

Projekt i realizacja tunelu aerodynamicznego o obiegu zamkniętym

Michał Przepiórski , Konrad Staruch 

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków

Streszczenie: W pracy opisano projekt i realizację tunelu aerodynamicznego o obiegu zamkniętym, przeznaczonego do badań metodą PIV. Tunel posiada przekrój roboczy $0,8\text{ m} \times 0,8\text{ m}$ i umożliwia osiągnięcie maksymalnej prędkości roboczej przepływu do 10 m/s . Całość zaprojektowano w środowisku CAD, a kluczowe komponenty zaprojektowano metodą CFD.

Słowa kluczowe: tunel aerodynamiczny, obieg zamknięty, metoda PIV, aerodynamika, CAD, CFD

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A CLOSED-LOOP WIND TUNNEL

Abstract: This paper describes the design and implementation of a closed-circuit wind tunnel for PIV testing. The tunnel has a working cross-section of $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ and allows for flow velocities of up to 10 m/s . The entire system was designed in a CAD environment, and key components were designed using the CFD method.

Keywords: wind tunnel, closed-circuit design, PIV (Particle Image Velocimetry), aerodynamics, CAD, CFD

https://doi.org/10.7494/978-83-68219-80-7_8

1. Wstęp

Od lotnictwa do konstrukcji lądowych aerodynamika decyduje o wydajności maszyn czy planowaniu przestrzennym miast. Do badania właściwości opływanych przez powietrze obiektów służą tunele aerodynamiczne. Zasada działania tunelu aerodynamicznego jest prosta. Powietrze wprowadzone w ruch opływa próbkę, symulując interakcję pomiędzy rzeczywistym obiektem i płynem. Istnieją dwa typy konstrukcji tuneli aerodynamicznych: tunele otwarte i zamknięte (Ahmed 2013). W tunelu otwartym powietrze jest zasysane, a po przejściu przez część roboczą jest wypuszczane z powrotem do otoczenia. W konstrukcjach zamkniętych cały czas używany jest ten sam gaz (brak wymiany płynu z otoczeniem). Główną zaletą tunelu otwartego jest jego prostsza względem tunelu zamkniętego konstrukcja, która umożliwia szybszą i tańszą budowę, a potem obsługę, niż w przypadku tunelu zamkniętego. Przykłady tuneli otwartych przedstawione są w pracach Jewel Barlowa i współautorów (1999) oraz Ryszarda Szwaiby i współautorów (2021). Tunel zamknięty, w związku z bardziej skomplikowaną budową, wymaga większych nakładów finansowych. Wyzwaniami są utrzymanie szczelności w obwodzie i opracowanie systemu, który umożliwia umiejscowienie próbki. Jednocześnie tunel zamknięty oferuje wyższą sprawność energetyczną i nie rozrzuca posiewu laboratoryjnego poza tunel (Ahmed 2013).

Różne sposoby badawcze umożliwiają opisanie zachowania próbki oraz opływającego ją płynu. Układ pomiarowy z dwóch wag umożliwia wyznaczenie współczynnika oporu i nośności próbki (Wood i in. 2025). Zaawansowane metody badawcze, takie jak np. PIV (*Particle Image Velocimetry*), umożliwiają wyznaczenie rozkładu prędkości. Metoda PIV opiera się na śledzeniu trajektorii cząsteczek wpuszczonych do płynu znajdującego się w ruchu. System pomiarowy mierzy przemieszczenie cząsteczek w bardzo krótkich odstępach czasu, dzięki czemu wyznacza pole prędkości płynu (LaVision 2025).

Głównymi parametrami opisującymi ruch płynu w tunelu aerodynamicznym są liczby bezwymiarowe, takie jak liczba Reynoldsa czy liczba Macha (Cattafesta i in. 2010). Wykorzystanie odpowiednio skalowanych modeli, mieszczących się w komorze pomiarowej, jest możliwe dzięki zastosowaniu twierdzenia Buckinghama. Umożliwia ono grupowanie wielkości fizycznych charakteryzujących dany przepływ wokół próbki oraz – przy zachowaniu takich samych wartości liczb bezwymiarowych – odtworzenie warunków rzeczywistych w przeskalowanym modelu.

W niniejszej pracy przedstawiono procedurę projektową oraz wykonawczą tunelu aerodynamicznego niskich prędkości. Opierając się na tym, dla jakich obiektów przeznaczony jest tunel, omówiono jego konstrukcję oraz dobrano moc i wielkość wentylatora.

