

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI**  
**INSTYTUT MASZYN I URZĄDZEŃ ENERGETYCZNYCH**

**INSTRUKCJA**

do ćwiczeń laboratoryjnych  
z „Metrologii wielkości energetycznych”

**Ćwiczenie M-5**

**Pomiar strumienia masy i objętości – część I**

Opracował: mgr inż. Daniel Węcel  
Sprawdził: dr inż. Jan Około-Kułąk  
Zatwierdził: dr hab. inż. Janusz Kotowicz

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych technik pomiaru strumienia masy powietrza wilgotnego w rurociągach za pomocą: metod zwężkowych i pomiaru prędkości w przekroju kanał.

## 1.

Prawie w każdym procesie technologicznym występuje przepływ jakiejś substancji. Czy to w elektrowni czy w hucie przepływ cieczy lub gazu występuje prawie na każdym kroku. Ilość przepływającej substancji, podobnie jak jej parametry, wpływają na pracę danego zakładu. Należy je oczywiście tak dobrać aby praca była jak najbardziej efektywna, a koszty jak najniższe. Ale żeby je dobrać trzeba znać ich wartości, czyli należy je zmierzyć. I tym właśnie będziecie się zajmować na laboratorium, czyli **pomiarem strumienia objętości lub masy** (inaczej zwanym objętościowym lub masowym natężeniem przepływu) powietrza wilgotnego przepływającego przez rurociąg pomiarowy. W przypadku płynów ściśliwych tzn. gdy gęstość  $\rho = \rho(p, T)$  lepiej posługiwać się pojęciem strumienia masy. Do tego wykorzystacie kilka przyrządów pomiarowych, o których słyszeliście już na wykładzie tj.:

- kryzę ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia,
- klasyczną zwężkę Venturiego,
- termoanemomet,
- rurkę spiętrzającą Prandtla,
- anemometr czasowy.

Niestety obfitość metod i przyrządów pomiarowych stosowanych przy pomiarach strumieni masy i objętości uniemożliwia pełną prezentację materiału zawierającego podstawy teoretyczne poszczególnych metod i przyrządów. Jeśli coś umknęło Twojej uwadze na wykładzie, w tej instrukcji znajdziesz wiele wiadomości teoretycznych oraz sposób wykonywania pomiarów i opracowania wyników.

## 2.

Ćwiczenie niewątpliwie pozwoli zorientować się w wielkości przepływającego powietrza w rurociągu oraz innych parametrów powietrza pozwalających obliczyć strumień objętości lub masy (chodzi głównie o prędkość przepływu oraz spadek ciśnienia na zwężkach). Umożliwi również praktyczne wykorzystanie różnych manometrów, którymi na co dzień nie dokonuje się pomiarów. Ponadto będziesz musiał wykorzystać tablice fizyczne oraz szereg wzorów które można znaleźć np. w polskich normach. Daje to szansę zapoznania się z rzadko używanym na co dzień lecz niezbędnym w pracy inżyniera dokumentem jakim jest norma.

## 3.

Przyrządy do pomiaru strumienia objętości lub masy w rzeczywistości nie mierzą tej wielkości, mierzymy nimi spadki ciśnień lub prędkości które następnie

przeliczamy na strumień. Przyrządy umożliwiające mierzenie strumienia masy i objętości można podzielić na następujące grupy:

