

Błędy pomiaru strumienia masy gazu kryzą ISA przy odwrotnym ustawieniu kryzy w rurociągu

Streszczenie. W artykule wyznaczono błędy pomiaru strumienia masy powietrza za pomocą kryzy ISA z przytarczowym pomiarem różnicy ciśnień w przypadku jej odwrotnego zainstalowania w rurociągu przepływowym. Obliczono wartości współczynnika poprawkowego zmniejszającego te błędy oraz przedstawiono wartości błędów resztkowych po wprowadzeniu tego współczynnika. W zależności od liczby Reynoldsa przedstawiono również zmiany wartości współczynnika przepływu dla kryzy zainstalowanej prawidłowo i odwrotnie.

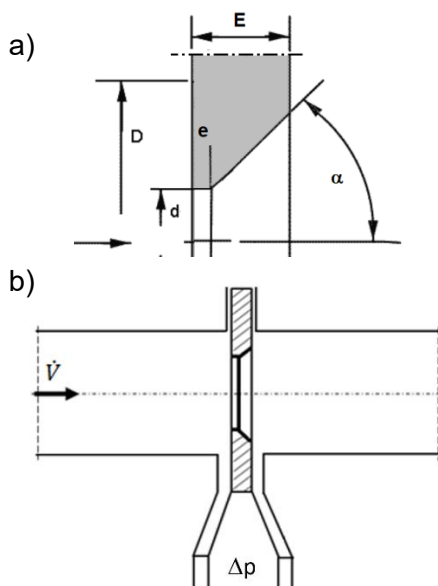
Abstract. The article determines the errors of air mass stream measurement by means of an ISA orifice with differential pressure measurement in the case of its reverse installation in a flow pipeline. The values of the correction factor reducing these errors were calculated and the values of the residual errors after taking this factor into account were presented. Depending on the Reynolds number, the changes in the value of the flow coefficient for an orifice installed correctly and in reverse are also presented. (Errors in measuring gas mass streams with an ISA orifice when the orifice is reversed in the pipeline)

Słowa kluczowe: strumień przepływu, metoda zwężkowa pomiaru, błąd pomiaru

Keywords: flow rate, orifice method of measurement, error of measurement

Wstęp

W pomiarach strumieni przepływów bardzo często stosuje się metodę zwężkową – szacuje się, że około 50% wszystkich urządzeń do pomiaru strumieni przepływu zainstalowanych w układach przepływowych to różnego typu zwężki lub kryzy [1]. Do jednych z popularniejszych rozwiązań spośród wielu rodzajów kryz standardowych opisywanych w normie ISO 5167-1 [2] lub w literaturze [3-5], należy kryza ISA z przytarczowym pomiarem różnicy ciśnień. Jest ona szczególnie chętnie stosowana w układach, gdzie trwała strata ciśnienia nie odgrywa znaczącej roli. Tego rodzaju układ pomiarowy jest stosunkowo tani, a błędy pomiaru strumieni objętości/masy płynu nie przekraczają 2% wartości mierzonej. Uzyskanie błędów tej wartości jest możliwe przy zachowaniu odpowiedniej długości odcinków prostych przewodów za i przed kryzą [6,7]. Gaz przepływający nie powinien zawierać fazy rozproszonej w postaci kropelek cieczy lub cząstek stałych [8].



Rys.1. Kryza ISA z przytarczowym pomiarem różnicy ciśnień
a) geometria kryzy b) prawidłowy sposób montażu [9].

Na rysunku 1a przedstawiono geometrię kryzy ISA. Posiada ona z jednej strony fazę o kącie $\alpha = 30^\circ - 45^\circ$. Najczęściej stosuje się kryzy o kącie 45° . Grubość walcowa

przewężenia $e = 0,005D - 0,02D$, przy grubości kryzy E nie przekraczającej $0,05D$. Prawidłowy montaż kryzy polega na jej ustawieniu w taki sposób, aby faza była ustawiona po przeciwległej stronie względem kierunku przepływu płynu (rys.1b). Niejednokrotnie w czasie montażu kryzy dochodzi do błędnego jej zamontowania w instalacjach przemysłowych. Często wykrycie tego błędu następuje już po całkowitym zmontowaniu i uruchomieniu instalacji przepływowej. Ponieważ zarówno czas jak i koszty usunięcia tego błędu są stosunkowo duże, pojawia się pytanie czy nie można eksploatować tej instalacji i mierzyć przepływ gazu do czasu przeprowadzenia kolejnego remontu instalacji.

