

Analiza pola prędkości za kryzą pomiarową z wykorzystaniem metody PIV

Analysis of the velocity field behind the measurement orifice using the PIV method

BARBARA TOMASZEWSKA-WACH

DOI 10.36119/15.2025.1.4

W artykule przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych, które dotyczyły analizy pola prędkości za kryzą. Analiza przeprowadzona została z wykorzystaniem metody PIV, która polega na śledzeniu ruchu cząstek znacznikowych wprowadzonych do płynu. Zastosowanie cyfrowej anemometrii obrazowej pozwala na wizualizację i analizę pola prędkości w całym obszarze przepływu. Przepływomierze zwężkowe, z uwagi na prostą budowę i nieskomplikowany pomiar, są często wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu. Badaniom poddane zostały dwie kryzy: standardowa i szczelinowa, które cechowały się jednakowym przewężeniem równym 0,5. Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było sprawdzenie, jak kształt otworów przepływowych w kryzie wpływa na rozkład prędkości płynu za nią. Wyniki badań wykazały, że kształt otworów w kryzie ma istotny wpływ na rozkład prędkości. W przypadku kryzy standardowej zaobserwowano wyraźny wzrost prędkości w centrum rury, natomiast kryza szczelinowa zapewniała bardziej równomierny rozkład prędkości w przekroju poprzecznym rurociągu. Efekt ten wynika z obecności szczelin na całej powierzchni kryzy, co umożliwia płynne przejście strumienia płynu i ograniczenie turbulencji.

Artykuł podkreśla znaczenie badań nad innowacyjnymi rozwiązaniami w dziedzinie przepływomierzy oraz zastosowanie nowoczesnych metod pomiarowych, takich jak cyfrowa anemometria obrazowa.

Słowa kluczowe: PIV, kryza szczelinowa, kryza standardowa, przepływomierz zwężkowy

The article presents the results of an experimental study that analyzed the velocity field behind the orifice. The analysis was carried out using the PIV method, which involves tracking the movement of tracer particles introduced into the fluid. The use of particle image velocimetry makes it possible to visualize and analyze the velocity field over the entire flow area. Orifice flowmeters, due to their simple design and uncomplicated measurement, are often used in many industries. Two orifices, a standard orifice and a slotted orifice, which were characterized by an equal constriction of 0.5, were tested. The purpose of the experimental study was to see how the shape of the flow holes in the orifice affects the distribution of fluid velocity behind it. The results showed that the shape of the orifice holes has a significant effect on the velocity distribution. In the case of a standard orifice, a clear increase in velocity was observed in the center of the pipe, while a slotted orifice provided a more uniform velocity distribution across the cross-section of the pipeline. This effect is due to the presence of slots over the entire surface of the orifice allowing smooth passage of the flow and reducing turbulence.

The article emphasizes the importance of research into innovative solutions in the field of flowmeters, as well as the use of modern measurement techniques such as particle image velocimetry.

Keywords: PIV, slotted orifice, standard orifice, venturi flowmeter

Wstęp

Pomiary strumienia płynu, w przewodach pod ciśnieniem, mają duże znaczenie w elektrociepłowniach i elektrowniach, a także w przemyśle chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym itd. Precyzyjne monitorowanie przepływu płynów jest niezbędne zarówno dla zapewnienia ciągłości procesów technologicznych, jak i dla podtrzymania wysokich standardów jakości i bezpieczeństwa. Urządzenia pomiarowe muszą cechować się wysoką dokładnością oraz niezawodnością, ponieważ nawet niewielkie odchylenia mogą prowadzić

do nieprawidłowości w pracy systemów. Dodatkowo, w środowisku przemysłowym, właściwości płynu determinują wybór odpowiedniego urządzenia pomiarowego. Mierzone media mogą obejmować: ciecze, gazy, ich mieszaniny, a także układy bardziej złożone, takie jak: zawiesiny, emulsje, czy aerozole. Każda z tych form stawia specyficzne wyzwania dla aparatury pomiarowej, co wymaga zastosowania technologii dostosowanych do konkretnej aplikacji [5], [9], [20].

W ostatnich latach naukowcy intensywnie pracują nad udoskonaleniem stosowanych obecnie urządzeń pomiaro-

wych. Równocześnie, poszukują innowacyjnych metod pomiaru, które charakteryzowałyby się wysoką precyzją, przyczyniając się do ograniczenia strat ekonomicznych [17].

