

**POLITECHNIKA**



**BIAŁOSTOCKA**

**WYDZIAŁ**



**INŻYNIERII**

**ZARZĄDZANIA**

**KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ**

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

*Systemy pomiarowe*

Kod przedmiotu: KS04515, KN04515

**Ćwiczenie Nr 7**

# **POMIAR PRĘDKOŚCI I WYDAJNOŚCI PRZEPIYWU POWIETRZA**

Autor:

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2022

*Wszystkie prawa zastrzeżone*

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

**Cel ćwiczenia:** celem ćwiczenia jest zapoznanie się studentów z metodami pomiaru prędkości i wydajności przepływu powietrza oraz zbadanie rozkładu prędkości przepływu powietrza w przekrojach poprzecznych kanału wentylacyjnego.

## 1. WPROWADZENIE

Pomiary parametrów przepływu gazów i płynów są wszechobecne w naszym życiu. Można tu wspomnieć o pomiarach:

- ✓ mających zastosowanie w życiu codziennym np.: pomiar zużycia wody, gazu w gospodarstwach domowych, pomiar prędkości wiatru i ciśnienia powietrza w domowych stacjach pogodowych;
- ✓ parametrów przepływu wody i powietrza w stacjach hydro- i meteorologicznych;
- ✓ parametrów przepływu (ciśnienie, prędkość, wydajność) w przemysłowych systemach wentylacyjnych, chłodzących (np. reaktory atomowe, turbiny parowe, itp.).

Od dokładności wykonania takich pomiarów może zależeć tylko np.: wielkość naszych wydatków w budżecie domowym, nasze samopoczucie (przy prognozowaniu pogody), ale może też bezpieczeństwo i życie wielu ludzi - w przypadku pomiarów na obiektach strategicznego znaczenia.

Pierwsze udane próby pomiarów przepływu były dokonywane już setki lat temu. Największy rozwój tej dziedziny naukowej, nastąpił z końcem XX wieku. Powodem tak dużego zapotrzebowania na przepływomierze jest ich wykorzystanie przy automatyzacji procesów przemysłowych. Obok pomiaru temperatury i ciśnienia, mierzenie przepływu stanowi podstawę modelowania procesów technologicznych. Znajomość prędkości, ilości danego medium w procesie produkcyjnym, daje możliwość regulacji, kontroli i sterowania procesem. To wszystko wpływa na optymalizację procesu produkcji oraz jakość produktu finalnego. Nowoczesne technologie i procesy produkcyjne coraz bardziej wymagają doskonalenia w zakresie metod i narzędzi pomiarowych.

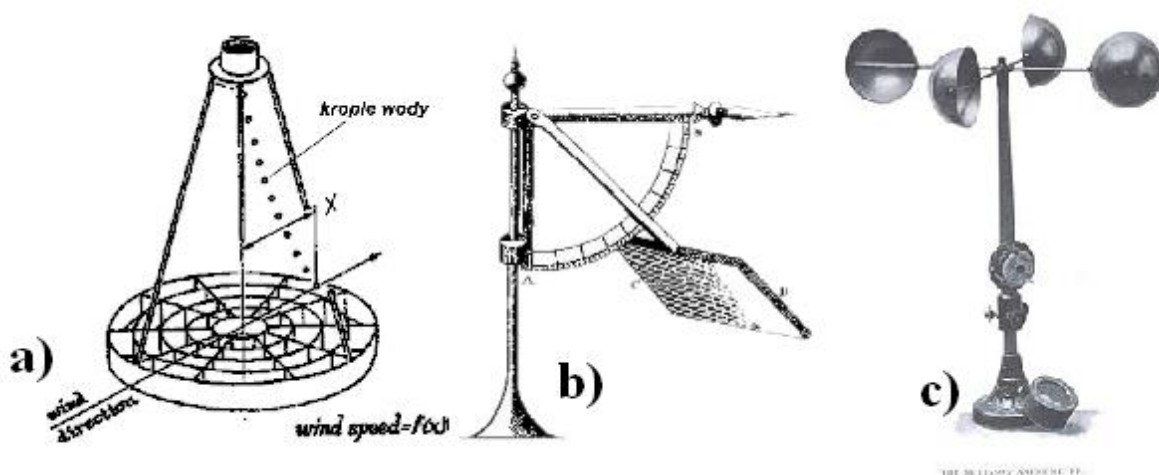
Do pomiaru prędkości przepływu używa się anemometrów:

- obrotowych: czasowe, wiatrakowe;
- wychyłowych;
- termoanemometrów;
- ciśnieniowych (rurka Pitota);
- dopplerowskich;

➤ ultradźwiękowych.

