

Wpływ obecności fazy gazowej w cieczy na błąd wskazania przepływomierza zwężkowego

Impact of gaseous phase presence in liquid on orifice flowmeter measurement error

PIOTR KRZYSZTOF SYNOWIEC, WIESŁAW WĘDRYCHOWICZ, ELŻBIETA WRÓBLEWSKA

DOI 10.36119/15.2025.9.4

Przepływomierze zwężkowe są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych urządzeń w pomiarach przemysłowych. Głównymi przyczynami skłaniającymi do ich montażu są możliwość ich zastosowania w przepływach różnych płynów, duża dokładność oraz szeroki zakres pomiarowy. Niestety są to urządzenia wymagające spełnienia rygorystycznych warunków montażu, aby zapewnić prawidłowe przeprowadzenie pomiaru, a w warunkach przemysłowych może być to co najmniej utrudnione. Zrealizowane na stanowisku badawczym pomiary dla przepływu dwufazowego woda-powietrze, pozwoliły oszacować różnicę jaka zachodzi w strumieniach wyznaczonych za pośrednictwem przepływomierza referencyjnego – elektromagnetycznego (pomiar strumienia objętości wody) oraz przepływomierza zwężkowego (pomiar strumienia objętości dwufazowego). Widoczne zmniejszenie wskazania Δp na kryzye ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia wskazuje na występowanie błędów w określaniu strumienia objętości, jakie towarzyszą pomiarom w przepływach dwufazowych. Poza tym występowanie dodatkowej fazy powoduje zwiększenie niepewności pomiarowej i sprawia, że uzyskane dane obciążone są dużym błędem.

Słowa kluczowe: strumień przepływu, przepływ dwufazowy, niepewność pomiarowa, przepływomierz zwężkowy.

Orifice flow meters are among the most widely used devices in industrial measurements. Their popularity stems primarily from their versatility across various fluid flows, high accuracy, and broad measurement range. However, these devices demand strict installation conditions to ensure accurate measurements, which can be challenging, if not difficult, to meet in industrial environments.

Measurements conducted on the research stand for two-phase water-air flow allowed for the estimation of discrepancies between flow rates determined by a reference electromagnetic flow meter (measuring water volumetric flow) and an orifice flow meter (measuring two-phase volumetric flow). The observable decrease in the pressure drop (Δp) indication at the ISA orifice plate with flange taps suggests the presence of errors in volumetric flow rate determination during two-phase flow measurements. Furthermore, the presence of an additional phase increases measurement uncertainty, leading to acquired data being subject to significant errors

Keywords: flow rate, two-phase flow, measurement uncertainty, orifice plate flow meter.

Wstęp

Pomiary przepływów dwufazowych, takich jak mieszanina wody i powietrza, mają duże znaczenie w wielu sektorach przemysłu. Przesyłanie ropy naftowej i gazu ziemnego na duże odległości często wiąże się z występowaniem przepływów dwufazowych (np. gaz z kondensatem, ropa z wodą i gazem). [1, 2] Jest to symulacja zjawisk występujących w przemyśle, np. petrochemicznym, spożywczym (browarnictwo), gdzie w przepływającym medium może pojawiać się faza gazowa. Precyzyjny pomiar strumienia płynu dwufazowego ma ogromne znaczenie technologiczne i w rozliczeniach handlowych. Zwężki pomiarowe, powszechnie stosowane w przemyśle, są jednymi z najpowszechniej stosowanych urządzeń pomiarowych. Są to urządzenia dokładne, stosowane dla różnych płynów i w szerokim zakresie średnic przewodów. [3, 4] Wymagają natomiast spełnienia warunku odpowiednio długiego prostego odcinka przewodu przed i za zwężką, powodując konieczność zatrzymania pracy instalacji w celu montażu i konserwacji oraz powo-

dują trwały spadek ciśnienia w układzie. W czasie pracy instalacji może pojawić się dodatkowa faza (np. gazowa w cieczy) będąca wynikiem przemian zachodzących w przepływającym medium [5, 6, 7]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań zrealizowanych dla przepływów medium dwufazowego woda-powietrze. Celem prowadzonych badań było określenie wpływu obecności fazy gazowej na wyniki pomiaru strumienia objętości wody metodą zwężkową z wykorzystaniem kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia [8, 9]. Badania zrealizowano na stanowisku badawczym przystosowanym do wykorzystania różnych typów przepływomierzy zwężkowych, wizualizacji przepływu oraz dozowania fazy gazowej do przepływu głównego. W metodzie wizualizacji zastosowano metodę oświetlenia obszaru badawczego cienką płaszczyzną światła laserowego (noża świetlnego).