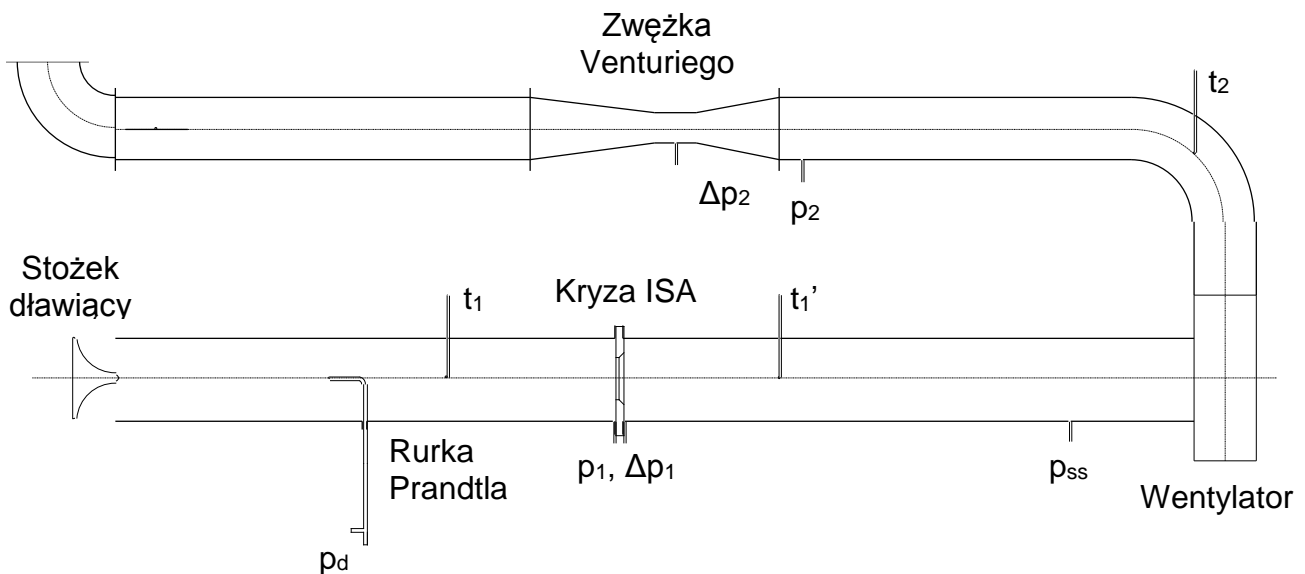
- a. wykorzystujące zjawisko dławienia przepływającej strugi (najliczniejsza i najczęściej spotykana w praktyce):
  - I. zwężki miernicze: kryza, dysza (ISA, Venturiego), klasyczna zwężka Venturiego, kryza segmentowa,
  - II. przepływomierze pływakowe tzw. rotametry (elementy dławiące o stałym spadku ciśnienia),
  - III. danaidy: jednozwężkowa, dwuzwężkowa,
  - IV. przelewy miernicze,
  - V. zwężkowe kanały miernicze.
- b. umożliwiające pomiary prędkości miejscowych:
  - I. rurki spiętrzające: Prandtla, Brabbéego,
  - II. młynki hydrometryczne Otta,
  - III. anemometry: skrzydełkowy, czasowy,
  - IV. termoanemometry,
  - V. katatermometry.
- c. pozostałe:
  - I. przepływomierze elektromagnetyczne (do cieczy przewodzących prąd elektryczny m.in. muły, szlamy, ścieki),
  - II. przepływomierze ultradźwiękowe (mogą być wzorcowane metodą pośrednią tzn. w oparciu o model matematyczny → pomiar prędkości średniej mierzonej po drodze fali ultradźwiękowej umiejscowionej w średnicy).

Powyższe dwa przepływomierze charakteryzują się następującymi zaletami: brak spadku ciśnienia, możliwość instalowania na pełnym rurociągu, niewrażliwość na nierównomierny rozkład prędkości i nieuspokojoną strugę.

W układzie pomiarowym zainstalowano wentylator promieniowy zasysający przewodem ssącym wilgotne powietrze o parametrach  $p_o$ ,  $t_o$ ,  $\varphi_o$  i po sprężeniu odprowadza go przewodem tłoczącym na halę. Przewód ssący i tłoczący są rurociągami stalowymi o przekroju kołowym. Wewnętrzna średnica przewodu ssącego wynosi  $D_s = 494$  mm, natomiast średnica przewodu tłoczącego  $D_t = 400$  mm, maksymalna nierówność powierzchni wewnętrznej rurociągu  $\Delta = 0,2$  mm. Na rurociągu ssącym wentylatora jest zainstalowana kryza ISA z przytarczowym pomiarem spadku ciśnienia. Średnica kryzy  $d_1 = 260,3$  mm, promień zaokrąglenia krawędzi wlotowej kryzy  $r_k = 0,2$  mm. Na rurociągu tłoczącym wentylatora jest zainstalowana klasyczna zwężka Venturiego. Średnica gardzieli zwężki  $d_2 = 200$  mm, na której znajduje się jeden otwór odbioru ciśnienia statycznego. Do kryzy i zwężki podłączone są jednoramienne cieczowe manometry różnicowe zabudowane na tablicy pomiarowej. Składają się one ze szklanej rurki wyskalowanej w [mm] połączonej ze zbiornikiem wypełnionym cieczą manometryczną. Stosunek  $k$  przekroju wewnętrznej rurki manometru do przekroju wewnętrznego zbiornika wynosi:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{4}{80}\right)^2 = 0,0025$$

i stąd można założyć, że poziom cieczy w zbiorniku nie będzie praktycznie ulegał zmianie.



Rys.1 Schemat instalacji pomiarowej

### a) Kryza ISA

Zwężka miernicza jest urządzeniem zmniejszającym pole powierzchni wewnętrznego przekroju rurociągu, tzn. urządzeniem stanowiącym dodatkowy opór dla strugi przepływającego płynu. Przy przepływie przez opór struga zostaje zdławiona i na zwężce mierniczej wystąpi spadek ciśnienia statycznego. Pomiedzy strumieniem masy i spadkiem ciśnienia na zwężce mierniczej występują zależności (dla ustalenia ich należy sporządzić bilans energetyczny przepływającej przez zmniejszony przekrój strugi).

Zakłada się, że jest zachowana ciągłość strugi przepływającego płynu i że jego gęstość w czasie przepływu przez zmniejszony przekrój nie ulega zmianie.

Kryza jest to cienka tarcza z otworem kołowym. Znormalizowane kryzy bywają nazywane: „tarcze cienkie” lub „tarcze z ostrą krawędzią”, ponieważ grubość płytki jest mała w stosunku do średnicy otworu. Krawędź kryzy jest ponadto prostopadła do kierunku przepływu i prostopadła względem samej tarczy.

