



## **Kształtowanie profilu prędkości w tunelu powietrznym przeznaczonym do badań procesów cieplno-przepływowych**

**Agnieszka Ochman<sup>1</sup>, Katarzyna Strzelecka<sup>2</sup>, Darya Krasota<sup>1</sup>**

*Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny*

<sup>1</sup>*Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych*

<sup>2</sup>*Katedra Technologii Energetycznych, Turbin i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych*

*E-mail: agnieszka.ochman@pwr.edu.pl*

### STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki z przeprowadzonych badań dotyczących pomiarów profilu prędkości w tunelu powietrznym zbudowanym do analizy wpływu geometrii turbulizatora na wymianę ciepła przy powierzchni grzewczej płaskiej płyty. W celu uzyskania jednorodnego profilu prędkości w części badawczej w sekcji wlotowej zastosowano tzw. dyszę Witoszyńskiego. Badania przeprowadzono dla dwóch charakterystycznych przekrojów tzn. na wlocie i wylocie z sekcji badawczej. Na podstawie badań laboratoryjnych określono jak kształtuje się profil prędkości dla przekroju umiejscowionego 50 mm za wylotem z dyszy Witoszyńskiego (wlot do sekcji badawczej) oraz w odległości 430 mm za wylotem z dyszy Witoszyńskiego (wylot z sekcji badawczej). Otrzymane wyniki zaprezentowano na wykresach 2D.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *tunel powietrzny, dysza Witoszyńskiego, profil prędkości*

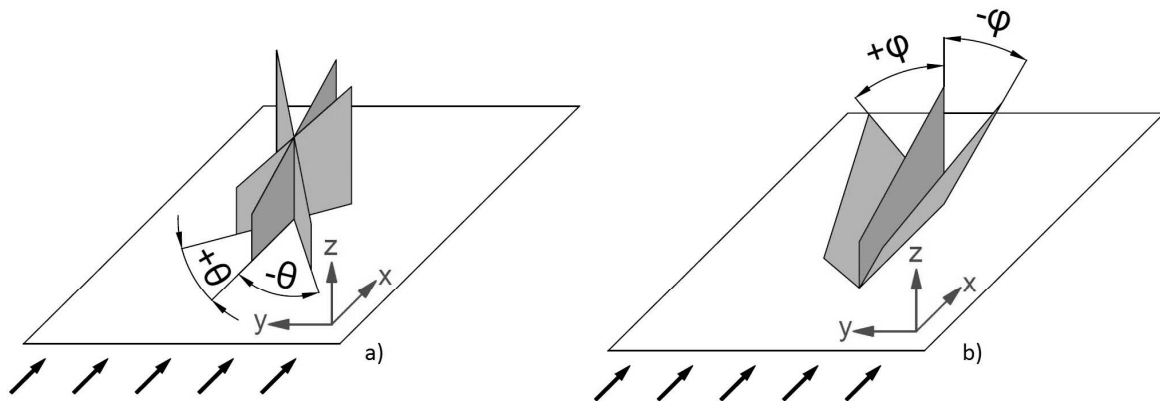
---

### 1. WPROWADZENIE

Ze względu na charakter zjawisk, uzyskanie jednorodnego profilu prędkości jest konieczne podczas prowadzenia doświadczalnych badań cieplno-przepływowych. W artykule zaprezentowano pomiary profilu prędkości w tunelu powietrznym zbudowanym na potrzeby zgłoszenia patentowego numer P.422127: „Akumulator ze złożem zmiennofazowym” oraz przeprowadzenia analiz doświadczalnych wpływu geometrii turbulizatora na wymianę ciepła przy powierzchni płaskiej.

Jednorodny profil prędkości w sekcji badawczej niezbędny jest m.in. do przeprowadzenia badań wpływu modyfikacji powierzchni płaskiej na procesy wymiany ciepła

i co za tym idzie określenie optymalnego kształtu np. turbulizatora. W sekcji badawczej zostanie umieszczona płaska grzałka, której powierzchnia będzie omywana przez strugę powietrza. Na grzałce zostaną umieszczone turbulizatory (ang. „vortex generators”), których celem jest wprowadzenie zaburzeń w strudze przepływającego płynu. Powstające za wystającym elementem wiry powodują zerwanie warstwy przyściennej oraz intensyfikację wymiany ciepła na drodze konwekcji [1, 2, 5, 15]. Na rys. 1 zostały zdefiniowane podstawowe parametry brane pod uwagę przy analizie wpływu turbulizatorów na procesy wymiany ciepła: kąt natarcia oraz pochylenie względem napływającej strugi powietrza. Istotną rolę odgrywa również kształt turbulizatora [2, 5].



