

# Analiza parametrów przepływu w tunelu aerodynamicznym z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej

MAGDALENA BUNDYRA, MAREK GAWOR, JACEK SOBCZYK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono pomiary właściwości metrologicznych tunelu aerodynamicznego z obiegiem zamkniętym. Mierzono parametry przepływu takie, jak: profil prędkości w dwóch prostopadłych przekrojach, intensywność turbulencji, odchylenie strugi od osi komory, temperaturę strugi, ciśnienie statyczne w komorze, wilgotność względną w tunelu. Profile prędkości mierzono dla częstotliwości falownika 5, 10, 30, 52 Hz, co odpowiadało prędkościom 5.3, 10.9, 34.9 i 62 m/s. Podano: typ, zakres pomiarowy oraz miejsce położenia przyrządów pomiarowych.

Przedstawiono charakterystykę tunelu, czyli zależność prędkości w pustej przestrzeni pomiarowej od częstotliwości falownika dla wybranych parametrów termodynamicznych (T, RH, P).

Stwierdzono, że system chłodzenia w tunelu działa poprawnie stabilizując temperaturę strugi powietrza na wybranym poziomie z dokładnością do 1K.

Podano wyniki badania modułu wymuszeń dynamicznych.

**Słowa kluczowe:** tunel aerodynamiczny, cyfrowa anemometria obrazowa (PIV), pomiar parametrów przepływu

## 1. Wstęp

W Pracowni Metrologii Przepływów Instytutu Mechaniki Górotworu PAN od wielu lat prowadzi się badania szerokiej klasy zjawisk zachodzących w przepływach gazów i cieczy.

W roku 2013 Instytut Mechaniki Górotworu został wyposażony w tunel aerodynamiczny o zamkniętym obiegu przystosowany do pomiarów prędkości przepływu powietrza metodami optycznymi. Tunel został sfinansowany ze środków Funduszu Nauki i Technologii Polskiej, nr umowy 682/FNiTP/34/2011. Głównym wykonawcą było Centrum Techniki Okrętowej S.A., Zakład Projektowo-Techniczny z Gdańska (*Dokumentacja Zdawcza*, 2013; *Protokół Kalibracji*, 2013).

W związku z tym zaistniała konieczność nauki posługiwania się tunelem, obsługą urządzeń do akwizycji danych pomiarowych (laser i kamery), oprogramowania do obliczeń pól prędkości (metoda PIV) oraz sprawdzeniem właściwości metrologicznych tunelu (Barlow i in., 1999).

Wykonano charakterystykę tunelu, czyli zależność prędkości w pustej przestrzeni pomiarowej od częstotliwości falownika dla wybranych parametrów termodynamicznych (temperatura, ciśnienie i wilgotność względna). W zakresie małych prędkości  $0.1 \div 1.0$  m/s pomiary wykonano termoanemometrem firmy SHMIDT Technology GmbH, w zakresie  $1.0 \div 2.5$  m/s – anemometrem wykorzystującym propagację fal temperaturowych skonstruowanym w IMG PAN. Dla prędkości większych od 2.5 m/s prędkość przepływu mierzono rurką spiętrzającą.

Wykonano pomiary profili prędkości w dwu prostopadłych płaszczyznach pokrywających się z osią komory pomiarowej. Analizie poddano stopień turbulencji oraz odchylenie strugi od osi komory pomiarowej.

W związku z tym, że powietrze porusza się w obiegu zamkniętym następuje zmiana jego temperatury (podgrzewanie). Sprawdzono system chłodzenia w tunelu, którego głównym zadaniem jest stabilizacja temperatury.

Testowano moduł wymuszeń dynamicznych. W testach wykorzystano termoanemometr o dużym paśmie przenoszenia oraz zestaw do anemometrii cyfrowej.

## 2. Parametry metrologiczne tunelu – wg specyfikacji technicznej

Tunel aerodynamiczny zapewnia uzyskanie następujących parametrów strumienia powietrza w przestrzeni pomiarowej:

- prędkość: od 0.1 m/s do 60 m/s,
- równomierny rozkład prędkości (z tolerancją 1%) w obu płaszczyznach (pionowej i poziomej przechodzących przez oś tunelu) w obszarze stanowiącym co najmniej 80% przekroju przestrzeni pomiarowej,
- intensywność turbulencji  $< 0,5\%$ ,
- kąt odchylenia strumienia od osi tunelu w obu płaszczyznach (pionowej i poziomej przechodzących przez oś tunelu)  $< 0,3^\circ$ ,
- stabilna temperatura strumienia, regulowana w zakresie do  $-1^\circ\text{C}$  (lub więcej) względem temperatury otoczenia,
- ciśnienie statyczne w przestrzeni pomiarowej zbliżone do ciśnienia atmosferycznego.

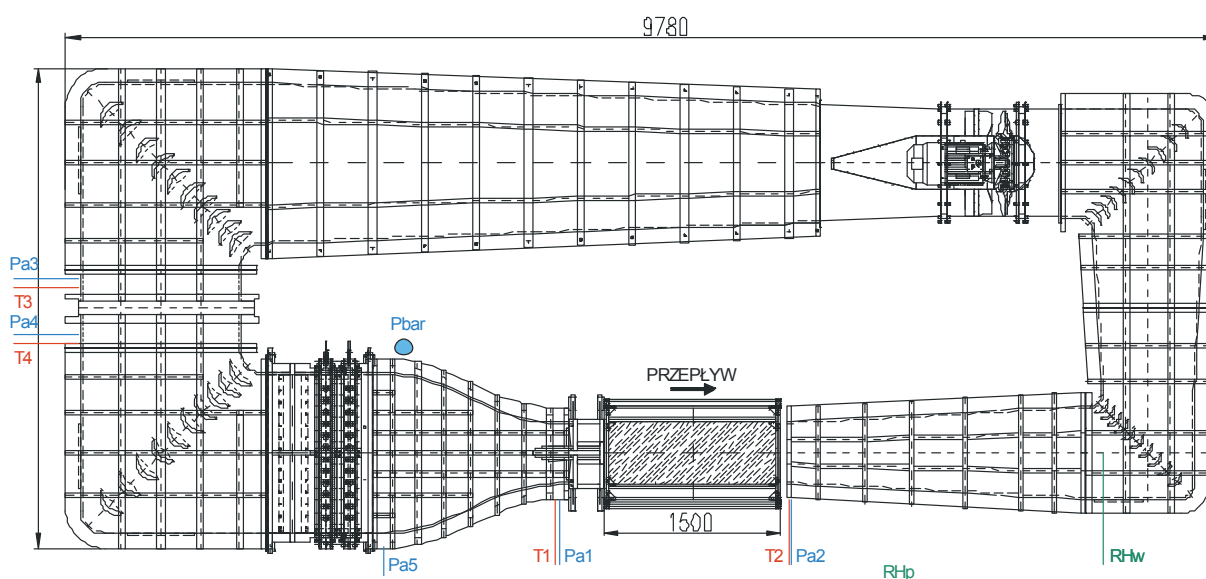
## 3. Przyrządy pomiarowe w tunelu i ich rozmieszczenie