### b) Klasyczna zwężka Venturiego

Zwężka Venturiego jest to element dławiący, którego powierzchnia wewnętrzna jest złożona ze: zbieżnego wlotu (konfuzor), części walcowej zwanej gardzielią oraz części rozbieżnej stożkowej (dyfuzor) będącej wylotem.

Zwężka Venturiego, której wlot jest znormalizowaną dyszą ISA 1932 nazywana jest dyszą Venturiego, natomiast gdy wlot ma kształt stożkowy nazywana jest klasyczną zwężką Venturiego.

### c) Termoanemometr

Termoanemometr służy do pomiaru miejscowych prędkości przepływającej strugi gazu. Wykorzystuje się w nim zależność oporu cienkiego drutu platynowego, nagrzewanego prądem elektrycznym i chłodzonego przez strugę, od prędkości gazu. Nagrzewany drut jest włączony w układ mostka. Miliwoltomierz podłączony do układu mostkowego wskazuje wartość przeliczoną na prędkość w [m/s]. Przy posługiwaniu się termoanemometrem należy pamiętać o tym, że są one wyskalowane dla pomiaru prędkości pewnego ściśle określonego gazu (opór drutu zależy od jego temperatury, a ta z kolei od prędkości i rodzaju gazu).

#### WYZNACZENIE PUNKTÓW POMIAROWYCH W PRZEKROJU RUROCIĄGU

Posługując się metodą podziału pola powierzchni przekroju rurociągu (przekrój rurociągu płaszczyzną prostopadłą do osi podłużnej) na równe części należy dla podanej przez prowadzącego ćwiczenie liczby „ $n$ ” części podziałowych obliczyć promienie z nieparzystymi indeksami, w przedziale  $1 \leq i \leq 2n$ , ze wzoru:

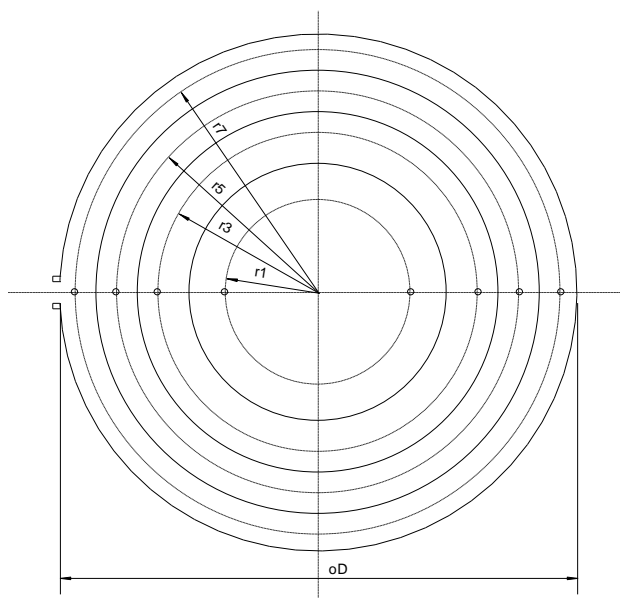
$$r_i = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{i}{2n}} \quad [\text{mm}]$$

gdzie:

$D$  - średnica wewnętrzna rurociągu w którym jest przeprowadzany pomiar [mm]

$n$  - liczba części podziałowych pola powierzchni przekroju

$i$  - wskaźnik promienia



Rys.2 Rozmieszczenie punktów pomiarowych przy pomiarze termoanemometrem

Wyliczone promienie na przecięciu z osią poprzeczną rurociągu wyznaczają punkty w których należy umieszczać czujnik termoanemometru.

## d) Rurka Prandtla

Rurka spiętrzająca Prandtla – określana również jako rurka Pitota-statyczna – zabudowana w strumieniu płynu umożliwia poprawny pomiar miejscowego ciśnienia statycznego ( $p_s$ ), ciśnienia całkowitego ( $p_c$ ) oraz ciśnienia dynamicznego ( $p_d$ ). Odpowiednie podłączenie do manometru pozwala zmierzyć ciśnienie dynamiczne – potrzebne do wyznaczenia prędkości miejscowej przepływającej strugi. Prędkość wyznacza się z poniższej zależności:

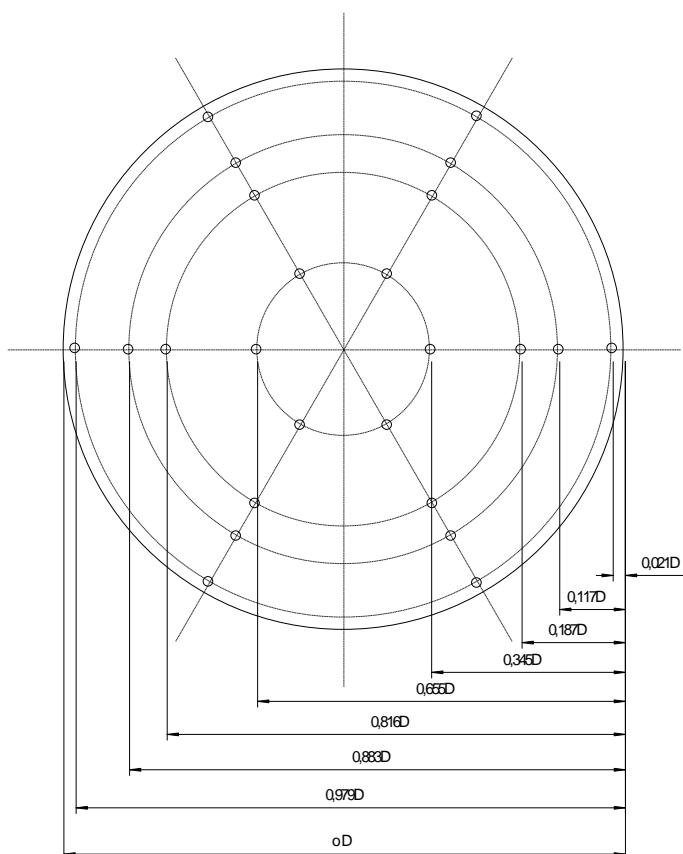
$$p_d = \rho \cdot \frac{w^2}{2}$$

Rurkę spiętrzającą Prandtla należy tak umieszczać w kanale pomiarowym aby głowica rurki była skierowana w stronę przeciwną do przepływającej strugi. Pomiar ciśnienia dynamicznego dokonuje się mikromanometrem cieczowym (alkohol etylowy) z pochyłą rurką jako różnicę ciśnienia całkowitego i ciśnienia statycznego.

$$p_d = p_c - p_s$$

### WYZNACZENIE PUNKTÓW POMIAROWYCH W PRZEKROJU RUROCIĄGU

Punkty pomiarowe zostały dobrane zgodnie z normą ISO 5801: 1997

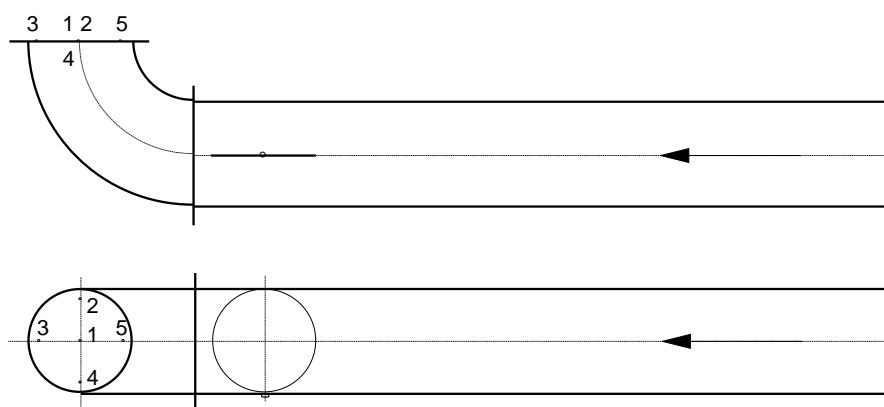


Rys.3 Rozmieszczenie punktów pomiarowych przy pomiarze rurką Prandtla

### e) Anemometr skrzydełkowy (czasowy)

Anemometry (wiatromierze) są to urządzenia służące do pomiaru miejscowych prędkości gazów. Anemometr **skrzydełkowy** składa się z następujących elementów: wirnika skrzydełkowego o osi obrotu równoległej do przepływającej strugi, obudowy osłaniającej i utrzymującej wirnik, termometru oraz układu elektronicznego mierzącego i przeliczającego prędkość i temperaturę. Ze względu na swą budowę można nimi mierzyć prędkości od 0,3 m/s do 30 m/s. Rozdzielczość takich mierników jest rzędu 0,01 m/s, a dokładność  $\pm 3\%$ . Elektroniczny układ pomiarowy umożliwia rejestrowanie wartości maksymalnej, minimalnej i średniej temperatury oraz prędkości strugi powietrza. Dodatkowo ma możliwość wykonywania i rejestracji serii pomiarów z wyznaczeniem wartości średniej. Próbkowanie sygnałów pomiarowych zwykle odbywa się raz na sekundę, a podstawa czasu do obliczania wartości średniej może wynosić 2 lub 16 sekund.

Anemometr **czasowy** składa się z: wirnika czasowego (z trzema ramionami) o osi obrotu prostopadłej do przepływającej strugi, licznika drogi strumienia oraz uchwytu. Ze względu na swą budowę można nim mierzyć prędkości powietrza w zakresie  $3 \div 50$  m/s. Pomiar tym anemometrem polega na określeniu ilości obrotów wirnika przypadających na jednostkę czasu, przy czym ilość obrotów wirnika jest od razu przekładana na drogę strumienia (licznik jest wyskalowany w [m] ).



Rys.4 Rozmieszczenie punktów pomiarowych na wylocie z rurociągu dla pomiaru anemometrem

#### 4.

### I POMIAR – Kryza ISA

Wielkościami mierzonymi będą: parametry otoczenia:  $p_{ot}$ ,  $t_{ot}$ ,  $\varphi_{ot}$ , ciśnienie statyczne przed kryzą  $h_1$ , spadek ciśnienia na kryzie  $\Delta h_1$  oraz temperaturę w rurociągu  $t_1$ .