### *Anemometry czasowe i wychyłowe.*

Pierwsze przyrządy do pomiaru prędkości i kierunku przepływu powietrza zostały skonstruowane już w kulturach starożytnych. Na rys. 1a przedstawiony jest wiatromierz Majów, który dokonywał pomiaru prędkości i kierunku wiatru oraz określał statyczny rozkład tych wielkości w czasie. Rysunek 1b przedstawia anemometr Roberta Hooke'a z 1450 roku, a rysunek 1c - anemometr Robinsona, który jest wykorzystywany i w czasie obecnym.

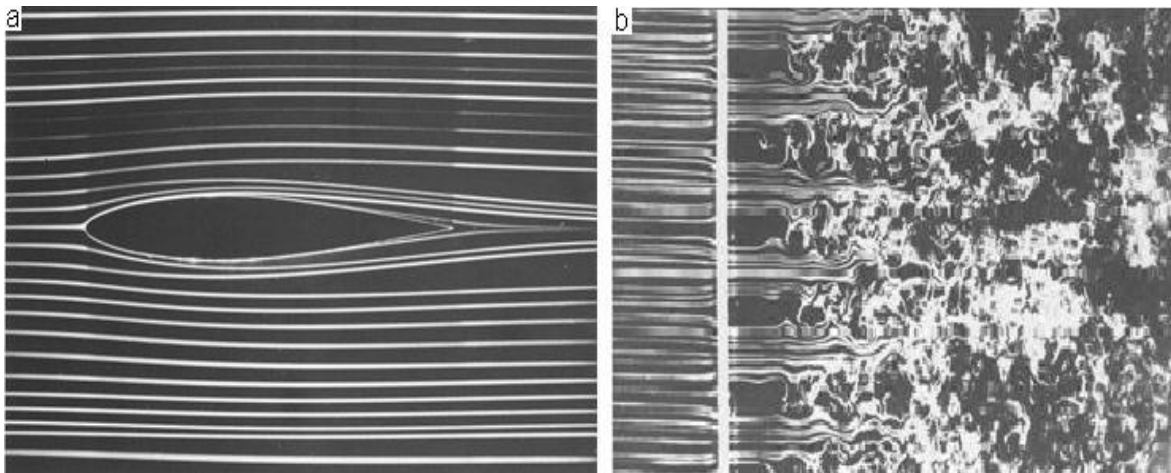


Rys. 1 Przyrządy do pomiaru prędkości wiatru:

a – wiatromierz Majów; b – anemometr Roberta Hooke'a; c – anemometr Robinsona[1].

Przedstawione na rysunku 1 przyrządy wyznaczają prędkość przepływu powietrza metodą pośrednią. Omówię to na przykładzie anemometru czasowego Robinsona (zasadę działania anemometru Hooke'a i wiatromierza Majów studenci „rozpracują” samodzielnie). W anemometrze Robinsona jedna wielkość fizyczna (prędkość wiatru) zamieniana jest na drugą wielkość fizyczną, jaką jest prędkość obracającej się czaszy (zależna od prędkości wiatru). W rezultacie zmierzoną prędkość wirowania czaszy 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. Niektóre przyrządy nie wymagają kalibracji, gdyż znana jest ich postać analityczna. Przykładem takiego przyrządu jest rurka Prandtla. Jednak większa część przetworników musi być kalibrowana.

Przy pomiarach prędkości przepływu mamy do czynienia z przepływami laminarnymi oraz turbulentnymi. Laminarne przepływy (inaczej niezaburzone - rys.2a) charakteryzują się tym, że poszczególne warstwy strumienia powierza poruszają się równoległe do siebie, nie mieszają się ze sobą, ani nie zawirowują. Turbulentne (zwane także burzliwymi - rys.2b) cechują się tym, że poszczególne warstwy strumienia przemieszczają się chaotycznie i mieszają się ze sobą.