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane i zbudowa-

dr inż. Elżbieta Wróblewska <https://orcid.org/0000-0002-6486-6722>, dr inż. Piotr Krzysztof Synowiec <https://orcid.org/0000-0002-7750-4931>, dr inż. Wiesław Wędrzychowicz <https://orcid.org/0000-0001-7437-6527>, – Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, Katedra Techniki Ciepłej. Autor korespondencyjny/Corresponding author: e.wroblewska@pwr.edu.pl

ne przez Zespół Miernictwa w Katedrze Techniki Ciepłej w Politechnice Wrocławskiej do sprawdzania i wzorcowania przepływomierzy (rys. 1).

Woda pobierana jest przez pompę (2) ze zbiornika zasilającego (1) tłoczona jest poprzez przepływomierz referencyjny – elektromagnetyczny (5), dalej przepływa przez element dozujący powietrze, obszar obserwacji wykonany ze szkła organicznego (12), kryzę ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia (8) skąd powraca do zbiornika zasilającego (1). W zbiorniku umieszczono termometr (11) przeznaczony do kontroli temperatury wody. Dzięki ciągłym pomiarom temperatury można na bieżąco kontrolować właściwości fizyczne wody (gęstość i lepkość kinematyczną), które, jak wiadomo, zależą od temperatury. Zmianę strumienia objętości przepływającej w instalacji wody realizowano poprzez zmianę obrotów pompy oraz zaworu regulacyjnego (3). Referencyjny pomiar strumienia objętości wody realizowano za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego (5). Jego zaletą jest duża dokładność i minimalny spadek ciśnienia, co czyni go idealnym do zastosowań wymagających wysokiej dokładności.

Kolejnym, elementem instalacji jest mieszacz wody i powietrza (6), który pozwala na kontrolowane wprowadzanie powietrza do strumienia wody, tworząc mieszaninę dwufazową. Powietrze do mieszacza dostarczane jest z kompresora (9). Pomiędzy kompresorem a mieszaczem zainstalowano reduktor ciśnienia z przepływomierzem termicznym (10). Ten typ przepływomierza jest często używany do pomiaru przepływu gazów, charakteryzując się dobrą dokładnością dla niskich i średnich przepływów masowych. Dzięki niemu można precyzyjnie mierzyć ilość powietrza dodawanego do strumienia wody z dokładnością wynoszącą $\pm 1,5\%$ wielkości mierzonej. Po przejściu przez mieszacz, strumień dwufazowy płynie rurociągiem przez obszar obserwacji do kryzy ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia (8). Nóż świetlny (7) jest używany do wizualizacji lub analizy struktury przepływu dwufazowego, przez oświetlenie strumienia płaszczyzną światła laserowego. Dzięki temu rozwiązaniu można obserwować rozkład pęcherzyków gazu w cieczy, ich rozmiar, kształt i dynamikę, co jest pomocne w badaniach przepływów dwufazowych. Przepływ przez kryzę powoduje spadek ciśnienia, który jest podstawą do wyznaczenia strumienia w metodzie zwężkowej, ale jego interpretacja staje się bardziej skomplikowana w przypadku przepływu dwufazowego.

