Bezpieczeństwo i eksploatacja systemów wentylacji i klimatyzacji
Laboratorium nr 9
Wentylacja i klimatyzacja – badania charakterystyk hydraulicznych kształtek wentylacyjnych

Politechnika Wrocławska
Wydział Inżynierii Środowiska

28 lutego 2025

Spis treści

1 Informacje podstawowe **2**
1.1 Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia 2
1.2 Cel ćwiczenia 3
1.3 Problematyka, przebieg ćwiczenia 3
1.4 Jak się przygotować do ćwiczenia? 3

2 Realizacja ćwiczenia **4**
2.1 Wprowadzenie do zagadnienia 4
2.2 Przeprowadzenie badania 5
2.2.1 Wyznaczenie wielkości strumienia objętościowego powietrza 5
2.2.2 Wyznaczenie charakterystyki hydraulicznej kształtki wentylacyjnej 6

3 Model numeryczny **8**

4 Zakres opracowania **13**

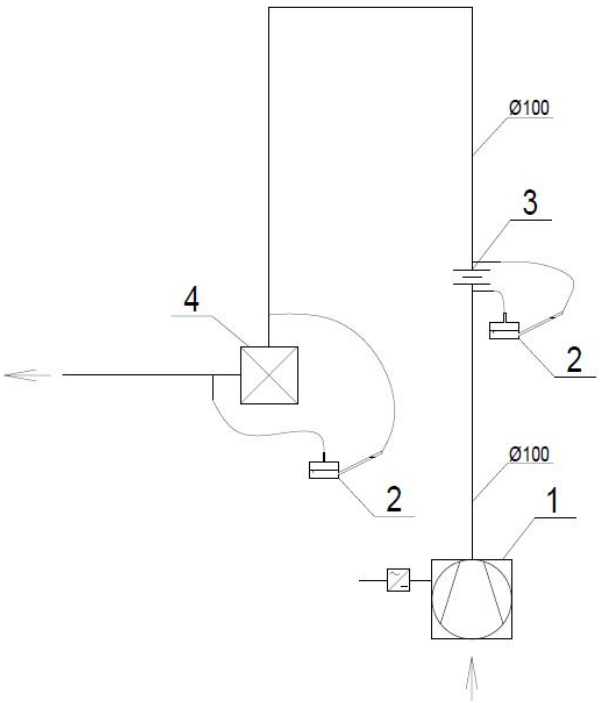
5 Oznaczenia **14**

1 Informacje podstawowe

W sekcji *informacje podstawowe* zebrano wyłącznie najważniejsze i bardzo skondensowane informacje dotyczące ćwiczenia. Warto bardzo dokładnie zapoznać się z tym krótkim fragmentem tekstu.

1.1 Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia

Stanowisko laboratoryjne do badania charakterystyk hydraulicznych kształtek wentylacyjnych znajduje się w hali technologicznej budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej. Schemat instalacji przedstawiony został na rysunku 1. Instalacja została wykonana z rur z stali kwasoodpornej o średnicy wewnętrznej $\phi = 100\ mm$.



Rysunek 1: Schemat stanowiska badawczego, 1 – wentylator z falownikiem, 2 – mikromanometr Recknagla z pochyłą rurką, 3 – kryza pomiarowa, 4 – badana kształtka,

Dla różnych wartości przepływu objętościowego strumienia powietrza, należy wyznaczyć spadek ciśnienia powietrza na badanych kształtkach wentylacyjnych (kolano segmentowe oraz trójnik). Strumień objętościowy powietrza określa się poprzez pomiar strat ciśnienia na kryzie pomiarowej (3). Pomiar różnicy ciśnień na elementach wykonuje się przy użycia mikromanometru Recknagla z pochyłą rurką.

1.2 Cel ćwiczenia

Przeprowadzenie ćwiczenia wiąże się z realizacją następujących celów:

1. poznanie doświadczalnych metod wyznaczania spadku ciśnienia na elementach instalacji wentylacyjnych;
2. utrwalenie praktyki w korzystaniu z mikromanometru Recknagla z pochyłą rurka;
3. zdobycie rozeznania w tematyce wyznaczania strumienia przepływu powietrza w instalacji przy użyciu kryzy pomiarowej;
4. nabycie umiejętności weryfikowania danych numerycznych względem danych pomiarowych;
5. zdobycie umiejętności opracowania danych pomiarowych;

1.3 Problematyka, przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na określeniu zależności spadku ciśnienia badanej kształtki od strumienia objętościowego przepływającego powietrza oraz na wyznaczeniu współczynnika oporu miejscowego w funkcji strumienia przepływającego powietrza, oraz ich porównanie z danymi uzyskanymi wskutek modelowania numerycznego.