#### **Pomiar ciśnienia otoczenia**

Ciśnienie otoczenia należy mierzyć barometrem (rtęciowym). Suwak wskaźnika skali barometru ustawić w ten sposób, aby dolne krawędzie wskaźnika znalazły się na wysokości górnego punktu menisku rtęci. Ciśnienie otoczenia obliczać ze wzoru:

$$p_{ot} = l_t \cdot \rho_o [1 - \beta_o \cdot t_{ot}] \cdot 9,81 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$l_t$  - odczyt na barometrze przy temperaturze otoczenia [mm]

$\rho_o = 13,595 \left[ \frac{kg}{dm^3} \right]$  - gęstość rtęci w temperaturze 0 °C

$\beta_o = 0,00018 [^{\circ}C^{-1}]$  – współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci

#### **Pomiar temperatury otoczenia**

Temperaturę otoczenia  $t_{ot}$  [°C] należy odczytać na termometrze umieszczonym w pobliżu barometru.

#### **Pomiar wilgotności względnej**

Wilgotność względną powietrza  $\varphi_{ot}$  [%] należy zmierzyć higrometrem włosowym znajdującym się w Hali Maszyn Ciepłych.

Ciśnienie otoczenia wystarczy zmierzyć raz w czasie pomiarów. Jest to wielkość której wartość zmienia się bardzo wolno i zmiany w krótkim przedziale czasu są niezauważalne na barometrze rtęciowym.

Wilgotność powietrza również nie zmienia się zbyt szybko więc wystarczy jeden pomiar.

Tabla 1. WYNIKI POMIARÓW

$l_t$ [mm]	$t_{ot}$ [°C]	$\varphi_{ot}$ [%]

Uwaga:

Wartości wysokości cieczy manometrycznej z indeksem ( )<sub>o</sub> należy odczytać przed wykonaniem pomiarów (przed uruchomieniem wentylatora).



## Pomiar strumienia powietrza wilgotnego

Tabla 2. WYNIKI POMIARÓW

Lp.	Ciśnienie statyczne pow. przed kryzą [mm]		Spadek ciśnienia na kryzie [mm]		Temperatura powietrza w rurociągu [°C]
	$h_o$	$h_l$	$\Delta h_o$	$\Delta h_l$	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
średnia					

Odczytu wskazań manometrów należy dokonywać co 2 minuty.

### OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARU

Wszystkie ciśnienia mierzone manometrami różnicowymi należy przeliczać korzystając z poniższego wzoru:

$$p = (h - h_o) \cdot \rho_c \cdot 9,81 \text{ [Pa]}$$

gdzie:

$h_o$  - wskazanie manometru różnicowego przed uruchomieniem wentylatora (wartość początkowa)

$h$  - wskazanie manometru różnicowego w czasie pomiaru

$\rho_c = 0,835 \text{ kg/dm}^3$  - gęstość cieczy manometrycznej (alkohol etylowy)

#### Ciśnienie bezwzględne przed kryzą

$$p_1 = p_{ot} - p_{m1} \text{ [Pa]}$$

$p_{m1}$  - ciśnienie manometryczne gazu przed kryzą ISA (zmierzone)

#### Gęstości gazu wilgotnego $\rho_1$

$$\rho_1 = \rho_g + \rho_p$$

Gęstość gazu suchego  $\rho_g$  należy obliczyć w/g wzoru:

$$\rho_g = \rho_n \frac{(p_1 - \varphi \cdot p_p) T_n}{p_n \cdot T_1}$$

gdzie:

$$p_n = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_n = 273 \text{ K}$$

Pamiętaj, że skala na manometrze jest w milimetrach, a wartości do wzoru należy podstawić w metrach

Kryza znajduje się w rurociągu ssącym więc masz do czynienia z podciśnieniem jako ciśnieniem bezwzględnym.

Przy odczytywaniu wszelkich wartości z tablic czy wykresu zwróć uwagę na podawane

$\rho_n$  - gęstość gazu suchego w parametrach normalnych  $p_n, T_n$   
 $p_l$  - ciśnienie statyczne gazu przed kryzą  
 $p_p$  - ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze  $t_l$  (tablica fizyczna lub wykres IS)  
 $t_l$  - temperatura gazu w rurociągu pomiarowym

Gęstość pary wodnej zawartej w gazie

$$\rho_p = \varphi \cdot \rho''$$

$\rho''$  - gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze  $t_l$  (tablica fizyczna)

Obliczenia w/g PN-93/M-53950/01

### **Współczynnik przepływu $C$ dla przytarczowego odbioru ciśnienia**

$$C_1 = 0,5959 + 0,0312\beta_1^{2,1} - 0,1840\beta_1^8 + 0,0029\beta_1^{2,5} \cdot \left[ \frac{10^6}{Re_D} \right]^{0,75}$$

$Re_D$  - liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy wewnętrznej rurociągu

$$Re_D = \frac{w \cdot D_s}{\nu}$$

$w$  - prędkość przepływu powietrza

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$  - współczynnik lepkości kinematycznej

### **Liczba ekspansji (ścisliwości) $\varepsilon_1$**

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35\beta_1^4) \frac{\Delta p_1}{\chi \cdot p_1}$$