Mając na uwadze to, że zmienia się wartość współczynnika przepływu, a także powstają dodatkowe błędy pomiaru strumienia płynu [10], możliwe jest prowadzenie pomiaru po wprowadzeniu odpowiedniej korekty.

Celem niniejszego artykułu jest określenie błędów pomiaru strumienia masy powietrza mierzonych za pomocą kryzy ISA z przytarczowym pomiarem różnicy ciśnień, dla odwrotnie zamontowanej kryzy ISA.

Zasada pomiaru

Dla prawidłowo zamontowanej kryzy oraz pomiarem parametrów przepływającego płynu (rys.2), strumień objętościowy płynu w rurociągu o średnicy wewnętrznej D wyznacza się z równania:

$$(1) \quad q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

gdzie: C - współczynnik przepływu, d - średnica otworu kryzy, β - przewężenie $\beta = d/D$, ε - współczynnik ścisłości, Δp - różnica ciśnień na kryzie, ρ - gęstość przepływającego płynu.

Zależność pomiędzy strumieniem objętościowym a masowym określa równanie:

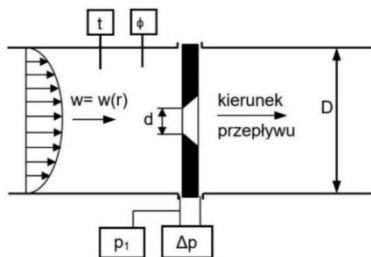
$$(2) \quad q_m = q_v \cdot \rho$$

Zgodnie z normą ISO 5167-1 wartość współczynnika C wyznacza się na podstawie równania Readera-Harrisa/Gallaghery, lub eksperymentalnie przekształcając równanie 1 dla zmierzonego strumienia inną metodą (np.

ultradźwiękową, rurką Prandtla, przepływomierzem termicznym lub wirowym. Współczynnik ściśliwości, w przypadku przepływu gazów, oblicza się z równania:

$$(3) \quad \varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1}$$

gdzie: κ - wykładnik izentropy, p_1 - bezwzględne ciśnienie płynu przed kryzą.



Rys.2. Układ pomiarowy

Gęstość gazu $\rho = \rho(t, \phi, p_1)$ jest zależna od temperatury t , wilgotności względnej ϕ , oraz nadciśnienia gazu przed zwężką p_1 . Można ją wyznaczyć w różny sposób, jednak najczęściej oblicza się ją z równania stanu gazu.

$$(4) \quad \rho = \frac{\mu p_1}{RT}$$

gdzie: μ - współczynnik lepkości dynamicznej, R - indywidualna stała gazowa, T - temperatura wyrażona w Kelvinach.

Sposób realizacji pomiarów

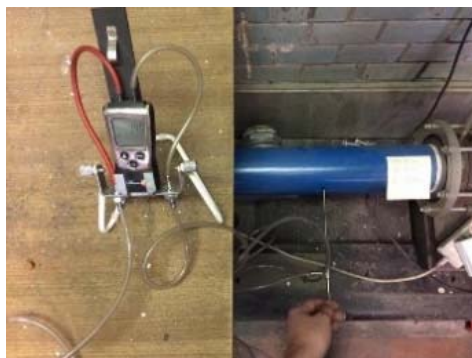
Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 3. Różnicę ciśnień na kryzie Δp i nadciśnienie w instalacji przed kryzą p_1 mierzono z 5 sekunodowym krokiem czasowym przez 10 minut, w celu uśrednienia wyników pomiaru. Uśrednienie zrobiono z wykorzystaniem programu komputerowego TN Flow [11], wyznaczano współczynnik przepływu C oraz z równania (1) strumień masy przepływającego powietrza. Ciśnienia były mierzone za pomocą rejestratora parametrów przepływu powietrza RPP-04 firmy LAT sp. z o. o. w Katowicach, z rozdzielczością 1 Pa. W układzie pomiarowym montowano kryzę zarówno zgodnie jak i przeciwnie do ruchu płynu. Dla każdego montażu zmieniano wartości przepływu dla ośmiu różnych przepływów powietrza. Starano się tak ustawić spadek ciśnienia na kryzie, aby wartości strumieni przepływu były w przybliżeniu jednakowe.