1.4 Jak się przygotować do ćwiczenia?

Przed przystąpieniem do ćwiczeń, należy zapoznać się z dalszą częścią instrukcji oraz należ przypomnieć sobie jakie rodzaje oporów przepływu występują w instalacjach powietrznych i co je charakteryzuje. Wskazane jest zapoznanie się z definicją ciśnienia oraz zasadą działania i rodzajami zwężek pomiarowych. Student powinien przypomnieć sobie sposób prawidłowego wykonywania pomiarów ciśnienia przy użyciu manometru z pochyłą rurką.

2 Realizacja ćwiczenia

W sekcji *realizacja ćwiczenia* opisano bardziej szczegółowo kluczowe kwestie związane z przeprowadzaniem ćwiczenia. Część tekstu powstała w oparciu o doświadczenia uczestników poprzednich edycji ćwiczeń, aby eliminować najczęstsze błędy popełniane podczas realizacji ćwiczenia.

2.1 Wprowadzenie do zagadnienia

Podczas przepływu płynu wewnątrz przewodu istotne znaczenie ma znajomość strat ciśnienia wywołanych działaniem sił stycznych. Opór przepływu w przewodach składa się z oporów tarcia oraz oporów miejscowych. Podział ten ma charakter umowny, ponieważ lepkość płynu jest źródłem oporów w obu przypadkach.

$$p_{str} = p_{str_t} + \sum p_{str_m} \tag{1}$$

Zmiana kierunku prowadzenia przewodu, pola przekroju lub jego kształtu powoduje podczas przepływu pewną stratę ciśnienia całkowitego, która związaną jest ze zmianą wartości i kierunku prędkości przepływu płynu. Straty ciśnienia powstają również na wlocie i wylocie z przewodu oraz w miejscach łączenia się lub rozgałęzienia przepływającego strumienia płynu. Równanie 1 można rozwinąć do poniższej postaci:

$$p_{str} = \sum_{i=1}^{n} (\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \xi_i) \frac{\rho w_i^2}{2} \tag{2}$$

Na podstawie powyższej zależności wywnioskować można, że wyrażenie na miejscowe straty ciśnienia przyjmuje poniższą postać:

$$p_{str_m} = \xi \frac{\rho_p w^2}{2} \tag{3}$$

Główne przyczyny miejscowych strat ciśnienia:

- odrywanie strumienia od ścianek, wzdłuż których przepływa powietrze,
- powstawanie wirów w strefie odrywania się strumienia powietrza,
- deformacja strumienia powietrza przepływającego przez kształtkę, spowodowana zmianą pola przekroju lub kierunku przepływu.

Rodzaj i rozmiar powyższych zaburzeń przepływu zależy głównie od geometrii kształtki. Zaburzenia przepływu nie znikają zaraz po wypływie po-

wietrza z danej kształtki, lecz można je stwierdzić w pewnej odległości za nią. Dla zdecydowanej większości kształtek geometrycznie podobnych wartość współczynnika oporu miejscowego ξ jest stała i nie zależy od liczby Reynoldsa.