Wyniki pomiarów

W czasie realizowanych pomiarów mierzono strumień objętości wody, strumień objętości powietrza, spadek ciśnienia Δp na zwężce i temperaturę wody. Pomiar temperatury wody umożliwił na bieżąco kontrolowanie właściwości fizycznych wody (gęstość i lepkość kinematyczną), na podstawie których wyznaczano liczbę Reynoldsa w celu utrzymania powtarzalności pomiarów. Dane pomiarowe z przepływomierza elektromagnetycznego, przepływomierza termicznego, kryzy i termometru były rejestrowane z interwałem 1 sekundy. Strumień objętości na kryzie ISA wyznaczono zgodnie z poniższym wzorem:

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{(1-\beta^4)}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ m}^3/\text{s}$$

w którym:

C – współczynnik przepływu,

β – przewężenie, $\beta = d/D$,

ε – liczba ekspansji,

d – średnica otworu kryzy, m

D – średnica wewnętrzna przewodu, m

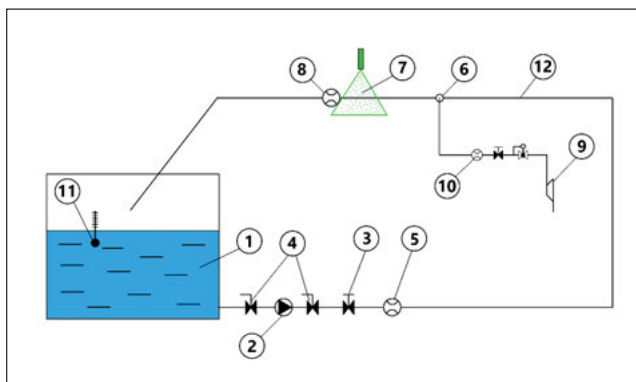
Δp – ciśnienie różnicowe na kryzie, Pa

ρ – gęstość przepływającego czynnika, kg/m^3 .

Na podstawie uzyskanych w drodze pomiarów wyników oraz przeprowadzonych obliczeń i analiz, wyliczono strumień przepływu i udział objętościowy fazy gazowej oraz zmiany procentowe strumienia przepływu bez i z udziałem fazy gazowej (tabela 1).

Na rys. 2 przedstawiono zbiorcze strumienie przepływu rejestrowane przez przepływomierz elektromagnetyczny, dla pomiarów bez udziału fazy gazowej oraz przez kryzę ISA z udziałem fazy gazowej.

Na podstawie przedstawionych w tabeli 1 danych i wykresu zawartego na rysunku 2, można porównać strumienie przepływu mierzone dwoma różnymi metodami: przepływomierzem elektromagnetycznym oraz kryzą. Czarna linia reprezentująca przepływomierz elektromagnetyczny przedstawia wartości strumienia objętości zmienianego skokowo od około $12,85 \text{ m}^3/\text{h}$ do $4,85 \text{ m}^3/\text{h}$. Czerwona linia reprezentująca kryzę odpowiada zmianom strumienia z przepływomierza elektromagnetycznego, ale

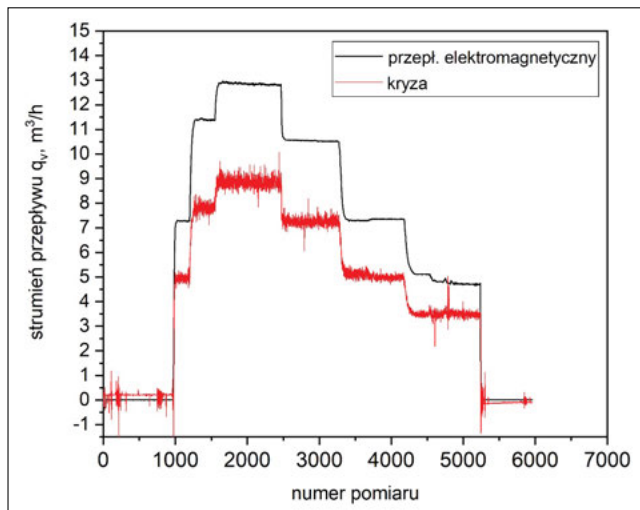


Rys. 1. Stanowisko doświadczalne: 1 – zbiornik zasilający, 2 – pompa, 3 – zawór regulacyjny, 4 – zawory odcinające (serwisowe), 5 – przepływomierz elektromagnetyczny, 6 – mieszacz wody i powietrza, 7 – nóż świetlny, 8 – kryza, 9 – kompresor, 10 – przepływomierz termiczny, 11 – termometr, 12 – rury instalacyjne ze szkła organicznego.

