



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Ćwiczenie L14

POMIAR SIŁY OPORU AERODYNAMICZNEGO

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest doświadczalne wyznaczenie siły oporu aerodynamicznego dla wybranych modeli profili.

2. Wstęp teoretyczny

Właściwości aerodynamiczne profilu zależą od jego geometrii, położenia przekroju, punktu w którym profil ma największą grubość, promienia zaokrąglenia części czołowej profilu (noska), kąta pochylenia profilu względem wektora prędkości płynu (kąta natarcia).

Siła aerodynamiczna działająca na profil jest wypadkową dwóch sił: równoległej oraz prostopadłej do kierunku ruchu (rys. 1). Korzystając z analizy wymiarowej można wykazać, że wartość tych sił zależy od kształtu i powierzchni profilu, kąta natarcia, gęstości płynu i prędkości ruchu. Składowa pionowa nazywa się siłą nośną i obliczana z równania

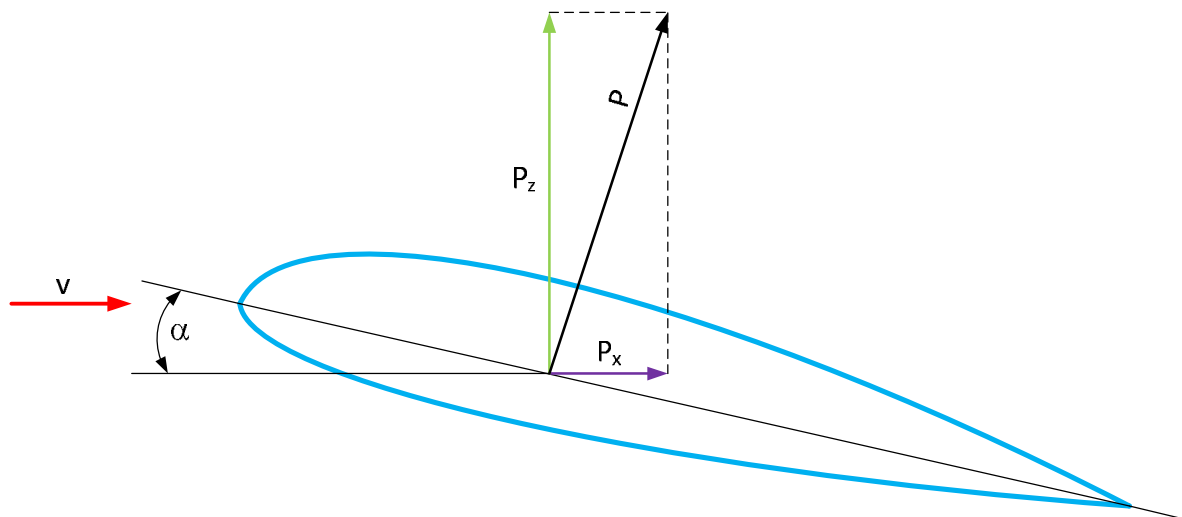
$$P_z = c_z A \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1)$$

gdzie: c_z – współczynnik siły nośnej, A – charakterystyczne pole powierzchni, $\frac{\rho v^2}{2}$ – ciśnienie dynamiczne. Natomiast składowa pozioma nazwana jest siłą oporu profilowego i wyznaczana z równania

$$P_x = c_x A \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

gdzie c_x – jest współczynnikiem oporu profilowego. Pole powierzchni w obu przypadkach jest wybierane arbitralnie najczęściej przyjmuje się rzut powierzchni profilu na płaszczyznę normalną do kierunku przepływu.

W dalszej części opisu skoncentrujemy się na sile oporu profilowego.



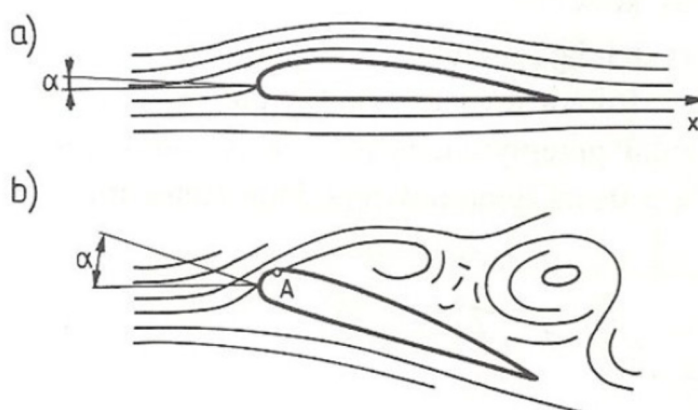
Rys. 1. Siły aerodynamiczne działające na profil.

