\Delta f = \frac{1}{2t_1} - \frac{1}{2t_2} = \frac{\cos \alpha}{L} v \Rightarrow v = \frac{\Delta f \cdot L}{\cos \alpha}.$$

**Przyrządy do pomiaru wydajności przepływu** w rzeczywistości nie mierzą tej wielkości. Najpierw mierzymy nimi spadki ciśnień lub prędkości, które następnie przeliczamy na wartość wydajności przepływu (np.: przy znanej prędkości przepływu  $v$  i polu powierzchni przekroju poprzecznego kanału  $S$  wydajność  $V=v \cdot S$ ).

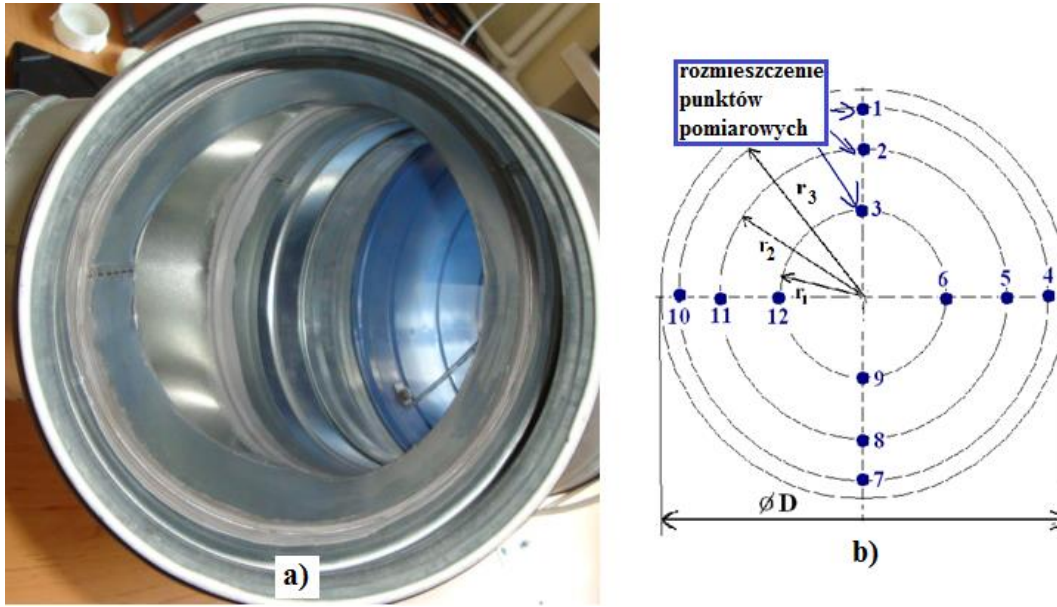
Przyrządy te można podzielić na następujące grupy:

- a) wykorzystujące zjawisko dławienia przepływającej strugi (najliczniejsza i najczęściej spotykana w praktyce):
  - zwężki miernicze: kryzy, dysze (ISA, Venturiego), klasyczna zwężka Venturiego, kryza segmentowa;
  - przepływomierze pływakowe tzw. rotametry (elementy dławiące o stałym spadku ciśnienia);
  - danaidy: jednozwężkowa, dwuzwężkowa;
  - przelewy miernicze;
  - zwężkowe kanały miernicze.
- b) umożliwiające pomiary prędkości miejscowych:
  - rurki spiętrzające: Prandtla, Brabbégo;
  - młynki hydrometryczne Otta;
  - anemometry: skrzydełkowy, czaszowy;
  - termoanemometry;
  - katatermometry.
- c) pozostałe:
  - przepływomierze elektromagnetyczne (do cieczy przewodzących prąd elektryczny np.: muły, szlamy, ścieki);
  - przepływomierze ultradźwiękowe.

Do pomiaru prędkości przepływu powietrza w przeprowadzonym ćwiczeniu używać będziemy anemometr turbinkowy AM 4213, a do pomiaru ciśnienia – miernik Wöhler DC 2000.