Rys. 1: a) Wyznaczenie kąta natarcia turbulizatora oraz b) jego nachylenia [15]

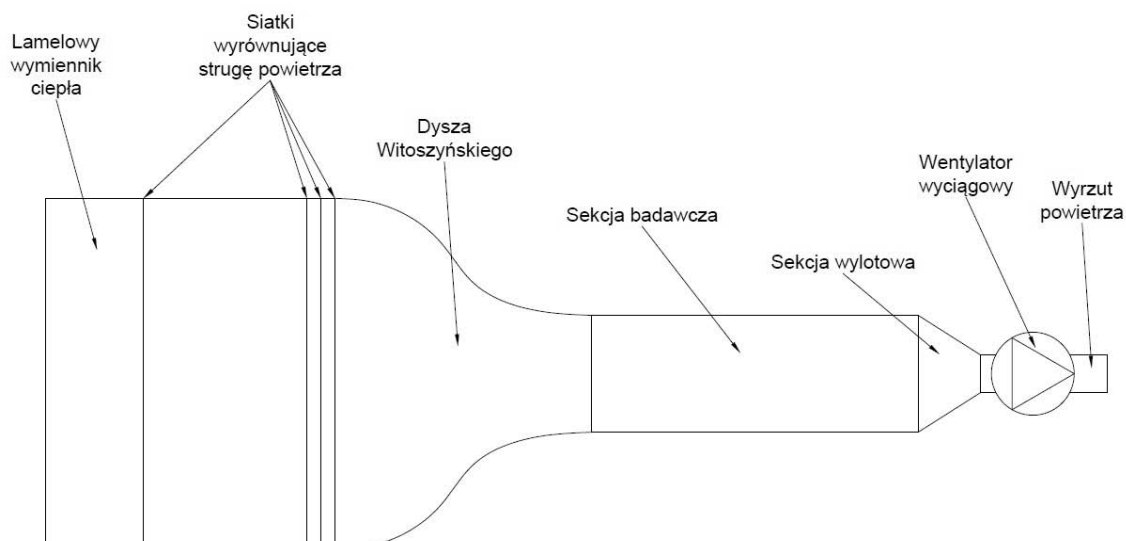
W celu uzyskania powtarzalności prowadzonych badań nad wpływem kształtów turbulizatorów na wymianę ciepła, niezbędne jest uzyskanie jednorodnego profilu prędkości przy napływie strugi na turbulizator. Dzięki temu wyeliminowane zostaną wszelkie zewnętrzne zaburzenia, które mogłyby wpłynąć na procesy wymiany ciepła oraz niekontrolowanie oddziaływać na otrzymane wyniki. Dlatego niezbędne jest przed przystąpieniem do badań docelowych analiza profilu prędkości w sekcji badawczej. Uzyskanie jednorodnej strugi powietrza omywającej turbulizator umożliwi przeprowadzenie powtarzalnych badań oraz ułatwi opracowanie modelu numerycznego i implementacji warunków brzegowych zgodnymi z panującymi w sekcji badawczej w czasie doświadczenia.

Zaprojektowany i zbudowany tunel powietrzny powinien zapewnić prowadzenie badań przy zachowaniu jednorodnego profilu prędkości i temperatury czynnika omywającego elementy znajdujące się w sekcji badawczej. Na prezentowanym w artykule stanowisku, możliwym jest pomiar różnic temperatury w wybranych punktach na wlocie i wylocie z sekcji badawczej. Specjalne otwory znajdujące się w pokrywie umożliwiają przeprowadzenie pomiarów temperatury i prędkości powietrza w wybranych miejscach w sekcji badawczej.

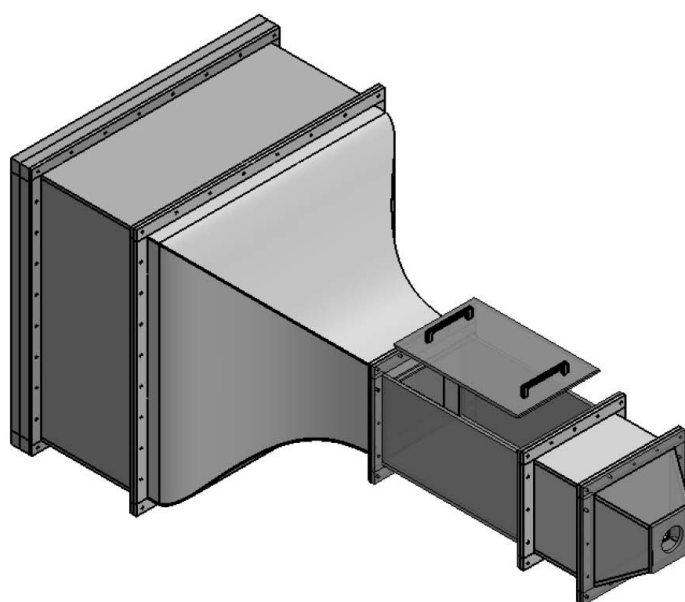
Aby spełnić wymagania związane z uzyskaniem jednorodnego profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej w tunelu zastosowano specjalną dyszę Witoszyńskiego.