Obecnie rynek przepływomierzy oferuje różnego rodzaju przyrządy pomiarowe, które dedykowane są określonym płynom. Przepływomierze różnią się nie tylko budową, ale także wykorzystywanym do ich działania zjawiskiem fizycznym. Przyrządy do pomiaru przepływającego strumienia płynu charakteryzują się specyficznymi właściwościami oraz możliwościami wykorzystania ich w określonych warunkach.

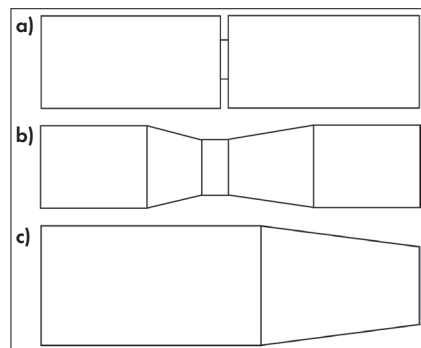
W zależności od przepływającego płynu (gaz, ciecz, mieszaniny) wyróżnia się przepływomierze: masowe, ultradźwiękowe, wirowe, elektromagnetyczne, czy przepływomierze różnicy ciśnień.

Przepływomierze różnicy ciśnień

Przepływomierze różnicy ciśnień, znane także jako przepływomierze DP (Differential Pressure Flowmeters) to grupa urządzeń, która do pomiaru strumienia płynu wykorzystuje różnicę ciśnień wywołaną przez zmianę prędkości przepływającego medium. W rurociągu instalowany jest element dławiący powodujący zmniejszenie pola przepływu, co prowadzi do zmiany prędkości gazu lub cieczy. W wyniku przepływu płynu przez zwężenie w przewodzie, jego prędkość wzrasta, a ciśnienie spada. Różnica ciśnień mierzona przed i za elementem dławiącym umożliwia obliczenie strumienia objętości lub masy.

Przepływomierze różnicy ciśnień cechują się prostą konstrukcją, łatwą konserwacją i niskim kosztem produkcji, dlatego też bardzo często wykorzystywane są między innymi w przemyśle: petrochemicznym, energetycznym, wodno-kanalizacyjnym czy chemicznym [1]. Przepływomierze DP charakteryzują się uniwersalnością i możliwością zastosowania do pomiaru różnego rodzaju płynów dlatego mogą być stosowane do pomiaru zarówno cieczy, gazów, pary jak i zawiesin. Wśród ich zalet można wymienić możliwość pracy w szerokim zakresie temperatury i ciśnienia, co powoduje, że przepływomierze zwężkowe są odpowiednie do stosowania w różnych warunkach procesowych.

Do najbardziej popularnych przepływomierzy różnicy ciśnień zalicza się: kryzy, zwężki Venturiego oraz dysze. Ich schematy zostały przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przepływomierzy różnicy ciśnień: a) kryza, b) zwężka Venturiego, c) dysza ISA
Fig. 1. Diagram of differential pressure flow meters: a) orifice, b) Venturi tube, c) ISA nozzle

Przepływomierze zwężkowe różnią się budową, a każdy z nich ma specyficz-

ne cechy, które wpływają na ich wykorzystanie w przemyśle. Kryza cechuje się najprostszą budową, ale w porównaniu do zwężki Venturiego czy dyszy generuje największe straty ciśnienia. W związku z tym od wielu lat prowadzone są badania nad innowacyjnymi rozwiązaniami, które będą łączyły zalety kryz z polepszeniem ich własności w odniesieniu do ograniczenia strat ciśnienia. W literaturze można spotkać rozwiązania dotyczące modyfikacji otworu przepływowego w kryzie standardowej, w których centralnie położony otwór o przekroju kołowym został zastąpiony np. szczelinami [2], [6], [11], [16], [22]. W pracach [1], [4], [7], [15], [23] przedstawione zostały wyniki badań nad innowacyjnymi rozwiązaniami dotyczącymi kryzy, wśród których można rozróżnić kryzy: perforowane, fraktalne oraz kryzy z otworem o innym kształcie niż kołowy (trójkąt, owal, kwadrat).

