

Pomiar strumienia masy i energii dla gazów czystych ich mieszanin przy użyciu przepływomierzy Coriolisa. Efekty wpływające na pomiar i sposób ich kompensacji

Mass and energy flow measurement for pure gases and their mixtures using Coriolis flowmeters. Effects influencing the measurement and the method of their compensation

Maciej Marusiak, Dariusz Janasz^{*}

Słowa kluczowe: przepływomierz Coriolisa, CO₂, H₂, MID, OIML

Streszczenie

W przywołanych w poniższym artykule publikacjach autorzy opisywali zasadę działania, zalety i wady przepływomierzy Coriolisa. W niniejszym artykule skoncentrowano się na przedstawieniu dodatkowych efektów, wpływających na dokładność pomiarów oraz metod ich kompensacji. Przytoczono wyniki badań laboratoryjnych potwierdzających dokładność pomiarów gazomierzy Coriolisa i możliwość kompensacji wpływów zakłócających, a także badania potwierdzające możliwość stosowania gazomierzy Coriolisa zgodnie z dyrektywą MID i zaleceniem OIML R137.

Keywords: Coriolis flow meter, CO₂, H₂, MID, OIML

Abstract

In the publications cited in the following article, the authors described the principle of operation, advantages and disadvantages of Coriolis flowmeters. This article focuses on presenting additional effects that affect the accuracy of measurements and methods for their compensation. Laboratory studies confirming the accuracy of gas meters and the possibility of compensating for the effects were cited. As well as the possibility of using gas meters in accordance with MID and OIML R137.

Wstęp

W 1977 r. firma Micro Motion wprowadziła na rynek pierwszy przemysłowy przepływomierz, którego działanie oparte było na tzw. zjawisku siły Coriolisa [3,17]. Przepływomierze te potocznie nazywano przepływomierzami Coriolisa. Obecnie są one szeroko stosowane w aplikacjach, charakteryzujących się ekstremalnie trudnymi warunkami procesowymi, gdy wymagane są wysoka dokładność i stabilność pomiaru.

W zastosowaniach niskotemperaturowych przepływomierze Coriolisa z powodzeniem służą do pomiaru LNG i LN2 [7,17], oraz w temperaturach super kriogenicznych, w zakresie od -270 °C do -250 °C (ciekły wodór i hel) [4,9]. W aplikacjach wysokotemperaturowych przepływomierze Coriolisa działają z powodzeniem w temperaturach do 430 °C (pomiar ciężkich frakcji ropopochodnych) [8]. W przypadku wysokich ciśnień, mierniki mogą pracować na ciśnieniu do 1000 bar, np. przy pomiarach CNG z typowym ciśnieniem roboczym do 300 bar, czy też pomiarach wodoru do 700 bar [10,11]. Biorąc pod uwagę, że pomiary dwutlenku węgla (CO₂) mieszczą się w tych ekstremalnych zakresach, to przepływomierze Coriolisa będą również odpowiednie do wszystkich aplikacji, w których gaz

ten występuje w różnych stanach skupienia. Stal kwasoodporna jest standardowym wykonaniem materiałowym wewnętrznych rur pomiarowych we wnętrzu tych przepływomierzy, natomiast dla aplikacji specjalnych stosuje się, w zależności od potrzeby, super duplex, hastelloy, tytan, tantal.

Czynniki pomiarowe

Technologia pomiarów, za pomocą przepływomierzy Coriolisa, obejmuje szeroki zakres zastosowań dla różnych warunków procesowych i różnych warunków otoczenia. Istnieje lista powszechnie znanych czynników, które mają wpływ na końcowe wyniki pomiarów. Udział każdego z nich w końcowej niepewności pomiaru będzie różny, w zależności od rodzaju aplikacji i typu miernika. Ich wpływ opisany jest w kartach katalogowych urządzeń. Przykłady analiz niepewności pomiaru, z wykorzystaniem przepływomierzy Coriolisa, można również znaleźć w różnych publikacjach, także krajowych, np. [2,16,17]. Niezależnie jednak od zastosowania, ogólne czynniki, które należy zawsze uwzględnić przy oszacowaniach niepewności pomiarów, z wykorzystaniem przepływomierzy Coriolisa obejmują:

- efekt temperatury,

^{*} Maciej Marusiak, Emerson Process Management Polska, 02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 13, maciej.marusiak@emerson.com;
Dariusz Janasz, Emerson Process Management Polska, 02-673 Warszawa, ul. Konstruktorska 13, dariusz.janasz@emerson.com

- efekt ciśnienia,
- efekt zera,
- efekt lepkości,
- efekt ściśliwości (znany również, jako efekt prędkości dźwięku).