Fig. 1. Experimental stand: 1 – supply tank, 2 – pump, 3 – control valve, 4 – shut-off (service) valves, 5 – electromagnetic flow meter, 6 – water-air mixer, 7 – light knife, 8 – orifice plate, 9 – compressor, 10 – thermal flow meter, 11 – thermometer, 12 – organic glass (plexiglass) installation pipes.

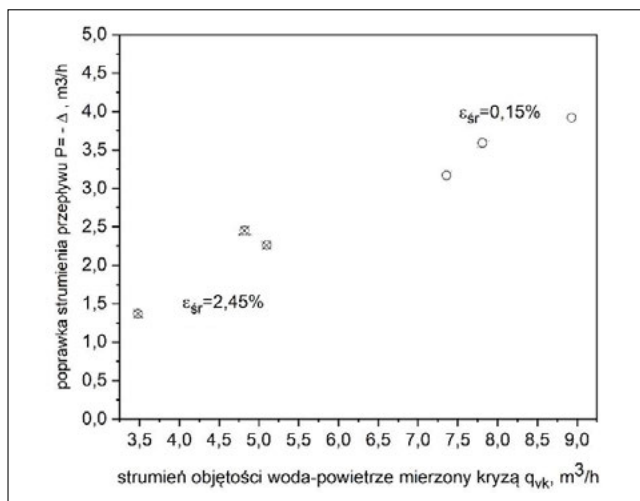
Tabela 1. Strumienie przepływów, udziały objętościowe i błędy systematyczne
Table 1. Flow rates, volumetric fractions and systematic errors

Nr serii pomiarowej	Strumień objętości wody w przepływomierzu elektromagnetycznym	Strumień objętości woda-powietrze w kryzie	Strumień powietrza	Udział objętościowy powietrza	Błąd systematyczny
	q_{ver} , m^3/h	q_{vk} , m^3/h	q_{pr} , m^3/h	, %	m^3/h / %
1	12,85	8,93	0,0168	0,13	-3,92 / -30,5
2	11,40	7,81	0,0168	0,15	-3,59 / -31,5
3	10,53	7,36	0,0168	0,16	-3,17 / -30,1
4	7,36	5,1	0,1550	2,12	-2,26 / -30,7
5	7,27	4,82	0,1550	2,13	-2,45 / -33,7
6	4,85	3,48	0,1500	3,09	-1,37 / -28,2



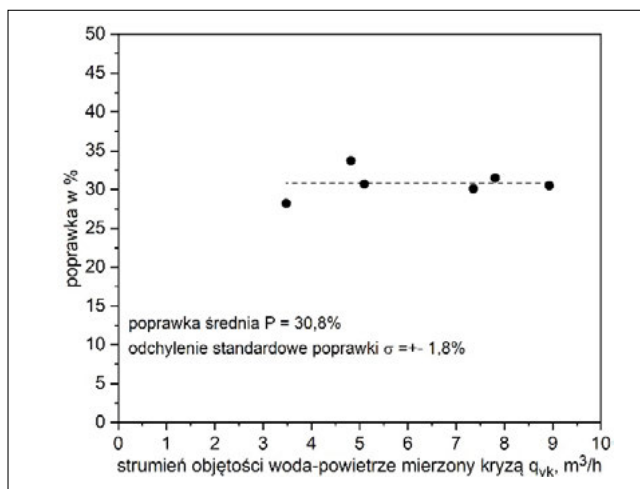
Rys. 2. Porównanie wskazań strumieni przepływu dla przepływomierza elektromagnetycznego (bez udziału fazy gazowej – linia czarna) i kryzy ISA (z udziałem fazy gazowej – linia czerwona).

Fig. 2. Comparison of flow rate indications for the electromagnetic flow meter (without gas phase – black line) and the ISA orifice plate (with gas phase – red line).



