

Silesian University Of Technology
Faculty of Power and Environmental Engineering
Institute of Power Engineering and Turbomachinery

Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska I Energetyki
Instytut Maszyn I Urządzeń Energetycznych

Measurement of fluid flow – part I

Pomiar strumienia masy i objętości – część I

Metrology laboratory
Laboratorium miernictwa

(M-V)

Developed by: PhD Daniel Węcel
Verified by: PhD Jan Około-Kułak
Approved by: Prof. DSc. Janusz Kotowicz

1. PURPOSE OF EXERCISE / CEL ĆWICZENIA

The purpose of the exercise is to learn the basic techniques for measuring the mass flow of humid air in pipelines by: differential pressure devices and speed measurement in cross section of the channel.

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

2. THEORETICAL INTRODUCTION / WPROWADZENIE TEORETYCZNE

In almost every technological process is the flow of a substance. In power station or in the steelworks, flow of liquid or gas occurs at almost everywhere. Amount of flowing substance, like its parameters, impact on operation of an industrial plant. They should, of course, be chosen, that work will be as effective as possible, and the costs as low as possible. But to get them to choose, you need to know their value, which should be measured.

//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.

At the laboratory, we will measure **volume or mass flow rate** of humid air flowing through the measuring pipeline. In the case of compressible fluids, i.e. when the density $\rho = f(p, T)$, it is better use the term mass flow rate. For this measure you use some measuring instruments, i.e.:

- ISA orifice with corner taps,
- classical Venturi tube,
- thermoanemometer (hot-wire anemometer),
- Pitot-static (Prandtl) tube,
- turbine (bowl's) anemometer.

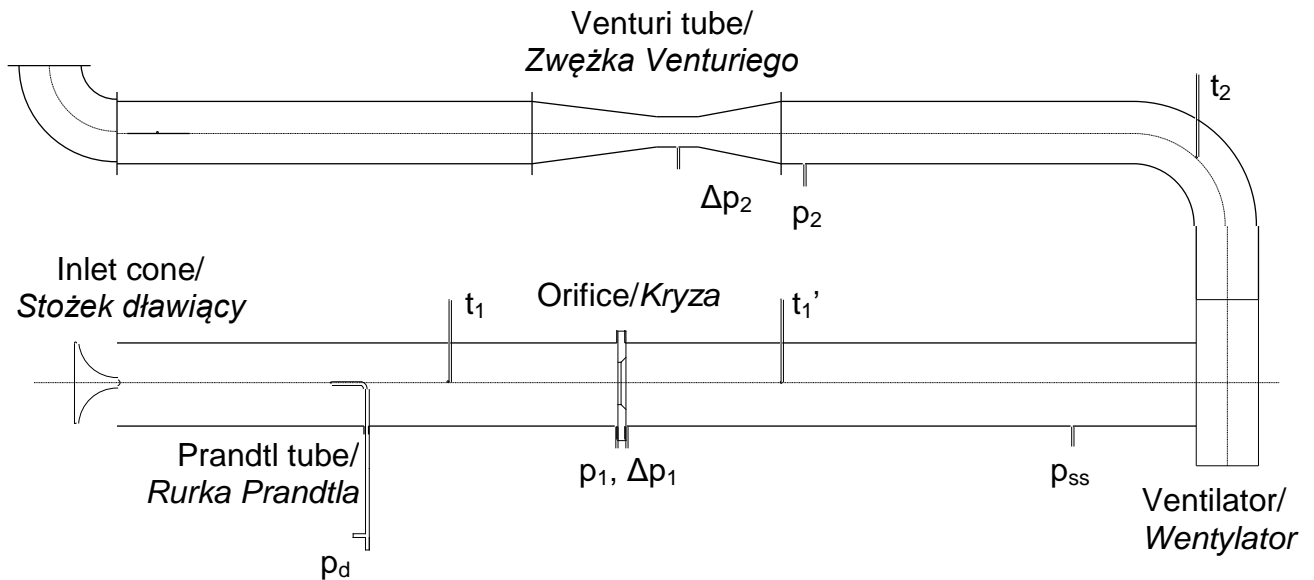
*//I tym właśnie będziecie się zajmować na laboratorium, czyli **pomiarem strumienia objętości lub masy** (inaczej zwanym objętościowym lub masowym natężeniem przepływu) powietrza wilgotnego przepływającego przez rurociąg pomiarowy. W przypadku płynów ściśliwych tzn. gdy gęstość $\rho = \rho(p, T)$ lepiej posługiwać się pojęciem strumienia masy. Do tego wykorzystacie kilka przyrządów pomiarowych, o których słyszeliście już na wykładzie tj.:*

- kryżę ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia,

- klasyczną zwężkę Venturiego,
- termoanemomet,
- rurkę spiętrzającą Prandtla,
- anemometr czasowy.

