

Tomasz Siuda

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

Pomiar zużycia gazu płynnego termicznym przepływomierzem masowym i bębnowym gazomierzem mokrym

Artykuł prezentuje budowę stanowiska z termicznym przepływomierzem masowym oraz problematykę pomiaru zużycia gazu płynnego termicznym przepływomierzem masowym i bębnowym gazomierzem mokrym na przykładzie badań obciążenia cieplnego palników kuchni gazowej. Porównano również budżet niepewności pomiaru zużycia gazu oboma tymi urządzeniami, zwracając uwagę na najistotniejsze elementy wpływające na jakość wyniku.

Słowa kluczowe: budżet niepewności, bębnowy gazomierz mokry, termiczny przepływomierz masowy, pomiar zużycia gazu.

Measuring the consumption of liquid petroleum gas by using thermal mass flow meter and wet gas meter

This paper presents the construction of a work-stand with thermal mass flow meter and problems of measuring the consumption of liquid petroleum gas by using thermal mass flow meter and wet gas meter for testing the heat input of domestic burners. The budget of uncertainty of gas consumption measurement using both of these equipments is compared, paying attention to the most important elements affecting the quality of results.

Key words: budget of uncertainty, wet gas meter, thermal mass flow meter, measurement of gas consumption.

Wstęp

Najczęściej stosowaną metodą pomiaru zużycia gazu przez palniki domowej kuchni gazowej jest technika opierająca się na wykorzystaniu wzorcowanych bębnowych gazomierzy mokrych. Norma [4] zakłada, że pomiar obciążenia cieplnego palnika płyty grzejnej wykonuje się przy działającym palniku w następujących warunkach:

- garnek wypełniony wodą stawia się nad palnikiem odkrytym,
- po osiągnięciu przez urządzenie temperatury otoczenia zapala się palnik i pozwala, aby działał przez 10 minut,
- pomiar rozpoczyna się w końcu dziesiątej minuty i kończy najpóźniej w końcu trzynastej minuty lub przed jej upływem, gdy osiągnięta zostanie największa liczba pełnych obrotów liczydła gazomierza; pomiar powinien

być wykonywany przez co najmniej jeden pełny obrót liczydła gazomierza.

Wobec powyższego czas pomiaru zużycia gazu gazomierzami różniącymi się między sobą objętością gazu potrzebną do wykonania pełnego obrotu liczydła będzie inny. W połączeniu z faktem, że badane palniki kuchni gazowej nagrzewają się, powodując zasklepianie dyszy i znaczny spadek zużycia gazu przez urządzenie w funkcji czasu jego pracy (efekt ten jest szczególnie widoczny dla palników zasilanych gazem płynnym, gdyż średnice stosowanych dysz są tam najmniejsze), uzyskuje się wyniki zależne od stosowanego gazomierza. Ponadto użytkowany w laboratorium bębnowy gazomierz mokry przy przepływie rzędu 30 dm³/h nie wykonuje pełnego obrotu liczydła w założonym przez normę

czasie. Wady takiej nie posiada termiczny przepływomierz masowy, który podaje wartość chwilowego strumienia zużycia gazu, a sam wynik pomiaru po sprzęgnięciu przepływomierza masowego z komputerem może być w dowolny sposób obrabiany. Z tego powodu zdecydowano się do badań obciążeń cieplnych palników kuchni gazowych zasilanych gazem

płynnym zaprojektować i wykonać stanowisko z termicznym przepływomierzem masowym, zapewniające możliwość pomiaru zużycia gazu płynnego w zakresie $30 \div 110 \text{ dm}^3/\text{h}$. Przedział ten odpowiada najczęściej stosowanym obciążeniom cieplnym palników w domowych kuchniach gazowych zasilanych tym paliwem.

Pomiar przepływu gazomierzem mokrym i przepływomierzem masowym

Zasada pomiaru przepływu gazomierzem mokrym polega na odmierzeniu i zliczaniu równych objętościowo porcji gazu. Liczba tych porcji jest rejestrowana przez specjalny mechanizm liczący. W trakcie przepływu przez gazomierz mokry gaz nasycy się wilgocią. Stąd ilość suchego gazu, która przepłynęła przez gazomierz, oblicza się według równania (1) [6]:

$$V_c = k \cdot V_{mes} \cdot \frac{p_a + p - p_s}{1013,25} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_g} \quad (1)$$

gdzie:

V_c – objętość suchego gazu przeliczona do warunków normalnych (0°C ; $101,325 \text{ kPa}$) [m^3],

