



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**



**KATEDRA INŻYNIERII CHEMICZNEJ
I PROCESOWEJ**

INSTRUKCJE DO ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH

**LABORATORIUM INŻYNIERII CHEMICZNEJ,
PROCESOWEJ I BIOPROCESOWEJ**

Ćwiczenie nr 7

Skalowanie zwężki

Osoba odpowiedzialna:

Piotr Rybarczyk

Gdańsk, 2017

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

1. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest wykreślenie rozkładów prędkości powietrza przy przepływie przez przewód ze zwężką i wykonanie cechowania kryzy pomiarowej /wyznaczenie zależności objętościowego natężenia przepływu powietrza przez zwężkę od różnicy ciśnienia na zwężce/. Cechowanie dokonuje się dla trzech różnych natężeń przepływu powietrza.

2. Wykonanie ćwiczenia

- ◆ Uzgodnić z prowadzącym ćwiczenia wybór odpowiednich przesłon dławiących wydajność wentylatora.
- ◆ Wypoziomować mikromanometr. Sprawdzić i ewentualnie skorygować położenie zera w mikromanometrze kompensacyjnym.
- ◆ Zapoznać się z mechanizmem przesuwu rurki Prandtla oraz zmiany jej położenia z płaszczyzny pionowej na płaszczyznę poziomą.
- ◆ Założyć jedną z wybranych przysłon.
- ◆ Włączyć wentylator.
- ◆ Wykonać pomiary ciśnienia dynamicznego dla różnych położzeń rurki Prandtla w płaszczyźnie pionowej i poziomej dla całego zakresu średnicy rury (siedem punktów pomiarowych w każdej z płaszczyzn, w tym środek rury i położenia skrajne).
- ◆ Odczytać i zanotować spadek ciśnienia /różnicę ciśnienia/ na zwężce, nadciśnienie przed zwężką oraz temperaturę powietrza wewnątrz rury. Manometry U-rurkowe mierzące w/w ciśnienia wypełnione są wodą zabarwioną na kolor fioletowy.
- ◆ Powtórzyć całość pomiarów dla dwóch kolejnych przysłon.
- ◆ Przy pomocy psychrometru aspiracyjnego zmierzyć wilgotność powietrza atmosferycznego.
- ◆ Odczytać na barometrze i zanotować wartość ciśnienia atmosferycznego.
- ◆ Wykonać pełne obliczenia dla wszystkich zrealizowanych pomiarów, zgodnie z tokiem postępowania opisanym w p. 3.

3. Opracowanie wyników.

WSZYSTKIE OBLICZENIA WYKONAĆ W UKŁADZIE SI

1. Określenie parametrów powietrza w warunkach pomiaru

Na podstawie zmierzonej wartości wilgotności powietrza, jego temperatury i ciśnienia atmosferycznego, należy obliczyć gęstość i lepkość powietrza w warunkach panujących na wylocie z rury /w miejscu pomiaru lokalnych prędkości przepływu powietrza rurką Prandtla/.

a/ obliczenie gęstości powietrza

$$\rho_F = \rho_P + \rho_W$$

$$\rho_P = \rho_N \frac{(p_a - \varphi p_w) T_N}{p_N T} \quad \rho_N = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_W = \varphi \rho''_W$$

- ◆ ρ_F – gęstość powietrza wilgotnego dla ciśnienia atmosferycznego
- ◆ ρ_P – gęstość powietrza suchego dla ciśnienia atmosferycznego
- ◆ ρ_W – gęstość pary wodnej
- ◆ ρ''_W – gęstość nasyconej pary wodnej w temperaturze pomiaru
- ◆ (z tablic pary wodnej zamieszczonych w instrukcji)
- ◆ p_w – prężność nasyconej pary wodnej w temperaturze pomiaru
- ◆ p_a – ciśnienie atmosferyczne
- ◆ φ – wilgotność względna powietrza
- ◆ T – temperatura pomiaru /temperatura powietrza wewnątrz rury/
- ◆ N – indeks odnoszący się do warunków normalnych (760 mm Hg, 0° C)

b/ lepkość powietrza

- dynamiczny współczynnik lepkości powietrza odczytujemy z tablic dla temperatury pomiaru lub przeliczamy z warunków normalnych wg wzoru

$$\eta_T = \eta_N \frac{1 + \frac{S}{273}}{1 + \frac{S}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}}$$