W płynie lepkim cząsteczki opływające profil mają różną prędkość zależną od odległości od jego powierzchni. Tuż przy samej powierzchni cząsteczki płynu „przyklejają” się do powierzchni i ich prędkość jest równa 0. Ze wzrostem odległości od powierzchni prędkość rośnie, osiągając w pewnej odległości prędkość tzw. strugi niezaburzonej czyli strugi w miejscu, gdzie nie ma oddziaływania profilu na prędkość. Warstwa, w której następuje zmiana prędkości od 0 przy ścianie do prędkości strugi niezaburzonej nazywana jest warstwą przyścienną. W warstwie przyściennej może występować przepływ laminarny lub turbulentny. W ruchu laminarnym torry cząstek płynu nie przecinają się, a cząstki poruszają się tworząc kolejne warstwy o różnych prędkościach przepływu. Ze względu na różną prędkość poszczególnych warstw występuje pomiędzy nimi tarcie, którego wartość zależy od lepkości płynu (czyli rodzaju płynu, jego temperatury, ciśnienia, wilgotności) oraz szybkości ścinania (pochodnej prędkości w warstwie przyściennej w kierunku prostopadłym do przepływu). Natomiast w ruchu turbulentnym torry cząstek krzyżują się czyli oprócz składowej prędkości zgodnej z kierunkiem przepływu występuje także składowa prostopadła (tzw. składowa fluktuacyjna). Podczas opływu może wystąpić zjawisko oderwania się warstwy przyściennej od powierzchni profilu. Zjawisko oderwania występuje, gdy prędkość cząstek w pobliżu ścianki zmniejszy się do zero lub gradient prędkości przy ścianie jest równy zero (3).

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \quad (3)$$

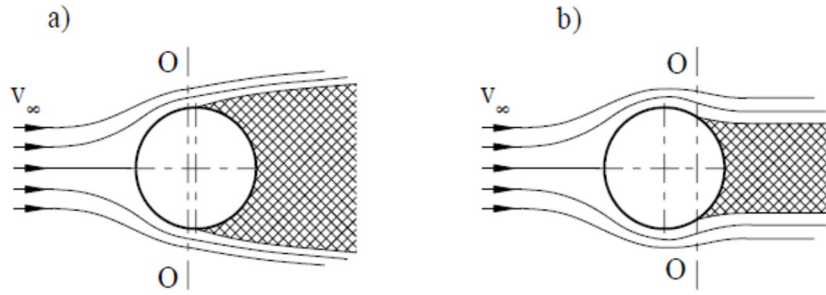
Energia kinetyczna cząstek płynu w pobliżu ściany maleje wówczas do zera. Na wartość prędkości cząstki płynu w warstwie przyściennej przy ścianie profilu wpływają dwie siły: siła ciśnieniowa wywołana różnicą ciśnień działających na przednią i tylną część cząstki oraz siła tarcia związana z lepkością płynu (rys. 5). Obie te siły zwrócone są w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu i powodują zatrzymanie cząstki lub w pewnych sytuacjach odwrócenie jej kierunku przepływu.

Zjawisko oderwania warstwy powoduje zburzenie profilu prędkości w warstwie przyściennej oraz wystąpienie za miejscem oderwania zawirowań (tzw. śladu Karmana). Punkt oderwania warstwy przyściennej zależy od kształtu opływającego ciała, kąta natarcia i rodzaju warstwy przyściennej. Dla profilu lotniczego przy małym kącie natarcia nie występuje oderwanie warstwy przyściennej, natomiast dla dużego kąta natarcia punkt oderwania warstwy przyściennej znajduje się w jego czołowej części (rys. 3).



Rys. 3. Opływ profilu a) bez oderwania warstwy przyściennej,
b) z oderwaniem warstwy przyściennej

W przypadku opływu walca zawsze następuje oderwanie warstwy przyściennej. Kąt oderwania laminarnej warstwy przyściennej jest mniejszy niż turbulentnej (rys. 4) czyli turbulentna warstwa przyścienna jest bardziej odporna na oderwanie. Jest to spowodowane istnieniem w turbulentnej warstwie przyściennej składowej fluktuacyjnej prędkości, prowadzącej do zderzeń cząstek, a tym samym wymiany pędu. Ponieważ cząstki znajdujące się w większej odległości od ściany mają wyższą energię kinetyczną niż znajdujące się w bliższej odległości, stąd energia kinetyczna cząstek wolniej maleje w warstwie turbulentnej.