W pracach [2], [11], [12], [16], [18] autorzy przedstawili wyniki badań nad wykorzystaniem kryz szczelinowych do pomiaru strumienia przepływającego płynu. Głównym wnioskiem z przeprowadzonych analiz jest to, że kryzy szczelinowe prowadzą do szybszego odzysku ciśnienia, struga stabilizuje się szybciej w porównaniu do standardowego rozwiązania. Zastosowanie kryz szczelinowych prowadzi także do ujednorodnienia się strugi.

W związku z pojawieniem się nowych rozwiązań dotyczących zmiany kształtu otworu przepływowego w kryzie, prowadzone są prace w kierunku znalezienia najbardziej optymalnych kształtów, bądź rozmieszczeniem tych otworów, które zapewnią ograniczenie np. wysokich strat ciśnienia. W takich badaniach z powodzeniem wykorzystuje się metody numeryczne czy metody PIV. Metody te pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska, które zachodzą podczas przepływu płynu przez np. różne elementy zaburzające przepływ, a są trudne do zmierzenia za pomocą tradycyjnych metod, lub do zaobserwowania w sposób bezpośredni [7], [10], [13], [14].

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry)

Metoda PIV stanowi eksperymentalną technikę pomiarową służącą do pomiaru prędkości przepływu płynu. Zasada pomiaru według omawianej metody polega na śledzeniu ruchu drobnych cząstek znacznikowych (tzw. markerów), które są wprowadzane do układu pomiarowego. Do wizualizacji ruchu cząstek markera najczęściej używa się laserowego światła, które oświetla wybraną płaszczyznę prze-

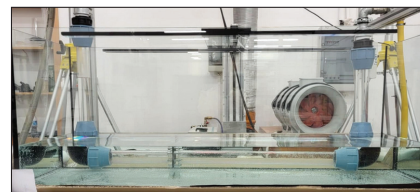
pływu, następnie przez kamerę video rejestrowane są zmiany położenia cząstek markera w czasie. [14], [21]. Metoda PIV pozwala na jednoczesny pomiar prędkości w całym polu przepływu, w przeciwieństwie do tradycyjnych metod pomiaru, które dostarczają informacji o prędkości tylko w jednym punkcie. Ze względu na możliwość pomiaru prędkości w całym obszarze przepływu, metoda PIV jest szczególnie ceniona przy badaniu przepływów turbulentnych i wykorzystywana jest do wizualizacji strug oraz wirów.

Z przeglądu literatury [3], [8], [14], [21] można wywnioskować, że choć metoda PIV jest szeroko stosowana w różnych dziedzinach to brakuje badań nad wykorzystaniem jej do obserwacji zachowania się płynu po przejściu przez różne rozwiązania geometryczne kryz szczelinowych. Przedstawione w niniejszej pracy badania koncentrują się na tym aspekcie.

Stanowisko badawcze

Celem przeprowadzonych eksperymentalnych badań była analiza zachowania się strumienia przepływającego płynu po przejściu przez kryzy pomiarowe o dwóch różnych rozwiązaniach kształtu.

Badania eksperymentalne prowadzone były w układzie zamkniętym. Na rysunku 3 przedstawiony został widok stanowiska badawczego.