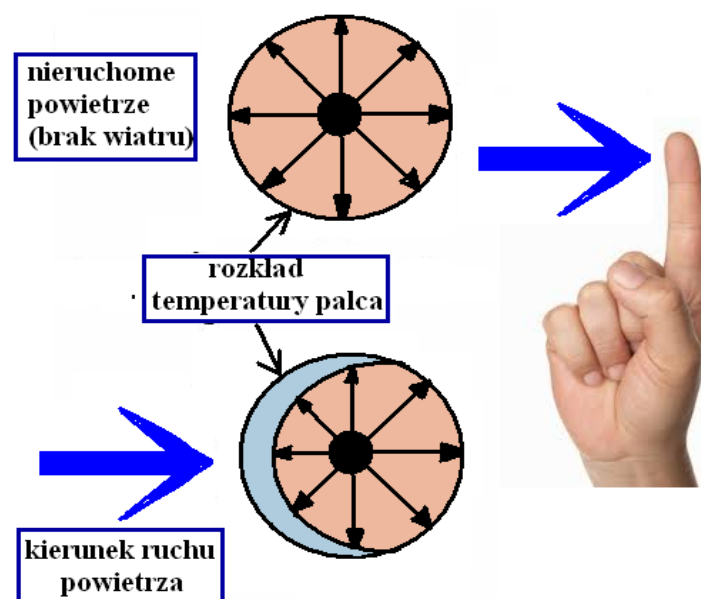
Rys. 2. Rodzaje przepływów: a) laminarny w symetrycznym opływie profilu przez płaski strumień, b) turbulentny powstający przy przepływie przez siatkę [2].

W przepływach turbulentnych wahania prędkości mają charakter przypadkowy. Oznacza to, że jej kierunek jak i wartość są nieprzewidywalne (prędkość fluktuuje). Fluktuacje charakteryzują się zmianami z częstotliwościami sięgającymi kilkuset kiloherców. Do badań takich przepływów wykorzystuje się termooanemometry charakteryzujące się małą stałą czasową, które są w stanie przetworzyć takie częstotliwości.

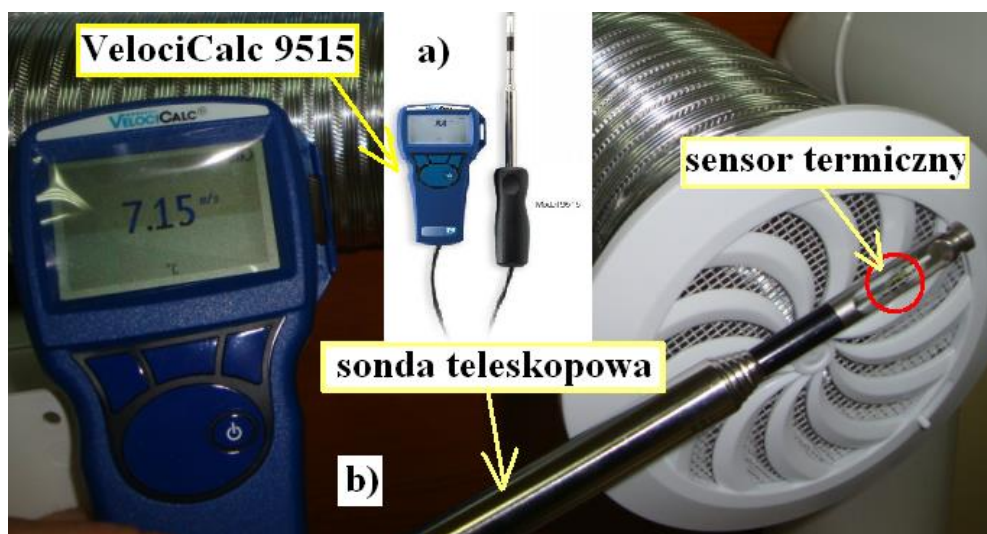
### ***Termooanemometry***

Zjawisko pomiaru prędkości metodą termiczną można przedstawić w prosty sposób. Każdy człowiek ma wbudowany w sobie czuły termooanemometr i może go wykorzystać zwilżając palec i podnosząc go do góry (zagadnienie do samodzielnego wyjaśnienia – dlaczego palec trzeba zwilżyć?). Wystawienie mokrego palca na działanie wiatru spowoduje jego oziębienie tym większe, im prędkość wiatru jest większa (rys.3). Właśnie ta 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. Stąd termooanemometry są to przyrządy do pomiaru prędkości przepływu, wykorzystujące zależność oddawania ciepła przez czuły element przetwornika