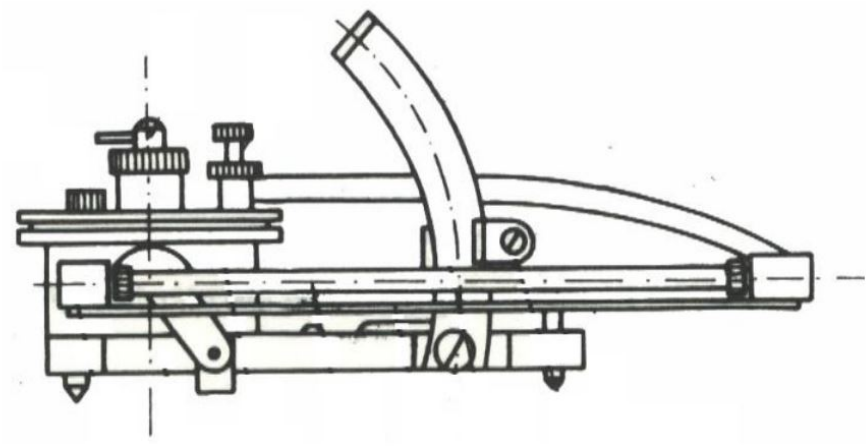
2.2 Przeprowadzenie badania

Ideą ćwiczenia laboratoryjnego jest wyznaczenie charakterystyki hydraulicznej kształtek wentylacyjnych. Jak przedstawiono na rysunku 1 stanowisko laboratoryjne składa się z wentylatora promieniowego MPA 90T produkcji Venture Industries Sp. z o.o. z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej oraz instalacji wykonanej z rur o średnicy 100 mm wykonanych ze stali kwasoodpornej. Na instalacji wbudowana została zwężka pomiarowa, umożliwiająca określenie strumienia objętościowego przepływającego powietrza oraz króćce do pomiaru ciśnienia statycznego przed i za badaną kształtką.

2.2.1 Wyznaczenie wielkości strumienia objętościowego powietrza

Zwężki pomiarowe są jednymi z najczęściej stosowanych przyrządów do pomiaru strumienia objętościowego lub masowego płynu. Charakteryzuje je duża dokładność pomiarów bez potrzeby ich wzorcowania, szybkość wykonania pomiaru oraz niezawodność która związana jest z prostotą ich konstrukcji. Norma PN-EN ISO 5167-1:2005 *"Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym – Część 1: Zasady i wymagania ogólne"* w sposób szczegółowy ujmuje kwestie projektowania, wyboru oraz wykonywania, obliczania zwężek oraz opisuje sposób wykonania pomiaru.

Pomiar ciśnienia statycznego wykonywany jest przy użyciu mikromanometru Recknagla z pochyłą rurką, który jest wypełniony alkoholem etylowym o gęstości $\rho_m = 809\ kg\ m^{-3}$. Na rysunku 2 przedstawiono konstrukcje manometru Recknagla z rurką pochyłą. Manometr ten jest wykorzystywany do pomiaru małych ciśnień, których pomiar wykonany manometrami o rurkach pionowych obarczony jest zbyt dużym błędem względnym odczytu. Zastosowanie rurki pochyłej pozwala na zwiększenie dokładności pomiaru. Im mniejszy kat nachylenia, tym otrzymujemy większą dokładność odczytywanych wartości.



Rysunek 2: Manometr Recknagla z pochyłą rurką

Ważne

Ważne jest aby manometr był wypoziomowany podczas wykonywania pomiaru. Wartość błędu pomiaru wynikający z niedokładnego wypoziomowania rośnie wraz z zwiększeniem przełożenia (zmniejszeniem kąta nachylenia ramienia). Manometr powinien zostać również wyzerowany.

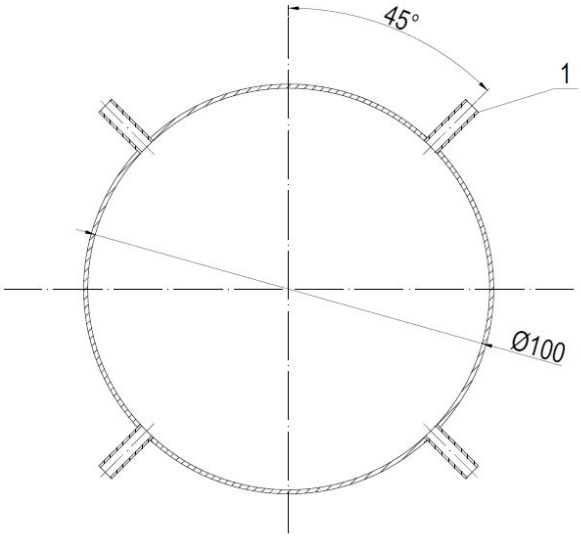
Spadek ciśnienia na kryzie pomiarowej należy obliczyć, korzystając z poniższej zależności:

$$\Delta p_{kr} = \rho_m g h_m n \tag{4}$$

Następnie z wykorzystaniem charakterystyki kryzy pomiarowej (Załącznik 1) należy wyznaczyć strumień objętościowy przepływającego powietrza.