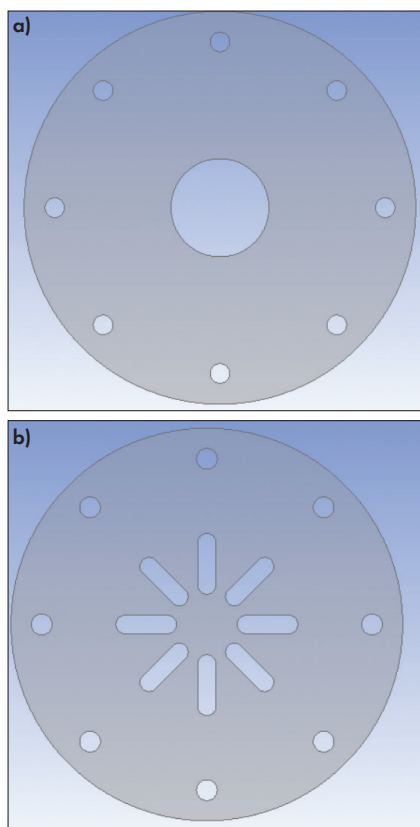


Rys. 2. Widok stanowiska badawczego
Fig. 2. View of the test stand

Stanowisko eksperymentalne składało się z układu rur o średnicy 50 mm, na którym zainstalowana była kryza pomiarowa o grubości 3 mm. Element badany został tak umieszczony w układzie, aby przed i za przeszkodą zapewnić proste odcinki odpowiedniej długości z ustabilizowaną strugą. Ciecz ze zbiornika o pojemności 0,2 m³ była pompowana do układu przez pompę Grundfos CR5-7, następnie wracała do zbiornika. Strumień przepływającej cieczy rejestrowany był z wykorzystaniem przepływomierza elektromagnetycznego ENKO EM-005C, a sam przepływ regulowany był zaworami. Aby wyznaczyć charakterystyki rozkładu prędkości przepływu konieczne było wprowadzenie do strumienia przepływającej wody cząstek znacznikowych. W badaniach zastosowane

zostały znaczniki PMMA-RhB-FRAK-SC57-01. Zarówno typ jak i liczba cząstek znacznikowych określone zostały na podstawie badań Ligus i inni [13]. Kamera CCD Dantec Dynamics FlowSense EO-4M była zainstalowana prostopadle do płaszczyzny przekroju poprzecznego rury wraz z kryzą. Długość odcinka, który był poddany badaniom wynosił około 20 cm. Obliczenia PIV prowadzone były z wykorzystaniem oprogramowania Dantec Dynamics Studio, wersja 7.5.

Badaniom poddane zostały dwie kryzy pomiarowe: kryza standardowa oraz kryza szczelinowa, cechą wspólną kryz było jednakowe przewężenie, które było równe 0,5 mm. Schemat badanych kryz został przedstawiony na rysunku 3.

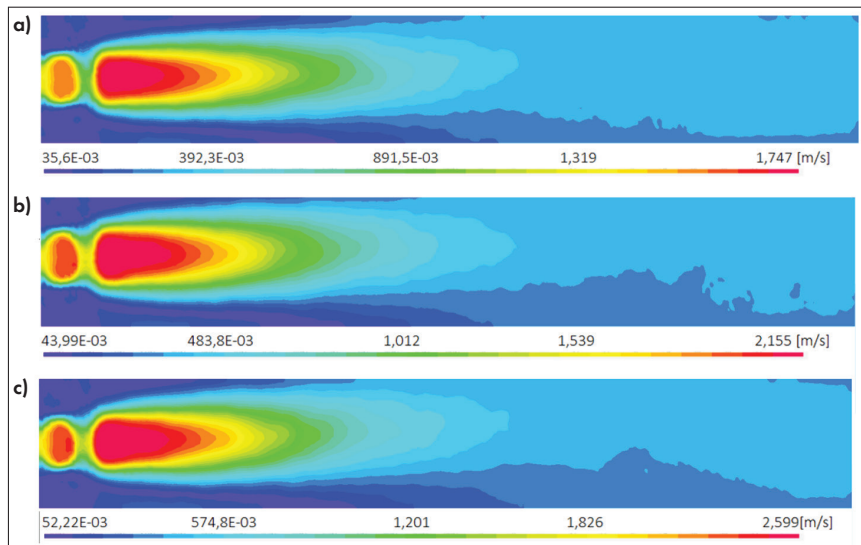


Rys. 3. Schemat badanych kryz: a) standardowa, b) szczelinowa
Fig. 3. Scheme of the tested orifices: a) standard, b) slotted

Badania eksperymentalne prowadzone były dla trzech różnych strumieni cieczy, które wynosiły odpowiednio $2 \text{ m}^3/\text{h}$, $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Wyniki przeprowadzonych badań

Przeprowadzone badania miały na celu przeanalizowanie zachowania się strumienia przepływającej cieczy po przejściu płynu przez różne rozwiązania konstrukcyjne kryz. Wyniki tych ekspery-