Rys. 4. Opływ walca z oderwaniem a) laminarnej warstwy przyściennej,
b) turbulentnej warstwy przyściennej

Siła oporu profilowego jest sumą składowych poziomych siły ciśnieniowej i siły tarcia

$$P_x = P_{xp} + P_{xf}. \quad (4)$$

W celu obliczenia składowych poziomych tych sił rozpatrzmy elementarne pole powierzchni na, które te siły działają.

Elementarna siła ciśnieniowa skierowana jest prostopadle do powierzchni (rys. 5), a jej wartość wynosi

$$dP_p = p dA. \quad (5)$$

W celu wyznaczenia składowej poziomej tej siły należy uwzględnić kąt usytuowania elementarnej powierzchni dA

$$dP_{xp} = p \cos \theta dA. \quad (6)$$

Stąd siła ciśnieniowa dla całego profilu jest równa

$$P_{xp} = \int_A p \cos \theta dA. \quad (7)$$

Elementarna siła tarcia związana z lepkością płynu jest styczna do powierzchni (rys. 5) i wynosi

$$dP_f = \tau dA. \quad (8)$$

Po uwzględnieniu kąta wynikającego z usytuowania powierzchni elementarnej dA otrzymamy składową poziomą

$$dP_{xf} = \tau \sin \theta dA, \quad (9)$$

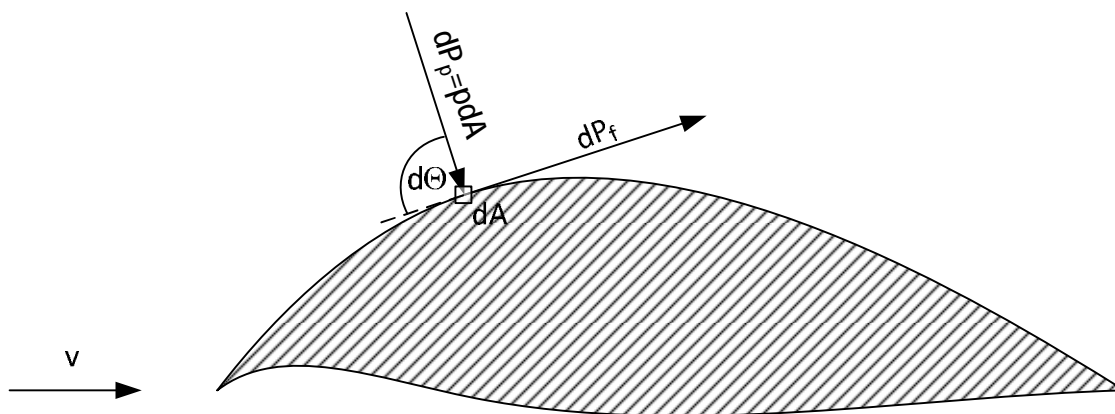
gdzie naprężenia styczne τ obliczane są ze wzoru Newtona

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn}, \quad (10)$$

w którym m – dynamiczny współczynnik lepkości, dv/dn – szybkość ścinania.

Stąd siła tarcia dla całego profilu jest równa

$$P_{xf} = \int_A \tau \sin \theta dA. \quad (11)$$



Rys. 5. Siła ciśnieniowa i siła tarcia działające na elementarne pole powierzchni.

Przez analogię do (2) siłę ciśnieniową i tarcia można zdefiniować jako iloczyn współczynnika siły, charakterystycznego pola powierzchni i ciśnienia dynamicznego

$$P_{xf} = c_{xf} A \frac{\rho v^2}{2}, \quad (12)$$

$$P_{xp} = c_{xp} A \frac{\rho v^2}{2}. \quad (13)$$

Siła oporu ciśnienia P_{xp} występuje przy niesymetrycznym rozkładzie ciśnienia na powierzchni profilu. Przy symetrycznym rozkładzie ciśnienia się równoważą i siła oporu ciśnienia wynosi 0. Niesymetryczny rozkład ciśnienia jest wywołany oderwaniem warstwy przyściennej i tworzeniem się wirów za opływającym profilem.