## 2. OPIS STANOWISKA I METODYKA BADAŃ

W celu sprawdzenia profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej, przeprowadzono miejscowe pomiary prędkości na stanowisku przedstawionym na rys.2 oraz w układzie izometrycznym na rys.3.



Rys. 2: Schemat stanowiska badawczego



Rys. 3: Uproszczony model 3D tunelu powietrznego

Przepływ powietrza przez stanowisko, wymuszany jest za pomocą wentylatora wyciągowego zamontowanego za sekcją badawczą. Powietrze przepływa kolejno przez sekcję zasysania strugi, sekcję kształtowania strugi i wyrównania przepływu, następnie przez sekcję badawczą oraz sekcję wylotową. Sekcja zasysania strugi składa się z lamelowego wymiennika ciepła, który może pracować w trybie grzania lub chłodzenia. Gęsto ułożone lamele pozwalają na zwiększenie wymiany ciepła, a także na redukcję zawirowań i wstępne prostowanie strugi powietrza wprowadzanej do układu. Zastosowanie sekcji zasysania, umożliwi regulowanie temperatury zasysanego powietrza oraz jego wstępną stabilizację cieplno-przepływową.

W skład sekcji kształtowania strugi i wyrównania przepływu wchodzi kolejno siatka o wielkości oczek  $1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , odcinek prosty (komora) o długości  $370\text{ mm}$  i przekroju poprzecznym  $750\text{ mm} \times 750\text{ mm}$  oraz układ 3 siatek rozsuniętych na odległość  $30\text{ mm}$  od siebie. Mają one za zadanie wyrównać strugę jeszcze przed wprowadzeniem jej do dyszy Witoszyńskiego.

Dysza Witoszyńskiego stanowi ostatni, zasadniczy element sekcji wyrównania przepływu i kształtowania profilu prędkości. Zastosowano ją w celu uzyskania równomiernego profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej. W szczególności profil równomierny wymagany jest w centralnej części sekcji badawczej, gdzie umieszczone zostaną badane elementy (m.in. turbulizatory). W tym właśnie obszarze prowadzone będą zasadnicze badania na stanowisku. Dodatkową zaletą zastosowania dyszy Witoszyńskiego jest bardzo mała grubość warstwy przyściennej u jej wylotu [4]. Szereg autorów umieszcza dyszę Witoszyńskiego w układzie właśnie w celu uzyskania jednorodnego rozkładu prędkości [8, 7, 11, 14].

Profil dyszy Witoszyńskiego zaprojektowano w oparciu o wzór 1 [12]:

$$\frac{d}{d_{cr}} = \left( 1 - \left[ 1 - \left( \frac{d_{cr}}{d_1} \right)^2 \right] \frac{(1 - \xi^2)^2}{(1 + 0,33\xi^2)^3} \right)^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

$d_{cr}$  – średnica krytyczna (najmniejsza)

$d_1$  – średnica na wlocie do dyszy (największa)

$\xi$  – współczynnik geometryczny

oraz

$$\frac{d_{cr}}{d_1} = 0,416 \quad (2)$$

$$\xi = \frac{x}{l} \quad (3)$$

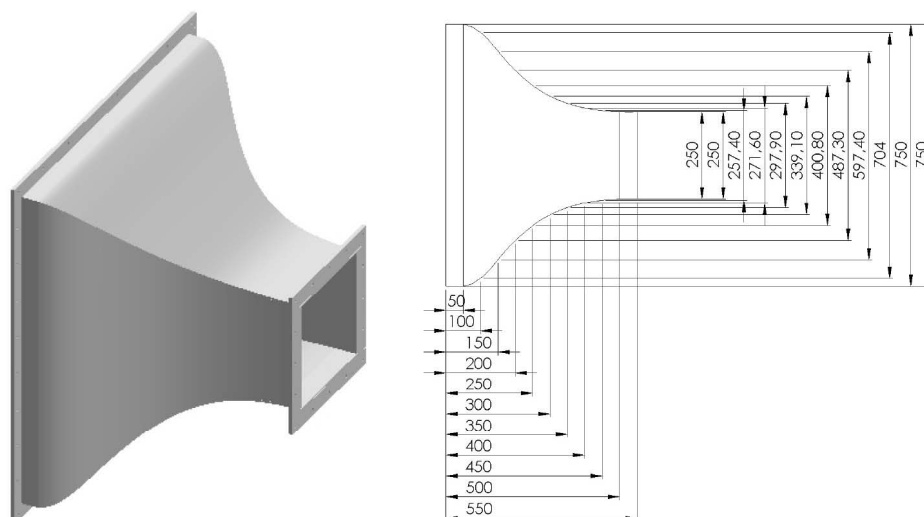
Podobne formuły przedstawiają autorzy w innych pracach [4, 9, 3, 6].