V_{mes} – objętość gazu zmierzona w warunkach pomiaru [m^3],

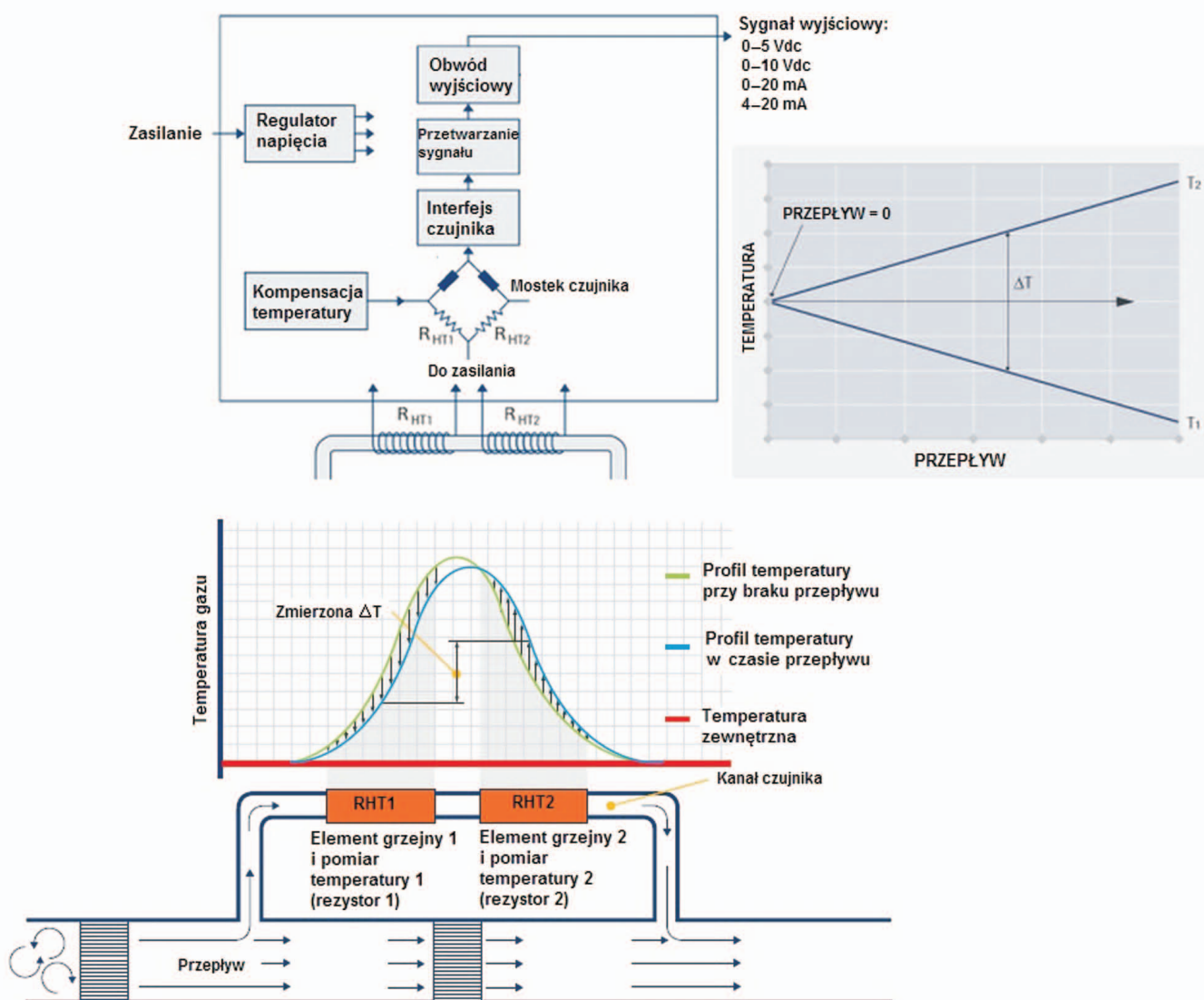
p_a – ciśnienie atmosferyczne [mbar],

p – ciśnienie zasilania gazem w punkcie pomiaru [mbar],

p_s – ciśnienie cząstkowe pary wodnej [mbar] w temperaturze t_g ,

t_g – temperatura gazu w punkcie pomiaru [$^\circ\text{C}$],

k – poprawka gazomierza [-].



Rys. 1. Schemat działania zastosowanego przepływomierza masowego firmy Bronkhorst [7]

Uzyskaną wartość objętości gazu powyższe równanie sprowadza do warunków normalnych, tj. do temperatury 0°C i ciśnienia 101,325 kPa.

Z kolei zasada pomiaru przepływu zastosowanym termicznym przepływomierzem masowym firmy Bronkhorst polega na pomiarze różnicy temperatur na elementach grzejnych R_{HT1} i R_{HT2} , która to różnica jest wprost proporcjonalna do przepływu masowego gazu przez czujnik (rysunek 1). Konstrukcja urządzenia sprawia, że warunki przepływu w kapilarze (czujniku) i w głównym kanale są porównywalne, co pozwala na założony z góry proporcjonalny podział strumienia. W momencie, gdy przez czujnik nie przepływa gaz, w kanale ustala się stan równowagi termicznej i temperatury, a tym samym oporności rezystorów R_{HT1} i R_{HT2} są takie same. Gdy przez kanał czujnika płynie gaz, temperatura rezystora 1 obniża się w stosunku do temperatury równowagi, zaś temperatura na rezystorze 2 wzrasta w stosunku do temperatury równowagi. Czujniki temperatury R_{HT1} i R_{HT2} włączone są jako ramiona mostka, którego napięcie, zależne od temperatur T_1 i T_2 , staje się funkcją przepływu masowego gazu przez urządzenie.

Wzorcowanie przyrządu producent dokonuje zazwyczaj z wykorzystaniem powietrza lub azotu. Wyniki wzorcowania (tablica 1) po zastosowaniu współczynnika konwersji pozwalają określać przepływ dla innych gazów niż powietrze.

Współczynnik konwersji C określa się według równania (2) [3]:

$$C = \frac{c_{p1} \cdot \rho_{n1}}{c_{p2} \cdot \rho_{n2}} \quad (2)$$

gdzie:

c_p – ciepło właściwe gazu pod stałym ciśnieniem [J/(kg · K)],

ρ_n – gęstość gazu w warunkach normalnych [kg/m³],

indeks (1) – gaz użyty do wzorcowania,

indeks (2) – gaz, którego przepływ chcemy zmierzyć.

Producent zaleca, aby wartość c_p użyta do obliczeń współczynnika konwersji była podana dla temperatury o ok. 50°C wyższej niż temperatura gazu wchodzącego na przepływomierz.

W przypadku zastosowanego termicznego przepływomierza masowego producent przeliczył, wykorzystując współczynnik konwersji, charakterystykę napięciową przyrządu z powietrza na czysty butan (tablica 1), zakładając, że jego przepływ będzie się odbywać przy nadciśnieniu 100 mbar i temperaturze gazu 20°C. Chcąc obliczyć przepływ czystego propanu w warunkach pomiaru, można skorzystać z równania (3):

$$p_{cz.p.} = p_{cz.b.} \cdot C_{cz.p.} \quad (3)$$

gdzie:

$p_{cz.p.}$ – przepływ czystego propanu w warunkach pomiaru,

$p_{cz.b.}$ – wartość przepływu liczona dla czystego butanu w warunkach: 20°C i 100 mbar (g), skalowanie: napięcie 0÷10 V odpowiada przepływowi czystego butanu 0÷90 dm³/h (warunki normalne),

$C_{cz.p.}$ – współczynnik konwersji dla czystego propanu względem czystego butanu w warunkach pomiaru: $x^\circ\text{C}$ i y mbar (g).

Tablica 1. Wyniki wzorcowania zastosowanego przepływomierza masowego

	Użytkownik		Kalibracja
Gaz	butan C ₄ H ₁₀	Gaz	powietrze
Ciśnienie	100 mbar (g)	Ciśnienie	0,0 bar (g)
Temperatura	20°C	Temperatura	24,9°C
Przepływ ^a	1,5 l/min	Temperatura w pomieszczeniu	24,9°C
Zakres	0÷100%	Ciśnienie atmosferyczne	1006 hPa
Sygnal wyjściowy	Przepływ ^b		
0%	0,0000 l/min		
25%	0,3742 l/min		
50%	0,7515 l/min		
75%	1,1250 l/min		
100%	1,5000 l/min		

^a Przepływ wyrażony w warunkach normalnych: 0°C, 1013,25 hPa (a)

^b Przepływ uzyskany na powietrzu jest przeliczany na przepływ użytkownika przy pomocy oprogramowania Bronkhorst High-Tech FLUIDAT

indeks (a) – ciśnienie absolutne

indeks (g) – nadciśnienie

W praktyce propan dostarczany w butlach może zawierać w swoim składzie również cięższe węglowodory. Stąd utworzona nakładka na program GeniDAQ oblicza przepływ gazu płynnego w warunkach pomiaru według równania (4):

$$p_{w.p.} = p_{cz.b.} \cdot C_{g.p.} \quad (4)$$

gdzie:

$p_{w.p.}$ – przepływ gazu płynnego w warunkach pomiaru,

$p_{cz.b.}$ – wartość przepływu liczona dla czystego butanu w warunkach: 20°C i 100 mbar (g), skalowanie: napięcie 0÷10 V odpowiada przepływowi czystego butanu 0÷90 dm³/h (warunki normalne),

$C_{g.p.}$ – współczynnik konwersji dla gazu płynnego względem czystego butanu w warunkach pomiaru: x°C i y mbar (g).

Należy zauważyć, że ciepło właściwe gazu pod stałym ciśnieniem c_p jest funkcją temperatury i ciśnienia gazu. Po założeniu konta i zalogowaniu się na stronie www.fluidat.com każdy może uzyskać dostęp do darmowego programu FLUIDAT

firmy Bronkhorst, zawierającego dane nt. fizycznych właściwości ponad stu gazów. Za pomocą tego oprogramowania wygenerowano dane dotyczące lotnego propanu, m.in. ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu gazu w zależności od temperatury (tablica 2) oraz gęstość tego gazu w warunkach normalnych. Wartości te wraz z danymi dla innych składników (tj. etanu, i-butanu, n-butanu, 1-butenu, trans-2-butenu, cis-2-butenu) charakterystycznych dla gazu płynnego po zaimplementowaniu w programie GeniDAQ posłużyły do automatycznego obliczania współczynnika konwersji w zależności od składu gazu płynnego, który użytkownik może sam wprowadzić, oraz w zależności od temperatury i ciśnienia gazu w stosowanym termicznym przepływomierzu masowym.