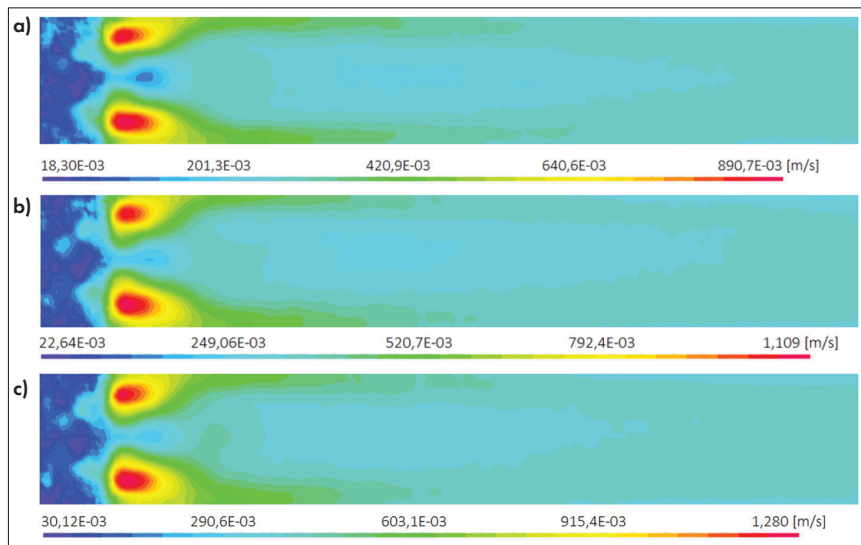


Rys. 4. Rozkład prędkości, kryza standardowa: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s
Fig.4. Velocity distribution, standard orifice: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s

mentów zostały przedstawione na poniższych rysunkach.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych dotyczące wizualizacji pola prędkości dla strumienia wody: $2 \text{ m}^3/\text{h}$, $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ i $3 \text{ m}^3/\text{h}$, odpowiednio dla kryzy standardowej i kryzy szczelinowej.

jest bardziej równomierny w porównaniu do kryzy standardowej. Wynika to bezpośrednio z geometrii otworu przepływowego. Dodatkowo, można zauważyć, że w przypadku kryzy szczelinowej, maksymalne prędkości przepływającego płynu są dwa razy niższe niż przy zastosowaniu klasycznego rozwiązania.

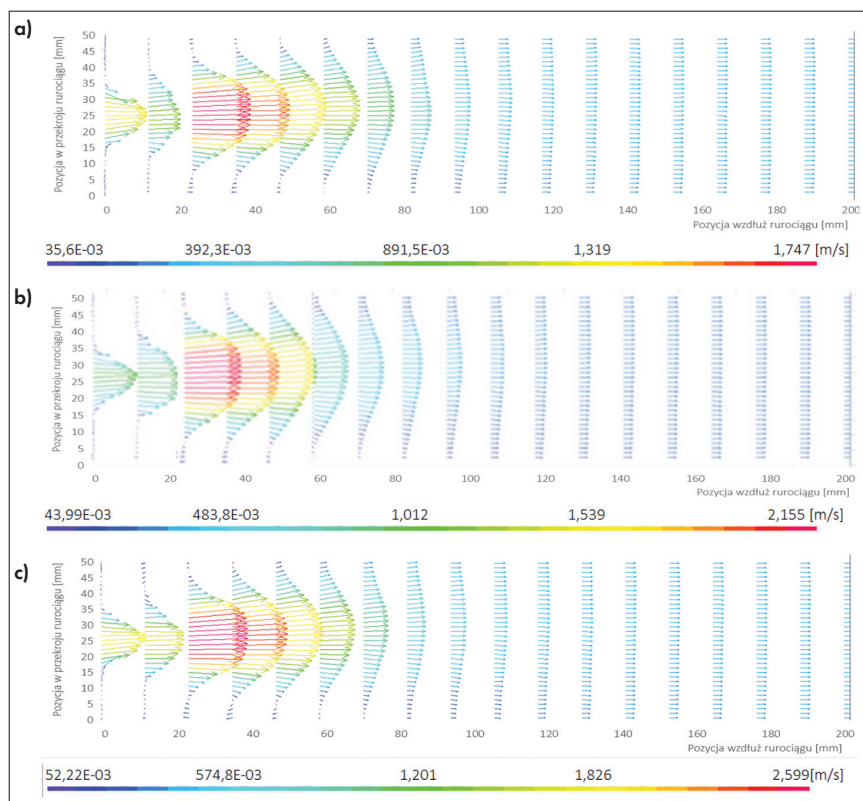


Rys.5. Rozkład prędkości, kryza szczelinowa (S2): a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s
Fig.5: Velocity distribution, slotted orifice: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s