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska pomiarowego: 1- przewód poziomy, 2- kryza ISA z przytarczowym pomiarem różnicy ciśnień, 3 - zawory regulacyjne, 4- przewód dolotowy, 5 - rejestrator ciśnień RPP-04, 6- manometr różnicowy

Referencyjną wartość przepływającego strumienia gazu obliczono na podstawie wielopunktowego pomiaru ciśnienia dynamicznego w przekroju poprzecznym rurociągu za

pomocą rurki Prandtla (rys.4). Strumień gazu obliczono metodą podziału przekroju rurociągu na pierścienie o równych polach a następnie na podstawie zmierzonej prędkości ruchu gazu obliczono średni strumień objętości/masy [12]. Dla odwrotnego położenia kryzy pomiary wykonano analogicznie, z tym, że współczynnik C obliczany był tak jak dla prawidłowego położenia kryzy.



Rys. 4. Zdjęcie układu do pomiaru strumienia gazu rurką Prandtla

Temperaturę powietrza mierzono termometrem oporowym metalowym Pt100 z rozdzielczością 0,1°C, natomiast wilgotność względną przyjęto równą wilgotności powietrza atmosferycznego i mierzono higrometrem firmy Testo.

W eksperymencie zastosowano kryzę ISA o wymiarach przedstawionych w tabeli 1. Kryzę zamontowano pomiędzy kołnierzami na rurociągu o średnicy wewnętrznej 80mm (rys.5a). W ten sam sposób montowano kryzę zarówno w prawidłowy jak i nieprawidłowym kierunku (rys.5b).

Tabela 1. Podstawowe parametry układu pomiarowego

kryza	D mm	d mm	β	C	t °C	ϕ %	ρ kg/m ³
ISA	80,00	57,98	0,725	0,6101	29,6	56	1,165

a)



b)



Rys.5. Kryza badana a) montaż kryzy b) obraz kryzy w ustawieniu: P- prawidłowym, O- odwrotnym

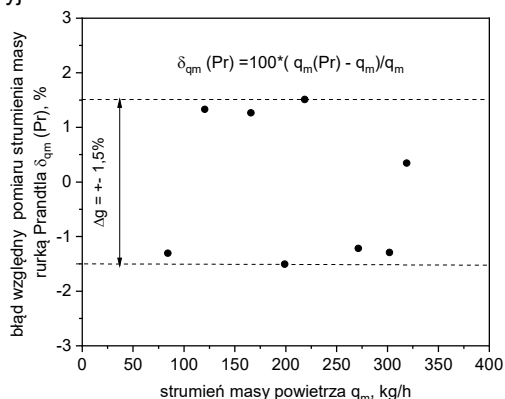
Wyniki pomiarów

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów wraz z obliczonymi wartościami współczynników przepływu C dla strumienia masy przepływającego gazu q_m . Dla prawidłowego (P) i odwrotnego położenia kryzy w rurociągu (O) obliczono liczby Reynoldsa Re oraz błędy względne δq_m strumienia masy powietrza przy odwrotnym montażu kryzy.

Tabela 2. Wyniki z przeprowadzonych pomiarów

Różnica ciśnień na kryzie Δp , [Pa]		Współczynnik przepływu C		Strumień masy q_m , [kg/h]		Re	δq_m [%]
P	O	P	O	P	O		
935	796	0,6101	0,6612	318,6	294,4	76910	-7,7
833	763	0,6105	0,6379	301,9	288,3	72660	-4,5
674	622	0,6113	0,6363	271,3	260,7	65480	-3,9
435	400	0,6130	0,6393	218,7	209,6	52800	-4,2
359	332	0,6139	0,6384	199,0	191,5	48000	-3,8
248	213	0,6156	0,6642	165,9	154,0	40060	-7,2
129	114	0,6192	0,6587	120,4	113,4	29000	-5,8
62	26	0,6241	0,9638	84,2	72,8	20130	-14

Rysunek 6 przedstawia błędy względne strumienia masy dla pomiarów za pomocą rurki Prandtla, obliczonymi na podstawie równania (1). Błąd graniczny pomiaru nie przekracza $\pm 1,5\%$ co świadczy o dużej zgodności pomiarów. Z tego względu przyjęto wyniki pomiaru strumienia z zastosowaniem rurki Prandtla jako wartości referencyjne.



Rys.6. Błąd względny strumienia masy wyznaczonego z pomiarów z zastosowanie rurki Prandtla.

Jak wynika z tabeli 2 wartości współczynnika przepływu dla odwrotnego położenia kryzy są większe od prawidłowego jej położenia. Obliczając zatem strumień masy przepływającego powietrza i przyjmując współczynnik przepływu C jak dla kryzy zamontowanej prawidłowo otrzymane wyniki będą zaniżone. Powstaje w ten sposób błąd systematyczny.