Unfortunately, the abundance of methods and measuring instruments used for measuring the mass and volume flow, does not allow a full presentation of the material containing the theoretical basis of the various methods and instruments. In this instruction you will find a lot of theoretical knowledge and the measurement procedure and method of results analysis.

//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.



ig.1 Diagram of the measuring system

//Rys. 1 Schemat instalacji pomiarowej

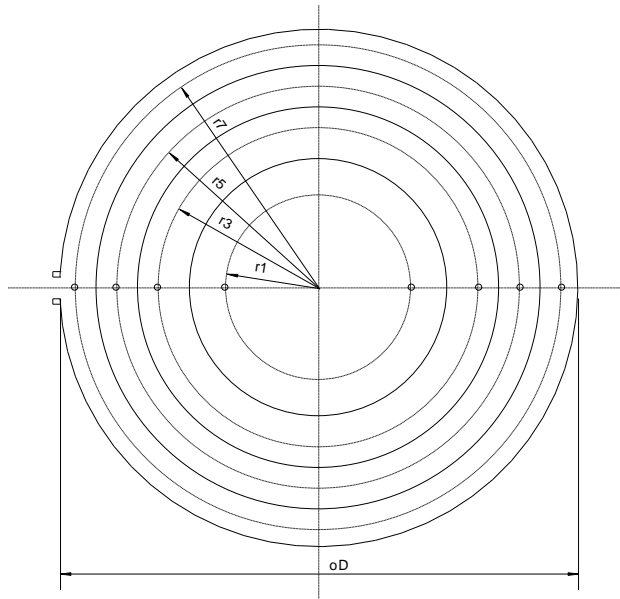


Fig.2 Location of measurement points for hot-wire anemometer measurement
 //Rys.2 Rozmieszczenie punktów pomiarowych przy pomiarze termoanemometrem

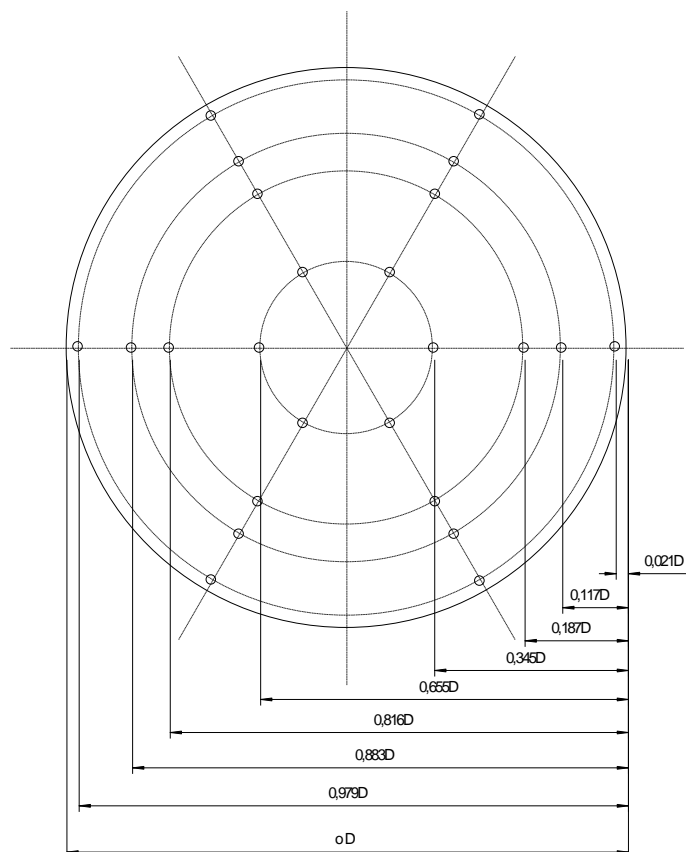


Fig.3 Location of measurement points for Pitot-static (Prandtl) tube measurement
 //Rys.3 Rozmieszczenie punktów pomiarowych przy pomiarze rurką Prandtla