W tablicy 2 przedstawiono wielkości ciepła właściwego pod stałym ciśnieniem c_p dla czystego propanu w zakresie nadciśnienia 0÷1 bar oraz temperatury 65÷85°C wygenerowane za pośrednictwem strony www.fluidat.com. Założono, że nadciśnienie gazu ustawiane na przepływomierzu masowym będzie nie większe niż 1 bar.

Tablica 2. Ciepło właściwe c_p [J/(kg·K)] pod stałym ciśnieniem dla propanu [8]

	65°C	66°C	67°C	68°C	69°C	70°C	71°C	72°C	73°C	74°C	75°C	76°C	77°C	78°C	79°C	80°C
0 bar (g)	1883	1888	1892	1897	1901	1906	1911	1915	1920	1924	1929	1933	1938	1943	1947	1952
0,1 bar (g)	1885	1889	1894	1898	1903	1908	1912	1917	1921	1926	1930	1935	1939	1944	1948	1953
0,2 bar (g)	1886	1891	1895	1900	1904	1909	1913	1918	1923	1927	1932	1936	1941	1945	1950	1954
0,3 bar (g)	1888	1892	1897	1901	1906	1910	1915	1919	1924	1929	1933	1938	1942	1947	1951	1956
0,4 bar (g)	1889	1894	1898	1903	1907	1912	1916	1921	1925	1930	1934	1939	1943	1948	1953	1957
0,5 bar (g)	1891	1895	1900	1904	1909	1913	1918	1922	1927	1931	1936	1940	1945	1949	1954	1958
0,6 bar (g)	1892	1897	1901	1906	1910	1915	1919	1924	1928	1933	1937	1942	1946	1951	1955	1960
0,7 bar (g)	1894	1898	1903	1907	1912	1916	1921	1925	1930	1934	1939	1943	1947	1952	1956	1961
0,8 bar (g)	1895	1900	1904	1909	1913	1918	1922	1927	1931	1935	1940	1944	1949	1953	1958	1962
0,9 bar (g)	1897	1901	1906	1910	1915	1919	1924	1928	1932	1937	1941	1946	1950	1955	1959	1963
1 bar (g)	1898	1903	1907	1912	1916	1921	1925	1929	1934	1938	1943	1947	1952	1956	1960	1965

Budowa stanowiska do pomiaru zużycia gazu płynnego za pomocą termicznego przepływomierza masowego

Stanowisko do pomiaru zużycia gazu płynnego zawiera:

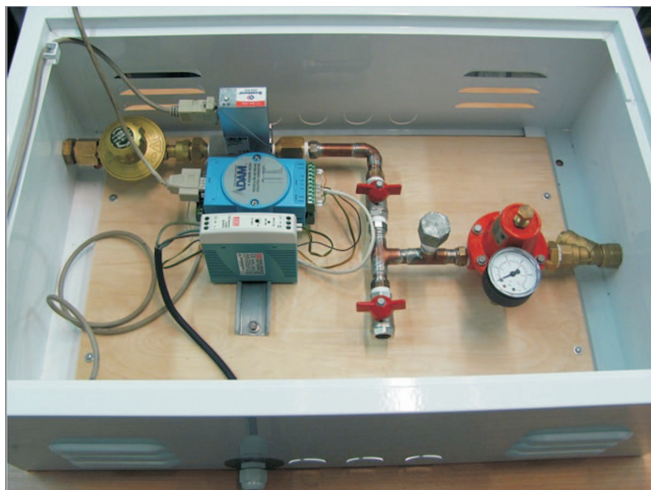
- przetwornik sygnałów analogowych na cyfrowe ADAM 4017;
- przepływomierz masowy firmy Bronkhorst przeznaczony do pomiaru ilości przepływającego gazu płynnego, przepływ czystego butanu w zakresie 0÷90 dm³/h;
- przetwornik protokołu komunikacyjnego RS 485 na protokół RS 232 (ADAM 4520) do komunikacji z komputerem.

Oprócz tego integralną częścią stanowiska są:

- zestaw komputerowy, na którym zainstalowano program GeniDAQ oraz stworzoną nakładkę na ten program do obsługi pomiaru zużycia gazu płynnego;

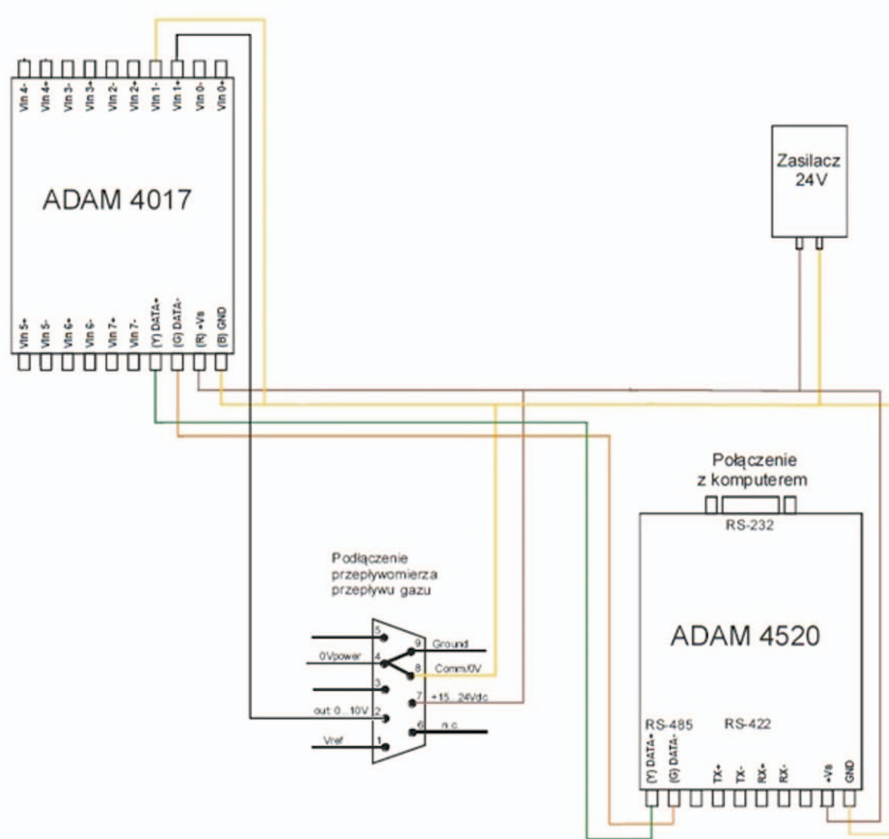
- dwa reduktory ciśnienia gazu.

Wykonane stanowisko zostało przedstawione na rysunku 2. Urządzenie pomiarowe oraz moduły zostały zabudowane w szafce metalowej z dwoma króćcami. Króciec wejściowy umożliwia podłączenie urządzenia do instalacji z gazem płynnym bądź bezpośrednio do butli z gazem płynnym. Króciec wyjściowy służy podłączeniu urządzenia gazowego. Do budowy programu obsługującego pomiar zużycia gazu wykorzystano aplikację ADVANTECH GeniDAQ. Jest to elastyczne środowisko programistyczne umożliwiające tworzenie wirtualnych aplikacji pomiarowych i sterujących [1].