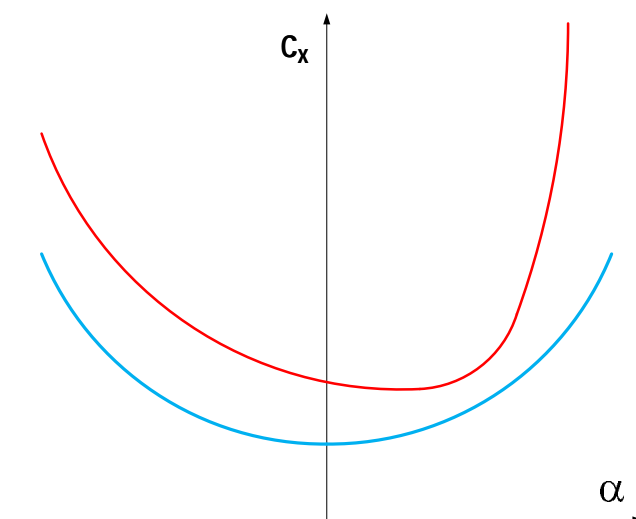
Podstawiając do (4) wzory definicyjne sił (2, 12, 13) otrzymamy

$$c_x = c_{xp} + c_{xf}, \quad (14)$$

czyli współczynnik oporu profilowego jest sumą współczynników oporu ciśnienia i tarcia (przy tym samym charakterystycznym polu powierzchni).

Wartość siły oporu tarcia jest proporcjonalna do gradientu prędkości w kierunku prostopadłym do opływanej powierzchni; jest więc stosunkowo mała w przepływie laminarnym, a znacznie większa w turbulentnym. W opływach ciał, w których występują wyraźne obszary oderwania, decydujący wpływ na siłę oporu profilowego ma opór ciśnieniowy, natomiast w opływach tzw. ciał aerodynamicznych, w których nie ma oderwania albo występuje na znikomej powierzchni, decydującą rolę odgrywają opory tarcia.

Współczynnik oporu profilowego c_x jest zależny od kąta natarcia. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe zależności współczynnika oporu profilowego od kąta natarcia dla profilu symetrycznego (krzywa w kolorze niebieskim) i niesymetrycznego (krzywa w kolorze czerwonym).



Rys. 6. Zależności współczynnika oporów profilowego od kąta natarcia dla profilu symetrycznego (krzywa w kolorze niebieskim) i niesymetrycznego (krzywa w kolorze czerwonym).

Dla profilu symetrycznego zależność $c_x=f(\alpha)$ jest również symetryczna dla dodatnich i ujemnych kątów natarcia. Natomiast w przypadku profilu niesymetrycznego krzywa jest niesymetryczna. Współczynnik oporu dla profilu niesymetrycznego jest większy niż dla profilu symetrycznego (przy tej samej grubości profilu) i szybciej przyrasta dla dodatnich kątów natarcia niż dla ujemnych.

3. Opis stanowiska

Stanowisko badawcze składa się z modułu głównego zapewniającego przepływ powietrza, dołączanego modułu do pomiaru siły oporu profilowego, trzech różnych testowych profili, dwóch odważników, wielokanałowego manometru cieczowego **M** ze zbiornikiem wyrównawczym **Zb**.

W module głównym znajduje się wentylator wymuszający przepływ powietrza, zawór regulacyjny do ustawiania strumienia objętości oraz króćce do pomiaru wysokości ciśnienia całkowitego i statycznego.

Moduł do pomiaru siły oporu profilowego umożliwia zamontowanie badanego profilu. Do wyboru są następujące profile: walec, graniastosłup, symetryczny profil aerodynamiczny. Moduł wyposażony jest w wagę do pomiaru siły oporu. Stan równowagi wagi osiąga się poprzez zrównoważenie siły oporu i sił pochodzących od dwóch odważników. Waga zbudowana jest z dwóch podłużnych ramion wyskalowanych w gramach siły (G). Pierwsze ramię ma podziałkę od 0 do 170 działek, natomiast drugie od 0 do 10 działek. Większy odważnik o masie 100 g przesuwany jest po pierwszym ramieniu i służy do zgrubnego ustawienia równowagi układu. Natomiast mniejszy odważnik o masie 10 g przesuwany jest po drugim ramieniu i służy do dokładnego ustawienia równowagi. Przesunięcie większego odważnika o 1 działkę odpowiada przyrostowi siły o 1 G (gram siły), natomiast przesunięcie mniejszego odważnika o 1 działkę przyrostowi siły o 0,1 G. Wartość siły z dużego odważnika odczytuje się w pionowej szczelinie, natomiast z małego odważnika na jego lewej krawędzi. Odczytane siły z obu odważników sumuje się. Osiągnięcie równowagi układu ustala się na podstawie nałożenia się na siebie dwóch otworów. Jeden otwór znajduje się w prawej części pierwszego ramienia, a drugi otwór na przezroczystej ścianie.