Niektóre z powyższych czynników mogą mieć znikomy wpływ, szczególnie jeżeli uwzględni się ich potencjalny wpływ na wartości metrologiczne pomiaru (niepewność, dokładność), natomiast pozostałe mogą być czynnikami istotnymi co do ich wartości. Z wyjątkiem wymienionego powyżej efektu zera, pozostałe elementy można modelować i korygować dla każdego zastosowania, ułatwiając w ten sposób przenoszenie, zarówno dokładności jak i niepewności pomiaru z kalibracji mierników na stanowiskach wodnych do zamierzonych zastosowań pomiarowych dla mediów innych niż woda. Wspomnianym powyżej efektem zera, czy efektem zerowym (stabilnością zera), nazywamy minimalne pozorne wskazania natężenia przepływu przepływomierza Coriolisa, w warunkach braku przepływu. W kartach katalogowych producenta element ten jest zwykle określany jako specyfikacja stabilności zera.

Chcąc zminimalizować wpływ efektu zera, miernik powinien być zainstalowany zgodnie z zaleceniami producenta i wtedy efekt ten będzie miał ograniczony wpływ na pomiar cieczy i gazów. Ponadto, efekt zerowy jest efektem niezależnym, który ma wpływ na dolną granicę zakresu przepływu strumienia masy.

Efekt lepkości ma zastosowanie tylko do płynów o wysokiej lepkości, takich jak np. oleje opałowe, ropa, dwutlenek węgla lub inne gazy, mające wartość lepkości dynamicznej mniejszą niż $20 \cdot \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$, która jest znacznie mniejsza od lepkości dynamicznej wody, wynoszącej około $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

Efekt temperaturowy polega na zmianie sztywności rur pomiarowych pod wpływem temperatury płynu. Efekt ten jest dobrze znany i zazwyczaj automatycznie kompensowany w przepływomierzach Coriolisa, dzięki wewnętrznemu czujnikowi Pt100 i oprogramowaniu przetwornika pomiarowego [17].

Efekt ciśnienia, jest niezależny od mierzonego płynu, zależy od konstrukcji i geometrii średnicy rur pomiarowych przepływomierza Coriolisa. W przypadku wzrostu ciśnienia rury stają się bardziej „sztywne”, przez co mamy do czynienia ze zwiększającym się błędem pomiarowym w jednym kierunku. Efekt ten wyraża się w [%/

bar]. Przetworniki ciśnienia podłączone do przetwornika Coriolisa przekazują drogą cyfrową, po protokole HART lub sygnałem prądowym [mA], informacje o ciśnieniu statycznym. Mówi się wtedy o kompensacji dynamicznej. Inną metodą jest wpisanie na sztywno wartości ciśnienia statycznego i wtedy mówimy o kompensacji statycznej. Korekty ciśnienia mogą być stosowane np. w pomiarach CO_2 w stanie nadkrytycznym, gdzie mamy do czynienia z dużymi ciśnieniami.

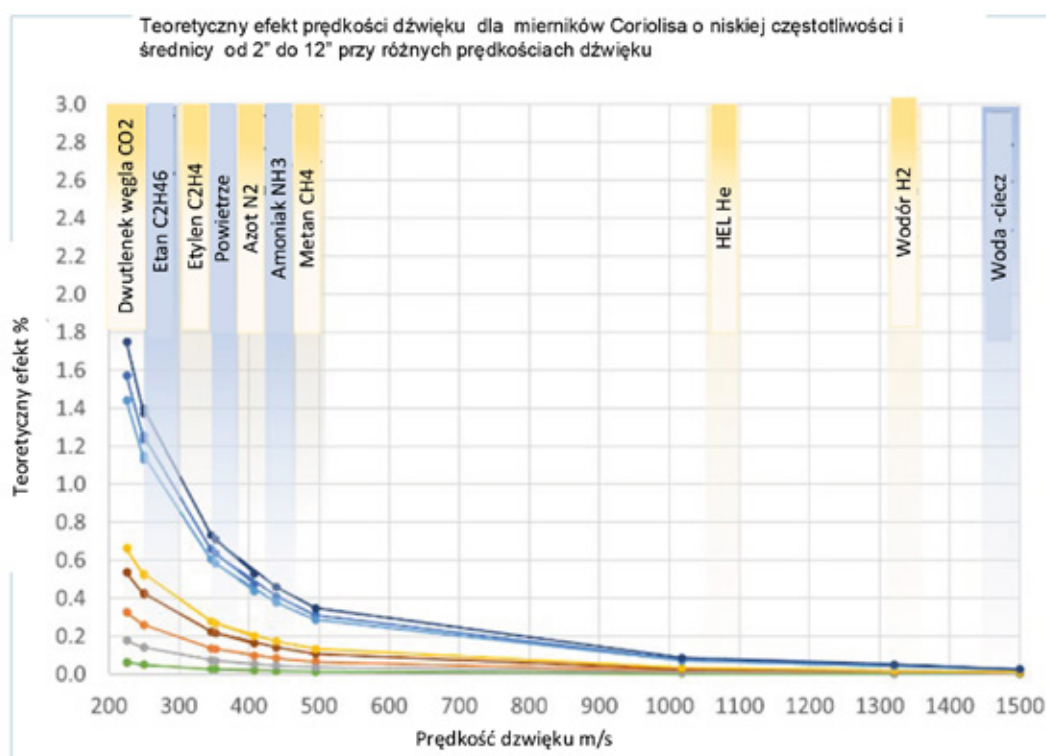
W tab. 1 przedstawiono przykładowe właściwości wybranych płynów, takich jak: wodór, (H_2), dwutlenek węgla (CO_2), azot (N_2) i metan (CH_4). Wodór i dwutlenek węgla są najbardziej związane z gospodarką zrównoważonego rozwoju i transformacją energetyczną, natomiast metan i azot podano z uwagi na fakt, że te płyny są powszechnie stosowane w różnych laboratoriach kalibracyjnych na całym świecie, jako reprezentacyjne płyny stosowane przy kalibracjach. Ponadto, azot chętnie wykorzystuje się po prostu jako bezpieczny płyn kalibracyjny.