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru zużycia gazu płynnego

Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat połączeń elektrycznych układu pomiarowego

Zgodnie z powyższym schematem połączeń elektrycznych sygnał analogowy z przepływomierza poprzez przetwornik sygnałów analogowych na cyfrowe ADAM 4017 oraz przetwornik protokołu komunikacyjnego RS 485 na protokół RS 232 do komunikacji z komputerem (przez wejście COM2) – ADAM 4520 – podawany jest do komputera na stworzoną nakładkę programu GENIE.

Na rysunku 4 przedstawiono główne okno dialogowe programu, które stworzono przy wykorzystaniu dostępnych obiektów oraz skryptów pisanych w języku Visual Basic.

Na utworzonym panelu głównym (rysunek 4) można wyróżnić trzy obszary:

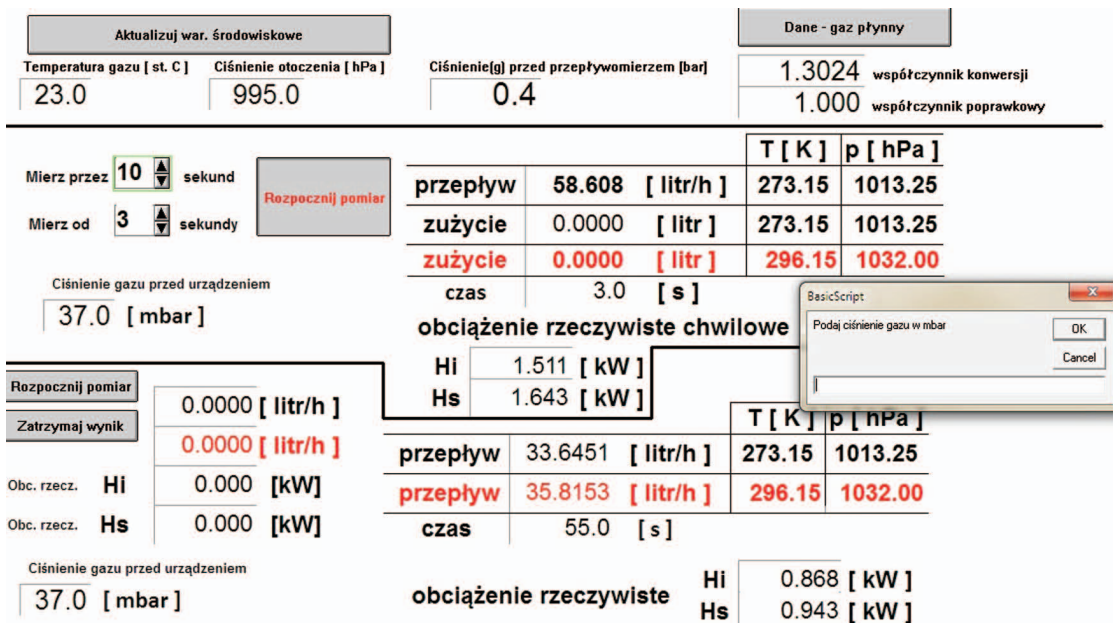
- Obszar 1: w momencie startu utworzona aplikacja uruchamia sekwencję okien, do których należy wpisać odpowiednio wartości: temperatury gazu, ciśnienia otoczenia, ciśnienia gazu w przepływomierzu. Wartości te mogą być modyfikowane w trakcie pomiarów po naciśnięciu przycisku „Aktualizuj warunki środowiskowe”. Temperatura gazu oraz jego ciśnienie w przepływomierzu są niezbędne do określenia prawidłowej wartości współczynnika konwersji, którego wartość jest zależna od rodzaju gazu oraz od podanych wyżej wielkości.

- Obszar 2: podaje wartość chwilowego rzeczywistego obciążenia cieplnego palników domowej kuchni gazowej. Ponadto po naciśnięciu przycisku „Rozpocznij pomiar” pojawia się okno, w które należy wpisać ciśnienie gazu przed urządzeniem pomiarowym w [mbar]. Od tego momentu aplikacja liczy czas i zgodnie z wartościami czasu wprowadzonymi do pola „Mierz przez” oraz „Mierz od” zlicza zużycie gazu, wyrażając je w litrach w warunkach normalnych oraz w litrach przeliczonych do warunków roboczych.

- Obszar 3: podaje wartości obciążenia rzeczywistego palników kuchni gazowej oraz wartości strumienia przepływu gazu liczone jako średnia od momentu naciśnięcia przycisku „Rozpocznij pomiar”. Aplikacja prosi również o podanie wartości ciśnienia gazu przed urządzeniem. Wartość przepływu jest wyrażona dla warunków normalnych i roboczych. Określenie przepływu w warunkach roboczych służy obliczeniu obciążenia skorygowanego palników. Po naciśnięciu przycisku „Zatrzymaj

wynik” wartości z tabeli dotyczące przepływu i obciążenia są przenoszone do odpowiadających im pól po lewej stronie obszaru (rysunek 4).

Po naciśnięciu przycisku „Dane – gaz płynny” uzyskujemy dostęp do panelu (rysunek 5), w którym można podać skład gazu płynnego stosowanego w badaniach. Na podstawie składu gazu oraz jego ciśnienia i temperatury



Rys. 4. Widok okna programu – panel główny

w przepływomierzu jest określana wartość ciepła właściwego mieszaniny, a w dalszej kolejności wartość współczynnika konwersji, który pozwala we właściwy sposób określić zużycie gazu przez palniki kuchni gazowej.

Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy warstwy TASK.

Ciepło właściwe mieszaniny w temperaturze 23.0 [st. C] pod ciśnieniem [g] 0.5 [bar]

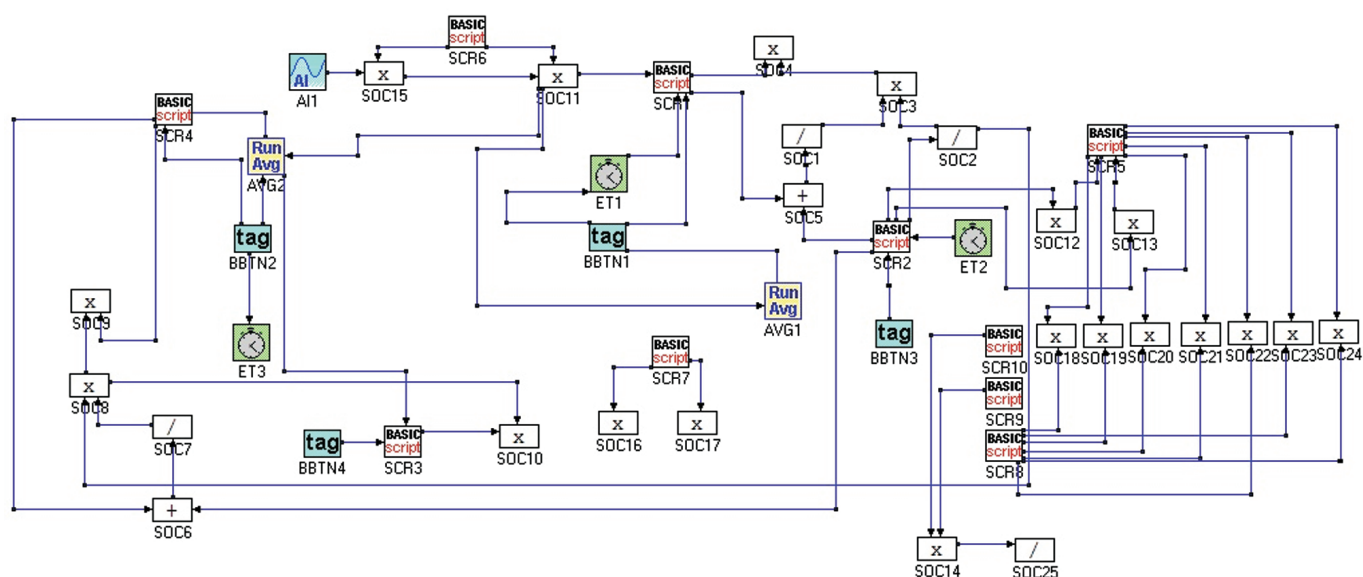
1925.96 [J/(kgK)]