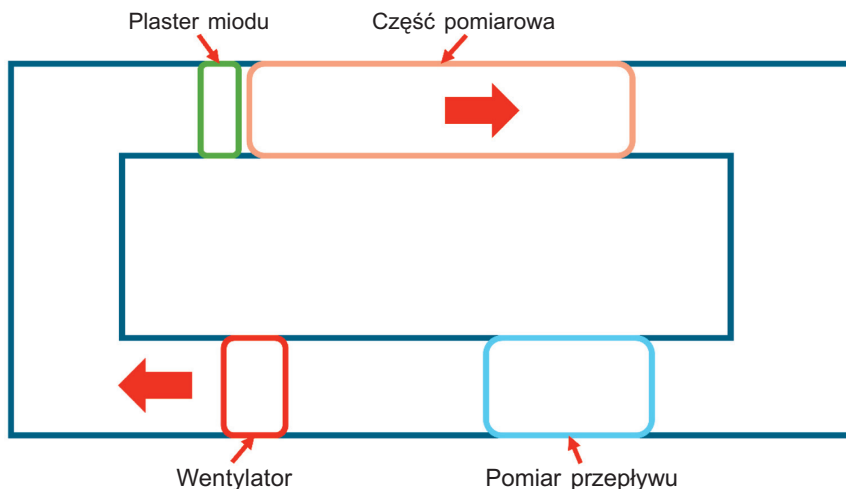
2. Metodologia

2.1. Pomiary

Tunel będzie współpracował z systemem PIV. Kamery PIV wymagają odpowiedniego ustawienia względem próbki pomiarowej (LaVision 2025), a cały tunel musi być przystosowany do współpracy z posiewem. Zebrane doświadczenia laboratoryjne wskazują na wykorzystanie szkła jako preferowanego materiału oddzielającego przepływ tunelu od aparatury PIV. Aby uzyskać miarodajne wyniki pomiarowe, przepływ wokół próbki musi być maksymalnie jednorodny, gdyż każda turbulencja w przepływie jest wizualizowana przez PIV.

2.2. Koncepcja tunelu

Konstrukcja tunelu opiera się na koncepcji zamkniętej (gaz pracujący nie jest wymieniany z otoczeniem). Przyjęta idea tunelu typu zamkniętego pozwala zatrzymać posiew wykorzystywany w metodzie PIV wewnątrz konstrukcji. Brak wymiany powietrza z otoczeniem pozwoli również na podniesienie sprawności energetycznej tunelu względem projektów typu otwartego (Ahmed 2013). Rysunek 1 prezentuje uproszczony rzut z góry omawianego obiektu. W segmencie pomiarowym tunelu lokalizuje się badaną próbkę. Znajdująca się pomiędzy wentylatorem a segmentem pomiarowym prostownica przepływu (plaster miodu) służy do ujednolicenia i nadania odpowiednich właściwości przepływowi turbulentnemu. Ostatnim elementem tunelu jest sekcja pomiaru właściwości przepływu. Sekcja odpowiada za pomiar prędkości w określonych miejscach przekroju kanału, tak aby uzyskać reprezentatywną wartość średniej prędkości powietrza w tunelu.