Pomiary właściwości metrologicznych tunelu oparty był o przyrządy zainstalowane na stałe w tunelu oraz umieszczane w komorze pomiarowej (Rys. 1) (Gawor i in., 2011). W tunelu umieszczono czujniki: temperatury, ciśnienia (w tym barometrycznego) i różnicy ciśnień oraz wilgotności. Czujniki ciśnienia  $Pa_1$ ,  $Pa_2$ ,  $Pa_5$  (firmy SIMEX typ CCA-300) o zakresie pomiarowym  $0\div 2500$  Pa umieszczono na wlocie i wylocie komory pomiarowej oraz na wlocie do konfuzora. Czujniki różnicy ciśnienia  $Pa_3$ ,  $Pa_4$  (firmy APLISENS typ APR-2000) umieszczono na wlocie i wylocie z chłodnicy. Zakres pomiarowy tych czujników wynosił  $\pm 2200$  Pa.

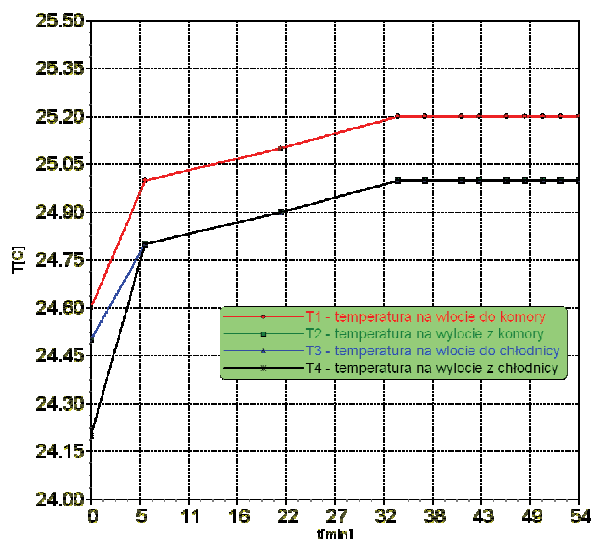
W tunelu umieszczono, za komorą pomiarową, a przed pierwszym kolaniem, czujnik wilgotności firmy PROFI MESS; typ RF-01N o zakresie od 0 do 100% RH.

W pomieszczeniu zamontowano dwa czujniki: jeden do pomiaru ciśnienia atmosferycznego, drugi do pomiaru wilgotności. Ciśnienie atmosferyczne  $P_{bar}$  (Rys. 1) mierzone było za pomocą manometru firmy DELATA OHM typ HD9408T BARO o zakresie  $0,8\div 1,1$  bar. Wilgotność w pomieszczeniu mierzona jest za pomocą czujnika firmy DST Seibu Giken; typ Eh4 o zakresie pomiarowym od 0 do 99% RH.

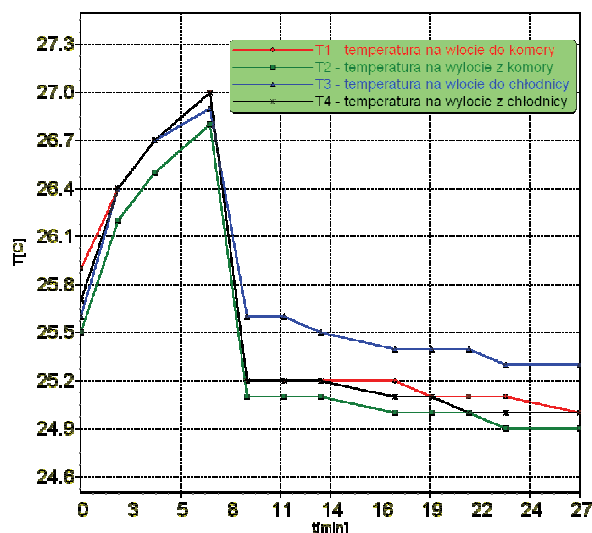
Przetworniki temperatury  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  (firmy TURCK typ – TTM050C-203A-CF-LI6-H1140-L100) umieszczono na wlocie i wylocie z komory pomiarowej oraz chłodnicy. Zakres pomiarowy tych czujników wynosił  $\pm 50^\circ\text{C}$ . Przykładowe zmiany temperatury w tunelu przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Na rysunku 2 pokazano wzrost temperatury w tunelu w przypadku wyłączonego modułu chłodzenia. Pomiary wykonywano przy prędkości powietrza w tunelu 10 m/s. Przy tej prędkości temperatura za komorą i w chłodnicy wzrosła o ok. 0.8K.



Rys. 1. Przekrój poziomy tunelu z naniesionymi lokalizacjami zamontowania przyrządów pomiarowych



Rys. 2. Wzrost temperatury w tunelu przy prędkości 10 m/s



Rys. 3. Zmiany temperatury w tunelu przy prędkości 30 m/s przed i po włączeniu układu chłodzenia

Różnica pomiędzy termometrem T1, a pozostałymi, wynosząca 0.2K wynika z dokładności pomiaru temperatury.