od prędkości przepływu. Omywany przez przepływające medium sensor (rys. 4b) 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 własnościami elektrycznymi i mechanicznymi. Materiały z jakich można wykonać takie czujniki to: wolfram, platyna, nikiel, miedź, platynorod, platynoiryd, a także materiały półprzewodnikowe.



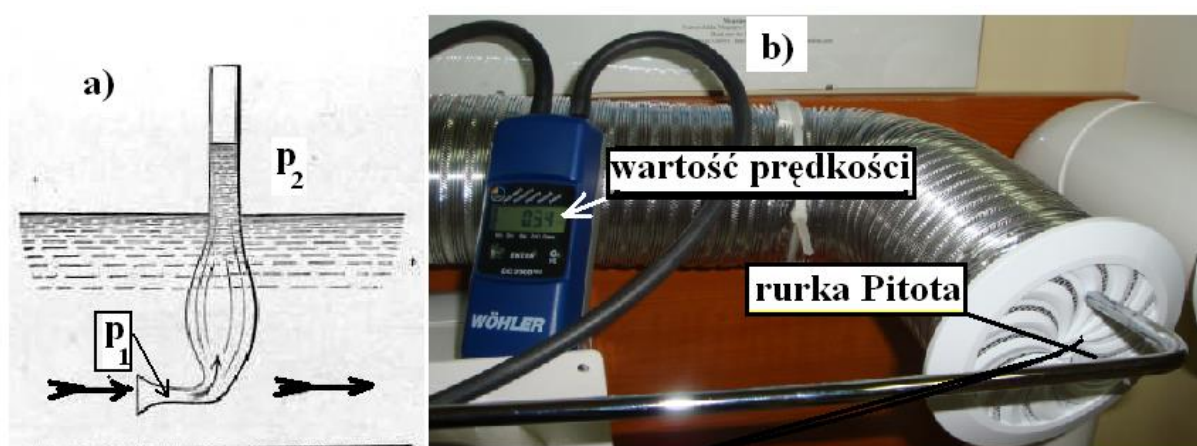
Rys.3. Zasada działania termoanemometru.



Rys.4. Termoanemometr VelociCalc 9515: a) widok przyrządu; b) pomiar prędkości przepływu powietrza.

### Anemometry ciśnieniowe

Anemometr ciśnieniowy po raz pierwszy skonstruował Henry Pitot w roku 1732. Rurka Pitota pierwotnie była stosowana do pomiaru prędkości nurtu rzek (rys.5a). Jej głównym zadaniem jest pomiar prędkości cieczy, natomiast w lotnictwie wykorzystuje się ją do pomiaru prędkości statków powietrznych.



Rys.5. Anemometr ciśnieniowy: a) zastosowanie rurki Pitota do pomiaru prędkości nurtu rzeki; b) pomiar prędkości przepływu przyrządem 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;

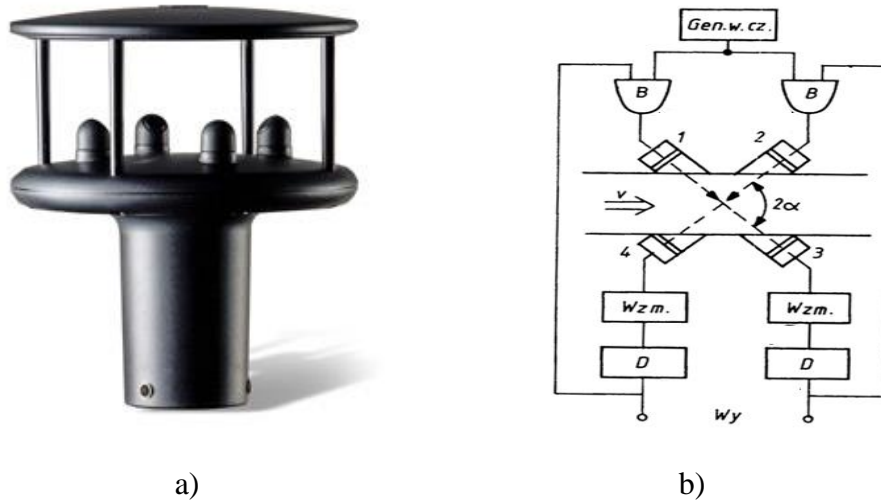
$k$  – wykładnik adiabaty (dla powietrza  $k=1,4$ );