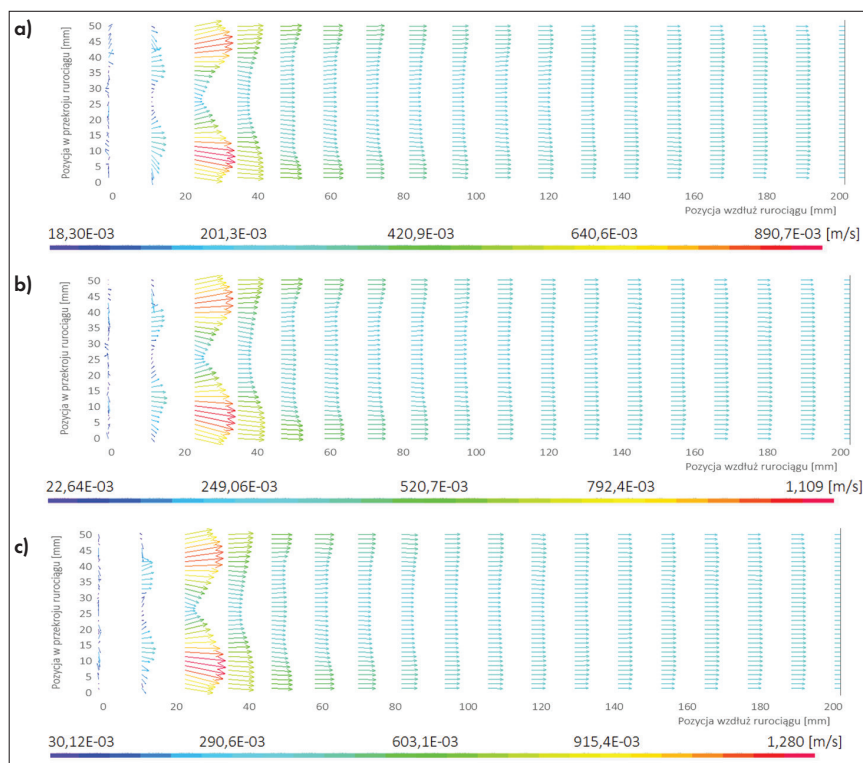
Analizując rysunki przedstawiające pola prędkości można zauważyć wyraźny wzrost prędkości płynu w obrębie otworu kryzy, widoczny jako obszar oznaczony kolorem czerwonym. W przypadku kryzy standardowej największy wzrost prędkości występuje w obszarze za kryzą, gdzie pole przekroju przepływowego gwałtownie się zmniejsza. Dla kryzy szczelinowej również obserwuje się wzrost prędkości w obrębie kryzy, jednak rozkład prędkości

Na rysunku 6 i 7 przedstawione zostały profile prędkości dla kryzy standardowej oraz szczelinowej. Analogicznie, jak wyżej dla trzech różnych strumieni przepływającej wody.

Rysunki przedstawiają profile prędkości przepływającej cieczy w przekroju poprzecznym rury w różnych odległościach za kryzą. Na osi Y przedstawiona została odległość w przekroju poprzecznym rurociągu, natomiast na osi X pozycja wzdłuż



Rys.6.
Profile prędkości, kryza standardowa: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s
Fig.6. Velocity profiles, standard orifice: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s



Rys.7.
Profile prędkości, kryza szczelinowa: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s
Fig.7. Velocity profiles, slotted orifice: a) 0,283 m/s, b) 0,354 m/s, c) 0,424 m/s

rurociągu. W odniesieniu do kryzy standardowej można zauważyć, że prędkość płynu jest największa w centralnej części rury i maleje wraz ze zbliżaniem się do ścianek rurociągu. Struga zaczyna się stabilizować około 80 mm za kryzą. W przypadku kryzy szczelinowej płyn rozdziela się na kilka

mniej strug. Profil prędkości jest znacznie bardziej równomierny w porównaniu do kryzy standardowej, a strumień o wyższych prędkościach obejmuje większą część przekroju poprzecznego, zamiast koncentrować się w centrum. Efekt ten jest spowodowany pojawieniem się otworów