Dwutlenek węgla jest najcięższym gazem (jego gęstość jest największa w porównaniu z innymi przytoczonymi gazami) o jednocześnie najniższej prędkości rozchodzenia się w nim dźwięku. Stosunkowo wysoka gęstość CO_2 skutkuje większym przepływem masowym dla równoważnego przepływu objętościowego, w porównaniu z innymi gazami w tab. 1. Ułatwia to uzyskanie korzystnego

Tabela 1 Właściwości fizyczne wybranych płynów: $\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2, \text{CO}_2$

Table 1 Physical properties of selected fluids: $\text{H}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2, \text{CO}_2$

	H_2	CH_4	N_2	CO_2
Waga molekularna, (kg/kmol)	2.016	16.04	28.01	44.01
Gęstość (gaz), @ 15°C , 1 bar, kg/m ³	0.085	0.68	1.17	1.85
Temperatura wrzenia, $^\circ\text{C}$	-252.8	-161.5	-210	-56.6
Punkt krytyczny, $^\circ\text{C}$	-249	-82	-147	31
Punkt krytyczny, bar	12.9	45.9	33.9	73.77
Prędkość dźwięku (VoS) @ 15°C , 1 bar, m/s	1294	441	346	264

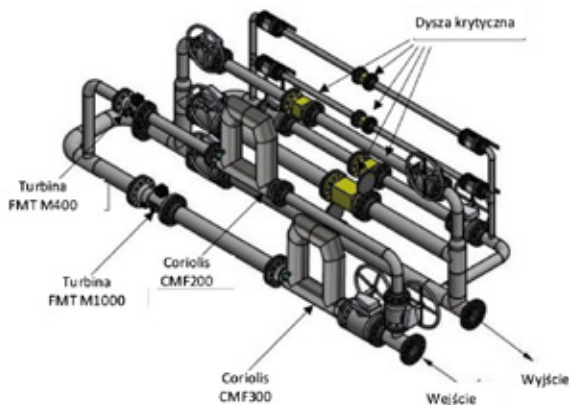


Rys. 1. Teoretyczny efekt prędkości dźwięku dla rozmiarów mierników od 2\"

Fig. 1. Theoretical effect of speed of sound for gauge sizes from 2\"



Rys. 2 Zdjęcie i schemat stanowiska referencyjnego
Fig. 2. Photo and diagram of the reference station



zakresu natężenia przepływu w stosunku do wodoru. Niska prędkość dźwięku w dwutlenku węgla powoduje większy efekt prędkości dźwięku (efekt VoS) dla przepływomierzy Coriolisa. Zjawisko to zostało wyjaśnione przez Hemp i Kutina [6]. W swojej pracy Hemp i Kutin konkludują, że błąd masy E_m można oszacować za pomocą równania

$$E_m = SF \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi f}{c} r \right)^2 \quad (1)$$

gdzie:

SF – jest współczynnikiem skali wyznaczonym dla każdego typu miernika Coriolisa w zależności od konstrukcji, która odnosi się do założeń przyjętych wg. [14],

f – to częstotliwość drgań własnych rurki pomiarowej Coriolisa,

c – to prędkość dźwięku w mierzonym płynie,

r – to wewnętrzny promień rurek pomiarowych Coriolisa.

Z równania (1) można wywnioskować, że prędkość efektu dźwiękowego odgrywa znaczącą rolę, w przypadku większych mierników Coriolisa o wysokiej częstotliwości drgań własnych w zastosowaniach, w których płyny charakteryzują się niską prędkością rozchodzenia się w nich dźwięku.

Wykres na rys.1 przedstawia efekt prędkości dźwięku dla różnych rozmiarów mierników Coriolisa o niskiej częstotliwości drgań własnych (poniżej 100 Hz) dla różnych gazów.

Efekt prędkości dźwięku odgrywa znaczącą rolę, w przypadku większych mierników Coriolisa o wysokiej częstotliwości drgań własnych, w których płyny mają niską prędkość dźwięku. W tab. 2 przedstawiono teoretyczne wartości efektu prędkości dźwięku dla przepływomierzy: 2-calowych, 3-calowych i 4-calowych, o różnych częstotliwościach drgań własnych, dla medium o prędkości dźwięku równej 250m/s (CO_2 w fazie gazowej w temperaturze 20 °C i przy ciśnieniu 20 bar).