W tabeli 1 zestawiono odległość ścianki dyszy od jej osi symetrii  $Y$  dla wybranych punktów wzdłuż przepływu strugi  $X$ , mm. Dysza ma przekrój kwadratowy i wraz z wymiarami charakterystycznymi została zaprezentowana na rys.4.

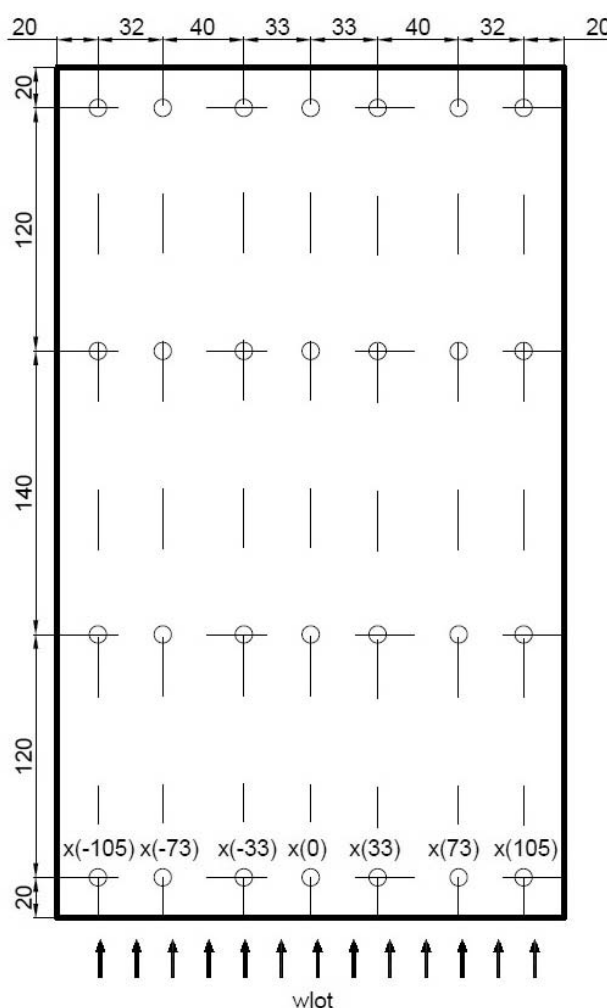
**Tabela 1:** Punkty odniesienia do wyznaczenia krzywizny dyszy

$X, \text{ mm}$	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
$\pm Y, \text{ mm}$	375	375	352	299	244	200	169	149	136	129	125	125

Sekcja badawcza stanowiska pomiarowego o przekroju  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  i długości  $520\text{ mm}$ , została wyposażona w łatwo demontowalną pokrywę. Rozwiązanie to umożliwia docelowy szybki montaż i demontaż elementów badawczych. W celu wykonania badań testowych profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej i wylocie z niej, w pokrywie wykonano otwory pomiarowe zgodnie z normą PN-ISO 5221 : 1994 [10]. Średnica otworów odpowiada średnicy zastosowanej sondy termooanemometru i wynosi  $8\text{ mm}$ . Położenie pokrywy na stanowisku badawczym przedstawiono na rys. 5.