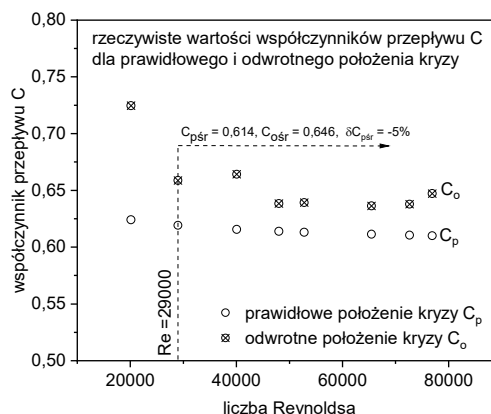
Na rysunku 7 przedstawiono zmiany współczynników przepływu C przy prawidłowym i odwrotnym położeniu kryzy w przewodzie pomiarowym. Wartość średnia dla prawidłowego montażu kryzy w przewodzie wynosi $C_p=0,614$ zaś w przypadku odwrotnym $C_o=0,646$. Największa procentowa różnica między tymi współczynnikami występuje dla liczby Reynoldsa $Re = 20130$ i wynosi prawie 14%. Dla liczb Reynoldsa większych niż $Re>29000$ różnica ta istotnie się zmniejsza i średnio w przedziale $29000 \leq Re \leq 76900$ wynosi 5%. Obliczając

zatem z równania (1) strumień przepływu dla odwrotnego położenia kryzy w przewodzie wartość współczynnika C można zapisać:

$$(5) \quad C = C_o = k \cdot C_p$$

gdzie $k = 1,05$ dla $29000 \leq Re \leq 76900$

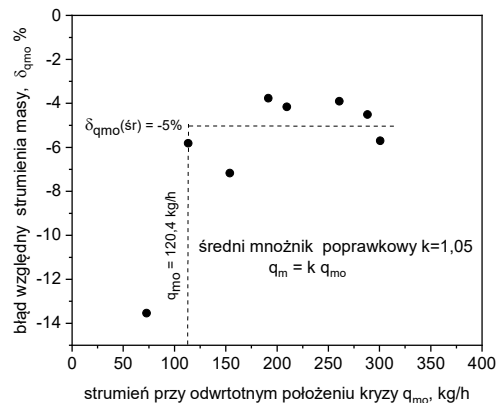
Liczba Reynoldsa $Re= 29000$ stanowi minimalną wartość, dla której można zastosować stały współczynnik poprawkowy k . Dla mniejszych liczb Reynoldsa przepływ w rurociągu z turbulentnego przechodzi w przepływ przejściowy, zmienia się rozkład prędkości powietrza w przekroju poprzecznym przewodu, wartość współczynnika przepływu przy odwrotnym położeniu kryzy zaczyna szybko rosnąć. W tym zakresie liczb Reynoldsa dla każdego strumienia przepływu wartość współczynnika poprawkowego należy wyznaczać indywidualnie.



Rys.7. Zmiany współczynnika przepływu C przy prawidłowym i odwrotnym położeniu kryzy w przewodzie przepływowym

Na rysunku 8 przedstawiono błędy względne strumienia masy powietrza przy odwrotnym położeniu kryzy w przewodzie. Wartości tych błędów zmieniają się proporcjonalnie do zmian wartości błędów współczynnika przepływu C . Dla strumienia masy $q_{mo} = 85,4$ kg/h błąd wynosi ok -14%. Począwszy od strumienia masowego $q_{mo} = 120,4$ kg/h błędy strumienia masy przepływającego powietrza mieszczą się w przedziale $-7,7 \leq \delta q_{mo} \leq -3,9\%$. Średnia wartość błędu wynosi około 5%. Współczynnik poprawkowy jest zatem taki sam jak dla współczynnika przepływu tzn. $k = 1,05$. Rzeczywisty strumień masy q_m dla $q_{mo} \geq 120,4$ kg/h.

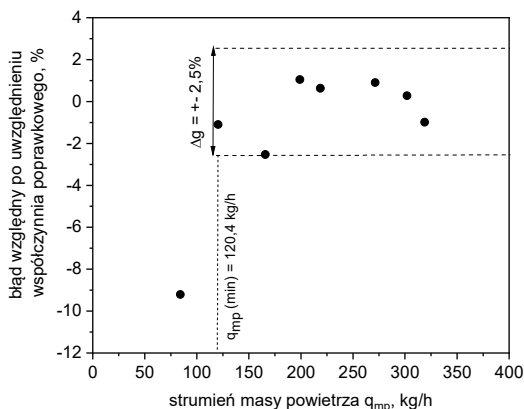
$$(6) \quad q_m = 1,05 \cdot q_{mo}$$



Rys.8. Błędy względne strumienia masy powietrza przy odwrotnym montażu kryzy

Uwzględniając średnią wartość współczynnika poprawkowego $k=1,05$ na rysunku 9 przedstawiono

względne błędy resztkowe strumienia masy powietrza. Zawierają się one w przedziale $-2,5 \leq \delta q_{m0} \leq 1,1\%$. Ich wartość graniczną można zatem przyjąć $\Delta g(q_m) = \pm 2,5\%$.