W drugim przykładzie podano zmiany temperatury przy prędkości 30 m/s (Rys. 3). Rysunek ten przedstawia również działanie układu chłodzenia. Temperatura, przy wyłączonym układzie chłodzenia, przez pierwsze 6 minut wzrasta o 1.5K. W siódmej minucie został włączony układ chłodzenia. W ciągu 2 minut temperatura w tunelu spada o 2K. Działanie układu chłodzenia powoduje charakterystyczną różnicę temperatur – temperatura na wlocie do układu chłodzenia jest wyższa o ok. 0.4K niż na wylocie z tego układu. Chłodzenie powietrza doprowadziło do obniżenia temperatury powietrza o ok. 0.5K w porównaniu z temperaturą na początku pomiarów.

#### 4. Podstawowa metoda pomiaru prędkości powietrza w tunelu

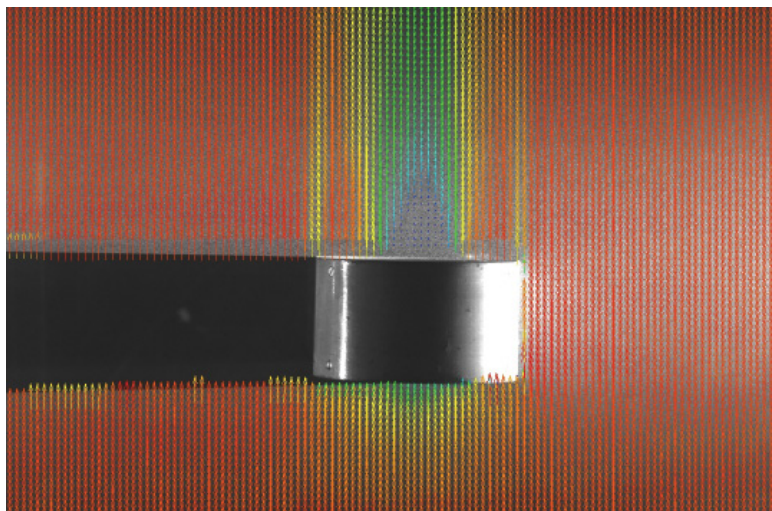
Podstawową metodą pomiaru prędkości w tunelu aerodynamicznym jest metoda cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV) (Raffel i in., 2007). W skład zestawu pomiarowego wchodzi: dwie kamery z matrycą typu sCMOS, dedykowane do pomiarów prędkości płynów metodami optycznymi firmy ANDOR (Rys. 13). Wyposażenie kamer stanowią: obiektywy firmy Nikon Nikkor AF-50 mm, f/1.8D; głowica mocująca – Manfrotto 400; frame grabber; filtr pasmowoprzepustowy 532 nm; para modułów Scheimfluga, zestaw mocowań i dystansów; zestaw do precyzyjnej kalibracji systemu stereoskopowego – specjalistyczne oprogramowanie do generowania wzorców kalibracyjnych; statyw Manfrotto 161MK2B.

Do generowania noża świetlnego służy dwuwętkowy laser impulsowy Nd:YAG o energii impulsu 200 mJ/wnękę, dedykowany do pracy w systemach PIV. Wiązka lasera może być prowadzona za pośrednictwem ramienia optycznego w wybrane miejsce układu pomiarowego. Optyka noża świetlnego zamocowana jest na końcu ramienia optycznego lub bezpośrednio na głowicy lasera. Do synchronizacji pracy lasera i kamer służy dedykowany moduł synchronizacji urządzeń pracujących w systemie pomiarowym.

W skład zestawu pomiarowego wchodzi również generator posiewu wytwarzający olejowe (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate) cząstki znacznikowe.

Integralną częścią całego systemu jest oprogramowanie do sterowania urządzeniami (laser, kamera, synchronizator), akwizycji danych (cyfrowych zdjęć badanego przepływu) i analizy obrazu prowadzącej do wyznaczania pól prędkości w dwóch lub trzech wymiarach.

Przykładowy wygląd opływu anemometru skrzydełkowego uzyskany za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wektory prędkości podczas opływu anemometru skrzydełkowego

## 5. Dodatkowe przyrządy do pomiaru prędkości

W celu zbadania właściwości metrologicznych tunelu aerodynamicznego w komorze pomiarowej instalowano czujniki służące do pomiaru prędkości. Stosowano czujniki działające na różnych zasadach pomiarowych (Tropea i in., 2007). Wykorzystywano czujniki oparte na propagacji fal temperaturowych, czujniki termooanemometryczne, anemometry skrzydełkowe oraz rurki spiętrzające. Część czujników była wykonana w IMG PAN, a część zakupiono od innych producentów.



Rys. 5. Głowica anemometru do pomiaru prędkości przepływu powietrza przy pomocy fal temperaturowych

### 5.1. Anemometr z falą cieplną

Tego anemometru używano do wyznaczania charakterystyki tunelu dla prędkości od 0.12 do 2.0 m/s. Anemometr skonstruowano w IMG PAN w Pracowni Metrologii Przepływów.

### 5.2. Anemometr termiczny do pomiaru małych prędkości

Drugim przyrządem używanym do pomiaru małych prędkości był anemometr termiczny (termooanemometr) firmy SCHMIDT technology. Zakres pomiarowy tego anemometru wynosił 0.06 do 2.5 m/s, a dokładność pomiaru  $\pm 3\%$ . Widok anemometru przedstawiono na rysunku 6. Anemometr przenosił pasmo częstotliwości do 1 Hz. Nie nadawał się do pomiarów zmiennych przepływów.



Rys. 6. Anemometr termiczny do małych prędkości

### 5.3. Anemometr skrzydełkowy

Anemometr skonstruowany w IMG PAN w Pracowni Wentylacji Kopalń. Zakres pomiaru prędkości tego przyrządu wynosi od 0.2 do 20 m/s. Minimalna prędkość mierzona wynosi 0.17 m/s. Zdjęcie anemometru skrzydełkowego przedstawiono na rysunku 7.