Na rys. 7a przedstawiony został widok kanału wentylacyjnego oraz rozmieszczenie punktów pomiarowych (rys. 7b).





Rys. 7. Pomiary parametrów powietrza: a) widok kanału wentylacyjnego; b) rozmieszczenie punktów pomiarowych.

Wartości promieni na których rozmieszczone są punkty pomiarowe na rys. 7b) wyznacza się z zależności:

$$r_i = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{i}{2n}}, \quad (1)$$

gdzie:  $D$  - średnica wewnętrzna kanału, w którym jest przeprowadzany pomiar;  
 $n$  - liczba części podziałowych pola powierzchni przekroju;  
 $i$  - wskaźnik promienia.

Wydajność przepływu powietrza  $V$  w  $m^3/min$  można obliczyć z zależności (dla  $n=3$ ):

$$V = 60 \cdot [S_1 \cdot v_{1sr} + (S_2 - S_1) \cdot v_{2sr} + (S - S_2) \cdot v_{3sr}], \quad (2)$$

gdzie:  $S_1, S_2, S$  – pola powierzchni;

$v_{1sr}, v_{2sr}, v_{3sr}$  – średnie prędkości zmierzone na promieniach  $r_1, r_2, r_3$ .

Pola powierzchni wyznaczamy ze wzorów:

$$S_1 = \pi \left( \frac{r_1 + r_2}{2} \right)^2, S_2 = \pi \left( \frac{r_2 + r_3}{2} \right)^2, S = \pi \cdot r^2.$$

Wartości średnie prędkości wyznaczamy na podstawie:

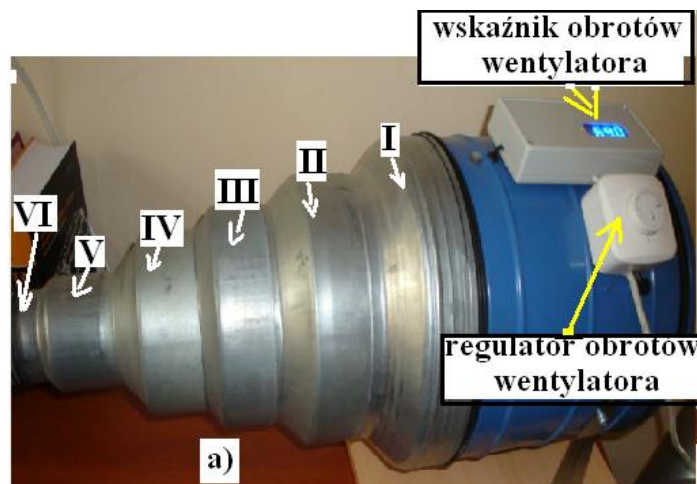
$$v_{1sr} = \frac{(v_3 + v_6 + v_9 + v_{12})}{4}, v_{2sr} = \frac{(v_2 + v_5 + v_8 + v_{11})}{4},$$

$$v_{3sr} = \frac{(v_1 + v_4 + v_7 + v_{10})}{4},$$

gdzie:  $v_1 \div v_{12}$  – prędkości zmierzone w punktach pomiarowych z rys. 7b.

## 2. PRZEBIEG POMIARÓW

Stanowisko pomiarowe (rys.8) składa się z wentylatora przemysłowego VKOM 315 i zestawu zwężek nakładanych na kanał wylotowy wentylatora. Prędkość obrotowa wentylatora jest zmieniana za pomocą potencjometru (regulator obrotów – rys. 8). Pomiar parametrów przepływu dokonywany jest za pomocą anemometru AM 4213 w dwunastu miejscach kanału wentylacyjnego pokazanych na rys. 7b.



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe z nałożonymi zwężkami (I, II, III, IV, V i VI).