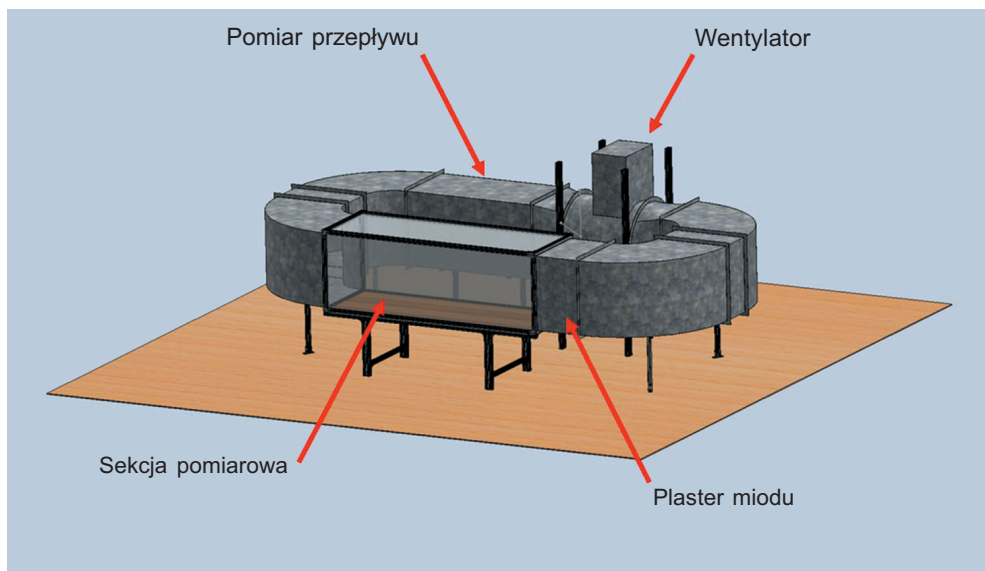


Rys. 1. Schemat przedstawiający rzut od góry tunelu aerodynamicznego typu zamkniętego. Czerwona strzałka oznacza kierunek przepływu powietrza

Wejściowe wielkości opisujące tunel zostały przedstawione w tabeli 1. Poniższe założenia dotyczące wymiarów oraz prędkości w tunelu zostały przyjęte na podstawie doświadczeń zebranych podczas badań aerodynamicznych zrealizowanych w przeszłości oraz ogólnej charakterystyki aparatury pomiarowej omówionej w podrozdziale 2.1. Krytycznym miejscem konstrukcji jest prześwit pomiędzy komorą pomiarową a wentylatorem. Przy założonych maksymalnych wymiarach zewnętrznych prześwit ten wynosi 1,4 m, co umożliwi odpowiednie umiejscowienie kamery PIV. Wszystkie elementy i podzespoły tunelu zostały zaprojektowane w środowisku CAD (SolidWorks). Wizualizacja projektu tunelu została przedstawiona na rysunku 2.

Tabela 1
Wielkości opisujące tunel

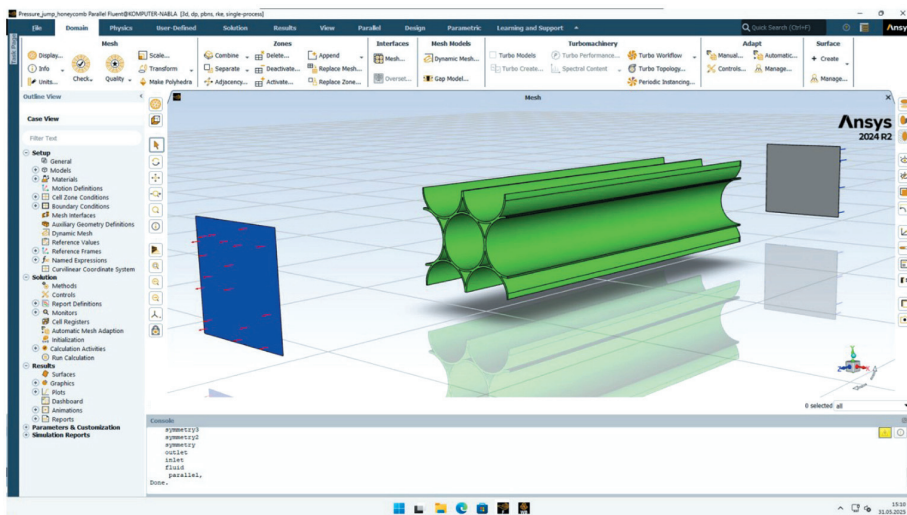
Wielkość opisująca tunel	Wartość liczbową
Maksymalna szerokość tunelu	3 m
Maksymalna długość tunelu	6 m
Maksymalna wysokość tunelu	2,5 m
Długość sekcji pomiarowej	2,5 m
Przekrój roboczy tunelu	0,8 m × 0,8 m
Prędkość maksymalna czynnika	10 m/s



Rys. 2. Wizualizacja tunelu aerodynamicznego w programie SolidWorks

2.3. Prostownica przepływu

Prostownice przepływu używane są w tunelach aerodynamicznych w celu poprawy jednolitości przepływu w sekcji pomiarowej. Podczas konstruowania tunelu założono przypadek prostownicy przepływu, w którym porowatość wynosi 0,9, grubość ścianek komórek wynosi 1,5 mm, kształt komórek został założony jako kołowy, a średnica wewnętrzna pojedynczej komórki wynosi 47 mm. Dobrana długość prostownicy przepływu wynosi 350 mm. Wszystkie wymiary prostownicy przepływu zostały dobrane na podstawie książki Noora Ahmeda (2013). Wizualizacja wycinka plastra miodu jest przedstawiona na rysunku 3.