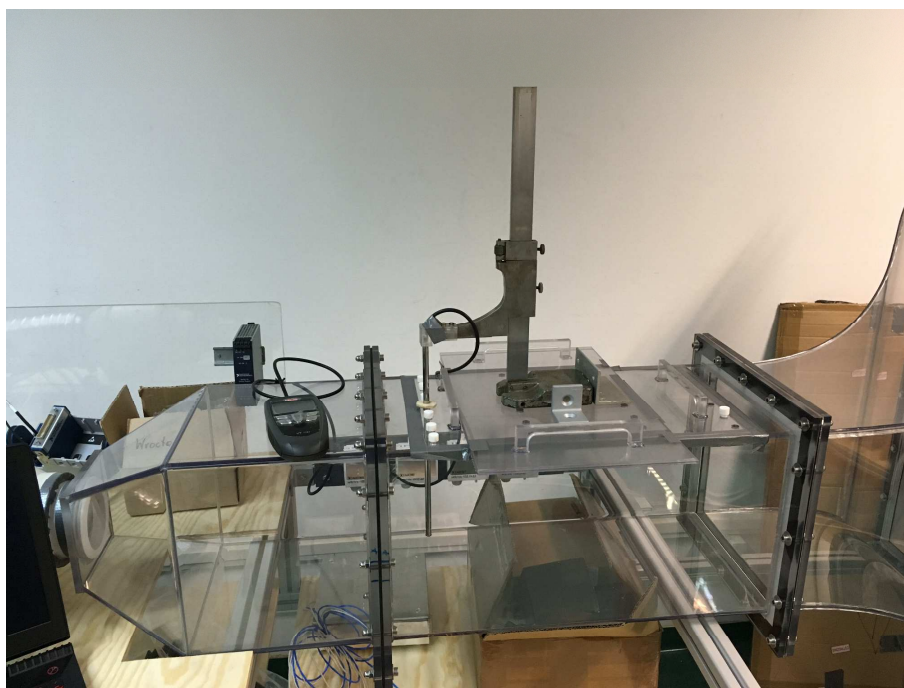


**Rys. 4:** Model 3D dyszy Witoszyńskiego wraz z wymiarami charakterystycznymi



**Rys. 5:** Widok z góry na pokrywę z umiejscowieniem otworów do pomiarów termooanemometrem

W każdym z otworów umieszczano sondę termooanemometru służącą do pomiaru wartości prędkości. Zbudowany układ trawersujący umożliwił precyzyjne przesuwanie końcówki sondy od dna do pokrywy górnej z dokładnością do 1 mm (rys. 6).



**Rys. 6:** Termoanemometr wraz z układem trawersującym



**Rys. 7:** Uszczelnienie sekcji badawczej w czasie pomiarów prędkości miejscowych

Podczas pomiarów, niewykorzystywane otwory doszczelniano specjalnie przygotowanymi korkami liczącymi od spodu z powierzchnią pokrywy. Po umieszczeniu sondy w wybranym punkcie, otwór ten był także doszczelniany od góry (rys.7).

Do pomiarów wykorzystano termoanemometr VT 100 firmy KIMO, którego dokładność wynosi  $\pm 0,5$  m/s w zakresie prędkości od 0,15 m/s do 3 m/s.

Sonda termoanemometru jest wyposażona w czujnik PT100 1/3 DIN. Pomiar temperatury i wilgotności powietrza na wlocie wykonano za pomocą sondy wilgotności firmy Testo przystosowanej do miernika testo 480.

Dokładność sondy wynosi  $\pm 0,04^{\circ}\text{C}$  dla zakresu temperatur od  $0,1^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$  oraz  $\pm 2\%$  RH dla zakresu wilgotności od  $2,1\%$  RH do  $98\%$  RH. Cyfrowy miernik testo 480 posiada wbudowany pomiar ciśnienia absolutnego o dokładności  $\pm 3\text{ hPa}$  w zakresie od  $700\text{ hPa}$  do  $1100\text{ hPa}$ .

### 3. ANALIZA WYNIKÓW

Pomiary prędkości w sekcji badawczej przeprowadzono w dwóch przekrojach: na wlocie oraz na wylocie. Podczas prowadzenia badań co 15 minut rejestrowano parametry otoczenia takie jak: ciśnienie, temperaturę i wilgotność w części wlotowej do tunelu badawczego. W czasie prowadzonych pomiarów profilu prędkości na wlocie do sekcji badawczej średnie ciśnienie otoczenia wyniosło  $997,7\text{ hPa}$ , średnia wartość temperatury powietrza  $22,3^{\circ}\text{C}$ , natomiast wilgotność średnia utrzymywała się na poziomie  $40,8\%$ . W czasie pomiarów profilu prędkości na wylocie z sekcji badawczej średnie ciśnienie otoczenia wyniosło  $997,3\text{ hPa}$ , średnia temperatura  $22^{\circ}\text{C}$ , natomiast średnia wilgotność  $37,2\%$ . Sonda termooanemometru przesuwana była od dna tunelu do góry co  $20\text{ mm}$ , przy czym dno oznacza odsunięcie czujnika sondy o  $9,25\text{ mm}$  od ścianki dolnej. W każdym punkcie pomiarowym dokonano 6 pomiarów prędkości. Wyniki uzyskane w czasie pomiarów zaprezentowano na rys. 8 i rys. 9.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów możliwe było zaobserwowanie zmiany profilu prędkości w interesującej nas sekcji. Stwierdzono, że na wlocie do części badawczej, profil prędkości jest bardziej jednorodny niż na wylocie.