2.2.2 Wyznaczenie charakterystyki hydraulicznej kształtki wentylacyjnej

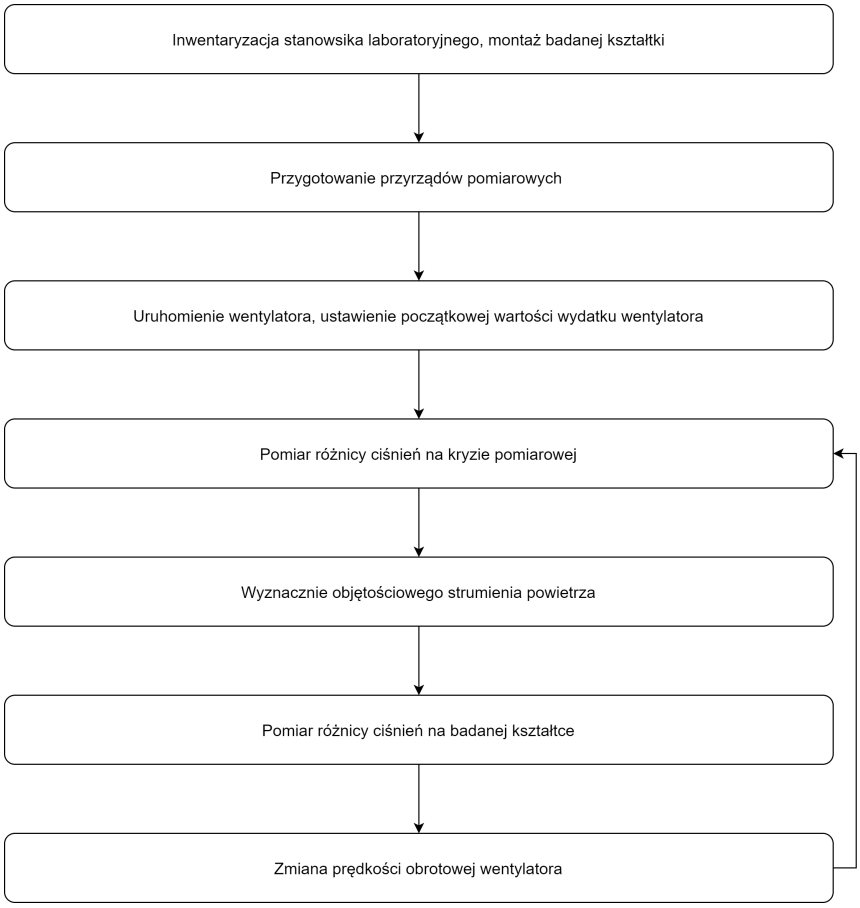
Spadek ciśnienia powietrza na badanej kształtce wentylacyjnej wykonuje się przy użyciu mikromanometru z pochyłą rurką. Króćce pomiarowe rozmieszczone przed i za kształtką pokazane zostały na rysunku 3



Rysunek 3: Rozmieszczenie króćców pomiarowych; 1 - Króciec do pomiaru ciśnienia

Prędkość przepływu powietrza za kształtką należy określić na podstawie poniższej zależności 5 natomiast przekształcając równanie 3 należy wyznaczyć współczynnik oporu miejscowego.