$\chi$  - wykładnik izentropy (dobrać z tablic dla powietrza)

Wzór ten można stosować jedynie w przypadku spełnienia

warunku  $\frac{p_2}{p_1} \geq 0,75$

### **Obliczenie strumienia powietrza wilgotnego:**

Spadek ciśnienia na kryzie

$$\Delta p_1 = (\Delta h_1 - \Delta h_o) \cdot \rho_c \cdot 9,81 \text{ [Pa]}$$

$q_m (q_v)$  - strumień masy (objętości)

$$q_m = \frac{C_1}{\sqrt{1 - \beta_1^4}} \cdot \varepsilon_1 \frac{\Pi}{4} d_1^2 \cdot \sqrt{2\Delta p_1 \cdot \rho_1} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

gdzie:

jednostki. Sprawdź czy wartość obliczonej gęstości ma ten sam rząd wielkości co gęstość w warunkach normalnych.

Wartość liczby Reynoldsa należy założyć, a następnie po obliczeniu strumienia objętości sprawdź czy założenie było słuszne. Jeśli nie skoryguj wartość liczby Re i powtórz obliczenia.

Liczba ekspansji uwzględnia poprawkę wynikającą z założenia, że gęstość powietrza jest taka sama przed jak i za kryzą.

$C_I$  - współczynnik przepływu

$\beta_1$  - przewężenie kryzy pomiarowej  $\beta_1 = \frac{d_1}{D_s}$

$\varepsilon_1$  - liczba ekspansji (ściśliwości - koryguje błędy spowodowane przez przyjęcie stałej objętości właściwej płynu, zależy od wymiarów i rodzaju zwężki)

$\rho_1$  - gęstość gazu  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$d_1$  - średnica otworu kryzy [m]

$D_s$  - średnica otworu wewnętrznego rurociągu ssawnego [m]

#### OGRANICZENIA STOSOWANIA METODY

$$15,5 \leq d$$

$$50 \leq D \leq 1000$$

$$0,2 \leq \beta \leq 0,45$$

$$5000 \leq \text{Re}_D \text{ dla } \beta \text{ jak wyżej}$$

$$10000 \leq \text{Re}_D \text{ dla } \beta > 0,45$$

Wartości  $D$  oraz  $d$  podane są w [mm].

Podane ograniczenia są spełnione w tym przypadku. Dają pogląd w jakich przypadkach można stosować powyższą metodę.

## II POMIAR – Klasyczna zwężka Venturiego

Wielkościami mierzonymi będą: parametry otoczenia  $p_{ot}$ ,  $t_{ot}$ ,  $\varphi_{ot}$ , ciśnienie statyczne w rurociągu ssącym  $h_{ss}$ , przyrost ciśnienia w wentylatorze  $\Delta h_s$ , spadek ciśnienia na zwężce Venturiego  $\Delta h_2$  oraz temperaturę za wentylatorem  $t_2$ .

**Pomiarów dokonuje się w identyczny sposób jak przy pomiarze kryzą ISA**

Tabla 3. WYNIKI POMIARÓW

$l_t$ [mm]	$t_{ot}$ [°C]	$\varphi_{ot}$ [%]

## ***Pomiar strumienia powietrza wilgotnego***

Tabla 4. WYNIKI POMIARÓW

Lp.	Ciśnienie statyczne (manometryczne) w rurociągu ssącym [mm]		Przyrost ciśnienia w wentylatorze [mm]		Spadek ciśnienia na zwężce [mm]		Temp. powietrza [°C]
	$h_{SSO}$	$h_{SS}$	$\Delta h_{SO}$	$\Delta h_S$	$\Delta h_o$	$\Delta h_2$	
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
średnia							

Odczytu wskazań manometrów należy dokonywać co 2 minuty.

### OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARU

#### ***Ciśnienie bezwzględne przed zwężką Venturiego***

$$p_2 = \Delta p_s + p_{ss} \text{ [Pa]}$$

$p_{ss}$ - ciśnienie bezwzględne gazu przed wentylatorem (w rurociągu ssącym)

$\Delta p_s$  - przyrost ciśnienia w wentylatorze

#### ***Obliczenie gęstości gazu wilgotnego $\rho_2$***

$$\rho_2 = \rho_g + \rho_p$$

Gęstość gazu suchego  $\rho_g$  należy obliczyć w/g wzoru:

$$p_n = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_g = \rho_n \frac{(p_2 - \varphi \cdot p_p) T_n}{p_n \cdot T_2}$$

$$T_n = 273 \text{ K}$$

gdzie:

$\rho_n$  - gęstość gazu suchego w parametrach normalnych  $p_n, T_n$

$p_2$  - ciśnienie statyczne gazu przed zwężką Venturiego

$p_p$  - ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze  $t_2$  (tablica fizyczna)

$t_2$  - temperatura gazu w rurociągu pomiarowym

Zmierzona wysokość  $h_{ss}$  odwzorowuje podciśnienie (ciśnienie manometryczne).

Zwężka Venturiego znajduje się w rurociągu tłoczącym więc masz do czynienia z nadciśnieniem.