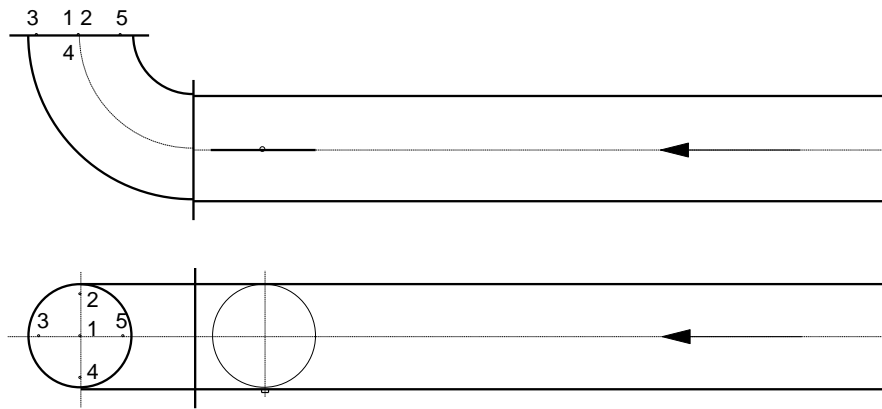


Fig.4 Location of measurement points at the outlet of the pipeline for anemometer measurement

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

3.

I – ISA orifice / Kryza ISA

Measured quantities will be: ambient parameters: p_{ot} , t_{ot} , φ_{ot} , static pressure before the orifice h_1 , pressure drop across the orifice Δh_1 and the temperature t_1 in the pipeline.

//Wielkościami mierzonymi będą: parametry otoczenia: p_{ot} , t_{ot} , φ_{ot} , ciśnienie statyczne przed kryzą h_1 , spadek ciśnienia na kryzie Δh_1 oraz temperaturę w rurociągu t_1 .

Measurement of ambient pressure / Pomiar ciśnienia otoczenia

The ambient pressure should be measured using a barometer (mercury). Barometer slider scale indicator set so that the lower edges of the indicator were at the upper point of the meniscus mercury. Ambient pressure calculated from the formula:

//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 [mm] - barometer's mercury level at ambient temperature / odczyt na barometrze przy temperaturze otoczenia

$\rho_o = 13,595 \left[\frac{kg}{dm^3} \right]$ - density of mercury at 0 °C / gęstość rtęci

w temperaturze 0°C

$\beta_o = 0,00018 [^{\circ}C^{-1}]$ – volume expansion coefficient of mercury / współczynnik rozszerzalności objętościowej rtęci

Measurement of ambient temperature / Pomiar temperatury otoczenia

Ambient temperature t_{ot} [°C] should be read on the thermometer placed near the barometer.

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

Ambient pressure p_{ot} is measure once during the measurement time. This is the quantity that varies very slowly and changes in a short period of time are unnoticeable on a mercury barometer.

//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.

Air humidity also does not change very quickly so you just make one measurement.

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

Measurement of relative humidity / Pomiar wilgotności względnej

The relative humidity of the air φ_{ot} [%] should be measure by hair hygrometer located in the Hall of Thermal Machinery (HMC).

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

Table 1. MEASUREMENT RESULTS / WYNIKI POMIARÓW

l_t [mm]	t_{ot} [°C]	φ_{ot} [%]

Note:

The values of the manometric liquid level with index ()_o must be read before taking measurements (before starting the fan).

//Uwaga:

Wartości wysokości cieczy manometrycznej z indeksem ()_o należy odczytać przed wykonaniem pomiarów (przed uruchomieniem wentylatora).

Flow measurement of humid air / Pomiar strumienia powietrza wilgotnego

Table 2. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

No./Lp.	Air static pressure before the orifice plate/ Ciśnienie statyczne pow. przed kryzą [mm]		Differential pressure/ Spadek ciśnienia na kryzie [mm]		Air temperature in the pipeline/ Temperatura powietrza w rurociągu [°C]
	h_o	h_l	Δh_o	Δh_l	t_l
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
Average/ średnia					

Pressure measurements should be made every 2 minutes / Odczytu wskazań manometrów należy dokonywać co 2 minuty.