Gęstość normalna mieszaniny 2.066 [kg/m³]

POWRÓT

	Skład gazu % obj.	Skład gazu % mas.	Ciepło właściwe [J/(kgK)]	Gęstość normalna [kg/m ³]
propan	89.6866	87.468	1927	2.012
i-butan	5.1855	6.666	1933	2.693
n-butan	2.9379	3.777	1935	2.705
1-buten	0.3595	0.446	1755	2.581
trans-2-buten	0.7405	0.919	1781	2.503
cis-2-buten	0.0000	0.000	1643	2.503
etan	1.0899	0.725	1977	1.355
SUMA	100.000			

Rys. 5. Widok okna programu – panel „Dane – gaz płynny”



Rys. 6. Schemat blokowy warstwy TASK

Szacowanie niepewności pomiaru zużycia gazu bębnowym gazomierzem mokrym i termicznym przepływomierzem masowym

Szacowanie niepewności pomiaru jest istotne ze względu na uzyskanie oceny wszystkich czynników mających wpływ na końcowy wynik pomiaru [2]. Wyróżniamy następujące typy szacowania niepewności:

- typ A – ocena poprzez statystyczną analizę wyników serii badań;
- typ B – ocena za pomocą innych dostępnych informacji:
 - wcześniejszych wyników badań,
 - doświadczenia i znajomości metody,
 - danych od producenta aparatury badawczej,
 - danych z wzorcowania lub z certyfikatów,
 - wartości referencyjnych z literatury.

Na procedurę określenia niepewności pomiaru składają się następujące czynności:

- określenie równania pomiaru;
- obliczenie niepewności standardowych na podstawie podanych dokładności przyrządów pomiarowych;
- obliczenie niepewności złożonej.

Do szacowania niepewności pomiaru zużycia gazu za pomocą bębnowego gazomierza mokrego i termicznego przepływomierza masowego zastosowano typ B szacowania niepewności.

Dla bębnowego gazomierza mokrego równanie pomiaru można określić wzorem (5):

$$\dot{V}_c = k \cdot 3600 \cdot \frac{V_{mes}}{t} \cdot \frac{p_a + p - p_s}{1013,25} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_g} \quad (5)$$

gdzie:

\dot{V}_c – strumień objętości zużywanego gazu [dm³/h],

V_{mes} – objętość gazu zmierzona w warunkach pomiaru [dm³],

p_a – ciśnienie atmosferyczne [mbar],

p – ciśnienie zasilania gazem w punkcie pomiaru [mbar],

p_s – ciśnienie cząstkowe pary wodnej [mbar] w temperaturze t_g ,

t_g – temperatura gazu w punkcie pomiaru [°C],

t – czas pomiaru [s],

k – poprawka gazomierza [-].

Uzyskaną wartość strumienia gazu powyższe równanie sprowadza do warunków normalnych gazu, tj. do temperatury 0°C i ciśnienia 101,325 kPa.

Dla tego pomiaru źródłem niepewności są niepewności wskazań aparatury użytej w trakcie pomiaru:

- barometru – pomiar ciśnienia otoczenia, przyjęto dokładność ±1 mbar;
- manometru cieczowego – pomiar ciśnienia gazu w gazomierzu, przyjęto dokładność ±0,1 mbar;

- termometru – pomiar temperatury gazu w gazomierzu, przyjęto dokładność ±0,5°C i niepewność wzorcowania 0,2°C;

- stopera – pomiar czasu, przyjęto dokładność 0,4 s. oraz dokładność wskazań samego gazomierza, która wynika m.in. z klasy przyrządu i jego rozdzielczości. Elementarna działka gazomierza to 0,02 dm³. W dolnym zakresie pomiarowym świadectwo wzorcowania zastosowanego gazomierza podaje względną niepewność rozszerzoną na poziomie 1,98÷5,72% (tablica 3).

W przypadku pomiaru zużycia gazu przepływomierzem masowym źródłem niepewności jest sam przyrząd oraz współczynnik konwersji. W tablicy 4 przedstawiono specyfikację techniczną zastosowanego przepływomierza.

Zgodnie ze specyfikacją dokładność urządzenia jest równa ±1% zakresu, zaś powtarzalność wskazań przyrządu mieści się w 0,2% wartości mierzonej (niepewność standardową pomiaru obliczono jako pierwiastek z sumy kwadratów wielkości związanej z dokładnością – przyjęto rozkład prostokątny – i wielkości związanej z powtarzalnością).

Gdy gaz zawiera wiele składników, musimy dokładnie poznać jego skład, a niepewność oznaczania składu gazu przenosi się na niepewność jego gęstości normalnej i ciepła właściwego, a te z kolei – na niepewność współczynnika konwersji i całego pomiaru. W tablicy 5 przedstawiono wyniki chromatograficznej analizy składu gazu uzyskane z laboratorium akredytowanego dla stosowanego w pomiarach gazu płynnego, przeliczone na sześć głównych jego składników, wraz z oszacowaną przez laboratorium bezwzględną niepewnością rozszerzoną.

Tablica 3. Wyniki wzorcowania zastosowanego gazomierza mokrego

Strumień objętości q_p [dm ³ /h]	Wartość poprawna V_p [dm ³]	Wskazanie wzorcowanego przyrządu V_s [dm ³]	Błąd względny wskazania e [%]	Niepewność pomiaru U [%]
675,14	50,10	50,16	0,12	0,80
375,42	50,13	50,32	0,38	0,80
224,50	25,05	25,23	0,72	0,80
75,74	25,06	25,21	0,60	1,98
22,76	10,06	10,09	0,30	5,72

Tablica 4. Specyfikacja techniczna zastosowanego przepływomierza masowego

Dokładność z uwzględnieniem liniowości	±1% zakresu
Powtarzalność	< 0,2% wartości mierzonej

Tablica 5. Skład gazu płynnego i bezwzględna niepewność rozszerzona oznaczania zawartości węglowodorów w badanym gazie płynnym

Nr składnika	Przeliczenie na 6 składników	Zawartość [%] obj.	Bezwzględna niepewność rozszerzona zawartości składnika w gazie U_i [%] ($k = 2$)
1	etan	1,09	0,06
2	propan	89,70	4,40
3	i-butan	5,19	0,27
4	n-butan	2,94	0,24
5	1-buten	0,36	0,10
6	trans-2-buten	0,74	0,39

W przypadku tego gazu płynnego odrzucono następujące składniki: tlen, azot (zanieczyszczenia powstałe przy pobieraniu próbki) oraz metan, iso-buten, iso-pentan, n-pentan i CO₂ (niewielki udział w stosunku do pozostałych składników). Przeliczenia dokonano na zasadzie proporcjonalnego zwiększenia ilości każdego wybranego składnika tak, że całość sumuje się do 100%, według wzoru (6):

$$\%x_i = \frac{\%_i \cdot 100}{100 - \Sigma\%} \quad (6)$$

gdzie:

$\%x_i$ – procent zawartości i -tego składnika po odrzuceniu wybranych składników [%],

$\%_i$ – procent zawartości i -tego składnika przed odrzuceniem wybranych składników [%],

$\Sigma\%$ – procent zawartości odrzuconych składników [%].