w kształcie szczelin, które są rozmieszczone na całej płaszczyźnie kryzy. Zaproponowane rozwiązanie nie stanowi takiego oporu dla przepływającego płynu jak w przypadku kryzy standardowej. Analizując powyższe rysunki, można zauważyć, że w przypadku kryzy szczelinowej strumień wody stabilizuje się dużo szybciej w porównaniu do standardowego rozwiązania. Struga zaczyna się stabilizować w zasadzie bezpośrednio za kryzą. Kryza szczelinowa zmniejsza niestabilności przepływu, a równomierny rozkład prędkości przekłada się również na mniejsze straty energii oraz ciśnienia.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawione zostały wyniki badań dotyczące zachowania się strumienia przepływającego płynu po przejściu przez kryzy pomiarowe o różnych kształtach otworu. Do tej analizy wykorzystano metodę PIV, która bazuje na rejestracji ruchu cząstek znaczników.

Pomiary przepływu płynu odgrywają kluczową rolę w wielu gałęziach przemysłu i są istotne ze względów bezpieczeństwa oraz zapewnienia wydajności procesów i urządzeń. Przepływomierze różnią się rodzajem zastosowanej technologii oraz dostosowaniem do rodzaju przepływającego medium. Wśród dostępnych urządzeń pomiarowych, przepływomierze różnicy ciśnień stanowią grupę, która jest szeroko stosowana w wielu gałęziach przemysłu. Jednym z kluczowych elementów w przepływomierzach DP jest konstrukcja elementu dławiącego, która ma wpływ na straty ciśnienia i zachowanie płynu w instalacji. Przepływomierze z różnymi rozwiązaniami geometrycznymi otworów, takie jak kryzy szczelinowe, stanowią obiecującą alternatywę dla tradycyjnych kryz, które mogą powodować większe straty ciśnienia.

Metoda cyfrowej anemometrii obrazowej obecnie stanowi nowoczesne narzędzie pomiarowe do monitorowania prędkości płynów w całym obszarze przepływu. W artykule opisano tę technikę, która została wykorzystana do badań nad kryzami, szczególnie w kontekście zastosowania innowacyjnych rozwiązań geometrycznych elementu dławiącego w pomiarach strumienia płynu.

Najważniejsze wnioski jakie można wyciągnąć z przeprowadzonych badań eksperymentalnych, to wyraźne różnice w rozkładzie prędkości przepływającego płynu w zależności od wykorzystanego rozwiązania konstrukcyjnego kryzy. Kryza szczelinowa umożliwia bardziej równomierny przepływ i w porównaniu do kryzy standardowej, jest skuteczniejsza w ustabilizowaniu się przepływu, zmniejszając straty ciśnienia i energii.