$p_1$  – ciśnienie spiętrzenia;

$p_2$  – ciśnienie statyczne.

### Anemometry ultradźwiękowe

Na rys. 6a przedstawiony jest anemometr ultradźwiękowy firmy Gill Wind Sonic [5], a na rys. 6b – schemat blokowy ilustrujący zasadę pomiaru prędkości przepływu przy pomocy ultradźwięków [4]. Anemometr taki zbudowany jest z dwóch głowic nadawczych (1 i 2) i dwóch odbiorczych (3 i 4



Rys. 6: a) widok anemometru firmy Gill Wind Sonic [5]; b) schemat blokowy anemometru ultradźwiękowego [4].

- rys. 6b) oraz niezbędnych układów elektronicznych (bramek, wzmacniaczy, liczników). Zasada 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  $t_1$  (różnica w czasach propagacji ultradźwięków spowodowana jest 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 ośrodka;

$\alpha$  – kąt wnikania fali ultradźwiękowej.

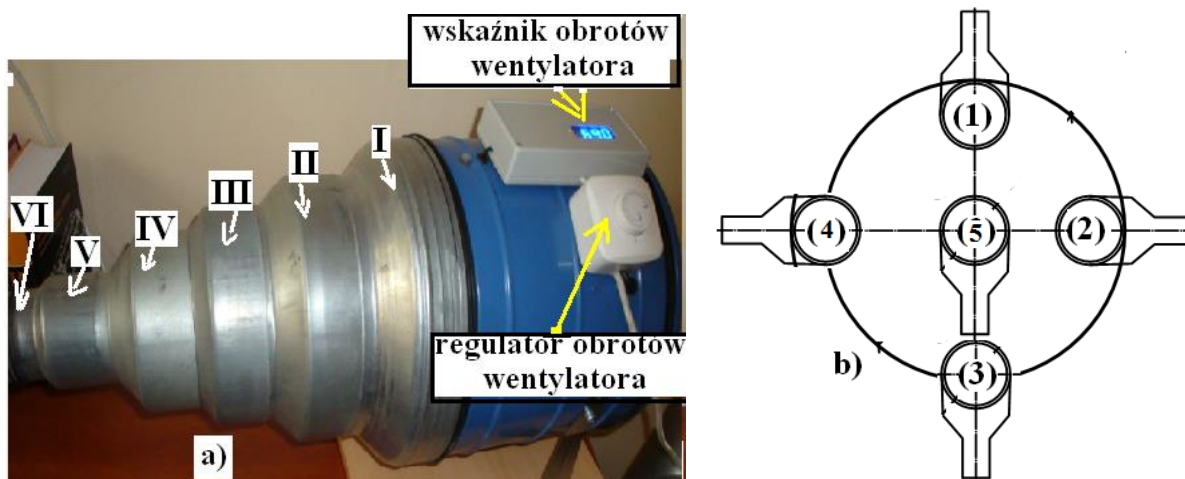
Ostatecznie prędkość przepływu  $v$  będzie proporcjonalna do różnicy impulsów  $\Delta f$  z generatora wysokiej częstotliwości:

$$\Delta f = \frac{c + v \cos \alpha}{2L} - \frac{c - v \cos \alpha}{2L} = \frac{\cos \alpha}{L} v .$$



## 2. PRZEBIEG POMIARÓW

Stanowisko pomiarowe (rys.7a) 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. 7a). Pomiar parametrów przepływu dokonywany jest za pomocą anemometru DT 8893 w pięciu miejscach kanału wentylacyjnego pokazanych na rys. 7b. Parametry techniczne anemometru DT 8893 są umieszczone w tabeli 1.