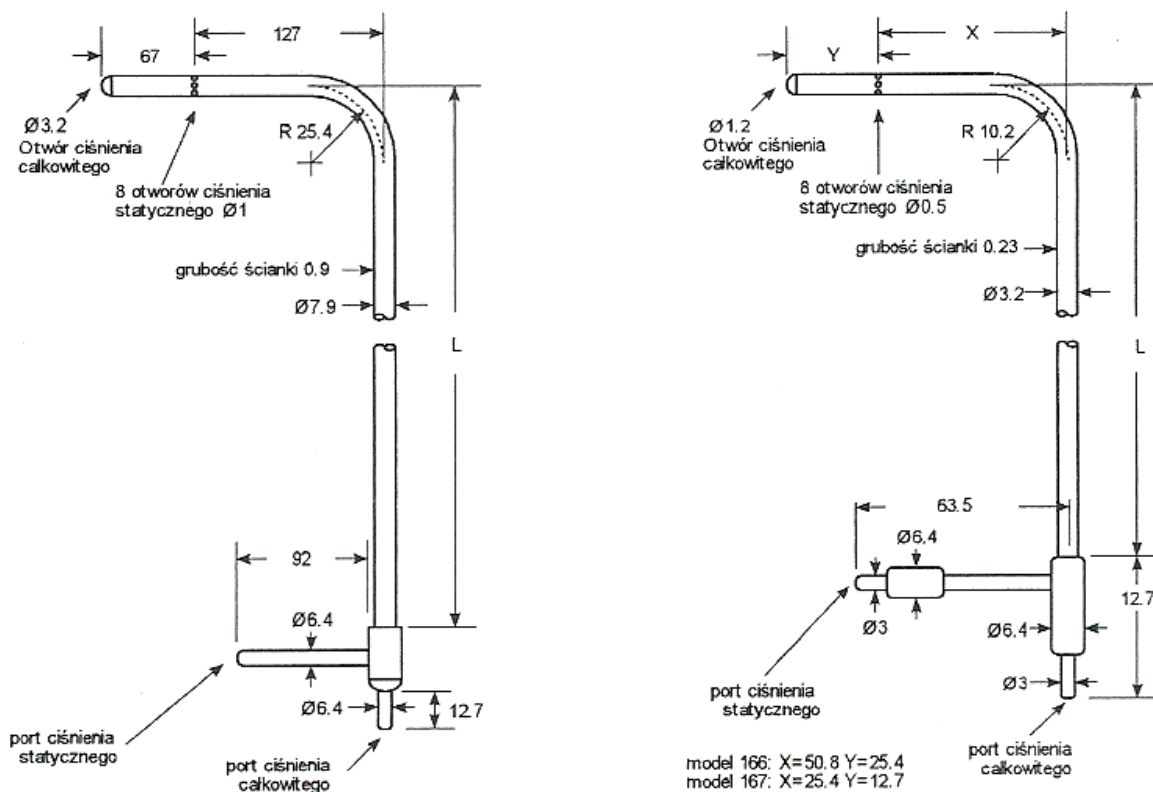


Rys. 7. Anemometr skrzydełkowy

### 5.4. Rurki spiętrzające i manometr

Do wyznaczania charakterystyki tunelu, dla dużych prędkości, wykorzystywano również rurki spiętrzające typu Pitota (Rys. 8). Na wyposażeniu tunelu są dwie rurki spiętrzające: standardowa o średnicy 7.9 mm i miniaturowa o średnicy 3.2 mm. Rurki mają budowę znormalizowaną więc nie wymagają wzorcowania (współczynnik korekcji wynosi jeden).

Ciśnienie różnicowe w rurkach spiętrzających mierzono za pomocą manometru firmy TSI AIRFLOW (Rys. 9). Zakres pomiaru ciśnienia tego mikromanometru wynosił  $\pm 3$  735 Pa. Zakres pomiaru prędkości 1.27 do 78.7 m/s. Rozdzielczość pomiaru prędkości 0.01 m/s.



Rys. 8. Rurka spiętrzająca typu Pitota



Rys. 9. Manometr różnicowy do pomiarów prędkości z użyciem rurki Pitota

### 5.5. Termoanemometr

Do pomiarów przepływów zmiennych w czasie, generowanych przez moduł wymuszeń dynamicznych (Rys. 10), wykorzystano jednowłókowy termoanemometr wykonany w IMG PAN w Pracowni Metrologii Przepływów (Rys. 11). Zakres pomiarowy prędkości termoanemometru wynosi od 0.1 do 50 m/s; dokładność pomiaru 5%. Pasma przenoszenia zmian prędkości, dla włókna o średnicy 5 mm, wynosi 50 kHz. Anemometr został wywzorcowany w tunelu aerodynamicznym będącym na wyposażeniu IMG PAN.