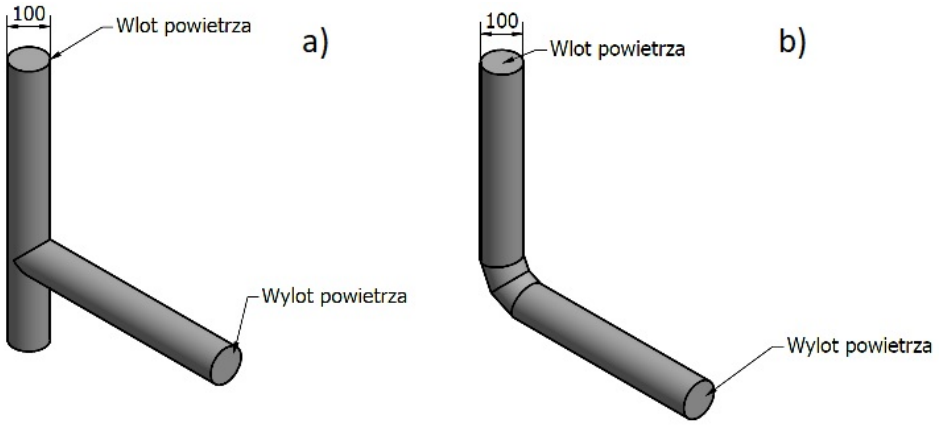
$$w = \frac{\dot{V}}{A} \tag{5}$$



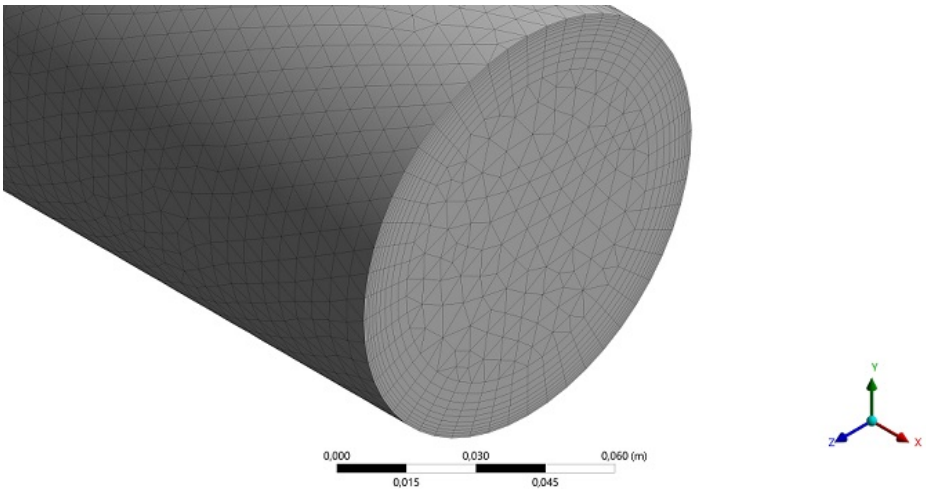
Rysunek 4: Diagram przeprowadzenia ćwiczenia

3 Model numeryczny

Na potrzeby ćwiczenia sporządzone zostały modele geometryczne badanych kształtek, które został przedstawione na rysunku 5. Na ich bazie została skonstruowana niestrukturalna siatka numeryczna w oprogramowaniu Ansys Meshing. Siatka numeryczna została zagęszczona w kierunku powierzchni tarcia co obrazuje rysunek 6. Natomiast liczba węzłów oraz elementów obliczeniowych została zestawiona w tabeli 1.



Rysunek 5: Model geometryczny badanych kształtek a) trójnik; b)kolano segmentowe



Rysunek 6: Szczegół siatki numerycznej obrazujący jej zagęszczenie w kierunku powierzchni tarcia

Tabela 1: Parametry siatki numerycznej

Element	Trójnik	Kolano
Rodzaj siatki	Tetragonalna	Tetragonalna
Liczba węzłów	178952	162225
Liczba komórek	441052	399872

Obliczenia zostały przeprowadzone w oprogramowaniu Ansys CFX. Wykorzystano został model turbulencji SST (Menter's Shear Stress Transport).

Obliczenia trwały do momentu osiągnięcia wartości średniokwadratowych znormalizowanych residuów równania ciągłości i zachowania pędu na poziomie 10^{-5} jednak nie krócej niż 500 iteracji. Warunki początkowe dla poszczególnych przypadków zestawione zostały w tabeli 2. Obliczenia przeprowadzono dla powietrza w temperaturze 25° w warunkach izotermicznych.

Tabela 2: Warunki brzegowe

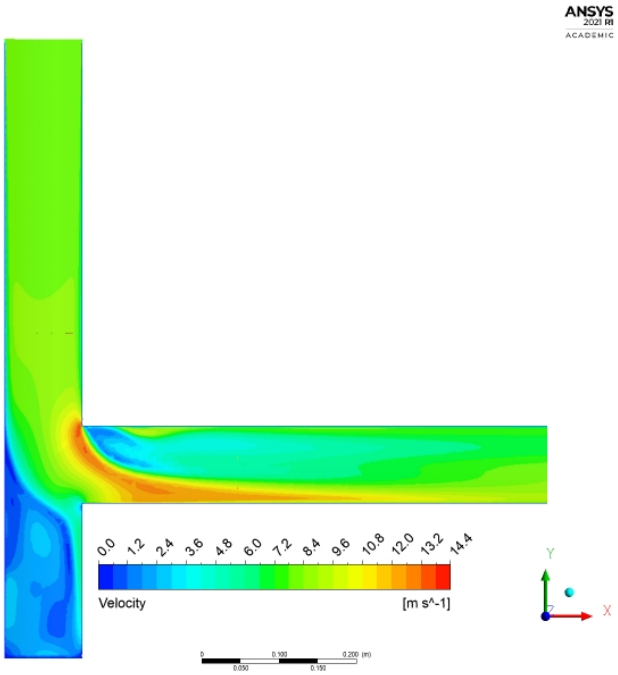
Lokalizacja	**Warunek brzegowy**	**Wartość**	**Jednostka**
Wlot	Wlot - prędkość	4,5,6,7,8	$m\ s^{-1}$
Wylot	Wylot - ciśnienie	1	bar
Kanał	Ściana - bez poślizgu	-	-