Dla bębnowego gazomierza mokrego bezwzględną standardową niepewność złożoną pomiaru strumienia zużywanego gazu przez badane urządzenie gazowe (palniki kuchni gazowej) obliczano z równania (7):

$$u_c(\dot{V}_c) = \sqrt{\left[\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial V_{mes}} \cdot u(V_{mes}) \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial t_g} \cdot u(t_g) \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial p_a} \cdot u(p_a) \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial p} \cdot u(p) \right]^2 + \left[\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial t} \cdot u(t) \right]^2} \quad (7)$$

gdzie:

$u_c(\dot{V}_c)$ – bezwzględna standardowa niepewność złożona pomiaru strumienia zużywanego gazu bębnowym gazomierzem mokrym,

$\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial V_{mes}}$ – pochodna cząstkowa z równania (5) po objętości gazu V_{mes} ,

$\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial t_g}$ – pochodna cząstkowa z równania (5) po temperaturze gazu t_g ,

$\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial p_a}$ – pochodna cząstkowa z równania (5) po ciśnieniu otoczenia p_a ,

$\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial p}$ – pochodna cząstkowa z równania (5) po ciśnieniu gazu p ,

$\frac{\partial \dot{V}_c}{\partial t}$ – pochodna cząstkowa z równania (5) po czasie pomiaru t ,

$u(V_{mes})$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru objętości zużytego gazu V_{mes} ,

$u(t_g)$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru temperatury gazu t_g ,

$u(p_a)$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru ciśnienia otoczenia p_a ,

$u(p)$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru ciśnienia gazu p ,

$u(t)$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru czasu t .

Niepewność standardową pomiaru objętości gazu określono jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności standardowej związanej z wzorcowaniem gazomierza i niepewności standardowej związanej z rozdzielczością gazomierza (przyjęto rozkład prostokątny).

Niepewność standardową pomiaru temperatury gazu określono jako pierwiastek z sumy kwadratów niepewności standardowej wzorcowania termometru i niepewności standardowej związanej z jego dokładnością (przyjęto rozkład prostokątny). Dla barometru i manometru określono standardową niepewność pomiaru na podstawie ich dokładności, przyjmując do obliczenia niepewności standardowej rozkład prostokątny.

Tablica 6. Przykładowe dane do budżetu niepewności

Wielkość	Wartość	Jednostka
V_{mes}	8,0	dm ³
t_g	22,0	°C
p_a	993	mbar
p	37,0	mbar
t	300,0	s
p_s	26,2	mbar
k	0,993	–
\dot{V}_c	87,4	dm ³ /h

Tablica 7. Budżet niepewności pomiaru strumienia objętości zużytego gazu bębnowym gazomierzem mokrym (zużycie gazu odniesione do warunków normalnych)

Wielkość	Symbol	Aparatura	Sposób szacowania niepewności	Rozkład prawdopodobieństwa	Bezwzględna niepewność standardowa		Współczynnik wrażliwości	Składowe bezwzględnej niepewności standardowej złożonej		Bezwzględna niepewność standardowa złożona $u_c(\dot{V}_c)$	Bezwzględna niepewność rozszerzona złożona $U_c(\dot{V}_c)$
					dm ³	°C		dm ³ /h	dm ³ /h		
Objętość gazu	V_{mes}	bębnowy gazomierz mokry	świadectwa wzorcowania	normalny	0,080	dm ³	10,928	0,8700	±0,88	±1,8	dm ³ /h
Temperatura gazu	t_g	termometr	1. świadectwa wzorcowania 2. dokładność	1. normalny 2. prostokątny	0,300	°C	-0,293	-0,0890	±0,88	±1,8	dm ³ /h
Ciśnienie otoczenia	p_a	barometr	dokładność	prostokątny	0,580	mbar	0,087	0,0500	±0,88	±1,8	dm ³ /h
Ciśnienie gazu w gazomierzu	p	manometr	dokładność	prostokątny	0,058	mbar	0,094	0,0054	±0,88	±1,8	dm ³ /h
Czas pomiaru	t	stoper	inne	prostokątny	0,230	s	-0,291	-0,0670	±0,88	±1,8	dm ³ /h

W tablicy 7 przedstawiono budżet niepewności pomiaru strumienia objętości suchego gazu za pomocą bębnowego gazomierza mokrego na podstawie przykładowych danych z tablicy 6.

Jak widać, największy udział w niepewności złożonej przy takim zużyciu gazu i czasie pomiaru ma niepewność samego gazomierza i jego wzorcowania.

W przypadku zastosowanego termicznego przepływomierza masowego producent podał charakterystykę napięciową dla czystego butanu. Utworzona nakładka na program Geni-DAQ oblicza przepływ gazu płynnego według równania (4). Stąd bezwzględną standardową niepewność złożoną pomiaru strumienia zużywanego gazu termicznym przepływomierzem masowym można obliczyć według równania (8):

$$u_c(p_{w.p.}) = \sqrt{\left[\frac{\partial p_{w.p.}}{\partial p_{cz.b.}} \cdot u(p_{cz.b.}) \right]^2 + \left[\frac{\partial p_{w.p.}}{\partial C_{g.p.}} \cdot u(C_{g.p.}) \right]^2} \quad (8)$$

gdzie:

$u_c(p_{w.p.})$ – bezwzględna standardowa niepewność złożona pomiaru strumienia zużywanego gazu termicznym przepływomierzem masowym,

$\frac{\partial p_{w.p.}}{\partial p_{cz.b.}}$ – pochodna cząstkowa z równania (4) po przepływie czystego butanu,

$\frac{\partial p_{w.p.}}{\partial C_{g.p.}}$ – pochodna cząstkowa z równania (4) po współczynniku konwersji,

$u(p_{cz.b.})$ – bezwzględna niepewność standardowa pomiaru strumienia czystego butanu,

$u(C_{g.p.})$ – bezwzględna niepewność standardowa współczynnika konwersji.

Dla tego pomiaru stworzony program oblicza współczynnik konwersji $C_{g.p.}$ według wzoru (9):

$$C_{g.p.} = \frac{c_{p_{cz.b.}} \cdot \rho_{n_{cz.b.}}}{c_{p_{g.p.}} \cdot \rho_{n_{g.p.}}} \quad (9)$$

gdzie:

$c_{p_{cz.b.}}$ – ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem dla czystego butanu w temperaturze 20°C i pod ciśnieniem 100 mbar (g) [J/(kg·K)],

$\rho_{n_{cz.b.}}$ – gęstość czystego butanu w warunkach normalnych [kg/m³],

$c_{p_{g.p.}}$ – ciepło właściwe pod stałym ciśnieniem dla gazu płynnego w warunkach: $x^\circ\text{C}$ i y mbar (g),

$\rho_{n_{g.p.}}$ – gęstość gazu płynnego w warunkach normalnych [kg/m³].