4. Procedura badawcza

- 1) Narysować schemat stanowiska i zlokalizować elementy zawarte w opisie stanowiska.
- 2) Pomiary wykonane zostaną dla dwóch opływanych kształtów. Opływany kształt wybiera prowadzący.
- 3) Ustawić zbiornik manometru wielokanałowego na $h_0 = 100$ mm.
- 4) Mały odważnik na drugim ramieniu ustawić na 0.
- 5) Za pomocą dużego odważnika zrównoważyć układ i zapisać wartość odczytanej siły F_{x0} .
- 6) Włączyć wentylator zasilający (1) wyłącznikiem (2).
- 7) Delikatnie otworzyć zawór regulacyjny (3), aż ramię wagi wyjdzie z równowagi.
- 8) Dużym odważnikiem zrównoważyć wagę, odczytać wysokości ciśnienia całkowitego i statycznego z manometru (odczyt z ramienia wagi wykonywać z dokładnością do 0,5 G, odczyt z manometru z dokładnością do 1 mm).
- 9) Zmienić strumień objętości zaworem regulacyjnym (3) delikatnie go otwierając obserwując wyjście wagi z równowagi.
- 10) Powtórzyć punkty 7-9) aż osiągnie się całkowite otwarcie zaworu regulacyjnego.

-
- 11) Wyłączyć wentylator zasilający wyłącznikiem (2).
 - 12) Poprosić prowadzącego o zamianę opływającego kształtu.
 - 13) Powtórzyć punkty 3-11).
 - 14) Wyłączyć wentylator zasilający wyłącznikiem (2).

5. Tabela wielkości mierzonych

Tabela wielkości pomiarowych do tego ćwiczenia zamieszczona jest na końcu instrukcji. Tabelę należy uzupełnić o jednostki wielkości mierzonych.

6. Opracowanie wyników pomiarów

Najpierw należy od wykonanych pomiarów wysokości ciśnienia całkowitego h_c i statycznego h_s odjąć wartość początkową h_0 , a od zmierzonej siły oporu profilowego odjąć F_{x0} .

W celu obliczenia ciśnienia dynamicznego należy odjąć od wysokości ciśnienia całkowitego h_c wysokość ciśnienia statycznego, a następnie dokonać konwersji z wysokości ciśnienia na ciśnienie.

Wysokość ciśnienia dynamicznego (wysokość prędkości) jest równa

$$h_d = h_c - h_s$$

Po przeliczeniu na ciśnienie dynamiczne otrzymujemy

$$p_d = \rho_m g (h_c - h_s),$$

gdzie ρ_m jest gęstością cieczy w jakiej został wyskalowany manometr.

Wykonać konwersję jednostki siły oporu profilowego z gramów siły (G) na niutony (N), przyjmując, że $1\text{ G} = 9,81 \times 10^{-3}\text{ N}$.

Na jednym wykresie należy narysować zmierzoną zależność siły oporu profilowego od ciśnienia dynamicznego dla opływanych kształtów.

W przypadku walca obliczyć średni współczynnik oporu ciśnieniowego. W tym celu korzystając ze (2) najpierw obliczyć współczynniki oporu ciśnieniowego dla każdego punktu pomiarowego, a następnie wartość średnią. Punkty pomiarowe znacznie odbiegające od średniej odrzucić.

7. Pytania kontrolne

- 1) Co to jest siła oporu profilowego - podać wzór z oznaczeniami.
- 2) Opisać jak odbywa się przepływ laminarnej i turbulentnej warstwie przyściennej?
- 3) W wyniku czego następuje oderwanie warstwy przyściennej?
- 4) Jak oblicza się straty hydrauliczne w części cylindrycznej zwężki Venturiego.
- 5) Laminarna czy turbulentna warstwa przyścienna odrywa się wcześniej i dlaczego?
- 6) W wyniku czego powstaje siła ciśnieniowa, podać wzór z oznaczeniami?
- 7) W wyniku czego powstaje siła tarcia, podać wzór z oznaczeniami?
- 8) Jak zmienia się współczynnik oporu profilowego od kąta natarcia dla profili symetrycznych i niesymetrycznych?

Nazwa kształtu:		Walec	Graniastosłup	Profil lotniczy
Wielkość	Jednost.			
F_{x0}				
h_0				

Nazwa kształtu:						
Wielkość	F_x	h_c	h_s	F_x	h_c	h_s
Jed.						
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						
7.						
8.						
9.						
10.						
11.						
12.						
13.						
14.						
15.						

Inne parametry			
Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Średnica walca	d	mm	12,5
Długość walca	d	mm	48,0

Sekcja nr			
Lp.	Nazwisko	Imię	Nr albumu
1.			
2.			
3.			
4.			

Data, podpis prowadzącego