Tabela 2 teoretyczne wartości efektu prędkości dźwięku dla przepływomierzy: 2", 3" i 4" o różnych częstotliwościach drgań własnych
Table 2. Theoretical values of the sound velocity effect for flow meters: 2", 3" and 4" with different natural frequencies

Rozmiar	D średnica rury pomiarowej [mm]	Częstotliwość drgań [Hz]	E_m [błąd %]
2 cale	30	100	0.07
2 cale	30	200	0.28
3 cale	45	100	0.16
3 cale	45	200	0.64
4 cale	70	100	0.39
4 cale	70	200	1.55

Z tab. 2 wynika, że mierniki Coriolisa mniejsze niż 2 cale i o częstotliwości roboczej poniżej 200 Hz, mają pomijalny efekt VoS. Podobnie jest dla 3-calowych mierników o częstotliwości drgań 100 Hz, gdzie VoS ma niewielki wpływ, podczas gdy dla miernika o podobnej wielkości, ale wyższej częstotliwości (np. 200 Hz) możemy zauważyć większy błąd pomiaru masy.

Jedną z metod uniknięcia lub złagodzenia wpływu efektu VoS w pomiarach CO_2 mogłoby być projektowanie systemów pomiarowych, z równoległymi miernikami o mniejszych przepływomierzach, ale mogłoby to jednak nie być pożądane, ze względu na ograniczoną przestrzeń, koszty instalacyjne lub ograniczenia związane ze spadkami ciśnienia. Z tych powodów zalecane jest stosowanie mierników o większym rozmiarze i najlepszą opcją byłoby wybieranie przepływomierzy Coriolisa o najniższej możliwej częstotliwości roboczej. Ważne jest, aby możliwe było oszacowanie i skorygowanie tego efektu. W niektórych nowoczesnych przepływomierzach Coriolisa korekta ta jest już zaimplementowana. Patent Micro Motion „Method of compensating for mass flow using known density” [14], umożliwia określenie prędkości dźwięku w CO_2 , przy użyciu wartości ciśnienia i temperatury procesu. Wykorzystywane jest to do obliczenia rzeczywistego efektu VoS i zastosowania odpowiedniej korekty.

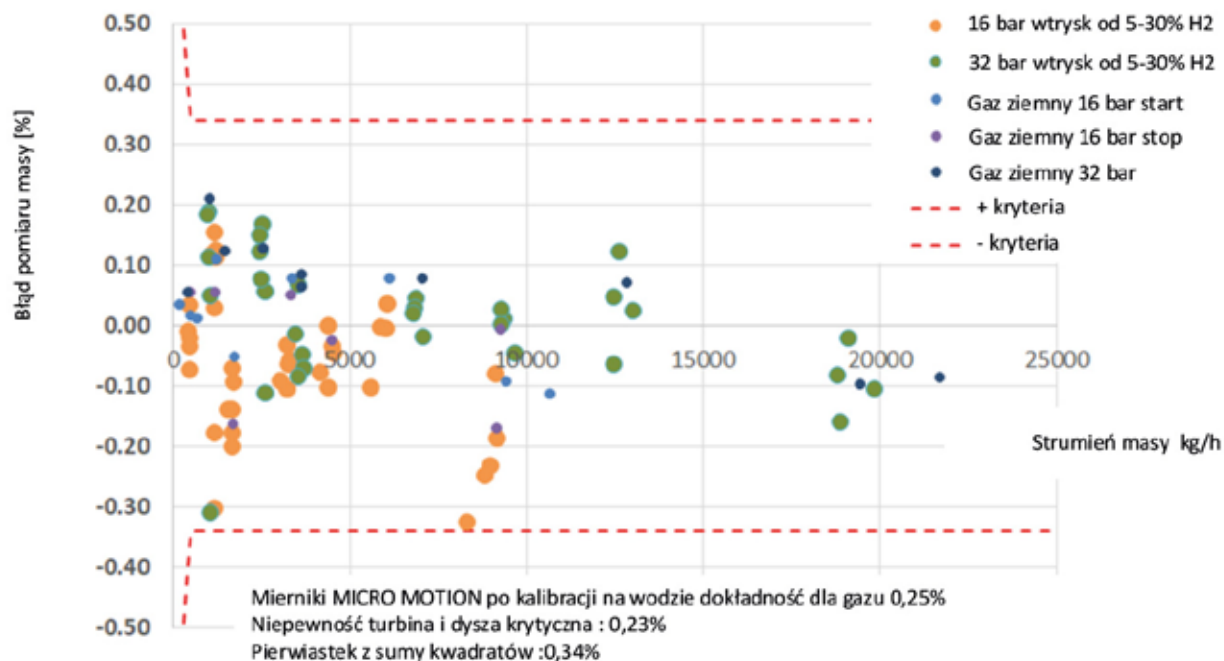
Szczegółowe testy przepływomierzy Coriolisa Micro Motion CMF200 (DN50) i CMF300 (DN80), zainstalowanych w unikalnym stanowisku referencyjnym DNV GL, składającym się z dysz krytycznych, mierników turbinowych i mierników Coriolisa, zostały przeprowadzone przez DNV GL w warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistej pracy [5].