COMPILATION OF THE MEASUREMENT RESULTS/
OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARU

All pressures measured by single arm manometers must be converted using the following formula/ *Wszystkie ciśnienia mierzone manometrami różnicowymi należy przeliczać korzystając z poniższego wzoru:*

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

where:

h_o – value of the single arm manometer before starting the fan (initial value)

h – value of the single arm manometer during measurement

$\rho_c = 0,835 \text{ kg/dm}^3$ - manometric liquid density (ethyl alcohol)

// 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)

Absolute pressure before the orifice plate/ Ciśnienie bezwzględne przed kryzą

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

p_{ml} - manometric pressure of air before the orifice plate (measured)

// p_{ml} - ciśnienie manometryczne gazu przed kryzą ISA (zmierzone)

Density of humid air ρ_1 / Gęstości gazu wilgotnego ρ_1

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

The density of dry gas ρ_g should be calculated according to the formula/ *Gęstość gazu suchego ρ_g należy obliczyć w/g wzoru:*

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

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

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

where:

ρ_n – density of dry gas at normal conditions p_n, T_n

p_1 – gas static pressure before the orifice plate

p_p – pressure of saturated steam at a temperature t_1 (from physical table or h-s chart)

t_1 – gas temperature in the pipeline

Note that the scale on the manometer is in millimeters, and values into the formula must substitute in meters/ *Pamiętaj, że skala na manometrze jest w milimetrach, a wartości do wzoru należy podstawić w metrach.*

Orifice is in the suction pipeline so there is underpressure (as absolute pressure)/ *Kryza znajduje się w rurociągu ssącym więc masz do czynienia z podciśnieniem jako ciśnieniem bezwzględnym.*

When reading any values from tables or a graph pay attention to the given units. Check whether the value of the calculated density is the same order of magnitude as the density under normal conditions/ *Przy odczytywaniu wszelkich wartości z tablic czy wykresu*

// gdzie:

ρ_n - gęstość gazu suchego w parametrach normalnych p_n, T_n

p_1 - ciśnienie statyczne gazu przed kryzą

p_p - ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze t_1 (tablica fizyczna lub wykres IS)

t_1 - temperatura gazu w rurociągu pomiarowym

The density of water vapor in the gas/ Gęstość pary wodnej zawartej w gazie

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

ρ'' - density of saturated steam at a temperature t_1 (from physical table)/ gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze t_1 (tablica fizyczna)

Calculation according to PN-93/M-53950/01

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

Discharge coefficient C_1 with corner taps / Wsółczynnik przepływu C dla przystawczego 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 - Reynolds number referenced to internal pipeline diameter/ liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy wewnętrznej rurociągu

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

\bar{w} - air flow velocity/ prędkość przepływu powietrza

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] - kinematic viscosity coefficient/ współczynnik lepkości kinematycznej

Expansion coefficient (compressibility) ε_1 / Liczba ekspansji (ścislności) ε_1

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

χ - isentropic exponent (choose from the array of air)/ wykładnik izentropy (dobrać z tablic dla powietrza)

This formula can be used only if the condition/ Wzór ten można

stosować jedynie w przypadku spełnienia warunku $\frac{p_1 + \Delta p_1}{p_1} \geq 0,75$

Humid air flow rate calculation/ Obliczenie strumienia powietrza wilgotnego:

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

Reynolds number should be assumed, and then, after the calculation of the flow rate, check that assumption was correct. If not, correct the value of Re and repeat the calculation/ 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.

Expansion coefficient takes into account a correction, resulting from the assumption that the air density is the same before and behind the orifice/ Liczba ekspansji uwzględnia poprawkę

Differential pressure across an orifice plate/ *Spadek ciśnienia na kryzcie*

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

q_m (q_v) - mass (volume) flow rate / *strumień masy (objętości)*

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

where:

C_1 - discharge coefficient

β_1 - diameter ratio of orifice diameter to pipe diameter $\beta_1 = \frac{d_1}{D_s}$

ε_1 - expansion coefficient (compressibility - it corrects errors caused by assuming constant specific volume of fluid; depends on the size and type of orifice)

ρ_1 - gas density $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

$d_1 = 260,3 \text{ mm}$ - internal orifice diameter [m]

$D_s = 494 \text{ mm}$ - internal suction pipe diameter [m]

// gdzie:

C_1 - *współczynnik przepływu*

β_1 - *przewężenie kryzy pomiarowej* $\beta_1 = \frac{d_1}{D_s}$

ε_1 - *liczba ekspansji (ściśliwości - koryguje błędy spowodowane przez przyjęcie stałej objętości właściwej płynu, zależy od wymiarów i rodzaju zwężki)*