**Przed rozpoczęciem pomiarów studenci powinni zapoznać się z instrukcją obsługi anemometru turbinkowego AM 4213 i przyrządu Wöhler DC 2000.**

Prowadzący ćwiczenia wskaże numer badanej zwężki oraz wartości prędkości obrotowej wentylatora, przy których będą wykonywane pomiary. Wykonujący ćwiczenie mierzą średnicę kanału wentylacyjnego i wyznaczają na podstawie wzoru (1) wartości promieni, na których rozmieszczone są punkty pomiaru prędkości przepływu powietrza. Następnie wykonują pomiary i zapisują wyniki w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiaru prędkości przepływu powietrza anemometrem AM 412.

		Prędkość obrotowa		temperatura	Wilgotność
		obr/min			
Prędkość powietrza		m/s		°C	%
<b>Nr punktu pomiarowego</b>	<b>1</b>				
	<b>2</b>				
	<b>3</b>				
	<b>4</b>				
	<b>5</b>				
	<b>6</b>				
	<b>7</b>				
	<b>8</b>				
	<b>9</b>				
	<b>10</b>				
	<b>11</b>				
	<b>12</b>				

Po wykonaniu pomiarów prędkości powietrza studenci powinni wykonać pomiar rozkładu ciśnienia powietrza za pomocą miernika Wöhler DC 2000. Wyniki pomiarów zamieszczamy w tabeli 2.

Mierniki temperatury i wilgotności powietrza wskaże prowadzący ćwiczenie.

Tabela 2. Wyniki pomiaru ciśnienia powietrza miernikiem Wöhler DC 2000.

		Prędkość obrotowa		temperatura	Wilgotność
		obr/min			
Ciśnienie powietrza		.....		°C	%
<b>Nr punktu pomiarowego</b>	<b>1</b>				
	<b>2</b>				
	<b>3</b>				
	<b>4</b>				
	<b>5</b>				
	<b>6</b>				
	<b>7</b>				
	<b>8</b>				
	<b>9</b>				
	<b>10</b>				
	<b>11</b>				
	<b>12</b>				

Tabela 3. Wyniki pomiaru i obliczeń wydajności przepływu powietrza.

<b>Wydajność przepływu</b>	Prędkość obrotowa w obr/min							
	<b>Wydajność przepływu</b>							
	<b>m<sup>3</sup>/min</b>							
<b>zmierzona</b>								
<b>obliczona</b>								

**W sprawozdaniu należy:**

1. Uzupełnić tabelę 3 i przeprowadzić analizę uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń.
2. Wykreślić charakterystyki (wykresy kolumnowe) rozkładu prędkości i ciśnienia w poszczególnych punktach pomiarowych) i przeprowadzić ich analizę.

3. Przedstawić wnioski, jakie nasunęło wykonywane ćwiczenie.

### 3. PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE

1. Wymień metody pomiaru ciśnienia i omów jedną z nich. Podaj przyczyny błędów pomiaru.
2. Wymień metody pomiaru prędkości przepływu i omów jedną z nich. Podaj przyczyny błędów pomiaru.
3. Wymień metody pomiaru wydajności przepływu i omów jedną z nich. Podaj przyczyny błędów pomiaru.
4. Wyjaśnij metodę pomiaru prędkości powietrza za pomocą termoanemometru.
5. Wyjaśnij metodę pomiaru prędkości powietrza za pomocą anemometru wiatraczkowego.
6. Wyjaśnij metodę pomiaru ciśnienia powietrza za pomocą rurki Pitota.

### 4. LITERATURA

1. Turkowski M.: *Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
2. Taler D.: *Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
3. Michalski A., Tumański S., Żyła B.: *Laboratorium miernictwa wielkości nieelektrycznych*, oficyna wydawnicza Pol. Warszawskiej, W-wa 1999.
4. Ammonit Measurement GmbH: *Witryna internetowa*. <http://www.ammonit.com>, stan z 11.07.2015.

### Wymagania BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciwpożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad:

- Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.

- Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.