Czynnik $c_{p_{cz.b.}} \cdot \rho_{n_{cz.b.}}$ to wielkość stała, która wynosi 5177,37 J/(m³·K), stąd równanie (9) można przedstawić za pomocą wzoru (10):

$$C_{g.p.} = \frac{5177,37}{c_{p_{g.p.}} \cdot \rho_{n_{g.p.}}} \quad (10)$$

a bezwzględną standardową niepewność złożoną współczynnika konwersji $C_{g.p.}$ można obliczyć według wzoru (11):

$$u_c(C_{g.p.}) = \sqrt{\left[\frac{\partial C_{g.p.}}{\partial c_{p_{g.p.}}} \cdot u(c_{p_{g.p.}}) \right]^2 + \left[\frac{\partial C_{g.p.}}{\partial \rho_{n_{g.p.}}} \cdot u(\rho_{n_{g.p.}}) \right]^2} \quad (11)$$

gdzie:

$u(C_{g.p.})$ – bezwzględna złożona niepewność standardowa współczynnika konwersji $C_{g.p.}$,

$\frac{\partial C_{g.p.}}{\partial c_{p_{g.p.}}}$ – pochodna cząstkowa z równania (10) po ciepłe właściwym pod stałym ciśnieniem gazu płynnego $c_{p_{g.p.}}$,

$\frac{\partial C_{g.p.}}{\partial \rho_{n_{g.p.}}}$ – pochodna cząstkowa z równania (10) po gęstości w warunkach normalnych gazu płynnego $\rho_{n_{g.p.}}$,

$u(c_{p_{g.p.}})$ – bezwzględna niepewność standardowa ciepła właściwego pod stałym ciśnieniem dla gazu płynnego,

$u(\rho_{n_{g.p.}})$ – bezwzględna niepewność standardowa gęstości gazu płynnego w warunkach normalnych.

Jak wcześniej wspomniano, w przypadku pomiaru zużycia gazu przepływomierzem masowym źródłem niepewności standardowej pomiaru jest sam przyrząd (niepewność standardowa wynikająca z dokładności przyrządu i powtarzalności jego wskazań) oraz współczynnik konwersji. Gdy stosowany gaz płynny ma w swoim składzie nie tylko czysty propan, niepewność współczynnika konwersji zawierać będzie w sobie niepewności oznaczania składników gazu. W normie [5] zamieszczono wzory do określania niepewności oznaczania wartości kalorycznej gazu ziemnego oraz jego gęstości na podstawie składu gazu. Przez analogię wzory te zastosowano do gazu płynnego w celu wyznaczenia bezwzględnej niepewności standardowej gęstości normalnej i ciepła właściwego pod stałym ciśnieniem. Stąd bezwzględną niepewność standardową oznaczania gęstości normalnej na podstawie składu gazu można obliczyć (tablica 8) według równania (12):

$$u(Q_{mix}) = \left[\sum_{i=1}^n \{u(i) \cdot (Q_i - Q_{mix})\}^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

gdzie:

$u(Q_{mix})$ – bezwzględna niepewność standardowa oznaczania gęstości gazu na podstawie jego składu [kg/m³],

$u(i)$ – bezwzględna niepewność standardowa zawartości i -tego składnika w gazie,

Q_i – gęstość i -tego składnika [kg/m³],

Q_{mix} – gęstość gazu wyliczona na podstawie składu gazu [kg/m³],

zaś bezwzględną niepewność standardową ciepła właściwego (tablica 9) według równania (13) [5]:

$$u(cp_{mix}) = \left[\sum_{i=1}^n \{u(i) \cdot (cp_i - cp_{mix})\}^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

gdzie:

$u(cp_{mix})$ – bezwzględna niepewność standardowa oznaczania ciepła właściwego gazu na podstawie jego składu [J/(kg·K)],

$u(i)$ – bezwzględna niepewność standardowa zawartości i -tego składnika w gazie,

cp_i – ciepło właściwe i -tego składnika [J/(kg·K)],

cp_{mix} – ciepło właściwe wyliczone na podstawie składu gazu [J/(kg·K)].

W tablicy 10 przedstawiono budżet niepewności współczynnika konwersji $C_{g.p.}$ gazu płynnego, zaś w tablicy 11 budżet niepewności pomiaru strumienia zużycia gazu płynnego termicznym przepływomierzem masowym dla przykładowej wartości sygnału równej 50% (5 V).

Budżet niepewności pomiaru zużycia gazu płynnego za pomocą zastosowanego przepływomierza masowego wskazuje, że największą niepewność pomiarową wnosi sam przyrząd, zaś wkład niepewności związanej z ciepłem właściwym i gęstością gazu jest mniejszy.

W celu określenia niepewności rozszerzonej współczynnika konwersji (wpływ temperatury i ciśnienia gazu na ciepło właściwe gazu) związanej z dokładnością pomiaru temperatury oraz ciśnienia gazu na przepływomierzu posłużono się oprogramowaniem dostępnym na stronie www.fluidat.com, wprowadzając składniki gazu płynnego. Zastosowany manometr mierzący nadciśnienie gazu przed przepływomierzem podaje jego wartość z dokładnością do 50 mbar. Stąd niepewność standardowa pomiaru ciśnienia tym manometrem wynosi 28,9 mbar, zaś rozszerzona 57,8 mbar. Takie wartości rzutują na względną zmianę współczynnika konwersji o $\pm 0,05\%$. Pomiar temperatury gazu jest realizowany z niepewnością rozszerzoną $\pm 0,6^\circ\text{C}$. Taka wartość rzutuje na względną zmianę współczynnika konwersji o $\pm 0,2\%$.

W tablicy 12 zestawiono względne niepewności rozszerzone pomiaru strumienia zużywanego gazu bębnowym gazomierzem mokrym i termicznym przepływomierzem masowym w zadanym zakresie przepływu, tj. 20÷100 dm³/h (warunki normalne).

Tablica 8. Wyznaczanie bezwzględnej niepewności standardowej gęstości normalnej gazu płynnego $\rho_{n,g,p}$ na podstawie jego składu (0°C, 101,325 kPa)

Lp.	Przeliczenie na 6 składników	Zawartość [%] obj.	Bezwzględna niepewność rozszerzona zawartości składnika w gazie $U(i)$ [%]	ρ_{n_i} [kg/m ³]	Bezwzględna niepewność standardowa ułamka molowego składnika w gazie $u(i)$	$[u(i) \cdot (\rho_{n_i} - \rho_{n,g,p})]^2$	Bezwzględna niepewność standardowa $u(\rho_{n,g,p})$ [kg/m ³]	Bezwzględna niepewność rozszerzona $U(\rho_{n,g,p})$ [kg/m ³]
1	etan	1,09	0,06	1,355	0,00030	0,000000046	±0,0019	±0,0038
2	propan	89,70	4,40	2,012	0,02200	0,000001400		
3	i-butan	5,19	0,27	2,693	0,00140	0,000000720		
4	n-butan	2,94	0,24	2,705	0,00120	0,000000590		
5	1-buten	0,36	0,10	2,581	0,00050	0,000000066		
6	trans-2-buten	0,74	0,39	2,503	0,00200	0,000000720		
$\rho_{n,g,p}$	2,0666	±0,0038	kg/m ³					

Tablica 9. Wyznaczanie bezwzględnej niepewności standardowej ciepła właściwego gazu płynnego $c_{p,g,p}$ na podstawie jego składu (72°C, 200 mbar (g))