Rys. 10. Moduł wymuszeń dynamicznych



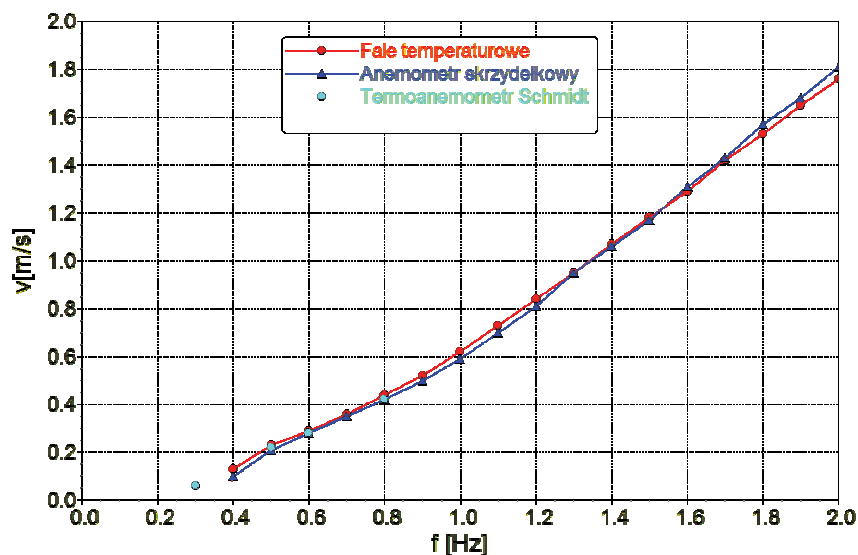
Rys. 11. Czujnik termoanemometru

## 6. Charakterystyki tunelu

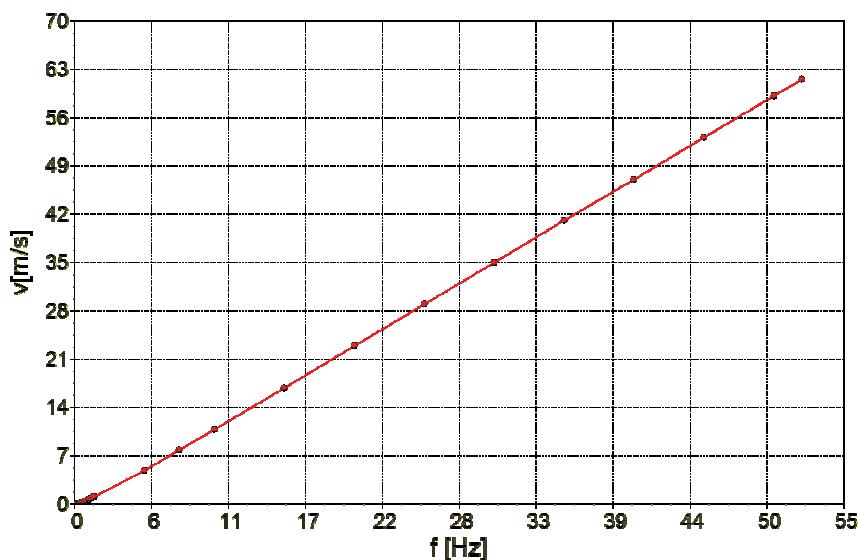
Wykorzystując opisane przyrządy pomiarowe wykonano charakterystykę tunelu. Charakterystyka polega na określeniu zależności częstotliwości falownika sterującego silnikiem wentylatora od prędkości w komorze pomiarowej. Charakterystykę tunelu wykonuje się w przypadku, gdy w komora pomiarowa nie zawiera żadnych elementów, oprócz przyrządów pomiarowych.

W zależności od prędkości przepływu powietrza wykorzystywano różne anemometry. Dla prędkości od 0.1 do 2.5 m/s używano: anemometru z falą cieplną, anemometru termicznego firmy SCHMIDT oraz anemometru skrzydełkowego. Charakterystykę tunelu dla tego zakresu prędkości przedstawiono na rysunku 12. Jak widać zależność prędkości od częstotliwości falownika, dla wszystkich czujników, jest identyczna.

Dla prędkości od 0.2 do 20 m/s charakterystykę tunelu wykonano używając anemometru skrzydełkowego. W zakresie prędkości od 5 do 60 m/s pomiary wykonano za pomocą rurki spiętrzającej. Pełną charakterystykę tunelu przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 12. Charakterystyka tunelu dla małych prędkości



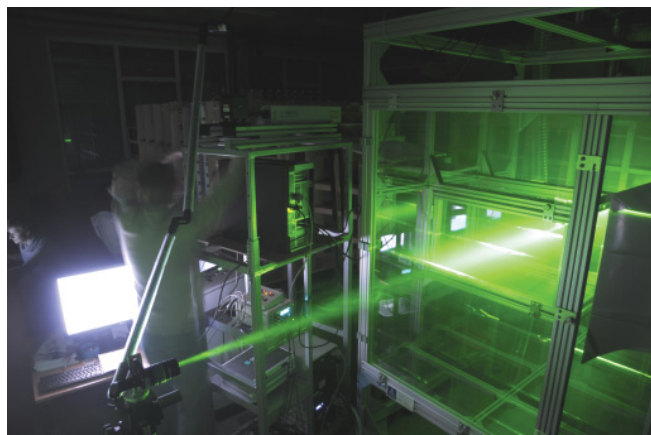
Rys. 13. Charakterystyka tunelu w pełnym zakresie prędkości

## 7. Profil prędkości w płaszczyźnie XY

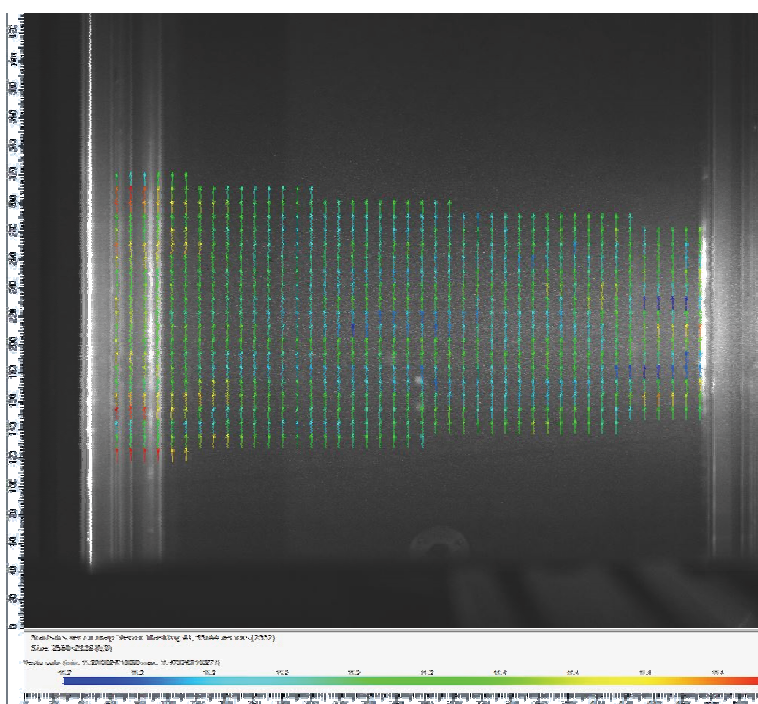
Przedstawione zostaną profile prędkości w dwu płaszczyznach. Przyjęto układ współrzędnych taki, że oś X skierowana jest wzdłuż osi komory pomiarowej, oś Y jest prostopadła do osi X w kierunku poziomym, a oś Z prostopadła do X w kierunku pionowym. Wykonanie zdjęć w tych dwóch płaszczyznach wymaga zmiany położenia lasera i kamery.