Na stanowisku pokazanym na rys. 2 były testowane mierniki, z użyciem rzeczywistego gazu ziemnego, przy różnych ciśnieniach roboczych, w celu ustalenia linii bazowej pomiaru. Wykonano także testy mierników na gazie ziemnym z domieszką H_2 (do 20%) i CO_2 (20%), przy różnych ciśnieniach roboczych.

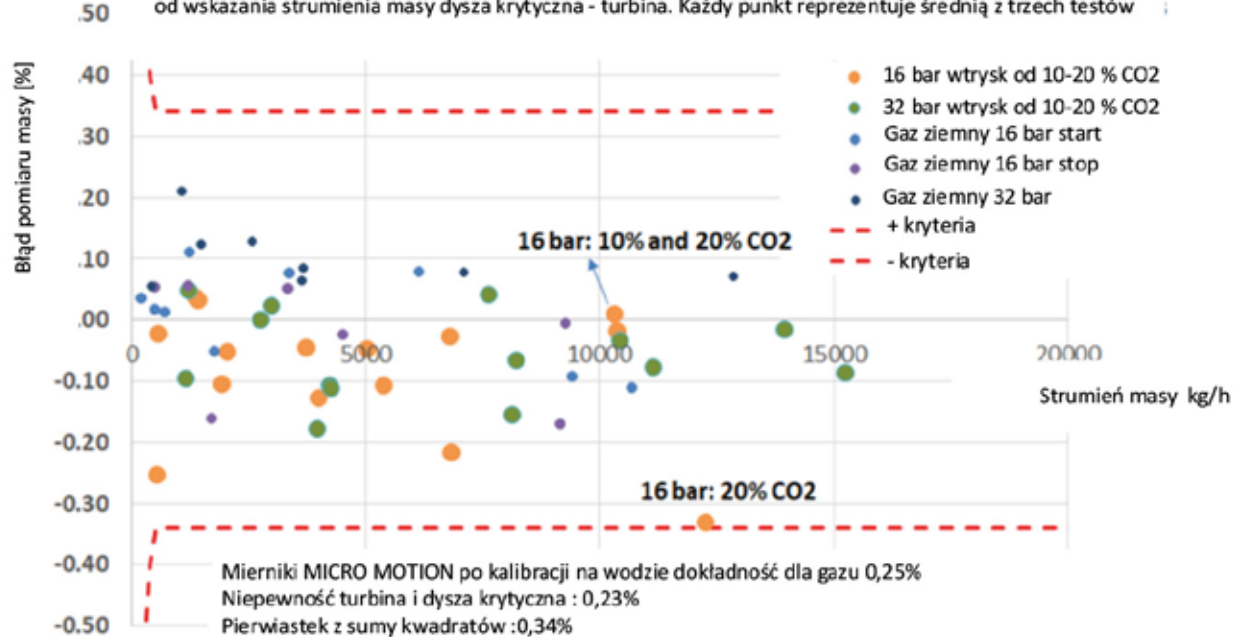
Wykresy na rys. 3 przedstawiają wartości błędów względnych mierników Coriolisa, w porównaniu z dyszami krytycznymi i gazomierzami turbinowymi. Katalogowa wartość błędu mierników CMF dla gazu wynosi $\pm 0,25\%$. Mimo, że wartości korekty VoS są uważane za nieistotne dla CMF200 i CMF300, metoda kompensacji efektu VoS została automatycznie zaimplementowana podczas testu. Współczynniki kalibracyjne miernika zostały określone na stanowisku kalibracyjnym wodnym i nie wprowadzono żadnych dodatkowych współczynników poprawkowych miernika.

Kolejnym testom zostały poddane mierniki CMF300 DN80 i CMF400 DN100 w laboratorium testowym Fortis BC w Kanadzie (medium pomiarowe – gaz CO_2). Warunki procesowe dla tych testów to 99% czystego gazu CO_2 pod ciśnieniem 16 bar i w temperaturze 23°C. Oba mierniki Coriolisa zostały skalibro-

Wpływ na mierniki Coriolisa „MICRO MOTION” wtrysku H₂ do gazu ziemnego o ciśnieniu 16 barów i 32 barów. Błąd masowego natężenia przepływu dla sumy sensorów pomiarowych CMF200 i CMF300 w zależności od wskazania strumienia masy dysza krytyczna - turbina. Każdy punkt reprezentuje średnią z trzech testów