Przy odczytywaniu wszelkich wartości z tablic czy wykresu zwróć uwagę na podawane jednostki. Sprawdź czy wartość obliczonej gęstości ma ten sam rząd wielkości co gęstość w warunkach normalnych.

Gęstość pary wodnej zawartej w gazie

$$\rho_p = \varphi \cdot \rho''$$

$\rho''$  - gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze  $t_2$  (tablica fizyczna)

Obliczenia w/g PN-93/M-53950/01

**Współczynnik przepływu  $C_2$**

$$C_2 = 0,985$$

**Liczba ekspansji  $\varepsilon_2$**

Wartość  $\varepsilon_2$  należy odczytać z tablic zamieszczonych w normie PN-93/M-53950/01.

**Obliczenie strumienia powietrza wilgotnego:**

Spadek ciśnienia na zwężce

$$\Delta p_2 = (\Delta h_2 - \Delta h_o) \cdot \rho_c \cdot 9,81 \text{ [Pa]}$$

$q_m$  ( $q_v$ ) - strumień masy (objętości)

$$q_m = \frac{C_2}{\sqrt{1 - \beta_2^4}} \cdot \varepsilon_2 \frac{\Pi}{4} d_2^2 \cdot \sqrt{2\Delta p_2 \cdot \rho_2} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

gdzie:

$C_2$  - współczynnik przepływu

$\beta_2$  - przewężenie zwężki Venturiego  $\beta_2 = \frac{d_2}{D_t}$

$\varepsilon_2$  - liczba ekspansji

$\rho_2$  - gęstość gazu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$d_2$  - średnica gardzieli zwężki Venturiego [m]

$D_t$  - średnica otworu wewnętrznego rurociągu tłoczego [m]

#### OGRANICZENIA STOSOWANIA METODY

$$200 \leq D \leq 1200$$

$$0,4 \leq \beta \leq 0,7$$

$$2 \cdot 10^5 \leq \text{Re}_D \leq 2 \cdot 10^6$$

Wartości  $D$  oraz  $d$  podane są w [mm].

Liczba ekspansji uwzględnia poprawkę wynikającą z założenia, że gęstość powietrza jest taka sama przed jak i w najwęższym miejscu zwężki.

Podane ograniczenia są spełnione w tym przypadku. Dają pogląd w jakich przypadkach można stosować powyższą metodę.

### III POMIAR – Termoanemometr

Pomiarów prędkości strumienia gazu dokonujemy w wyznaczonych punktach przekroju rurociągu (ze względu na budowę rurociągu pomiar wykonuje się wzdłuż jednej średnicy). Pomiar należy powtórzyć trzykrotnie.

Tabla 5. WYNIKI POMIARÓW

Lp.	Prędkości w rurociągu $w_i$ [m/s]							
	$r_{2n-1}$	...	...	$r_1$	$r'_1$	...	...	$r'_{2n-1}$
1.								
2.								
3.								
średnia								

$r$  - promienie oznaczające punkty pomiarowe bliższe otworu w ścianie rurociągu

$r'$  - promienie oznaczające punkty pomiarowe za osią podłużną rurociągu

#### OBLICZENIA

##### *Prędkość średnia strugi powietrza*

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^{2n} w_i}{2n} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

##### *Strumień masy powietrza*

$$q_m = A \cdot \bar{w} \cdot \rho_1 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

W tym przypadku liczbę punktów pomiarowych można przyjąć równą 4 na jednym promieniu.

### IV POMIAR – Rurka Prandtla

Pomiarów ciśnienia dynamicznego dokonujemy w określonych punktach przekroju rurociągu. Pomiar należy powtórzyć trzykrotnie.

##### *Pomiar prędkości przepływającego powietrza w rurociągu*

Tabla 6. WYNIKI POMIARÓW

Lp.	Ciśnienia dynamiczne w rurociągu $l_{di}$ [mm]									Temp. pow. w rurociągu
	$l_o$	Miejsce pomiaru								
		0,021D	0,117D	0,184D	0,345D	0,655D	0,816D	0,883D	0,979D	
1.										
2.										
3.										
średnia										

$l_o$  – wartość wskazywana przez mikromanometr przed uruchomieniem wentylatora (stan zerowy)

## OBLICZENIA

### *Ciśnienie dynamiczne w punktach pomiarowych*

$$p_{di} = c \cdot (l_{di} - l_o) \cdot \rho_c \cdot 9,81 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$c$  – przełożenie mikromanometru

### *Średnie ciśnienie dynamiczne w przekroju*

$$\bar{p}_d = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{di}^{0,5} \right]^2$$

### *Prędkość średnia strugi powietrza*

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{2}{\rho_1} \cdot \bar{p}_d} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### *Strumień masy powietrza*

$$q_m = A \cdot \bar{w} \cdot \rho_1 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Odległości od rurociągu w których zlokalizowane są punkty pomiaru  $p_d$  są zaznaczone na rurce Prandtla

Gęstość powietrza przyjmij taką samą jak przy obliczeniach dla kryzy ISA.