Przedstawimy profile prędkości wykonane w płaszczyźnie XY. Położenie lasera pokazano na rysunku 14 (kamera, niewidoczna na zdjęciu wykonuje zdjęcia prostopadle do noża świetlnego).

Na rysunku 15 przedstawiono wektory prędkości zarejestrowane prostopadle do osi Z (płaszczyzna XY). Parametry przepływu w tym przekroju przedstawiono w tabeli 1. Pomiary wykonano przy częstotliwości falownika 10 Hz, co odpowiada prędkości przepływu powietrza 10.8 m/s, zgodnie z charakterystyką tunelu. Średnia wartość prędkości wzdłuż osi tunelu, wyznaczona metodą cyfrowej anemometrii obrazowej, wynosi  $V_x = 11.3$  m/s. W kierunku prostopadłym do osi tunelu  $V_y = 0.0$  m/s ( $-0.0007$  m/s).



Rys. 14. Widok noża świetlnego w przypadku pomiarów profilu prędkości w płaszczyźnie XY



Rys. 15. Wektory prędkości w płaszczyźnie XY

Podczas pomiarów wykonywano serię zdjęć, dokładniej par zdjęć. Na podstawie każdej pary zdjęć wyznaczano, metodą korelacyjną, pole prędkości. Na podstawie tego pola prędkości wyznaczano średnią prędkość w profilu.

Kolejnym parametrem określającym właściwości strugi powietrza w komorze pomiarowej jest kąt odchylenia strugi od osi tunelu. Kąt ten wyznaczany jest jako  $\arctg(V_y/V_x)$ . Kąt odchylenia profilu wynosi  $0.0^\circ$  ( $-0.0001^\circ$ )

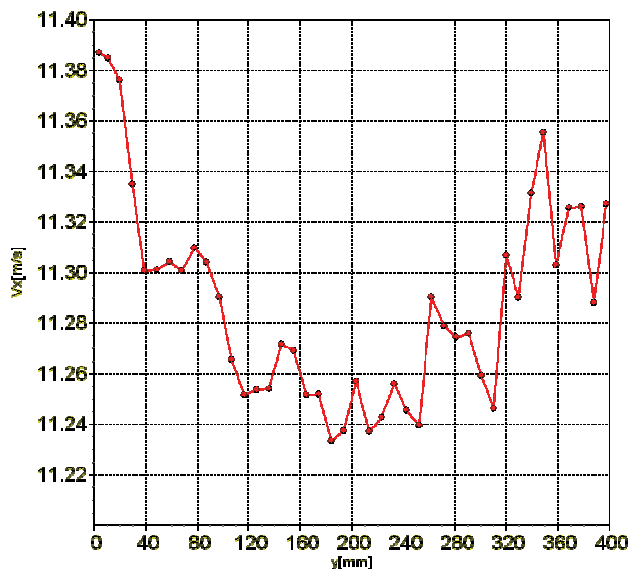
Tab. 1. Parametry przepływu w płaszczyźnie XY

Częstotliwość falownika	10	[Hz]
Płaszczyzna pomiaru	XY	[-]
Prędkość z charakterystyki tunelu	10,88	[m/s]
Prędkość średnia $V_x$	11,29	[m/s]
Prędkość średnia $V_y$	-0,0007	[m/s]
Intensywność turbulencji	0,27	[%]
Kąt odchylenia strumienia	-0,0001	[°]

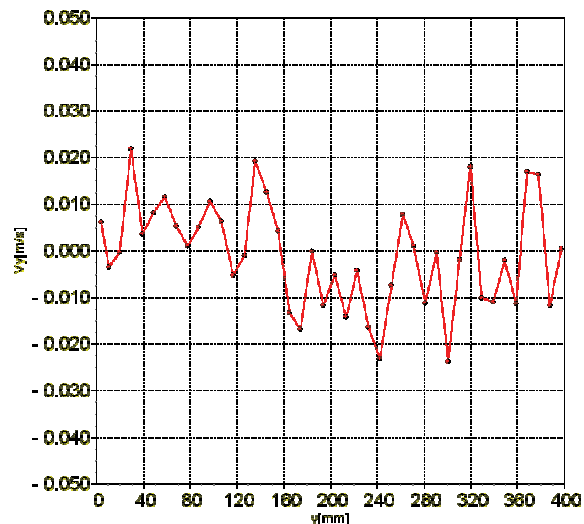


Na rysunku 16 przedstawiono przykładowy profil prędkości  $V_x$  wzdłuż osi Y. Średnia wartość prędkości, wzdłuż profilu, wynosi 11.3 m/s, a różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wartości prędkości w tym profilu wynosi 0.15 m/s.

Profil prędkości składowej prędkości  $V_y$  wzdłuż osi y przedstawiono na wykresie 17. Średnia wartość prędkości dla tego profilu wynosi 0.0 m/s ( $-0.0007$  m/s). Różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wynosi 0.05 m/s.