- ◆ S – stała Sutherlanda – dla powietrza $S = 114$
- ◆ $\eta_N = 17.17 \cdot 10^{-6}$ Pas

2. Obliczenie prędkości lokalnej przepływającego powietrza i wykreślenie rozkładów prędkości

Na podstawie pomiarów wykonanych rurką Prandtla w płaszczyźnie poziomej i płaszczyźnie pionowej obliczyć średnie wartości Δp z obu płaszczyzn pomiarowych /7 wartości/ a następnie 7 wartości prędkości lokalnych przepływu powietrza z zależności:

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_F}}$$

- ◆ Δp - ciśnienie dynamiczne mierzone rurką Prandtla [Pa]
- ◆ ρ_F - gęstość powietrza wilgotnego dla ciśnienia atmosferycznego

Mikromanometr kompensacyjny napełniony jest wodą. Obliczenia wykonać dla gęstości cieczy manometrycznej $\rho_m = 998 \text{ kg/m}^3$.

Należy wykreślić 3 profile prędkości, postępując w następujący sposób:

- ◆ na podstawie zanotowanych odczytów z linijki obliczamy odległości osi rurki Prandtla (r) od osi rury dla 7 punktów pomiarowych
- ◆ obliczonym odległościom przypisujemy obliczone prędkości lokalne i nanosimy na wykres zależności $u = f(r^2)$
- ◆ łączymy punkty krzywą i ekstrapolujemy ją do ścianki rury tj. do promienia $r = 4 \text{ cm}$ pamiętając, że ostatnia warstewka płynu przy ściance rury nie porusza się (prędkość lokalna $u = 0$)

3. Obliczenie objętościowego natężenia przepływu powietrza

Objętościowe natężenie przepływu powietrza obliczamy jako iloczyn pola przekroju poprzecznego rury i obliczonej graficznie prędkości średniej przepływającego powietrza.

- ◆ D - średnica rury = 0.08 m

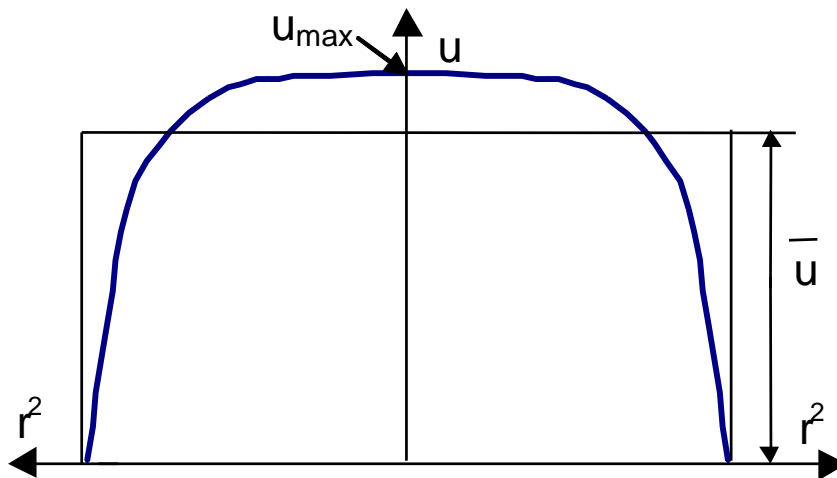
Na podstawie wykreślonych rozkładów prędkości, dla wszystkich pomiarów należy określić prędkość maksymalną u_{\max} (jak pokazano na załączonym rysunku), a następnie obliczyć prędkość średnią jako $\bar{u} = 0,82 u_{\max}$

Dodatkowo, dla wskazanej przez prowadzącego serii pomiarów, należy obliczyć prędkość średnią metodą całkowania graficznego, zgodnie z poniższym opisem:

- ◆ obliczamy pole pod wybraną krzywą /tj. pod profilem prędkości/
- ◆ obliczamy wysokość prostokąta, którego pole będzie równe polu figury pod krzywą przedstawiającą profil prędkości powietrza przy przepływie przez rurę /wysokość tego prostokąta jest równoznaczna prędkości średniej/

$$V = \pi \int_{-r_0}^{r_0} u(r) dr = A \bar{u}$$

- ◆ A - pole przekroju rury pomiarowej
- ◆ r_0 - promień rury = 0,04 m
- ◆ \bar{u} - prędkość średnia obliczona jako wysokość prostokąta, którego pole jest równe polu ograniczonemu krzywą $u = f(r^2)$ i osią r^2
- ◆ r - odległość osi rurki Prandtla od osi przewodu /rury/



4. Skalowanie zwężki

a/ wyznaczenie liczby ekspansji ε

- liczbę ekspansji ε wyznacza się z dołączonego do instrukcji wykresu funkcji

$$\varepsilon = f\left(\frac{\Delta p}{p_1}\right)$$

- ◆ Δp - ciśnienie różnicowe /różnica ciśnienia na zwężce/
- ◆ p_1 - ciśnienie statyczne gazu przed zwężką

$$p_1 = p_a + \Delta p_1$$

- ◆ p_a - ciśnienie atmosferyczne
- ◆ Δp_1 - nadciśnienie statyczne gazu przed zwężką

b/ obliczenie gęstości powietrza

Obliczyć gęstość powietrza dla warunków panujących przed zwężką tj. dla ciśnienia p_1 i temperatury pomiaru:

$$\rho_{F1} = \rho_{P1} + \rho_W$$

$$\rho_{p1} = \rho_N \frac{(p_1 - \varphi p_w) T_N}{p_N T} \quad \rho_N = 1,293 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_w = \varphi \rho_w''$$

- ◆ ρ_{F1} - gęstość powietrza wilgotnego dla ciśnienia przed zwężką
- ◆ ρ_{P1} - gęstość powietrza suchego dla ciśnienia przed zwężką

c/ wyznaczenie liczby przepływu α

$$V = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{F1}}}$$

$$\alpha = \frac{4V}{\pi \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{F1}}}}$$

- ◆ Δp - ciśnienie różnicowe /różnica ciśnienia na zwężce/ [Pa]
- ◆ d - średnica kryzy = 0,04 m
- ◆ ρ_{F1} - gęstość powietrza wilgotnego dla ciśnienia przed zwężką

5. Obliczenie liczby Re

$$Re = \frac{\bar{u} D \rho_F}{\eta}$$

- ◆ ρ_F - gęstość powietrza wilgotnego dla ciśnienia atmosferycznego
- ◆ D - średnica rury = 0.08 m
- ◆ η - lepkość dynamiczna

Parametry nasyconej pary wodnej w zależności od temperatury

Temperatura /°C/	prężność /mm Hg/	prężność /Pa/	gęstość ρ'' /kg/m ³ /
20	17.54	2337	0.01729
21	18.65	2486	0.01833
22	19.83	2643	0.01942
23	21.07	2808	0.02057
24	22.38	2982	0.02177
25	23.76	3167	0.02304
26	25.21	3360	0.02437
27	26.74	3564	0.02576
28	28.35	3779	0.02723
29	30.04	4004	0.02876
30	31.82	4241	0.03037