Rys.9 Wartości błędów resztkowych strumienia masy powietrza po wprowadzeniu współczynnika poprawkowego $k = 1,05$

Podsumowanie

W artykule wyznaczono błędy strumienia masy przepływającego powietrza w przypadku odwrotnego montażu kryzy w przewodzie przepływowym o przekroju kołowym. Pomiar i obliczenia pokazały, że w przypadku odwrotnego montażu kryzy wartości współczynników przepływu C w całym zakresie pomiarowym były większe niż w przypadku prawidłowego montażu kryzy. Stąd też wyznaczenie rzeczywistej wartości strumienia masy wymaga wprowadzenia mnożnika poprawkowego do współczynnika przepływu C . Wartość tego mnożnika dla liczb Reynoldsa większych niż $Re \geq 20900$ wynosiła średnio $k = 1,05$. Dla mniejszych liczb Reynoldsa błędy wyznaczenia strumienia masy szybko rosną i wartość współczynnika poprawkowego należy wyznaczyć indywidualnie dla każdego strumienia gazu. Uwzględniając stałą wartość współczynnika poprawkowego w równaniu na strumień masy, jak zostało to przedstawione na rysunku 9, błędy resztkowe nie przekraczają $\pm 2,5\%$, a w znakomitej większości przypadków ich wartość mieści się w przedziale $\pm 1\%$. W przypadku odwrotnego montażu kryzy w rurociągu oraz braku możliwości przerwania pracy instalacji pomiarowej należy na stanowisku laboratoryjnym dla wykorzystywanej kryzy wyznaczyć wartości współczynników przepływu C w szerokim zakresie liczb Reynoldsa i dalej w układzie obliczeniowym strumienia masy/objętości uwzględnić dodatkową wartość współczynnika poprawkowego k .

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.rzasa@po.edu.pl;
dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Techniki Ciepłej, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kabza Z., Pomiar strumieni płynów (przewodnik), *Studia i monografie z.90, Politechnika Opolska, Opole* (1996)
- [2] PN-EN ISO 5167-1:2005 Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym - Część 1: Zasady i wymagania ogólne.
- [3] Piotrowski J., Pomiar. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego- praca zbiorowa, *Wydawnictwo WNT, Warszawa* (2012)
- [4] Mrowiec A., Heronimczak M.: Badanie przepływu płynu nieściśliwego przez wybraną kryzę segmentową, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.95, 11(2019), 63-65
- [5] Golijanek-Jędrzejczyk A., Mrowiec A., Hanus R., Zych M., Świsulski, D.: Uncertainty of mass flow measurement using centric and eccentric orifice for Reynolds number in the range $10,000 \leq Re \leq 20,000$; *Measurement*, v. 160,10785, (2020),
- [6] Straka M., Koglin C., Eichler T.: Segmental orifice plates and the emulation of the 90° -bend, *tm-Teschnisches Messen*, 87 (2020), 18-31
- [7] Turkowski M., Metrologia przepływów, *Oficina wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa* (2018)
- [8] Tomaszewska-Wach B., Rząsa M.R., A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices, *Sensors*, 21 (2021), 2291, DOI: 10.3390/s21072291
- [9] Rząsa M.R., Tomaszewska – Wach B., Pomiar strumienia mokrego gazu kryzą standardową, *Przegląd elektrotechniczny*, R.95, 11, (2019), 86-89
- [10] Wróblewska E., Synowiec P., Wędrychowicz W., Andruszkiewicz A., Błędy w pomiarach strumieni objętości zwężką podwójną przy odwrotnym ustawieniu kryz w rurociągu, *Przegląd elektrotechniczny*, R.94, 8 (2020), 154 -157
- [11] Program TNflow - Obliczanie zwęzek pomiarowych wg PN-EN ISO 5167:2005
- [12] Stańda J., Górecki J., Andruszkiewicz A., Badanie maszyn i urządzeń energetycznych, *Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław* (2004)