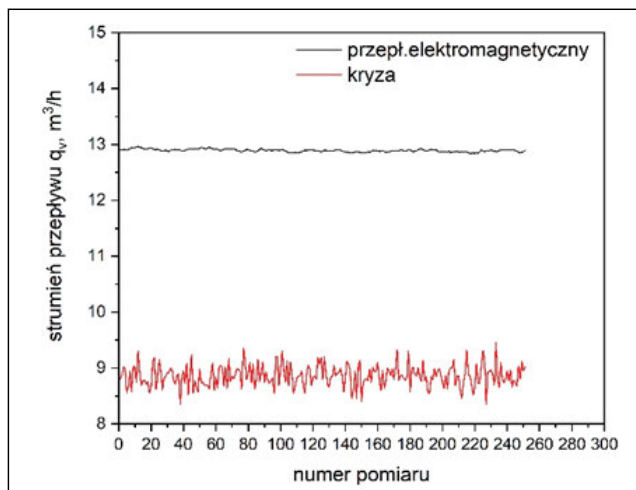
Rys. 3. Zależność poprawki wskazania strumienia przepływu od strumienia objętości mierzonego kryzą.

Fig. 3. Dependence of the flow rate indication correction on the volumetric flow rate measured by the orifice plate.



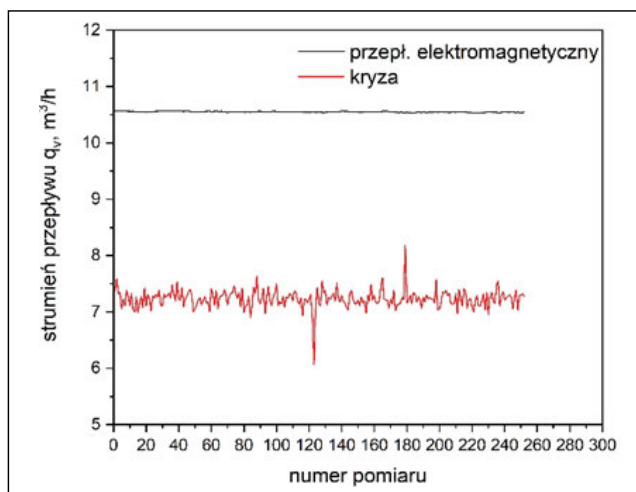
Rys. 4. Zależność poprawki wyrażonej w % od strumienia objętości mierzonego za pomocą kryzy.

Fig. 4. Dependence of the correction expressed in % on the volumetric flow rate measured by the orifice plate.



Rys. 5. Wycinek pomiaru strumienia przepływu przepływomierzem elektromagnetycznym oraz kryzą przy udziale fazy gazowej ok. $12,85 m^3/h$.

Fig. 5. Segment of flow rate measurement using an electromagnetic flow meter and an orifice plate with a gas phase involvement of approximately $12,85 m^3/h$.



Rys. 6. Wycinek pomiaru strumienia przepływu przepływomierzem elektromagnetycznym oraz kryzą przy udziale fazy gazowej ok. $10,53 m^3/h$.

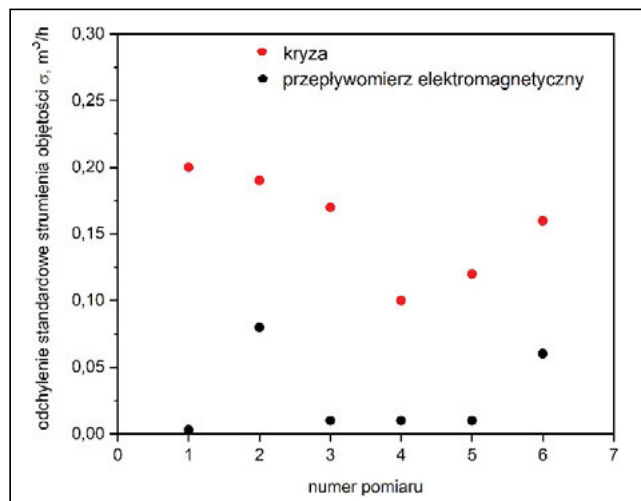
Fig. 6. Segment of flow rate measurement using an electromagnetic flow meter and an orifice plate with a gas phase involvement of approximately $10,53 m^3/h$.

jej wartości są konsekwentnie niższe, co świadczy o występowaniu błędów systematycznych pomiaru.

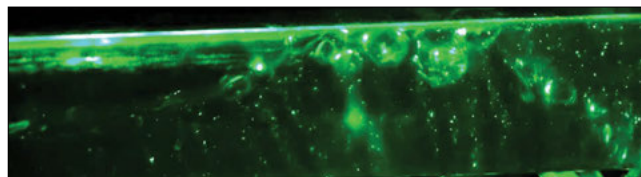
Na rys. 3 przedstawiono poprawki wskazania pomiaru kryzą, w funkcji strumienia objętości mieszaniny woda-powietrze, z uwzględnieniem średniego procentowego udziału fazy gazowej oznaczonego jako ε_{sr} .