ρ_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]

LIMITATIONS FOR ORIFICE PLATES/ OGRANICZENIA STOSOWANIA METODY

$$15,5 \leq d$$

$$50 \leq D \leq 1000$$

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

$$5000 \leq Re_D \text{ for } \beta \text{ as above}$$

$$10000 \leq Re_D \text{ for } \beta > 0,45$$

Values D and d are given in [mm]/ *Wartości D oraz d podane są w [mm].*

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

In this case given limitation are fulfilled. They give a view in which cases the above method can be used/ *Podane ograniczenia są spełnione w tym przypadku. Dają pogląd w jakich przypadkach można stosować powyższą metodę.*

II – Classical Venturi tube / Klasyczna zwężka Venturiego

Measured quantities will be: ambient parameters: p_{ot} , t_{ot} , φ_{ot} , static pressure in suction pipeline h_{ss} , pressure increase in the fan Δh_s , pressure drop across the Venturi tube Δh_2 and the temperature t_2 behind the fan.

// Wielkościami mierzonymi będą: parametry otoczenia p_{ob} , t_{ob} , φ_{ob} , ciśnienie statyczne w rurociągu ssącym h_{ss} , przyrost ciśnienia w wentylatorze Δh_s , spadek ciśnienia na zwężce Venturiego Δh_2 oraz temperaturę za wentylatorem t_2 .

Measurements shall be made in the same way as when measuring ISA orifice

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

Table 3. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

l_t [mm]	t_{ot} [°C]	φ_{ot} [%]

Flow measurement of humid air/ Pomiar strumienia powietrza wilgotnego

Table 4. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

No.	Static pressure (manometric) in suction pipeline/ Ciśnienie statyczne (manometryczne) w rurociągu ssącym [mm]		Pressure increase in the fan/ Przyrost ciśnienia w wentylatorze [mm]		Pressure drop across the Venturi tube/ Spadek ciśnienia na zwężce [mm]		Air temperature / Temp. powietrza [°C]
	h_{sso}	h_{ss}	Δh_{so}	Δh_s	Δh_o	Δh_2	
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
Average / średnia							

Pressure measurements should be made every 2 minutes/ Odczytu wskazań manometrów należy dokonywać co 2 minuty.

COMPILATION OF THE MEASUREMENT RESULTS-
OPRACOWANIE WYNIKÓW POMIARU

Absolute pressure at the Venturi inlet- Ciśnienie bezwzględne

Measured value h_{ss}
indicates

przed zwężką Venturiego

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

p_{ss} - gas absolute pressure at fan inlet (in suction pipeline)

Δp_s - pressure increase in the fan

// p_{ss} - ciśnienie bezwzględne gazu przed wentylatorem

(w rurociągu ssącym)

Δp_s - przyrost ciśnienia w wentylatorze

Density of humid air ρ_2 / Obliczenie gęstości gazu wilgotnego

ρ_2

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

The density of dry gas ρ_g should be calculated according to the formula/ Gęstość gazu suchego ρ_g należy obliczyć w/g wzoru:

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

$$\rho_g = \rho_n \frac{(p_2 - \varphi \cdot p_p) T_n}{p_n \cdot T_2} \quad T_n = 273 \text{ K}$$

where:

ρ_n – density of dry gas at normal conditions p_n, T_n

p_2 – gas static pressure at the Venturi inlet

p_p – pressure of saturated steam at a temperature t_2 (from physical table or h-s chart)

t_2 – gas temperature in the pipeline

// gdzie:

ρ_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

The density of water vapor in the gas/ Gęstość pary wodnej zawartej w gazie:

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

ρ'' - density of saturated steam at a temperature t_2 (from physical table)/ ρ'' - gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze t_2 (tablica fizyczna)

Calculation according to PN-93/M-53950/01/ Obliczenia w/g PN-93/M-53950/01

Discharge coefficient C_2 / Współczynnik przepływu C_2

$$C_2 = 0,985$$

Value C_2 from standards/ Wartość C_2 odczytano z norm.

underpressure (gauge pressure)/ Zmierzona wysokość h_{ss} odwzorowuje podciśnienie (ciśnienie manometryczne).

Venturi tube is in the discharge pipeline so there is overpressure/ Zwężka Venturiego znajduje się w rurociągu tłoczącym więc masz do czynienia z nadciśnieniem.