Na wykresach przedstawiających profil prędkości na wlocie (rys. 8) i wylocie (rys. 9) pionową linią oznaczono średnią prędkość przepływu dla danego przekroju która została wyznaczona ze wzoru (4):

$$v_{sr} = \frac{q_v}{A} \quad (4)$$

gdzie:

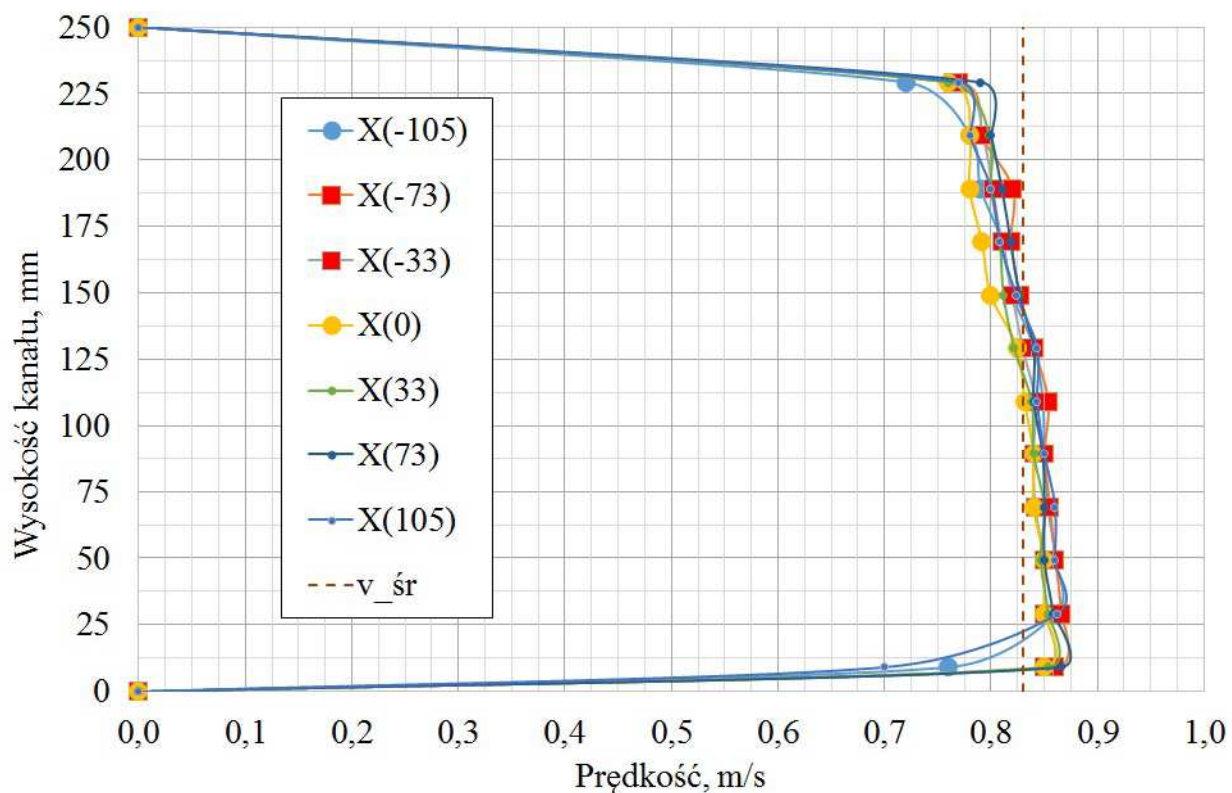
$q_v$  – strumień przepływu wyliczony jako całka objętościową pod zmierzonym przestrzennym polem prędkości w analizowanym przekroju,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$A$  – pole powierzchni analizowanego przekroju,  $\text{m}^2$ .