Warunki pomiarowe

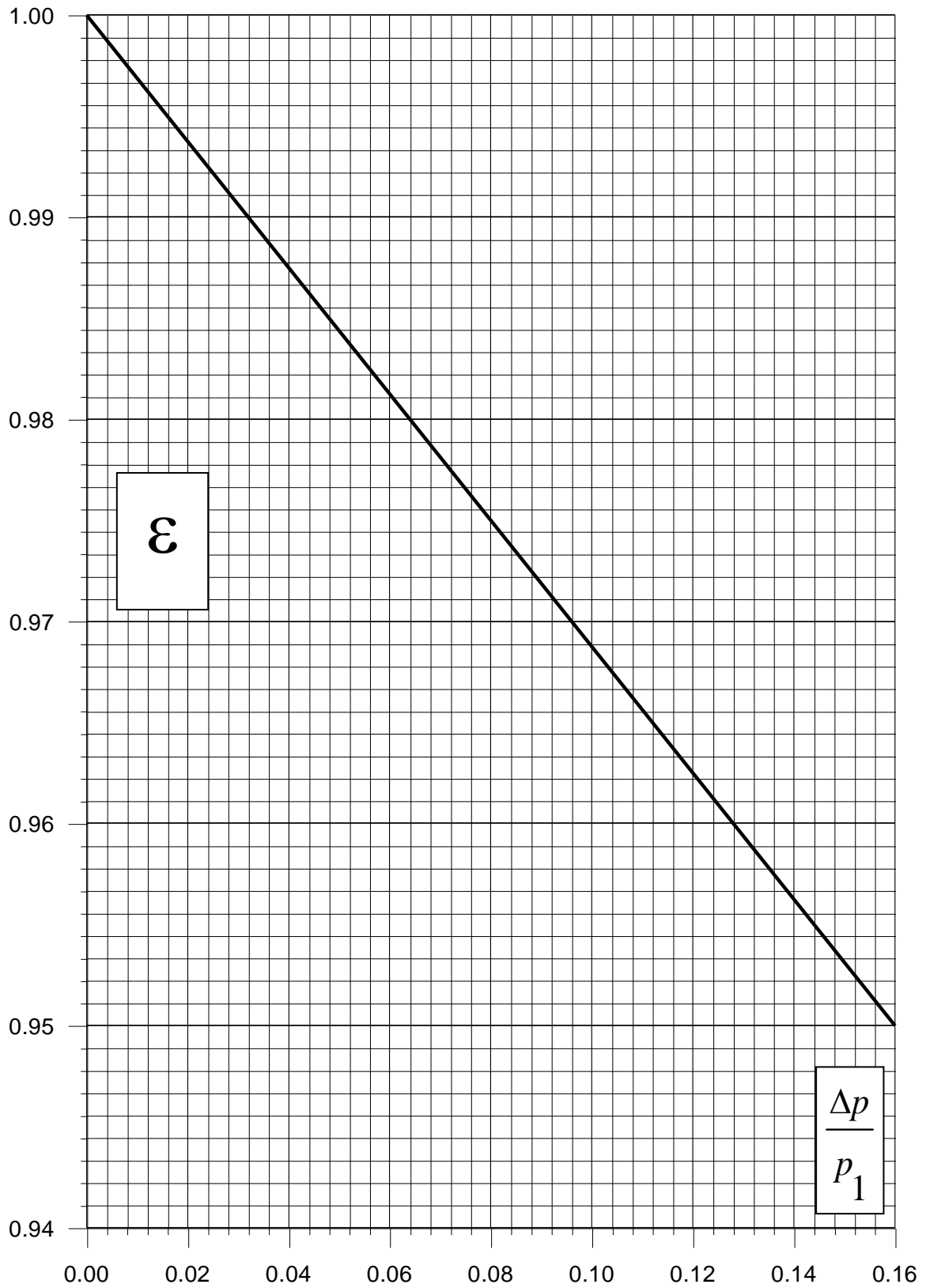
Ciśnienie atmosferyczne	Wilgotność względna
$p_a =$ mm Hg	$\varphi =$ %

Rurka Prandtla

Przesłona nr	Położenie rurki Prandtla		Ciśnienie dynamiczne Δp [mm H ₂ O]	
	Lp	cm	Płaszczyzna pionowa	Płaszczyzna pozioma
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			

Zwężka

Przesłona nr	Temperatura powietrza w rurze [°C]	Ciśnienie różnicowe Δp [mm H ₂ O]	Nadciśnienie statyczne Δp_1 [mm H ₂ O]



Zależność $\varepsilon = f\left(\frac{\Delta p}{p_1}\right)$ dla kryzy ISA z pomiarem przytarczowym i przepływu powietrza $\kappa=1.41/$