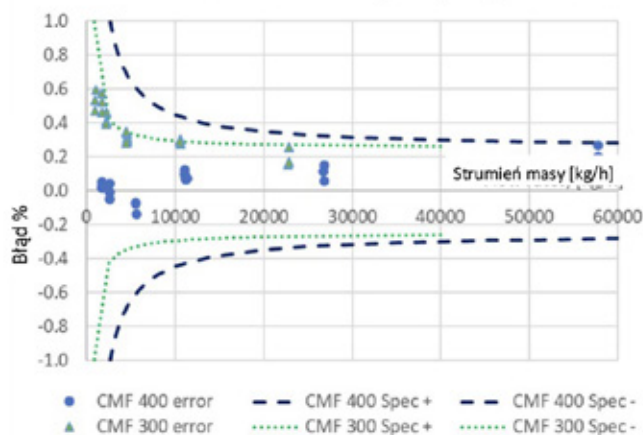
Wpływ na mierniki Coriolisa „MICRO MOTION” wtrysku CO₂ do gazu ziemnego o ciśnieniu 16 barów i 32 barów. Błąd masowego natężenia przepływu dla sumy sensorów pomiarowych CMF200 i CMF300 w zależności od wskazania strumienia masy dysza krytyczna - turbina. Każdy punkt reprezentuje średnią z trzech testów



Rys. 3 Wartości błędów względnych dla mierników CMF200 i CMF 300 względem dysz krytycznych i turbin

Fig. 3 Relative error values for the CMF200 and CMF 300 meters relative to critical nozzles and turbines

Coriolis CMF300 i CMF400 wyniki testów dla CO₂ 99% - 16 bar 23° C



Rys. 4 Wykres błędów dla miernika CMF300 bez korekcji VoS i CMF400 z korekcją VoS
Fig. 4 Error graph for CMF300 without VoS correction and CMF400 with VoS correction

wane na wodzie. Podczas testów w Fortis BC zastosowano korektę ciśnienia. Ponadto, wbudowana korekcja efektu VoS została aktywowana dla CMF400, podczas gdy CMF300 był testowany bez żadnej korekcji VoS.

Wyniki przedstawione na rys. 4 pokazują, że oba mierniki Coriolisa spełniały wymagania specyfikacji, ale CMF300 miał niewielkie odchylenie dodatnie. Można to przypisać efektowi VoS lub niepewności laboratorium.

„Water transferability”

Przepływomierze Coriolisa bezpośrednio mierzą masę przepływającego płynu. Innymi słowy, miernik mierzy ilość cząsteczek przepływających przez miernik, niezależnie od rodzaju przepływających cząsteczek. Mając na uwadze tę zasadę, działanie przepływomierza Coriolisa na wodzie można przenieść na inne płyny, w przypadku których testy dokładności nie są możliwe do wykonania, ze względu na ograniczenia techniczne, handlowe lub związane z bezpieczeństwem. Żeby to udowodnić, przepływomierze Coriolisa poddano wielu testom, kalibrując je na wodzie, a następnie testując je na innych mediach, takich jak gazy, oleje i węglowodory. Wyniki tych testów dowiodły, że współczynniki kalibracji określone dla wody nie wymagają dalszych modyfikacji dla dokładnego pomiaru szerokiej gamy płynów w fazie ciekłej, gazowej lub nadkrytycznej. Badania takie wykonywano także w laboratoriach w Polsce [2,16,17].

W przytoczonych powyżej testach liczniki Coriolisa zostały wstępnie skalibrowane na wodzie o temperaturze otoczenia 20 °C i ciśnieniu 1 bar. Należy podkreślić, że nie oznacza to, ani nie sugeruje się, że miernik po kalibracji na wodzie jest możliwy do zastosowania bez uwzględniania korekt. Na przykład, jeśli licznik jest przeznaczony do pracy przy wyższym ciśnieniu, należy zastosować korektę ciśnienia, aby „water transferability” był efektywny. Podobnie w przypadku korekty temperatury i VoS. Oczywiście, w niektórych zastosowaniach korekty są niewielkie i wtedy mogą być pomijane, ale tylko w przypadku świadomej wiedzy, że wartości liczbowe korekt są niewielkie.

Podsumowanie

Przepływomierze Coriolisa oferują dokładny i niezawodny pomiar masy w wielu aplikacjach ciekowych i gazowych, między innymi dla pomiaru gazu ziemnego, H₂, CO₂, a także różnych mieszanin gazo-



wych. Przepływomierze te stosowane są w różnych zastosowaniach przemysłowych, w tym rozliczeniowych. Nie należy porównywać wprost mierników Coriolisa z innymi miernikami, gdyż te mierzą strumień masy i gęstość, oraz przez konkretny miernik może przepływać płyn, zarówno w formie cieczy jak i gazu. Nie wymagają one odcinków prostoliniowych przed i za przepływomierzem. Płyn przepływający przez sensor może mieć teoretycznie postać zarówno laminarną jak i turbulentną. Celem potwierdzenia dokładności pomiarowej przepływomierzy Coriolisa wystarczy wykorzystywać stanowiska kalibracyjne pracujące na wodzie, co znacznie obniża koszty weryfikacji wskazań i jest bezpieczniejsze.