Rys. 7: a) stanowisko pomiarowe z nałożonymi zwężkami (I, II, III, IV, V i VI);  
b) rozmieszczenie punktów pomiaru prędkości i wydajności przepływu powietrza.

Tabela 1. Parametry techniczne anemometru DT 8893 [6].

Prędkość przepływu	Zakres pomiaru	Rozdzielczość	Dokładność - $\Delta gr$
m/s	0,40-30,00 m/s	0,01 m/s	$\pm(3\% + 0,20 \text{ m/s})$
km/h	1,4-108,0 km/h	0,1 km/h	$\pm(3\% + 0,8 \text{ km/h})$
ft/min (stopy na minutę)	80–5900 ft/min	1 ft/min	$\pm(3\% + 40 \text{ ft/m})$
mph (mile na godzinę)	0,9–67,0 mph	0,1 mph	$\pm(3\% + 0,4 \text{ mph})$
knots (mila morska na godzinę)	0,8 to 58,0 knots	0,1 knots	$\pm(3\% + 0,4 \text{ knots})$
Wydajność	Zakres pomiaru	Rozdzielczość	Pole pomiarowe
CMM (cubic meters/min)	0-999900 m <sup>3</sup> /min	0,001 to 100	0 ,000 to 999,9m <sup>2</sup>
CFM (cubic ft/min)	0-999900 ft <sup>3</sup> /min	0,001 to 100	0,000 to 999,9ft <sup>2</sup>
Temperatura	Zakres pomiaru	Rozdzielczość	Dokładność
	14-140°F(-10-60°C)	0,1°F/C	4,0°F(2,0°C)

### *Pomiary prędkości i wydajności przepływu powietrza anemometrem DT 8893*

Przed przystąpieniem do pomiarów studenci zapoznają się z instrukcją obsługi anemometru DT 8893. Następnie wykonują pomiary prędkości i wydajności przepływu przy konfiguracji kanału wentylacyjnego wskazanej przez prowadzącego ćwiczenia. Wyniki pomiarów należy zanotować w tabelach 2-3. Zmierzyć też średnicę wylotową kanału wentylacyjnego.

Tabela 2. Wyniki pomiaru prędkości przepływu (zweźka Nr....., d=..... m)

Lp.	Prędkość obrotowa	Prędkość przepływu						
		w punktach pomiarowych - $v_k$					$v_{sr}$	$v = v_{sr} \pm \sqrt{3}\Delta_{gr}$
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		
obr./min	m/s							
1	180							
2	240							
3	300							
4	360							
5	420							
6	480							
7	540							
8	600							
9	660							
10	720							
11	780							
12	820							
13	900							
14	960							
15	1020							
16	1080							
17	1140							
18	1200							
19	1260							
20	1320							

Wynik pomiaru prędkości zapisujemy w postaci:

$$v = v_{sr} \pm \sqrt{3}\Delta_{gr},$$

gdzie:  $v_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k$  - wartość średnia prędkości przepływu.

Tabela 3. Wyniki pomiaru wydajności przepływu (zweźka Nr....., d=.....m)

Lp.	Prędkość obrotowa	Wydajność przepływu							
		w punktach pomiarowych - $V_k$					Zmie- rzona	Obli- czona	Róż- nica
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	$V_{sr}$	$V_{obl.}$	$\Delta V$
	obr./min	$m^3/min$							
1	180								
2	240								
3	300								
4	360								
5	420								
6	480								
7	540								
8	600								
9	660								
10	720								
11	780								
12	820								
13	900								
14	960								
15	1020								
16	1080								
17	1140								
18	1200								
19	1260								
20	1320								

Oznaczenia w tabeli 3:

$$V_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k - \text{wartość średnia wydajności przepływu};$$

$$V_{obl} = 60 \cdot v_{sr} \cdot \pi d^2 / 4 - \text{obliczona wartość wydajności przepływu (nie mylić prędkości } v \text{ z wydajnością } V!!!);$$

$d$  – średnica kanału wentylacyjnego;

$N=5$  – liczba punktów pomiarowych;