Celem przeprowadzonych symulacji numerycznych było wyznaczenie strat ciśnienia na badanych modelowanych kształtkach wentylacyjnych. Wyniki symulacji zostały zestawione w tabeli 3. Miejsce wyznaczenia ciśnienia statycznego w modelu numerycznym pokrywa się z miejscem na stanowisku laboratoryjnym.

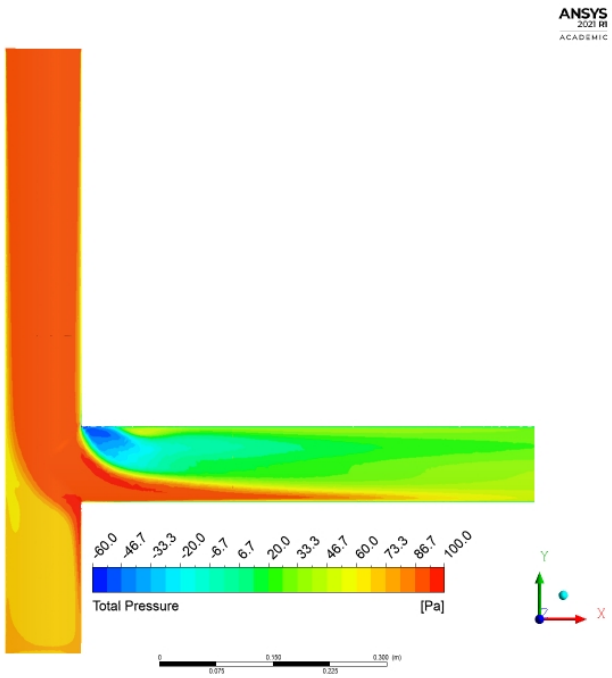
Tabela 3: Strata ciśnienia na kształtce w funkcji prędkości powietrza

Prędkość powietrza wlot	**Strata ciśnienia trójnik**	**Strata ciśnienia kolano**
$m\ s^{-1}$	Pa	Pa
4	9	6
5	14	7
6	20	8
7	27	10
8	34	12

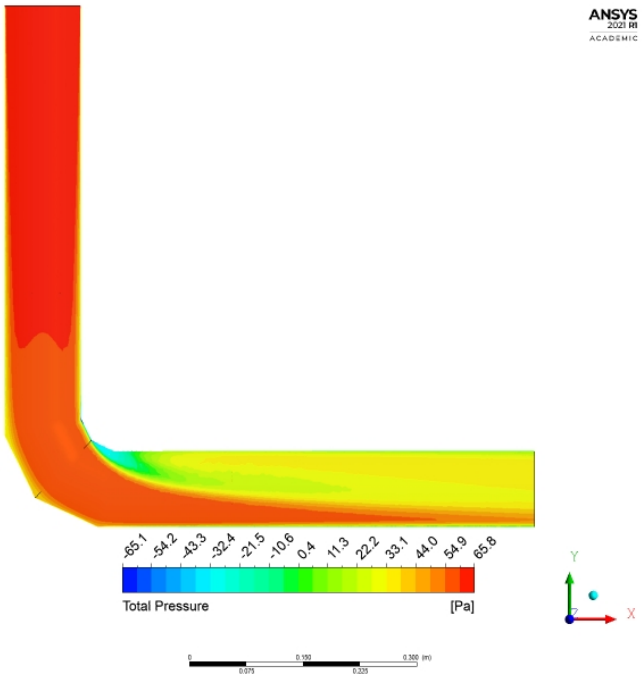
W programie Ansys Post dokonano wizualizacji zjawisk przepływowych zachodzących w badanych kształtkach. Dla prędkości przepływu powietrza równej 8 $m\ s^{-1}$ przedstawiano na poniższych rysunkach rozkład pola ciśnień oraz modułu prędkości na powierzchni zlokalizowanej w środku modelowanej bryły.