Ograniczeniami w stosowaniu przepływomierzy Coriolisa są duże rozmiary rurociągów – powyżej DN400. W tym przypadku należy stosować układy składające się z kilku równoległych mierników. Koszty sprawdzenia mierników powyżej DN400 są znaczne i ograniczona jest ilość miejsc, które mogą wykonać takie kalibracje. Patrząc na problem szacowania niepewności pomiarowych można stwierdzić, że niepewność pomiaru oraz błąd pomiarowy, są znacznie mniejsze przy równoległym umieszczeniu kilku mniejszych mierników zamiast jednego większego.

Patrząc w przyszłość wydaje się, że Coriolisy będą głównymi miernikami służącymi do pomiarów fazy ciekłej i gazowej, także dla wodoru. Przewiduje się, że urządzenia te będą stosowane w pomiarach CO₂ w postaci gazu, cieczy i w postaci nadkrytycznej, w procesach sekwestracji i wszelkich prób wykorzystywania dwutlenku węgla na skalę masową, w tym przy przesyłach rurociągowym [24]. W związku z przewidywanym rosnącym zainteresowaniem transportem rurociągowym CO₂, w ramach prac Komitetu Standardu Technicznego przy Izbie Gospodarczej Gazownictwa, powstał już dokument standaryzacyjny, zawierający wytyczne dotyczące takiego transportu na skalę masową [25].

Wiele osób pochodzi sceptycznie do rozliczeń gazów paliwowych, przy zastosowaniu gazomierzy Coriolisa. Dyrektywa MID, aneks 2 jasno mówi, że jednostką „legalną” jest [kg] lub [m³ rzeczywisty] a przeliczenie na jednostkę bazową [m³ normalny] następuje dopiero w przeliczniku przepływu (tzw. flow-komputerze).

W przypadku rozliczeń paliw gazowych, należy przeprowadzać te przeliczenia w jednostkach energii. W tym celu, jeżeli pośrednią jednostką pomiarową jest masa, to należy zmierzoną masę danego medium przesyłać okresowo do przelicznika. Oprócz zmierzonej masy, konieczne jest także przesłanie danych dotyczących wartości kalorycznych danego medium, czyli ciepła spalania odniesionego do jednostki masy. Dopiero przemnożenie masy i odpowiedniej wartości

kalorycznej daje w złożeniu informację nt. energii zawartej w mierzonym paliwie gazowym [23].

Analogicznie, w przypadku pomiaru pośredniej jednostki pomiarowej w postaci objętości paliwa, a nie jego masy, to do przelicznika należy przesłać dane dotyczące zmierzonej objętości i wartości kalorycznej, w tym przypadku ciepła spalania odniesionego do jednostki objętości. Oprócz tego zawsze do przelicznika muszą być przesyłane skwantowane dane dotyczące temperatury i ciśnienia gazu. Gazomierze (przepływomierze) Coriolisa, tak jak każde inne gazomierze, aby zostały dopuszczone do rozliczeń według dyrektywy MID [12], muszą przejść procedurę certyfikacji zgodnej z OIML 137 [13], podczas której przechodzą szereg testów. Jednym z takich testów, potwierdzającym ich niewątpliwą zaletę pomiarową jest test „water transferability”. Referencyjnym dokumentem potwierdzającym możliwości stosowania gazomierzy Coriolisa jest dokument AGA Report No. 11 [1].

Należy dodać, że do celów rozliczeniowych, zarówno w rozliczeniach energetycznych dla gazów palnych, jak i rozliczeniach masowych, dla takich gazów jak np. CO₂, ważne jest połączenie Coriolisów w pełne systemy pomiarowe włącznie z chromatografami gazowymi z odpowiednimi aplikacjami. Aplikacje te powinny mieć zaimplementowane właściwe dla analityki funkcje nadzoru i stabilizacji, oraz analizatory powinny okresowo być nadzorowane przez referencyjne laboratoria kontrolne. W literaturze krajowej wiele miejsca i czasu poświęcano w przeszłości tym zagadnieniom, np. [15,18,19]. Komplet procedur w tym zakresie jest też bezproblemowo dostępny, chociażby w postaci odpowiednich dokumentów standaryzacyjnych Izby Gospodarczej Gazownictwa [21,22].

Także w przypadku transportu rurociągowego gazów obojętnych, jak CO₂, połączenie systemu kontroli ilości z chromatograficznymi systemami kontroli jakości jest niezbędne [24]. Istotnym czynnikiem, który w znacznym stopniu wpływa w ogóle na możliwość transportu CO₂ i ewentualnie innych gazów inertnych rurociągami jest czystość tych gazów, także pod względem zanieczyszczeń śladowych i choćby z tego powodu systemy kontroli jakości, zarówno paliw gazowych jak i gazów inertnych, są niezbędne. Mówiąc o czystości gazów i ich mieszanin należy też zwracać szczególną uwagę na prężność pary wodnej w tych gazach, poprzez taki parametr jak punkt rosy wody, włącznie z odpowiednimi kryteriami akceptacji lub dezakceptacji danego medium gazowego dla możliwości jego wykorzystania [20]. Poziom zawilgocenia wpływa zarówno na jakość medium pomiarowego, jak i na sam proces pomiaru ilości tego medium.