LITERATURA

- [1] Abou El-Azm Aly A., Chong A., Nicollean F., Beck S. 2010. "Experimental Study of the Pressure Drop after Fractal-Shaped Orifices in Turbulent Pipe Flows." *Experimental Thermal and Fluid Science* 34 (1): 104–11. <https://doi.org/10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2009.09.008>.
- [2] Annamalai G., Pirouzpanah S., Sujan R. G., Morrison G.L. 2016. "Characterization of Flow Homogeneity Downstream of a Slotted Orifice Plate in a Two-Phase Flow Using Electrical Resistance Tomography." *Flow Measurement and Instrumentation* 50 (August): 209–15. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2016.07.003>.
- [3] Dong Z., Wenqian Z. 2018. "PIV Analysis of Cavitating Flow Behind Square Multi-Orifice Plates" 3 (July): 615–603. <https://doi.org/10.29007/fhdg>.
- [4] Elsaey A., El-Azm Aly A. A., Fouad M. 2014. "CFD Simulation of Fractal-Shaped Orifices for Flow Measurement Improvement." *Flow Measurement and Instrumentation* 36 (April): 14–23. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2014.01.004>.
- [5] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C. 2009. "Multiphase Flow Metering," 329.
- [6] Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Kleszcz S., Hanus R., Zych M., Jaszczur M. 2022. "A Numerical and Experimental Analysis of Multi-Hole Orifice in Turbulent Flow." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 193 (April). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110910>.
- [7] Guo B. Y., Hou Q. F., Yu A. B., Li L. F., Guo J. 2013. "Numerical Modelling of the Gas Flow through Perforated Plates." *Chemical Engineering Research and Design* 91 (3): 403–8. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2012.10.004>.
- [8] Guo Z-p., Sun Xi-h., Dong Zhi-y. 2020. "PIV Analysis and High-Speed Photographic Observation of Cavitating Flow Field behind Circular Multi-Orifice Plates." *Water Science and Engineering* 13 (2): 145–53. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.06.004>.
- [9] Ismail B., Wael A. 2010. "Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements." *Recent Patents on Electrical Engineering* 1 (1): 1–13. <https://doi.org/10.2174/18744476110801010001>.
- [10] Jaworski Z. 2005. "Numeryczna Mechanika Płynów w Inżynierii Chemicznej i Procesowej." *Akademia Oficyna Wydawnicza EXIT*.
- [11] Kumar P., Boon F. C., Wong Ming Bing M. 2011. "Wet Gas Measurement with Slotted Orifice Meter—Effect of Geometry of Slots and Pressure." *Chemical Product and Process Modeling* 6 (1). <https://doi.org/10.2202/1934-2659.1620>.
- [12] Kumar P., Wong Ming Bing M. 2011. "A CFD Study of Low Pressure Wet Gas Metering Using Slotted Orifice Meters." *Flow Measurement and Instrumentation* 22: 33–42.
- [13] Ligus G., Wasilewski M., Kołodziej S., Zajęc D. 2020. "CFD and PIV Investigation of a Liquid Flow Maldistribution across a Tube Bundle in the Shell-and-Tube Heat Exchanger with Segmental Baffles." *Energies* 13 (19). <https://doi.org/10.3390/en13195150>.
- [14] Malek K., Skoczowska K., Ulbrich R. 2017. "Zastosowanie Metody PIV Do Analizy Zachowania Się Złoża w Aparacie Bębnowym Wstęp," no. 1: 14–16.
- [15] Maynes, D., Holt G. J., Blotter J. 2013. "Cavitation Inception and Head Loss Due to Liquid Flow through Perforated Plates of Varying Thickness." *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME* 135 (3): 1–11. <https://doi.org/10.1115/1.4023407>.
- [16] Morrison G., Deotte R. 1994. "Slotted Orifice Flowmeter." *AICHE Journal*, January. https://www.academia.edu/20301164/Slotted_orifice_flowmeter.
- [17] Nasiruddin S., Singh S. N. 2021. "Performance Evaluation of an Innovative Design Modification of an Orifice Meter." *Flow Measurement and Instrumentation* 80 (December 2020): 101944. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101944>.
- [18] Pirouzpanah, S., Çevik M., Morrison G.L. 2014. "Multiphase Flow Measurements Using Coupled Slotted Orifice Plate and Swirl Flow Meter." *Flow Measurement and Instrumentation* 40: 157–61.
- [19] Raheem A., Baseer Siddiqi, A.S., Ibrahim A., Ullah A., Hameed Inayat M. 2021. "Evaluation of Multi-Holed Orifice Flowmeters under Developing Flow Conditions – An Experimental Study." *Flow Measurement and Instrumentation* 79 (January): 101894. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101894>.
- [20] Piechota P., Synowicz P., Wędrychowicz W., Wróblewska E., Andrzejkiewicz A., 2023. "Pomiar przepływu metodą ultradźwiękową w warunkach niestandardowych. Analiza wpływu podstawowych elementów hydraulicznych zaburzających przepływ na wynik pomiaru" *INSTAL*, 12-18, DOI: 10.36119/15.2023.5.2
- [21] Sikora M., Ligus G., 2022. "The Use of PIV Methods in the Study of Two-Phase Flows in Small Diameter Channels TWO-PHASE FLOWS IN SMALL DIAMETER" (June). <https://doi.org/10.30464/jmee.2022.6.1.85>.
- [22] Singh, V. K., Tharakan T.J. 2015. "Numerical Simulations for Multi-Hole Orifice Flow Meter." *Flow Measurement and Instrumentation* 45 (October): 375–83. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.08.004>.
- [23] Zhao T., Zhang J., Ma L. 2011. "A General Structural Design Methodology for Multi-Hole Orifices and Its Experimental Application." *Journal of Mechanical Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0706-3>. ■