When reading any values from tables or a graph pay attention to the given units. Check whether the value of the calculated density is the same order of magnitude as the density under normal conditions/ 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.

Expansion coefficient ε_2 / Liczba ekspansji ε_2

$$\varepsilon_2 = 0,999$$

Value ε_2 was read from the tables contained in the standard PN-93/M-53950/01/ *Wartość ε_2 odczytano z tablic zamieszczonych w normie PN-93/M-53950/01.*

Humid air flow rate calculation/ Obliczenie strumienia powietrza wilgotnego:

Differential pressure across a Venturi tube/ *Spadek ciśnienia na zwężce*

$$\Delta p_2 = (\Delta h_2 - \Delta h_0) \cdot \rho_c \cdot 9,81 \text{ [Pa]}$$

$q_m (q_v)$ - mass (volume) flow rate/ *strumień masy (objętości)*

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

where:

C_2 - discharge coefficient

β_2 - ratio of the diameter throat of the Venturi to the inside

diameter of the pipe $\beta_2 = \frac{d_2}{D_t}$

ε_2 - expansion coefficient

ρ_2 - gas density [kg/m³]

$d_2 = 200$ mm - diameter throat of the Venturi tube [m]

$D_t = 400$ mm - internal discharge pipe diameter [m]

// gdzie:

C_2 - współczynnik przepływu

β_2 - przewężenie zwężki Venturiego $\beta_2 = \frac{d_2}{D_t}$

ε_2 - liczba ekspansji

ρ_2 - gęstość gazu [kg/m³]

d_2 - średnica gardzieli zwężki Venturiego [m]

D_t - średnica otworu wewnętrznego rurociągu tłoczego [m]

LIMITATIONS FOR VENTURI TUBES

$$200 \leq D \leq 1200$$

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

$$2 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 2 \cdot 10^6$$

Values D and d are given in [mm]/ *Wartości D oraz d podane są w [mm].*

Expansion coefficient takes into account a correction resulting from the assumption that the air density is the same before and in the narrowest section of the Venturi tube/ *Liczba ekspansji uwzględnia poprawkę wynikającą z założenia, że gęstość powietrza jest taka sama przed jak i w najwęższym miejscu zwężki.*

In this case given limitation are fulfilled. They give a view in which cases the above method can be used/ *Podane ograniczenia są spełnione w tym przypadku. Dają pogląd w jakich przypadkach można stosować powyższą metodę.*

III – Thermoanemometer / Termoanemometr

Gas flow velocity measurements we make at designated points of the pipeline cross section (due to the construction of the pipeline, measurement is made along one diameter). Measurements must be repeated three times.

// 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.

Table 5. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

No.	Velocity in the pipeline/ Prędkości w rurociągu w_i [m/s]							
	r_{2n-1}	r_1	r'_1	r'_{2n-1}
1.								
2.								
3.								
Average / średnia								

r - radius values indicating measurement points closer to hole in the wall of pipeline
 r' - radius values indicating the measurement points behind the longitudinal axis of pipeline

*// r - promień oznaczające punkty pomiarowe bliższe otworu w ścianie rurociągu
 r' - promień oznaczające punkty pomiarowe za osią podłużną rurociągu*

CALCULATION/ OBLICZENIA

Average velocity of air stream/ Prędkość średnia strugi powietrza

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

Air mass flow rate/ Strumień masy powietrza

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

In this case, the number of measurement points may be assumed equal 4 at one radius/ W tym przypadku liczbę punktów pomiarowych można przyjąć równą 4 na jednym promieniu.

IV – Pitot-static (Prandtl) tube/ Rurka Prandtla

Dynamic pressure are measured at specific points in cross section of the pipeline. Measurements must be repeated three times.

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

Measurement of air velocity in the pipeline/ Pomiar prędkości przepływającego powietrza w rurociągu

Table 6. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

No.	Dynamic pressure in the pipeline/ Ciśnienia dynamiczne w rurociągu l_{di} [mm]									Air temp. in the pipeline/ Temp. pow. w rurociągu	
	l_o	Place of measurement/ Miejsce pomiaru									
		0,021D (10 mm)	0,117D (58 mm)	0,184D (91 mm)	0,345D (170 mm)	0,655D (324 mm)	0,816D (403 mm)	0,883D (436 mm)	0,979D (484 mm)		
1.											
2.											
3.											
Average / średnia											

l_o – value indicated by micromanometer before starting the fan (zero state)/ wartość wskazywana przez mikromanometr przed uruchomieniem wentylatora (stan zerowy)