LITERATURA

- [1] AGA Report No. 11 API MPMS 14.9 *Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter*, Transmission Measurement Comm.
- [2] Bogucki A., K.Cholaś, S.Kowalczyk, G.Rosłonek, A.Urbanowicz, 2018, *Wykorzystanie infrastruktury PGNiG SA Oddział w Odolanowie do weryfikacji wzorca roboczego do przepływomierzy kriogenicznych*, Konferencja FORGAZ, INiG Kraków, 2018.
- [3] Control Magazin January 2022 micro-motion-45th-anniversary.pdf.
- [4] De Jonge T., T.Patten, A.Rivetti, L.Serio, *Development of a Mass Flowmeter based on the Coriolis Acceleration for Liquid, Supercritical and Superfluid Helium*, Report CERN LHC 2002-19.
- [5] Druzhkov A., Y.Alghanmi, M.Brugman, S.Pitti, R.Blankestijn, *Coriolis Flow Technology in H2 and CO2 Measurement: Key Questions and Answers to Make Reliable measurement Happen in Industrial Applications*, Global Flow Measurement Workshop 22-24.10.2024.
- [6] Hemp J., J.Kutin, “Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 17, issue 6, pp. 359-369.
- [7] Liquid Hydrogen and Ultra Cryogenic Solutions Micro Motion ELITE Coriolis Flow Meters, MC-002566 2021.
- [8] Micro Motion Elite High temperature Coriolis Flow Meters – GI-002112 Rev C 11/2019.
- [9] Micro Motion White Paper. The Nature of Hydrogen Gas and the Benefits of Coriolis Fluid Measurement Technology WP-00539 2003.
- [10] Micro Motion™ CNG050 Compressed Natural Gas Flow Meters product Data Sheet PS-00408, Rev G April 2020.
- [11] Micro Motion™ High Pressure Coriolis Flow Meters Product Data Sheet PS-002073, Rev F February 2023.
- [12] MID – DIRECTIVE 2014/32/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 February 2014.
- [13] OIML 137-1&2– International Recommendation Gas meters Part 1: Metrological and technical requirements Part 2: Metrological controls and performance tests Edition 2012 (E) Including Amendment 2014.
- [14] Patten AT, Garnett RB. Method of compensating for mass flow using known density. US 11486752 B2. 2022.
- [15] Rosłonek G.2010. „Nadzór nad procesowymi analizatorami chromatograficznymi”, Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu, 2010.
- [16] Rosłonek G., A.Bogucki, A.Urbanowicz, S.Kowalczyk,2019.” Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych typu Coriolis do pomiarów rozliczeniowych w obszarze LNG małej skali oraz innych cieczy kriogenicznych,” *Nafta-Gaz*, (10) :633-639.
- [17] Rosłonek G. 2024.” Cztery dekady rozwoju i zastosowania przepływomierzy Coriolisa jako urządzeń pomiarowych w gazownictwie. Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych Coriolisa do pomiarów LNG” *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, (1) :2-8.
- [18] Rosłonek G., J.Bojewski, M.Sobczak, 2005. „Nadzór metrologiczny nad laboratoryjnymi chromatografami gazowymi do kontroli jakości gazu ziemnego”, *Analityka*, (3): 27-33.
- [19] Rosłonek G., M.Sobczak, J.Bojewski, 2005. „Metoda poprawy precyzji analiz chromatograficznych gazów ziemnych poprzez kontrolowany sposób wprowadzania próbki na analizator w warunkach "barostatycznych", *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, (4): 7-9.
- [20] Rosłonek G. 2005, „Pomiar temperatury punktów rosy w gazach ziemnych. Część 1. Przegląd metod do pomiaru temperatur punktów rosy wody” *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, (7-8) :15-18.
- [21] ST-IGG-0205:2023 *Ocena jakości gazów ziemnych. Chromatografy gazowe procesowe do analizy składu gazu ziemnego*.
- [22] ST-IGG-0206:2023 *Ocena jakości gazów ziemnych. Chromatografy gazowe laboratoryjne do analizy składu gazu ziemnego*.
- [23] ST-IGG-2701:2018, *Zasady rozliczeń paliw gazowych w jednostkach energii*.
- [24] Włodek T., G.Rosłonek, 2024.” Metody pomiaru strumienia dwutlenku węgla w transporcie rurociągowym” *Gaz Woda i Technika Sanitarna*, 10(98): 2-7.
- [25] WT-IGG-4601:2025, *Zalecenia dotyczące projektowania i eksploatacji rurociągów do transportu dwutlenku węgla*.