## V POMIAR – Anemometr czasowy

Liczniki anemometru przed wykonaniem pomiarów należy wyzerować. Wykonać serię pięciu pomiarów prędkości miejscowych na wylocie z rurociągu (w środku rurociągu [1], na osiach poprzecznych możliwie najbliżej wewnętrznej ścianki rurociągu [2], [3], [4], [5]). Po umieszczeniu anemometru w miejscu pomiarowym równocześnie włączyć licznik anemometru oraz uruchomić stoper. Po ustalonym z góry czasie odczytać wskazanie licznika. Jednocześnie odczytywać temperaturę na termometrze za wentylatorem.

### *Pomiar prędkości przepływającego powietrza na wylocie z rurociągu*

Tabla 7. WYNIKI POMIARÓW

Numery punktów pomiarowych	Pomiary	Wskazanie licznika anemometru $\Delta l$ [m]	Wskazanie stopera $\Delta \tau$ [s]	Temperatura powietrza w rurociągu $t$ [°C]
1	I II III			
2	I II III			
3	I II III			
4	I II III			
5	I II III			
Średnia				

## OBLICZENIA

### *Prędkości w określonych miejscach pomiarowych*

$$w = \frac{\Delta l}{\Delta \tau} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$\Delta l$  – wskazanie licznika anemometru [m]

$\Delta \tau$  – wskazanie stopera [s]

### *Prędkość średnia*

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i}{5} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### *Strumień masy*

$$q_m = A \cdot \bar{w} \cdot \rho_o \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

A - pole przekroju poprzecznego (miejsca umieszczenia anemometru)

Ze względu na brak wykresu wskazań anemometru nie koryguj pomierzonych wartości.

Jako średnicę kanału wylotowego możesz przyjąć średnicę rurociągu tłocznego.

Pomiary wykonywano na wylocie z rurociągu gdzie można przyjąć, że gęstość odpowiada parametrom otoczenia.

## VI POMIAR – Anemometr skrzydełkowy

Liczniki anemometru przed wykonaniem pomiarów należy wyzerować. Wykonać serię pomiarów prędkości miejscowych na wylocie z rurociągu w pięciu punktach pomiarowych (w środku rurociągu, na osiach poprzecznych możliwie najbliżej wewnętrznej ścianki rurociągu Rys. 4). Po umieszczeniu anemometru w miejscu



pomiarowym, należy odczekać aż do ustalenia wartości na wyświetlaczu anemometru. Zatrzymać pomiar poprzez naciśnięcie przycisku **HOLD** i zapamiętać wyniku poprzez naciśnięcie przycisku **MIN/MAX**. Powtórzyć procedurę w każdym z 5 punktów pomiarowych, a następnie uśrednić wynik z tych punktów poprzez naciśnięcie przycisku **MULTI AVER**. Wszystkie wyniki zapisywać w tabeli 7. Temperaturę odczytywać z wyświetlacza anemometru, jednokrotnie dla każdej serii pomiarowej. Pomiar powtórzyć trzykrotnie.

***Pomiar prędkości przepływającego powietrza na wylocie z rurociągu***

Tabla 8. WYNIKI POMIARÓW

Serie pomiarowe <i>n</i>	Numery punktów pomiarowych	Wskazanie wyświetlacza anemometru <i>w<sub>i</sub> [m/s]</i>	Średnia z serii pomiarowej	Temperatura powietrza w rurociągu <i>t [°C]</i>
I	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
II	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
III	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
Średnia				

**OBLICZENIA**

***Prędkość średnia w poszczególnych seriach pomiarowych***

$$\overline{w_n} = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i}{5} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

*n* – numer kolejnej serii pomiarowej

### ***Prędkość średnia***

$$\bar{w} = \frac{\sum_{n=1}^N w_n}{N} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

N – ilość serii pomiarowych

### ***Strumień masy***

$$q_m = A \cdot \bar{w} \cdot \rho_o \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

A - pole przekroju poprzecznego (miejsca umieszczenia anemometru)

Jako średnicę kanału wylotowego należy przyjąć średnicę rurociągu tłoczego.

Pomiary wykonywano na wylocie z rurociągu gdzie można przyjąć, że gęstość odpowiada parametrom otoczenia.

## **5.**

Każdy pomiar i następujące po nim obliczenia muszą zostać sprawdzone. Po wykonaniu pomiarów należałoby przeprowadzić analizę niepewności. W Twoim przypadku też powinieneś sprawdzić obliczone wielkości: pod względem jednostki jak i otrzymanej wartości. Ostatnim elementem sprawdzającym będzie policzenie niepewności pomiaru, obrazujących jakość poszczególnych metod pomiarowych.

### **WYKAZ LITERATURY**

1. Praca zbiorowa pod redakcją Cz. Graczyka: *Laboratorium miernictwa cieplnego*, Skrypty uczelniane Nr 801, Politechnika Śląska, Gliwice 1981.
2. Polska norma PN-93/M-53950/01, *Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynów za pomocą zwężek pomiarowych*.
3. Praca zbiorowa: *Pomiary cieplne*, WNT, Warszawa 1993.
4. E.Romer: *Miernictwo przemysłowe*, PWN W-wa 1978
5. Sydenham H.: *Podręcznik metrologii cz.I i II*, Wyd. Komunikacji i Łączności, W-wa 1988