Na rys. 3 można zauważyć, że niezależnie od udziału fazy gazowej (dla $\varepsilon_{sr} = 2,45\%$, na wykresie oznaczonego kółkiem z krzyżykiem oraz $\varepsilon_{sr} = 0,15\%$, na wykresie oznaczonego kółkiem) wartość poprawki strumienia przepływu wykazuje tendencję wzrostową, co może sugerować stały procentowy udział poprawki. Nie są to wartości przedstawiające zależność funkcji liniowej. Na podstawie czego można wywnioskować, że wartości odchylenia standardowego poprawki strumienia objętości mają wartości niezerowe, co zostało przedstawione na rys. 4.

Na rys. 4 przedstawiono zależność poprawki wyrażonej w procentach od strumienia objętości mieszaniny woda-powietrze, mierzonego kryzą. Można zauważyć, że przyjmując wartość średnią poprawki dla całego przebadanego zakresu pomia-

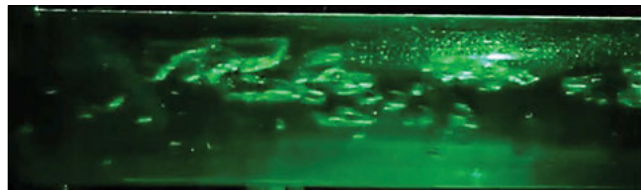


Rys. 7. Zależność odchylenia standardowego strumienia przepływu dla kryzy i przepływowierza elektromagnetycznego.
Fig. 7. Dependence of the standard deviation of flow rate for the orifice plate and the electromagnetic flow meter.



Rys. 8. Przykładowy obraz fazy gazowej wprowadzonej i unoszonej ze strumieniem wody.

Fig. 8. Exemplary image of the gas phase introduced and carried with the water stream.



Rys. 9. Przykładowy obraz fazy gazowej wprowadzonej i unoszonej ze strumieniem wody (plug).

Fig. 9. Exemplary image of the gas phase introduced and carried with the water stream (plug flow).

rowego, wartość odchylenia standardowego wynosi $\pm 1,8\%$. W całym zakresie pomiarowym współczynnik korelacji poprawki strumienia objętości do strumienia objętości mieszaniny woda-powietrze, mierzonej za pomocą kryzy, wynosi 0,98. Świadczy to o tym, że można przyjąć uśrednioną wartość poprawki wskazania na poziomie 30% jako wartość poprawną.

Poza zaniżaniem wartości strumienia objętości przez kryzę, wprowadzenie do wody fazy gazowej powoduje powstanie rozrzutu wyników pomiarowych. Przez to obserwuje się wzrost odchylenia standardowego rejestrowanych strumieni przepływu, co przedstawiono na rys. 5 i 6.

Zarówno na rys. 5 jak i 6 występują podobieństwa charakteru rozrzutu wyników pomiarowych w porównaniu ze strumieniem rejestrowanym za pomocą referencyjnego przepływowierza elektromagnetycznego. Bez względu na referencyjną wartość strumienia przepływu odchylenia standardowe dla pomiaru kryzą mają podobny charakter.

Na rys. 7 przedstawiono uśrednione wartości odchylenia standardowego strumienia objętości dla kolejnych serii pomiarowych określonych w tabeli 1.

Można zauważyć, że w badanym zakresie pomiaru 12,85-4,85 m³/h odchylenie standardowe strumienia objętości było większe dla pomiaru kryzą w związku z występowaniem fazy gazowej w wodzie. Dla pomiarów przepływowierzem elektromagnetycznym, mierzącego przepływ wody bez udziału fazy gazowej, można zauważyć, że wartość odchylenia standardo-

wego jest bliska 0. Dla pomiarów kryzą wartość odchylenia standardowego jest wyraźnie wyższa.