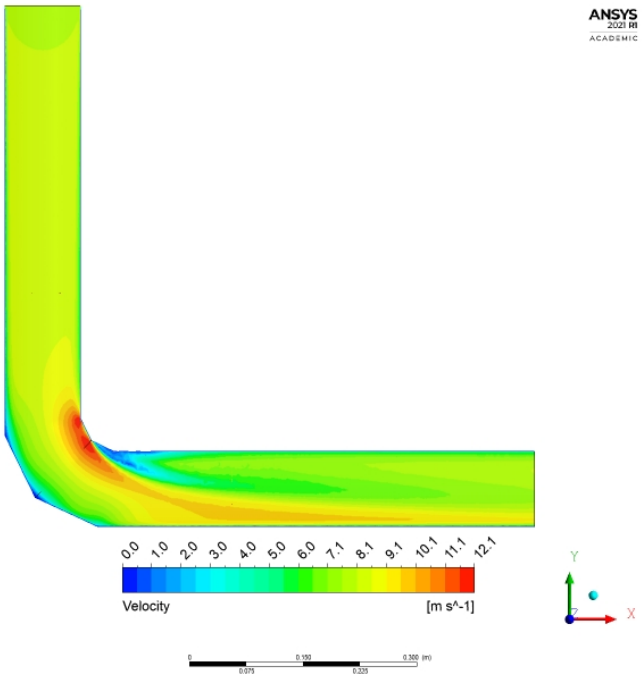
Rysunek 7: Pole modułu prędkości trójnik



Rysunek 8: Pole modułu ciśnienia trójnik



Rysunek 9: Pole modułu prędkości kolano segmentowe



Rysunek 10: Pole modułu ciśnienia kolano segmentowe

4 Zakres opracowania

W sprawozdaniu należy zamieścić następujące elementy:

- strona tytułowa
- spis treści, ilustracji, tabel itd.,
- przedstawienie problematyki ćwiczeń laboratoryjnych wraz z realizowanym zakresem,
- przykład obliczeniowy, przedstawiony w jasny i zrozumiały sposób dla jednego przypadku,
- interpretację otrzymanych wyników.

Ponadto w opracowaniu należy zawrzeć:

- zestawienie tabelaryczne wartości zmierzonych na stanowisku laboratoryjnym,
- zestawienie tabelaryczne wartości obliczonych,
- wykres straty ciśnienia na badanej kształtce w funkcji prędkości przepływającego powietrza,
- wykres współczynnika oporu miejscowego w funkcji prędkości przepływającego powietrza,
- obliczenie współczynnika oporu miejscowego na podstawie danych zawartych w tabeli nr 3,
- obliczenia strat miejscowych na podstawie współczynników przyjętych z literatury,
- na jednym wykresie dokonać porównania wartości zmierzonych, otrzymanych w wyniku obliczeń numerycznych oraz obliczonych na podstawie danych z literatury,
- interpretację rysunków nr 7, 8, 9, 10,
- wnioski do przeprowadzonego ćwiczenia.