$k$  – kolejny numer punktu pomiarowego ( $k=1,2,3,4,5$ );

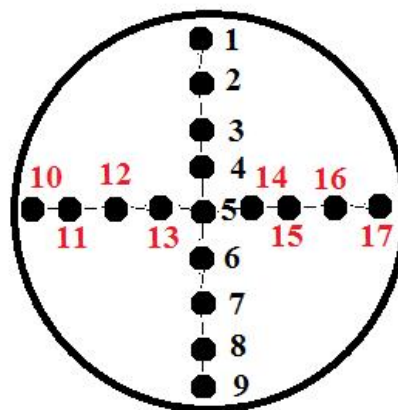
$\Delta V = V_{obl} - V_{sr}$  - różnica w wydajności przepływu powietrza otrzymanej z pomiaru prędkości przepływu i zmierzonej bezpośrednio miernikiem DT 8893.

### *Pomiary prędkości i wydajności przepływu powietrza anemometrem AM 4213.*

Dla konfiguracji kanału wentylacyjnego użytej w poprzednich pomiarach wykonać pomiary anemometrem AM 4213 (rys. 8a) w 17 punktach jak na rysunku 8b dla dwóch prędkości wentylatora wskazanych przez prowadzącego. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 4.



a)



b)

Rys. 8: a) widok anemometru AM 4213; b) rozmieszczenie punktów pomiarowych.

Tabela 4. Wyniki pomiaru rozkładu prędkości przepływu powietrza anemometrem AM4213 (zwężka Nr....., d=.....)

Nr punktu pomiarowego	<b>Prędkość obrotowa</b>					
	..... obr./min			..... obr./min		
	Prędkość przepływu $u$		Wydajność przepływu	Prędkość przepływu	Wydajność przepływu	
	$v_k$	$v_{sr}$	$V_{obl.}$	$v_k$	$v_{sr}$	$V_{obl.}$
1	m/s		$m^3/min$	m/s		$m^3/min$
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						

**W sprawozdaniu należy:**

1. Uzupełnić tabele 2-4 i przeprowadzić analizę uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń.
2. Wykreślić i przeanalizować charakterystyki rozkładu prędkości i wydajności przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych w funkcji prędkości obrotowej wentylatora (wykresy kolumnowe).
3. Wykreślić i przeanalizować rozkłady prędkości w płaszczyźnie pionowej i poziomej uzyskane podczas pomiarów anemometrem AM 4213.

4. Porównać wydajność przepływu uzyskaną za pomocą pomiaru anemometrem DT 8893 i AM 4213.
5. Przedstawić wnioski, jakie nasunęło wykonywane ćwiczenie.

### **3. PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE**

1. Narysuj i omów budowę i zasadę działania anemometrów czasowych.
2. Narysuj i omów budowę i zasadę działania termoanemometrów.
3. Narysuj i omów budowę i zasadę działania anemometrów ultradźwiękowych.
4. Narysuj i omów budowę i zasadę działania anemometrów ciśnieniowych.
5. Omów procedurę i przyczyny błędów pomiaru prędkości przepływu powietrza anemometrem DT 8893.
6. Omów procedurę i przyczyny błędów pomiaru wydajności przepływu powietrza anemometrem DT 8893.
7. Omów procedurę i przyczyny błędów pomiaru wydajności przepływu powietrza anemometrem AM 4213.

### **4. LITERATURA**

1. Matthias A.: *Flow handbook*, Endress+Hauser.
2. Elsner J. W Drobniag S.: *Metrologia przepływów turbulentnych* 1989.
3. Turkowski M. *Przemysłowe sensory i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
4. Michalski A., Tumański S., Żyła B.: *Laboratorium miernictwa wielkości nieelektrycznych*, oficyna wydawnicza Pol. Warszawskiej, W-wa 1999.
5. Ammonit Measurement GmbH: *Witryna internetowa*. <http://www.ammonit.com>, stan z 11.12.2011.
6. [http://www.elmer.krakow.pl/html/body\\_dt\\_8893.html](http://www.elmer.krakow.pl/html/body_dt_8893.html), *Witryna internetowa*. stan z 11.12.2011.

#### **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 wskazanym i 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 stanowisk 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.*