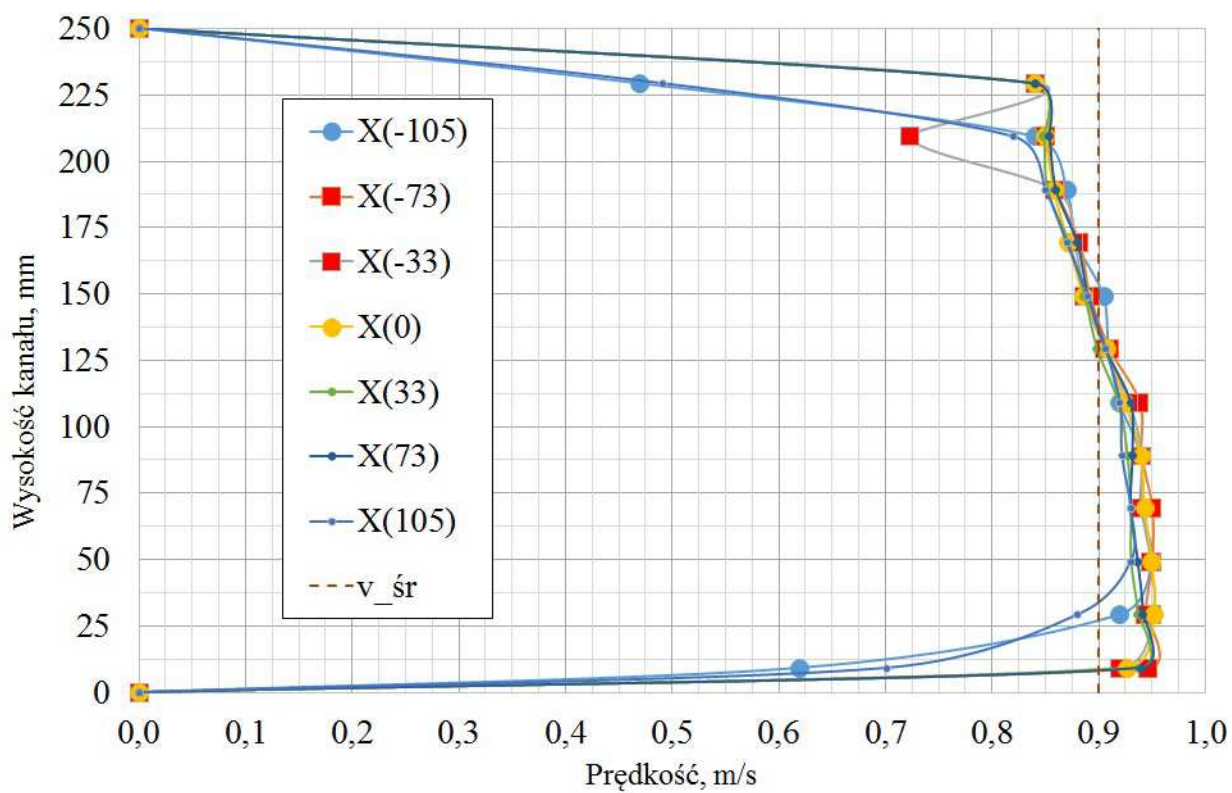
Całkę objętościową obliczono na podstawie zmierzonych profili prędkości w oprogramowaniu *Matlab* metodą *Trapezoidal numerical integration*. Obliczony strumień przepływu dla przekroju wlotowego wyniósł  $137,59\text{ m}^3/\text{h}$ , natomiast dla przekroju wylotowego  $149,39\text{ m}^3/\text{h}$ . Jako pole powierzchni przekroju przyjęto maksymalny przekrój wyznaczony przez graniczne punkty pomiarowe, wynoszący  $0,0462\text{ m}^2$ . Średnia wartość prędkości przepływu na wlocie to  $v_{sr} = 0,83\text{ m/s}$ , natomiast dla wylotu  $v_{sr} = 0,90\text{ m/s}$ . Zarówno wartości strumienia przepływu, jak i średniej prędkości są większe na wylocie niż na wlocie odpowiednio o  $11,80\text{ m}^3/\text{h}$  oraz  $0,071\text{ m}^2/\text{s}$ . W obu przypadkach różnica została określona na ok.  $8\%$ .

Na różnicę pomiędzy wartościami strumienia przepływu oraz średnią prędkością na wlocie i wylocie z sekcji badawczej mogą mieć wpływ:

- nieszczelne połączenie pomiędzy pokrywą, a obudową sekcji badawczej,
- błąd pomiarowy termooanemometru ( $\pm 0,05\text{ m/s}$ ),
- zaburzenia przepływu spowodowane nierównomierną pracą wentylatora,
- warunki atmosferyczne (wilgotność, temperatura, ciśnienie).



Rys. 8: Profil prędkości na wlocie do sekcji badawczej



Rys. 9: Profil prędkości na wylocie z sekcji badawczej



Na podstawie otrzymanych danych pomiarowych wyznaczono procentowe odchylenie prędkości miejscowych od prędkości średniej. Największe odchylenia zaobserwowano przy ściankach tunelu, wynoszące od 2,74% do 15,39% dla wlotu i od 2,70% do 45,30% na wylocie. Dla centralnego otworu w pokrywie  $X(0)$  procentowe odchylenie profilu prędkości od wartości średniej wynosiło od 0,33% do 8,13% dla wlotu i od 0,47% do 7,35% dla wylotu. Dokładność pomiarowa zastosowanego termooanemometru wynosi  $\pm 0,05$  m/s w zakresie prędkości od 0,15 m/s do 3 m/s, co oznacza, że dla średnich wartości prędkości w tunelu procentowa dokładność pomiaru wynosi  $\pm 6\%$ . Kształt profilu prędkości w przekroju wlotowym i wylotowym z sekcji badawczej charakteryzuje się spadkiem wartości prędkości wraz ze wzrostem wysokości kanału. Trend ten jest bardziej uwidoczny dla przekroju wylotowego niż wlotowego.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki z pomiarów rozkładu prędkości w tunelu powietrznym zaprojektowanym do badań wpływu geometrii turbulizatora na wymianę ciepła przy grzewczej powierzchni płaskiej. Zastosowanie siatek wyrównujących strugę powietrza oraz dyszy Witoszyńskiego pozwoliło na odpowiednie uformowanie strugi powietrza wprowadzanej do sekcji badawczej. Uzyskany profil prędkości charakteryzuje się odchyłkami od teoretycznego profilu prędkości oczekiwanego za dyszą Witoszyńskiego, jest jednak jednorodny w centralnej części tunelu, a zatem w części, w której przewiduje się umieszczenie badanych elementów. Procentowe odchylenie wartości prędkości miejscowych od prędkości średniej wynosiło od 0,33% do 8,13% dla profilu centralnego na wlocie do sekcji badawczej. Z analizy wynika, że badane elementy umieszczane będą w obszarze, dla którego procentowe odchylenie wyniosło od 0,33% do 3,95%.