5 Oznaczenia

A - pole poprzeczne przekroju, m^2

d_i - średnica i-tego odcinka, m

g - przyśpieszenie ziemskie, $m\ s^{-2}$

h_m - wysokość cieczy w manometrze, m

l_i - długość i-tego odcinka, m

n - przełożenie manometru

p_{str} - straty ciśnienia, Pa

p_{str_t} - liniowe straty ciśnienia, Pa

p_{str_m} - miejscowe straty ciśnienia, Pa

w_i - prędkość przepływu powietrza w i-tym odcinku, $m\ s^{-1}$

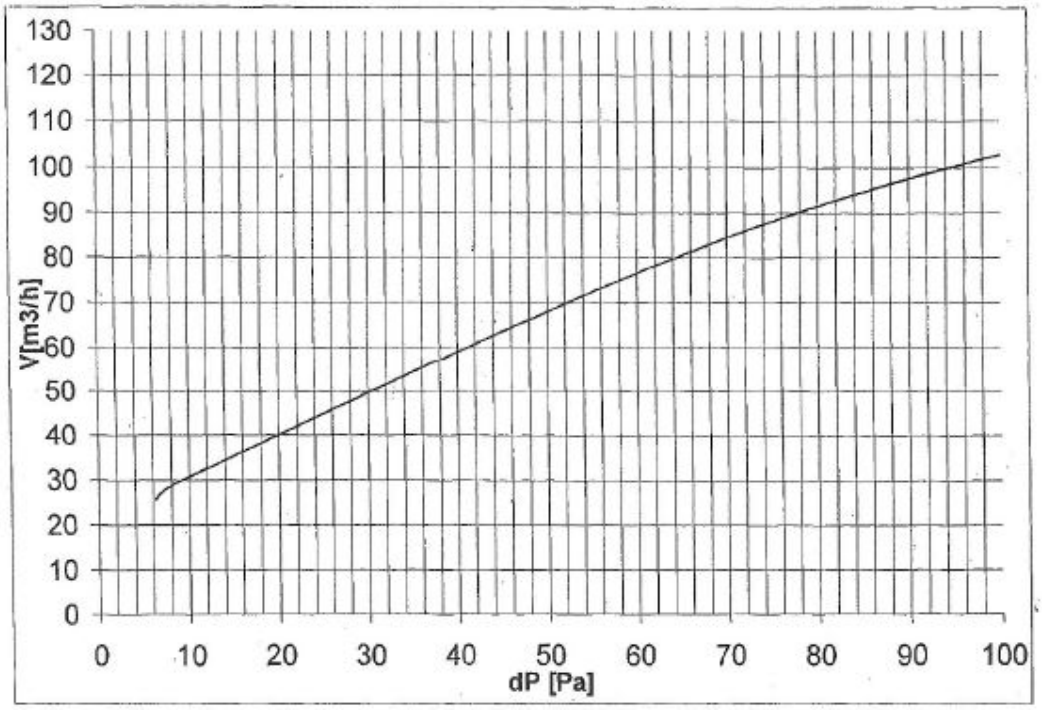
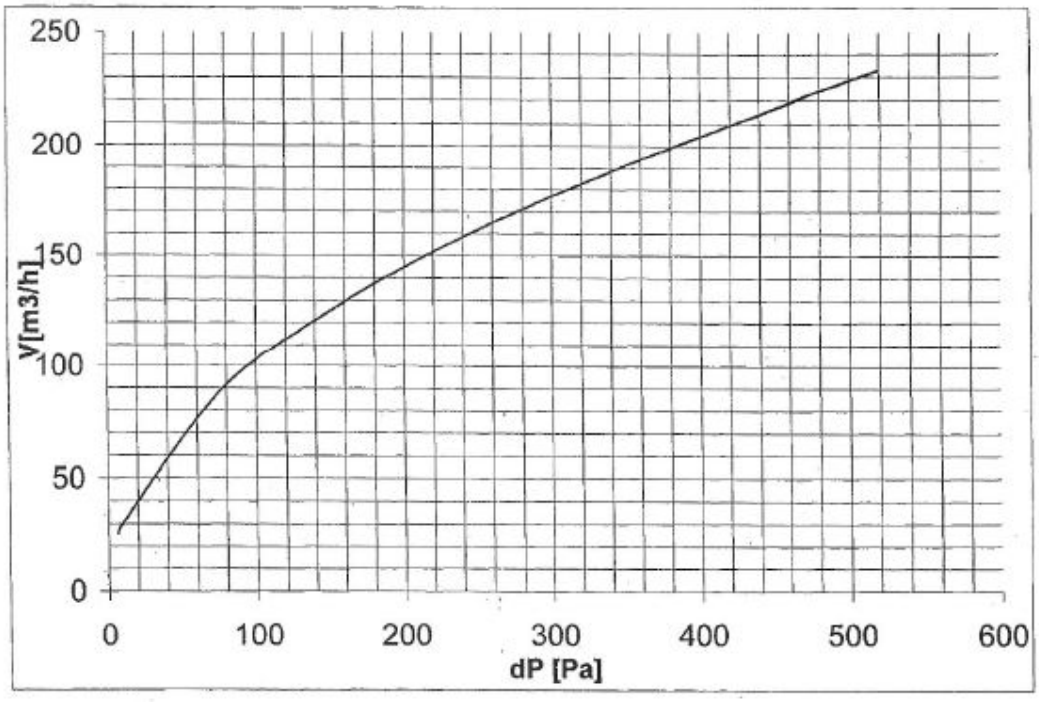
V - strumień objętościowy przepływu powietrza, $m^3\ s^{-1}$

$\Delta_{p_{kr}}$ - strata ciśnienia na kryzie pomiarowej, Pa

λ_i - współczynnik oporów liniowych i-tego odcinka

ρ_p - gęstość powietrza, $kg\ m^{-3}$

ρ_m - gęstość cieczy w manometrze, $kg\ m^{-3}$

ζ_i - współczynnik oporów miejscowych i-tego elementu

Załącznik 1 - Charakterystyka kryzy pomiarowej