Rys. 3. Zrzut ekranu przedstawiający wizualizację wycinka prostownicy przepływu w programie Ansys Fluent
Źródło: Ansys (2025)

2.4. Obliczenia wstępne

Sercem każdego tunelu aerodynamicznego jest maszyna wprawiająca płyn w ruch. W przypadku tunelu opisywanego w niniejszej pracy zdecydowano o wyborze wentylatora jako maszyny pędnej. Aby dobrać odpowiedni wentylator, wyznaczono spadek ciśnienia płynu przemieszczającego się w pętli tunelu przy założonym wydatku masowym. Do obliczeń wykorzystano przyjęte parametry wejściowe (tab. 1). Wydatek masowy można obliczyć z równania zachowania masy dla płynów zapisanego w postaci równania (1):

$$v \cdot A = Q \quad (1)$$

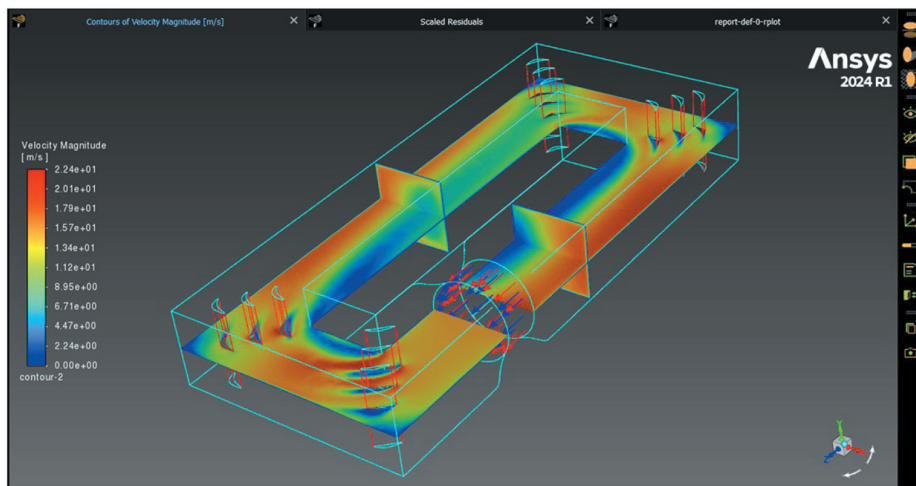
gdzie:

v – prędkość [m/s],

A – pole powierzchni [m²],

Q – wydatek objętościowy powietrza [m³/h].

Zgodnie z równaniem (1) wydatek objętościowy przepływu powietrza przy założonej prędkości czynnika oraz przekroju roboczym wynosi $23\,040\text{ m}^3/\text{h}$. Spadek ciśnienia może być obliczony za pomocą metod analitycznych (Ahmed 2013) lub metod symulacji komputerowych CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (Yong i Dol 2015). Dzięki dostępowi do zasobów komputerowych oraz programu Ansys Fluent 2024 R1 (Ansys 2025) wybrano metodykę CFD. W symulacji uwzględniono rozmiary tunelu oraz obecność kierownic w kolankach. Wyznaczone pole prędkości (rys. 4) umożliwiło obliczenie spadku ciśnienia pomiędzy wlotem a wylotem wentylatora. Wyniki symulacji porównano z przybliżonymi wynikami teoretycznymi, wykorzystując zależności analityczne (prawo zachowania energii w przepływie) i tabele współczynników spadku ciśnienia.



Rys. 4. Zrzut ekranu przedstawiający wizualizację pola prędkości w tunelu aerodynamicznym. Wizualizacja powstała w programie Ansys Fluent
Źródło: Ansys (2025)

Kolejnym elementem potrzebnym do oszacowania spiętrzenia wentylatora jest wyznaczenie spadku ciśnienia w prostownicy przepływu znajdującej się przed częścią testową tunelu (rys. 2). Spadek ciśnienia w prostownicy przepływu również wyznaczono za pomocą symulacji komputerowych CFD. Plaster miodu potraktowano jako geometrię składającą się ze skończonej liczby identycznych wycinków. Zostały one wyznaczone przez przecięcie geometrii reprezentującej prostownicę przepływu przez skończoną liczbę płaszczyzn symetrii. Plaster miodu po „przecięciu” domeny obliczeniowej jest przedstawiony na rysunku 3. Przy założonym warunku symetrii przepływu na płaszczyznach symetrii plastra miodu odwzorowano spadek ciśnienia między wlotem a wylotem prostownicy przepływu. Wyniki symulacji porównano z przybliżonymi wynikami teoretycznymi, wykorzystując analityczne zależności (prawo Darcy’ego). Przyjęto założenie, że spadki ciśnienia w tunelu oraz w prostownicy przepływu można zsumować i dzięki temu uzyskać finalne spiętrzenie wentylatora przy zadanym wydatku