W celu wyeliminowania niejednorodności profilu prędkości będącego funkcją wysokości tunelu, przed przeprowadzeniem badań docelowych, niezbędne jest sprawdzenie uszczelnienia pomiędzy pokrywą a tunelem. Przyczyną tych fluktuacji w szczególności w górnej części tunelu może być także zbyt duży wpływ pracy wentylatora na obszar wewnątrz sekcji badawczej. Wentylator zostanie zatem odsunięty na większą odległość od strefy badawczej. Wydłużona będzie tym samym sekcja wyprowadzenia strugi. Na jej końcu zamontowana zostanie dodatkowa siatka uspokajająca strugę przepływającą ze strefy badawczej, aby uniknąć ewentualnego wstecznego oddziaływania powstałych w tym miejscu zawirowań.

#### LITERATURA

- [1] Abdollahi A., Shams M., *Optimization of shape and angle of attack of winglet vortex generator in a rectangular channel for heat transfer enhancement*, Applied Thermal Engineering, **81**, 376-387, 2015.
- [2] Caliskan S.L., *Experimental investigation of heat transfer in a channel with new winglet-type vortex generators*, International Journal of Heat and Mass Transfer, **78**, 604-614, 2014.
- [3] Danzer W., *Nozzle For Industrial Processing*, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2008/0257976 A1
- [4] Discetti S., Ianiro A., Aref H., *Experimental Aerodynamics*, CRC Press, 2017.

- [5] Fiebig M., *Vortices, generators and heat transfer*, Trans IChemE, **76**, Part A, 108–123, 1998.
- [6] Fijałkowski S., Wójcik P., *Model działania schładzacza spalin silnika turbinowego w ekstremalnych lotach śmigłowca*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr 194–195, 2008.
- [7] Grapow F., Grzegorz Liśkiewicz G., *Compressor modeling using Greitzer model validated by pressure oscillations*, Transactions of the Institute of Fluid–Flow Machinery, **133**, 69–89, 2016.
- [8] Gumuła S., Piaskowska-Silarska M., Pytel K., Noga H., Kulinowski W., *Evaluation of the impact of adjusting the angle of the axis of a wind turbine rotor relative to the flow of air stream on operating parameters of a wind turbine model*, E3S Web of Conferences, **14**, 01016 (2017), Energy of Fuels 2016.
- [9] Hou D., Jiang W., Zhao W., Bian J., Liu Y., Lai X., *Effect of linetype of convergent section on supersonic condensation characteristics of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> mixture gas in Laval nozzle*, Chemical Engineering and Processing–Process Intensification, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.09.016>, 2018.
- [10] Norma PN-ISO 5221:1994, *Rozprowadzanie i rozdział powietrza – Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie*, wersja polska, 1994.
- [11] Pietkiewicz P., Miąskowski W., Nalepa K., Kowalczyk K., *Badanie rozkładu prędkości w dyfuzorze turbiny wiatrowej*, XIX Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Mechanik, **7**, 2015.
- [12] Szlumczyk H., *Analiza ruchu strumienia dwufazowego w regeneratorze liniowym*, Archives of Foundry, **5** (15), 2005.
- [13] Szlumczyk H., Janerka K., *Badania modelowe regeneratora liniowego*, Archives of Foundry, **6** (19), 2006.
- [14] Wierciński Z., Skotnicka A., *Investigation of hysteresis of the Coanda effect at the flat plate*, Colloquium Fluid Dynamics 2007, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, 2007.
- [15] Zuraw A., Pietrowicz S., Gnutek Z., *Enhancement of thermal processes in the fin-and-tube heat exchanger by vortex generators*, Proceedings of the XVth International Conference on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy, HTRSE-2016, Wydawnictwo Uczelniane ZUT, 2016.