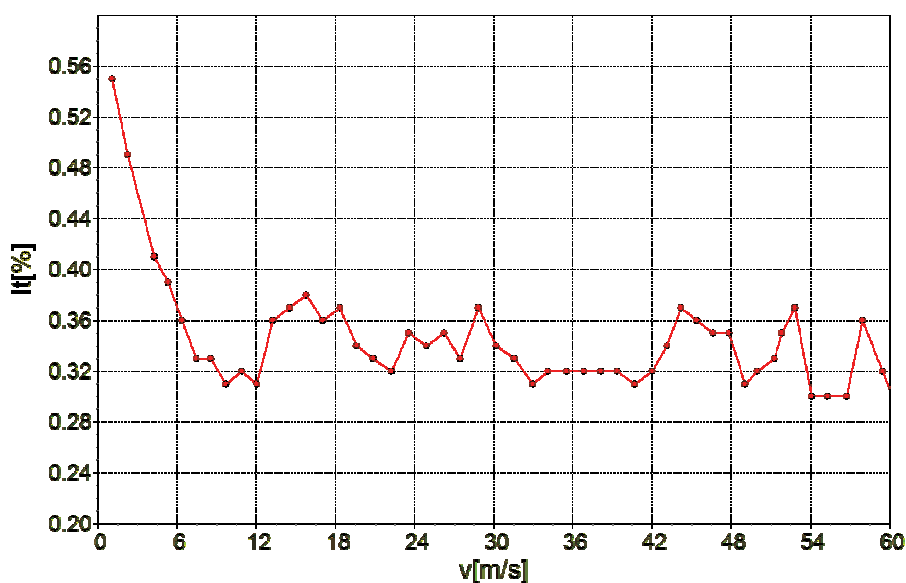


Rys. 16. Profil prędkości  $V_x$  wzdłuż osi Y



Rys. 17. Profil prędkości  $V_y$  wzdłuż osi Y

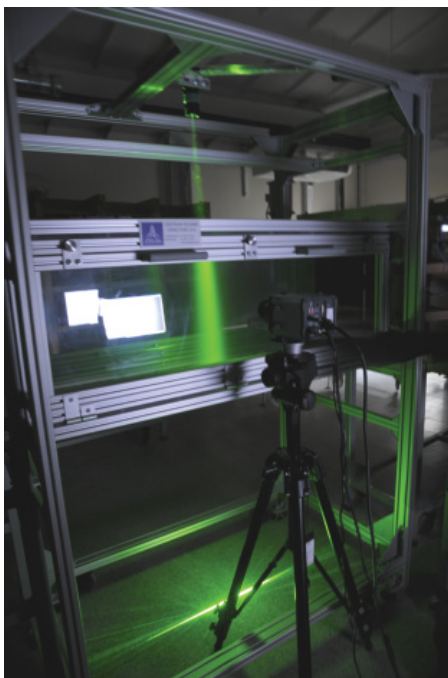
Intensywność turbulencji wyznaczono dla całego zakresu prędkości tunelu za pomocą termoanemometru jednowłóknowego (Rys. 11). Umieszczono go w środku komory pomiarowej i skierowano w kierunku napływu. Wartość intensywności turbulencji obliczano odnosząc odchylenie standardowe do prędkości średniej. Wykres tak zmierzonej zależności w funkcji prędkości przedstawiono na rysunku 18. Dla prędkości powyżej  $\sim 1,5$  m/s wartość tego parametru utrzymuje się poniżej poziomu 0,5%.



Rys. 18. Intensywność turbulencji w środku komory pomiarowej zamkniętej

## 8. Profil prędkości w płaszczyźnie XZ

Drugą serię pomiarów wykonano w płaszczyźnie XZ. Położenie lasera pokazano na rysunku 19. Zdjęcie pokazuje położenie głowicy noża świetlnego, nad komorą pomiarową oraz kamerę z boku komory. Wyznaczone parametry przepływu w tym przekroju przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 19. Widok noża świetlnego w przypadku pomiarów profilu prędkości w płaszczyźnie XZ

Tab. 2. Parametry przepływu w płaszczyźnie XZ

Częstotliwość	10	[Hz]
Płaszczyzna pomiaru	ZY	[-]
Prędkość z charakterystyki	10,88	[m/s]
Prędkość średnia $V_x$	11.25	[m/s]
Prędkość średnia $V_z$	0.024	[m/s]
Intensywność turbulencji	0,25	[%]
Kąt odchylenia strumienia	0,0024	[°]

## 9. Wymuszenia dynamiczne

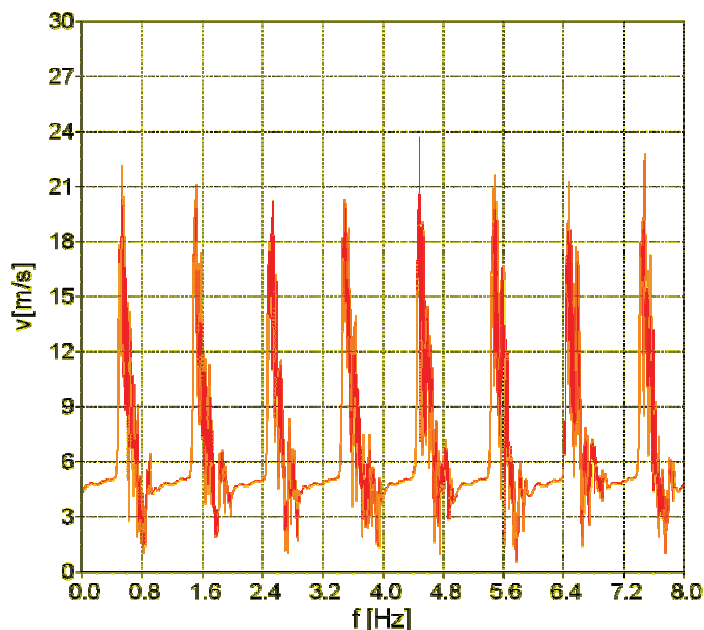
Moduł wymuszeń dynamicznych przedstawiono na rysunku 10. Zasada jego działania polega na zmianie pola przekroju na wlocie do komory pomiarowej. Przekrój poprzeczny komory pomiarowej wynosi  $0.25 \text{ m}^2$ . Łopatki mogą przysłaniać 90, 80 lub 70% przekroju komory. Powoduje to zmianę powierzchni do wartości odpowiednio  $0.025$ ,  $0.05$  i  $0.075 \text{ m}^2$ .