objętościowym. Obliczone metodą CFD spiętrzenie wentylatora wynosi 200 Pa. Mając na uwadze przyszły rozwój konstrukcji oraz niedoszacowanie spadków ciśnienia metodą CFD, przemnożono uzyskane spiętrzenie wentylatora przez współczynnik przewymiarowania wynoszący 1,5 i uzyskano wartość 300 Pa. Współczynnik przewymiarowania został dobrany arbitralnie przy uwzględnieniu błęd obliczeń CFD oraz przyszłej przebudowy tunelu w celu uzyskania wyższych prędkości przepływu.

3. Wyniki

3.1. Konstrukcja tunelu

Tunel aerodynamiczny składa się z czterech kanałów prostych oraz z czterech kolanek. Kanał, w którym znajduje się prostownica przepływu, ma długość 0,5 m. Długość pozostałych przewodów oraz kolanek wentylacyjnych została dobrana jako zmienna wynikowa w celu zachowania parametrów opisanych w tabeli 1. Sekcja pomiarowa tunelu została złożona z profili aluminiowych konstrukcyjnych o długości boku 40 mm. Szyby hartowane 8 mm zostały wykorzystane do wypełnienia ścian bocznych i górnej w konstrukcji sekcji pomiarowej. Zastosowano szkło z uwagi na dobrą charakterystykę współpracy z laserem (podrozdz. 2.1). Sekcja testowa, wkomponowana w pozostałe podzespoły tunelu, została zaprezentowana na rysunku 5, który przedstawia sekcję bez włożonych wypełnień ścian bocznych, dolnej i górnej.



Rys. 5. Sekcja testowa tunelu aerodynamicznego ze zdemontowanymi wypełnieniami ścian bocznych

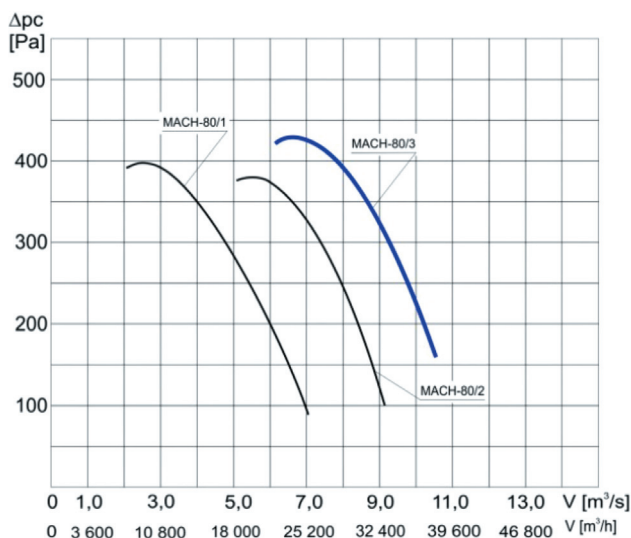
Wszystkie kanały zostały skręcone za pomocą śrub, a pomiędzy każdym kanałem umieszczono uszczelkę gąbkową samoprzylepną o grubości 16 mm w celu utrzymania szczelności w obwodzie. Każdy kanał ma swoją podporę zbudowaną z profili aluminiowych. Rysunek 6 przedstawia cały tunel po złożeniu, lecz bez zainstalowanego wentylatora.



Rys. 6. Zdjęcie zbudowanego tunelu aerodynamicznego.
Na zdjęciu tunel pozbawiony jest wentylatora oraz ścian bocznych w sekcji pomiarowej

3.2. Wentylator

Wentylator dobrano na podstawie obliczeń wykonanych w podrozdziale 2.4 Przyjęty spręż maksymalny wentylatora to 300 Pa przy wydatku objętościowym równym 23 040 m³/h. Zgodność z wyliczonymi parametrami przepływu oferuje wentylator firmy Tywent model MACH-80/3 3F (Tywent 2025). Na rysunku 7 przedstawiona została charakterystyka spiętrzeniowa wentylatora. Porównanie teoretycznych obliczeń z charakterystyką wentylatora wskazuje na przewymiarowanie maszyny względem założonych nominalnych parametrów pracy czynnika roboczego. W celu przystosowania wentylatora do obliczonych parametrów pracy zastosowano inwerter.