Lp.	Przeliczenie na 6 składników	Zawartość [%] mas.	Bezwzględna niepewność rozszerzona zawartości składnika w gazie $U(i)$ [%] ($k=2$)	c_{p_i} [J/(kg · K)] 72°C, 200 mbar (g)	Bezwzględna niepewność standardowa ułamka masowego składnika w gazie $u(i)$	$[u(i) \cdot (c_{p_i} - c_{p,g,p})]^2$	Bezwzględna niepewność standardowa $u(c_{p,g,p})$ [J/(kg · K)]	Bezwzględna niepewność rozszerzona $U(c_{p,g,p})$ [J/(kg · K)]
1	etan	0,725	0,040	1791	0,00040	0,00250	±0,36	±0,73
2	propan	87,500	4,200	1918	0,02100	0,00260		
3	i-butan	6,670	0,340	1923	0,00170	0,00016		
4	n-butan	3,780	0,300	1925	0,00150	0,00020		
5	1-buten	0,450	0,110	1747	0,00057	0,00930		
6	trans-2-buten	0,920	0,480	1772	0,00240	0,12000		
$c_{p,g,p}$	1915,57	±0,73	J/(kg · K)					

Wielkości w tablicy 12 wygenerowano w programie Excel na podstawie utworzonego budżetu niepewności na zasadzie wpisania (potrzebnych do uzyskania określonego strumienia przepływu) odpowiednich danych. Dla bębnowego gazomierza mokrego wpisywano następujący zestaw danych: objętość zużytego gazu (założono stałą wartość równą 2 dm³), czas pomiaru (zmieniano, by uzyskać różne

wartości strumienia gazu), temperaturę gazu (założono stałą wartość), ciśnienie gazu w gazomierzu (założono stałą wartość), ciśnienie otoczenia (założono stałą wartość). W przypadku termicznego przepływomierza masowego jako informację wejściową wpisywano wielkość napięcia, które pojawia się w momencie przepływu gazu przez termiczny przepływomierz masowy.

Tablica 10. Budżet niepewności wyznaczania współczynnika konwersji $C_{g,p}$ gazu płynnego

Wielkość	Bezwzględna niepewność rozszerzona	Bezwzględna niepewność standardowa	Współczynnik wiarygodności	Składowe bezwzględnej niepewności standardowej	Bezwzględna niepewność standardowa złożona współczynnika konwersji $u_c(C_{g,p})$ [-]	Bezwzględna niepewność rozszerzona złożona współczynnika konwersji $U_c(C_{g,p})$ [-]	Względna niepewność rozszerzona złożona współczynnika konwersji [%]
$\rho_{ng,p}$	0,0038 kg/m ³	0,0019 kg/m ³	-0,63000	-0,00120	±0,0012	±0,0024	±0,19
$C_{pg,p}$	0,73 J/(kg·K)	0,36 J/(kg·K)	-0,00068	-0,00025			

$C_{g,p}$	1,3078	±0,0024	[-]
		±0,19	%

Tablica 11. Budżet niepewności pomiaru strumienia zużycia gazu płynnego za pomocą przepływomierza masowego dla poziomu napięcia 50% (5 V) – strumień zużycia gazu odniesiony do warunków normalnych

Wielkość	Symbol	Aparatura	Sposób szacowania niepewności	Rozkład prawdopodobieństwa	Bezwzględna niepewność standardowa	Współczynnik wiarygodności	Składowe bezwzględnej niepewności standardowej złożonej	Bezwzględna niepewność standardowa złożona przepływu gazu płynnego $u_c(p_{w,p})$	Bezwzględna niepewność rozszerzona złożona strumienia przepływu gazu płynnego $U_c(p_{w,p})$
Strumień objętości czystego butanu	dm ³ /h								
	$P_{c,z,b}$	termiczny przepływomierz masowy	1. powtarzalność przyrządu 2. dokładność przyrządu	1. normalny 2. prostokątny	±0,6900 dm ³ /h	1,3078	0,900 dm ³ /h	±0,90 dm ³ /h	±1,81 dm ³ /h
Współczynnik konwersji	$C_{g,p}$	-	niepewność złożona	-	±0,0012	45,00	0,055 dm ³ /h		

Tablica 12. Porównanie względnej niepewności rozszerzonej gazomierza mokrego i przepływomierza w zakresie rozpatrywanego przepływu (przebieg wyrażony w warunkach normalnych)

Bębnowy gazomierz mokry		
Przebieg [dm ³ /h]	100,84	79,02
Względna niepewność rozszerzona [%]	2,41	2,37
Termiczny przepływomierz masowy		
Przebieg [dm ³ /h]	100,72	79,14
Względna niepewność rozszerzona [%]	1,85	2,31

Podsumowanie

Zastosowany termiczny przepływomierz masowy w rozpatrywanym zakresie przepływu (tablica 12) osiąga podobne wartości względnej rozszerzonej niepewności pomiarowej co użytkowany w laboratorium gazomierz. Jeśli chodzi o specyfikę pomiarów (pomiar obciążenia cieplnego palników kuchni gazowej zgodnie z normą [4]) prowadzonych w laboratorium, termiczny przepływomierz masowy w porównaniu do gazomierza mokrego pozwala określać wielkość strumienia zużywanego gazu płynnego dla stałej wartości czasu pomiaru, bez względu na obciążenie cieplne palnika, eliminując zmienną czasową związaną z wyborem momentu przerywania pomiaru (długość czasu jego trwania ze względu na zasklepianie się dyszy gazowej wpływa na końcową wartość strumienia zużywanego gazu).

Inną zaletę przepływomierza masowego w porównaniu do stosowanego w laboratorium bębnowego gazomierza mokrego po uwzględnieniu założeń normy [4] stanowi fakt, że dla przepływów rzędu 30 dm³/h gazomierz nie wykona wymaganego w założonym przez normę czasie pomiaru pełnego obrotu liczydła. Kolejną zaletą jest możliwość przyspieszenia pomiarów jakości spalin emitowanych z palników kuchni gazowej, które zgodnie z normą należy wykonać przy określonej wartości obciążenia cieplnego palnika – możliwość chwilowego odczytu tej wartości ze wskazań przepływomierza masowego. Jednak wadą przepływomierza masowego w porównaniu do bębnowego gazomierza mokrego jest konieczność oznaczenia składu gazu, którego przepływ mierzymy.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 7, s. 444–456

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Modernizacja mieszalni gazów pod kątem pomiarów zużycia gazów płynnych* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 75/0015/GU/12, nr archiwalny: DK-4100/15/2013-01.

Literatura

- [1] *Advantech GeniDAQ User's Manual*; www.interworldna.com/images/advan/Genidaq.pdf (dostęp: maj 2013).
- [2] Burnus Z.: *Problematyka walidacji metod badań w przemyśle naftowym na przykładzie benzyn silnikowych*. Nafta-Gaz 2013, nr 2, s. 143–152.
- [3] *General instruction digital Mass Flow / Pressure instruments laboratory style / IN-FLOW*. Instruction manual. Bronkhorst High-Tech B.V.
- [4] PN-EN 30-1-1 *Domowe urządzenia do gotowania i pieczenia spalające paliwa gazowe. Część 1-1: Bezpieczeństwo – Postanowienia ogólne*.
- [5] PN-EN ISO 6976:2008 *Gaz ziemny – Obliczanie wartości kalorycznych, gestosci, gestosci względnej i liczby Wobbego na podstawie składu*.
- [6] Wojtowicz R.: *Ocena gazu granicznego G21 pod kątem jego przydatności do określania jakości spalania gazów ziemnych wysokometanowych pochodzących z regazyfikacji LNG w urządzeniach użytku domowego*. Nafta-Gaz 2013, nr 8, s. 599–612.
- [7] www.bronkhorst.com (dostęp: lipiec 2013).
- [8] www.fluidat.com (dostęp: sierpień 2013).



Mgr inż. Tomasz SIUDA
Specjalista inżyniersko-techniczny w Zakładzie
Użytkowania Paliw.
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: siuda@inig.pl