Pomiary wykonywano przy prędkości przepływu powietrza  $10.8 \text{ m/s}$  (częstotliwość falownika  $10 \text{ Hz}$ ). Częstotliwość łopat generator wynosiła  $1.0 \text{ Hz}$ . Na rysunku 20 przedstawiono zmiany prędkości podczas wymuszeń dynamicznych, a w tabeli 3 statystykę pomiarów. Analiza tabeli prowadzi do wniosku, że w zależności od stopnia zamknięcia powierzchni przekroju zmienia się średnia wartość prędkości. Dla zamknięcia 90% wynosi ona  $6.5 \text{ m/s}$ , a dla 70%  $8.8 \text{ m/s}$ . Zmianie ulega również minimalna wartość prędkości od  $0.5 \text{ m/s}$  do  $5.7 \text{ m/s}$ . Niewielkiej zmianie ulega maksymalna wartość prędkości.

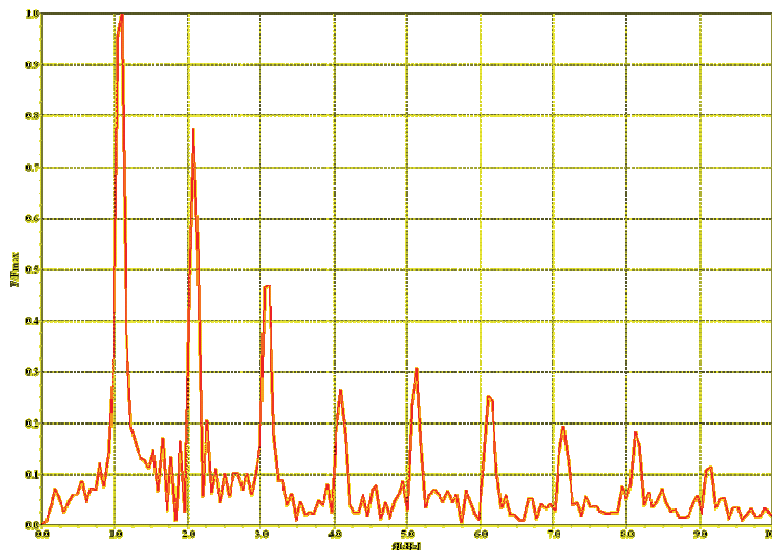
Na rysunku 21 przedstawiono transformatę Fouriera zarejestrowanych sygnałów prędkości przy przysłonięciu przekroju 90%. Główny pik transformaty występuje przy częstotliwości  $1 \text{ Hz}$ , bo taka jest podstawowa częstotliwość pracy łopatek. W widmie częstotliwości widać również kolejne harmoniczne. Podobne widma częstotliwości zarejestrowano przy pozostałych przysłonięciach.

Tab. 3. Wyniki pomiarów prędkości w komorze pomiarowej z działającym modulem wymuszeń dynamicznych

Pow. zamknięta	10% (0.025 m <sup>2</sup> )	20% (0.05 m <sup>2</sup> )	30% (0.075 m <sup>2</sup> )
Średnia [m/s]	6.5	7.7	8.8
Minimalna [m/s]	0.5	1.3	5.7
Maksymalna [m/s]	23.7	22.6	22.1
Odch. Std. [%]	58	42	34



Rys. 20. Prędkość przepływu podczas wymuszeń dynamicznych



Rys. 21. Transformata Fouriera

### 10. Podsumowanie

Pomiary prędkości przepływu powietrza w komorze pomiarowej wykazały, że najmniejsza prędkość jaką można uzyskać to 7 cm/s, a największa to 62 m/s. Na ich podstawie można stwierdzić, że w obszarze stanowiącym ok. 80% przekroju poprzecznego przestrzeni pomiarowej rozkład prędkości w profilu poziomym i pionowym jest równomierny.

Intensywność turbulencji, w zakresie prędkości od 1.5 do 50 m/s, jest mniejsza od 0.5%.

Stabilizacja temperatury, utrzymywana za pomocą modułu chłodzenia, działa prawidłowo utrzymując temperaturę powietrza w tunelu na zadanym poziomie z dokładnością do 1K.

Krytycznie oceniono działanie modułu wymuszeń dynamicznych. Uwagi dotyczące działania tego urządzenia zostały przekazane producentowi, który w ramach gwarancji zobowiązał się usunąć wady.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

Barlow J.B., Rae W.H., Pope A., **1999**: *Low-speed wind tunnel testing*. Wiley.

Dokumentacja Zdawcza, **2013**: 5838-DZ/0.0, Rew. A, CTO S.A., Gdańsk.

Gawor M., Gorgoń J., Sobczyk J., **2011**: *Tunel aerodynamiczny przystosowany do badań metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace IMG PAN, T. 13, Nr 1-4, s. 257-266.

Protokół Kalibracji, **2013**: 5838-DZ/0.7, CTO S.A., Gdańsk.

Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J., **2007**: *Particle Image Velocimetry a practical guide*. Springer.

Tropea C., Yarin A. L., Foss J.F., **2007**: *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer.

## Analysis of the wind tunnel flow parameters with the use of Particle Image Velocimetry

### Abstract

In the paper measurements of metrological properties of the closed circuit wind tunnel are presented. In the tunnel parameters of airflow such as velocity profile in two perpendicular cross sections, intensity of turbulence, deviation of stream from axis of measurement chamber, temperature of stream, static pressure and relative humidity were measured. The velocity profiles were measured for 5, 10, 30, 52 Hz of variable frequency drive (VFD) which corresponds to velocities 5.3, 10.9, 34.9 and 62 m/s in the measurement chamber. The type, the measuring range and the location of measuring instruments are given.

Characteristics of the tunnel, in other words velocity in the empty measurement chamber dependable from frequency of VFD for chosen thermodynamic parameters (T, RH, P) is presented.

Authors stated that cooling system works as intended and stabilizes temperature of air stream at given level with accuracy of 1K.

Research results of the modulus inducing dynamic changes of the velocity of flow are presented.

**Keywords:** aerodynamic tunnel, stereoscopic PIV (SPIV), measurement of stream parameters