CALCULATION/ OBLICZENIA

Dynamic pressure in place of measurement/ 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 – ratio of micromanometer/ przełożenie mikromanometru

Average dynamic pressure in cross section/ Średnie ciśnienie dynamiczne w przekroju

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

Average velocity of air stream/ Prędkość średnia strugi powietrza

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

Air mass flow rate/ Strumień masy powietrza

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

Distance from the wall of the pipe, in which they are located p_d pressure measuring points, are marked on the Prandtl tube/ Odległości od ścianki rurociągu w których zlokalizowane są punkty pomiaru p_d są zaznaczone na rurce Prandtla.

Air density assume the same as in the calculation to the ISA orifice/ Gęstość powietrza przyjmij taką samą jak przy obliczeniach dla kryzy ISA.

V – Turbine anemometer/ *Anemometr skrzydełkowy*

Anemometer counter should be reset before making measurements. Perform a measuring series of the local velocity at the outlet of the pipeline, in five measuring points (in centre of the pipeline, on the transverse axis close as possible to the inner wall of the pipeline Fig. 4). After placing an anemometer at the measurement point, wait until you determine the value on the anemometer display. Stop the measurement by pressing the **HOLD** button and save the result by pressing the **MIN / MAX** button. Repeat the procedure for each of the 5 measuring points and then average the the result of these points by pressing the **MULTI AVER** button. All results write to Table 7. The temperature read from the anemometer display, once for each series. Measurements repeat three times.

*// 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. Pomiary powtórzyć trzykrotnie.*

Measurement of air velocity on the pipeline outlet/ Pomiar prędkości przepływającego powietrza na wylocie z rurociągu

Table 7. MEASUREMENT RESULTS/ WYNIKI POMIARÓW

Measuring series/ <i>Serie pomiarowe</i> <i>n</i>	Numbers of measurement points/ <i>Numery punktów pomiarowych</i>	Indication of anemometer display/ <i>Wskazanie wyświetlacza anemometru</i> <i>w_i [m/s]</i>	Average value from measuring serie/ <i>Średnia z serii pomiarowej</i>	Air temperature in pipeline/ <i>Temperatura powietrza w rurociągu</i> <i>t [°C]</i>
I	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
II	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
III	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
Average/ <i>Średnia</i>				

CALCULATION/ OBLICZENIA

Average velocity in particular w poszczególnych seriach pomiarowych/ Prędkość średnia w poszczególnych seriach pomiarowych

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

n – number of subsequent measuring series/ *numer kolejnej serii pomiarowej*

Average air velocity/ Prędkość średnia

As the diameter of the outlet channel should be taken a diameter of discharge pipeline/ *Jako średnicę kanału wylotowego należy przyjąć średnicę rurociągu tłocznego.*

Measurements were

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

N – amount of measuring series

Air mass flow rate/ Strumień masy

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

A - cross section area (the section of use anemometer)/ *pole przekroju poprzecznego (miejsca umieszczenia anemometru)*

taken at the outlet of the pipeline where can be assumed that the density corresponding to the ambient parameters/ *Pomiary wykonywano na wylocie z rurociągu gdzie można przyjąć, że gęstość odpowiada parametrom otoczenia.*

4.

Each measurement and subsequent calculations must be checked. After performing the measurement uncertainty analysis should be carried out. In your case, you should also check the calculated values: with regard to units and the resulting values. The last element of the validation will be calculation the measurement uncertainty, showing the quality of particular measurement methods.

//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

5. REPORT / SPRAWOZDANIE

In a report of laboratory exercise should be:

- Title page (date of the exercise and its number, names of the participants),
- Scheme of the measurement system (with the description),
- Tables of values of results,
- The calculation: all formulas and calculation results,
- Observations and conclusions

//W sprawozdaniu z ćwiczenia laboratoryjnego powinno się znaleźć:

- *Strona tytułowa (data wykonania ćwiczenia, numer ćwiczenia, nazwiska i imiona uczestników,*
- *Schemat układu pomiarowego (z opisem zastosowanych przyrządów pomiarowych),*
- *Tabele z wynikami pomiarów*
- *Obliczenia: wszystkie zastosowane wzory i wyniki obliczeń,*
- *Spostrzeżenia i wnioski.*