W trakcie prowadzenia pomiarów realizowana była również rejestracja obrazu z wykorzystaniem laserowego noża świetlnego. Pozwoliło to na obserwację zmian kształtu, wielkości i drogi poruszania się pęcherzy powietrza dodawanego króćcem do strumienia wody. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykładowe fotografie obrazujące występowanie fazy gazowej, wprowadzonej do instalacji króćcem przed zwężką od strony napływowej dla różnych strumieni przepływu.

Wnioski

W wyniku przeprowadzenia badań dotyczących wpływu obecności fazy gazowej na wskazanie przepływowierza zwężkowego stwierdzono wpływ na wynik pomiaru powodujący zaniżenie wskazań przepływowierza. We wszystkich przebadanych przypadkach zauważyć można, że wprowadzenie fazy gazowej powoduje zaniżenie wartości strumienia fazy ciekłej średnio o 30%, co jest równoznaczne ze zmniejszeniem wartości różnicy ciśnień na kryzie. Wartość błędu systematycznego, utrzymującego się na średnim poziomie 30%, jest niezależna od procentowego udziału fazy gazowej w mieszaninie. Stwierdzono także wyraźny wzrost niepewności pomiarowej strumienia wyrażony zwiększeniem odchylenia standardowego wartości mierzonej co zobrazowane jest na rysunku 7. Wartości odchylenia standardowych dla kryzy większe są kilkukrotnie niż dla strumienia mierzonego przepływowierzem elektromagnetycznym.

Uzyskane wyniki pomiarów wykazały konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych nad wpływem obecności fazy gazowej na wskazania przepływowierzy zwężkowych w celu dokładniejszego jej przebadania i rozszerzenia zakresu stosowania różnego typu zwęzek do pomiarów strumieni przepływów dwufazowych.

LITERATURA:

- [1] Piotr Synowiec, Wiesław Wędrychowicz, Artur Andruszkiewicz; Pomiar strumienia przepływów dwufazowych metodami ultradźwiękowymi za pomocą rurociągu; Elektronika (Warszawa). 2016. R. 57, nr 9, s. 115-117, DOI: 10.15199/13.2016.9.27
- [2] Piotr Synowiec, Artur Andruszkiewicz, Wiesław Wędrychowicz, Paweł Regucki; Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływowierzem ultradźwiękowym; Przegląd Elektrotechniczny. 2015. R. 91, nr 10, s. 179-182, DOI: 10.15199/48.2015.10.37
- [3] Hanyu Wang, Shuichiro Miwa, Wen Zhou, Takashi Hibiki, Koji Okamoto, Development of an industry-applicable two-phase flow regime identification approach using flow-induced vibration acceleration signals, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 154, 2025, 110751, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110751>.
- [4] Yu Zhang, Chao He, Pengzhou Li, Numerical investigation of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipe with orifice plate, Progress in Nuclear Energy, Volume 138, 2021, 103801, ISSN 0149-1970, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103801>.
- [5] Mohamad Husni Mubarak, Sadiq J. Zarrouk, John E. Cater, Two-phase flow measurement of geothermal fluid using orifice plate: Field testing and CFD validation, Renewable Energy, Volume 134, 2019, Pages 927-946, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.081>.
- [6] S.R.V. Campos, J.L. Bali-Aqo, I. Slobodnicov, D.F. Filho, E.F. Paz, Orifice plate meter field performance: Formulation and validation in multiphase flow conditions, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 58, 2014, Pages 93-104, ISSN 0894-1777, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflsci.2014.06.018>.
- [7] C. Fischer, Development of a metering system for total mass flow and compositional measurements of multiphase/multicomponent flows such as oil/water/air mixtures, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 5, Issue 1, 1994, Pages 31-42, ISSN 0955-5986, [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0955-5986(94)90006-X).
- [8] Sarah Helbig, Sadiq J. Zarrouk, Measuring two-phase flow in geothermal pipelines using sharp edge orifice plates, Geothermics, Volume 44, 2012, Pages 52-64, ISSN 0375-6505, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.07.003>.
- [9] Aswini Kumar Khuntia, Souren Misra, Alok Patra, Santosh Kumar Panda, Determination of pressure drop through a circular orifice for two-phase flow with machine learning technique, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 94, 2023, 102478, ISSN 0955-5986, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102478>.