Rys. 7. Charakterystyka spiętrzeniowa wentylatora Tywent MACH-80/3 3F (zaznaczona niebieską linią)
Źródło: Tywent (2025)

4. Wnioski i podsumowanie

W pracy przedstawiono procedurę projektową oraz wykonawczą tunelu aerodynamicznego niskich prędkości. Wykorzystując oprogramowania CAD oraz CFD, skonstruowano tunel oraz dobrano moc i wielkość wentylatora. Następnie przedstawiono rzeczywistą konstrukcję złożoną w laboratorium. Zbudowana konstrukcja mieści się w założonych maksymalnych wymiarach tunelu. Rzeczywista długość tunelu to 5,3 m, szerokość to 2,7 m, a prześwit pomiędzy kanałami to 1,039 m. Tunel ma wymiary mieszczące się w tych maksymalnych opisanych w tabeli 1. Tunel ma kwadratowy przekrój roboczy 0,8 m $\times$ 0,8 m, a uzyskana prędkość robocza czynnika wynosi 10 m/s. Koszt budowy instalacji wyniósł 30 000 zł (podana kwota nie zawiera ceny aparatury pomiarowej PIV). Budowa tunelu, bez czasu potrzebnego na dostawę zamówionych części, zajęła dwa dni.

Przewymiarowany wentylator oraz modułowa, skręcana konstrukcja umożliwiającą zmianę parametrów pracy tunelu. Zmniejszenie powierzchni poprzecznej przepływu pozwoli na zwiększenie jego prędkości (prędkość powietrza rośnie odwrotnie proporcjonalnie do powierzchni poprzecznej przepływu). Po przebudowie tunel będzie mógł służyć nie tylko do badań urbanistycznych, ale również do badań z dziedziny motoryzacji. Tunel dodatkowo wymaga opracowania modułu pomiarowego próbek. Moduł ten będzie uzupełnieniem systemu PIV, pozwalającym wykonywać proste badania współczynników nośności i oporu dzięki czujnikom tensometrycznym. W przyszłości konstrukcja tunelu powinna zostać wyposażona w chłodnicę w celu zredukowania efektu nagrzewania się powietrza przez sprężający je wentylator.

Literatura

- Ahmed N., 2013, *Wind tunnel designs and their diverse engineering applications*, InTech. <https://doi.org/10.5772/3403>.
- Ansys 2025, Ansys Fluent. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> [dostęp: 12.06.2025].
- Barlow J., Rae W.H. Jr., Pope A., 1999, *Low-speed Wind Tunnel Testing*, Third Edition, John Wiley & Sons, New York – Chichester – Weinheim – Brisbane – Singapore – Toronto.
- Cattafesta L., Bahr C. Mathew J., 2010, *Fundamentals of wind-tunnel design*, [w:] Blockley R., Shyy W. (Eds.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, John Wiley & Sons, s. 1–10. https://www.researchgate.net/profile/Louis-Cattafesta/publication/230271809_Fundamentals_of_Wind-Tunnel_Design/links/5a0d7a51a6fdcc39e9bfe-324/Fundamentals-of-Wind-Tunnel-Design.pdf.
- LaVision, *Particle Image Velocimetry*. <https://www.lavision.de/en/techniques/piv-ptv/index.php> [dostęp: 12.06.2025].

- Symkaton, Symkaton. <https://symkom.pl/symkaton/> [dostęp: 12.06.2025].
- Szwaba R., Hinc K., Ochrymiuk Z., Krzemianowski Z., Doerffer P., Kurowski M., 2021, *Open low speed wind tunnel – design and testing*, Archives of Thermodynamics, vol. 42(1), s. 57–70. <https://doi.org/10.24425/ather.2021.136947>.
- Tywent, Tywent MACH-80/3 3F. <https://tywent.pl/mach/476-wentylator-kana-owy-mach-80-3-3f-16342.html> [dostęp: 12.06.2025].
- Wood M., Detlefs J., Arnold N., 2025, *2C20.50 – Airfoil Lift and Drag*. <https://www.youtube.com/watch?v=EbOpgUrwK7M> [dostęp: 12.06.2025].
- Yong T.H., Dol S.S. 2015, *Design and development of low-cost wind tunnel for educational purpose*, 78, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 78, 012039. 10.1088/1757-899X/78/1/012039.