

Wpływ dodatku wodoru na liczbę metanową gazu ziemnego

The impact of hydrogen addition on the methane number of natural gas

Jadwiga Holewa-Rataj, Ewa Kukulska-Zajęc

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Liczba metanowa jest istotnym parametrem charakteryzującym paliwa silnikowe. Wartość liczby metanowej określa podatność paliwa na spalanie stukowe, przy czym im wartość ta jest większa, tym większa jest odporność paliwa na spalanie stukowe. Gaz ziemny należący do grupy H powinien charakteryzować się minimalną liczbą metanową powyżej 65 (PN-EN 16726:2018). W doniesieniach literaturowych dominuje z kolei pogląd, że ze względu na efektywność pracy silnika oraz niską emisję szkodliwych substancji optymalna wartość liczby metanowej dla gazów spalanych w silnikach samochodowych zasilanych gazem CNG lub LNG powinna wynosić powyżej 80. W dobie dążenia do ograniczenia zużycia i zastępowania paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii (OZE) istotne jest sprawdzenie, jak duży wpływ na wartość liczby metanowej gazu ziemnego będzie miało dodanie do niego wodoru, który od kilku już lat znajduje się w centrum uwagi jako doskonały nośnik energii i tzw. czyste paliwo i dla którego przyjęto zerową wartość liczby metanowej. W artykule omówiono wpływ dodatku wodoru do gazu ziemnego na wartość liczby metanowej powstającej mieszaniny, w odniesieniu do minimalnej i optymalnej wartości liczby metanowej. Podczas analizy wykorzystano dane dotyczące 19 różnych składów gazu ziemnego, charakteryzujące gaz ziemny należący do grupy E pochodzący z polskiej sieci dystrybucyjnej. Wyniki przeprowadzonych obliczeń pozwalają stwierdzić, że dodanie wodoru do gazu ziemnego, w ilości pozwalającej na zachowanie parametrów fizykochemicznych gazu określonych w odpowiednich normach, powoduje obniżenie wartości liczby metanowej powstałej mieszaniny gaz ziemny–wodór maksymalnie o 22,1%. Należy dodać, że w żadnym z analizowanych przypadków uzyskana wartość liczby metanowej nie była niższa niż wartość minimalna wynosząca 65. W odniesieniu z kolei do optymalnej wartości liczby metanowej dla paliw gazowych można stwierdzić, że dodatek wodoru do gazu ziemnego, z zachowaniem przyjętych założeń w zakresie parametrów energetycznych i gęstości gazu, może powodować zwiększenie właściwości stukowych powstałej mieszaniny i przyczynić się do tego, że nie będzie ona optymalnym paliwem. Przeprowadzone obliczenia i analizy wykazały także, że zmiana wartości liczby metanowej mieszaniny gaz ziemny–wodór jest proporcjonalna w stosunku do ilości wodoru wprowadzonego do gazu ziemnego.

Słowa kluczowe: liczba metanowa, gaz ziemny, wodór.

ABSTRACT: The methane number is an important parameter characterizing motor fuels. The value of the methane number determines the fuel susceptibility to knocking combustion, and the higher its value, the greater the fuel resistance to knocking combustion. Natural gas belonging to the H group should have a minimum methane number above 65 (PN-EN 16726:2018). The dominant view in the literature is that the optimal value of the methane number for gases burned in CNG or LNG fueled car engines should be above 80 due to the efficiency of the engine operation and low emission of harmful substances. In the era of striving to reduce the consumption of fossil fuels and replace them with renewable energy sources (RES), it is important to check how significantly will the hydrogen addition impact the methane number value of natural gas. It is essential because hydrogen has been in the spotlight for several years now as an excellent energy carrier and the so-called clean fuel, and for zero methane number was assumed. The article discusses the effect of hydrogen addition to natural gas on the value of the methane number of the resulting mixture in relation to the minimum and optimal value of the methane number. Data on 19 different compositions of natural gas were used to perform the analysis. They characterized natural gas belonging to group E from the Polish distribution network. The results of the calculations carried out allow us to state that the addition of hydrogen to natural gas, in an amount allowing to maintain the physicochemical parameters of the gas specified in the relevant standards, causes a decrease in the value of the methane number of the resulting natural gas-hydrogen mixture by a maximum of 22.1%. However, in none of the analyzed cases the obtained methane number was lower than the minimum value of 65. With regard to the optimal methane number value for gaseous fuels, it can be concluded that the addition of hydrogen to natural gas (while maintaining the adopted assumptions regarding energy parameters and gas density) can increase the knocking properties of the resulting mixture and make it not an optimal fuel. The performed calculations and analyzes also showed that the change in the methane number value of the natural gas-hydrogen mixture is proportional to the amount of hydrogen introduced into natural gas.

Key words: methane number, natural gas, hydrogen.

Autor do korespondencji: J. Holewa-Rataj, e-mail: jadwiga.holewa@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 29.09.2020 r. Zatwierdzono do druku: 29.10.2020 r.

Wstęp

Łagodzenie zmian klimatu, adaptacja do zmian klimatu i walka o jak najlepszą jakość powietrza to kluczowe wyzwania, przed którymi stoi obecnie cały świat. U podstaw tych wyzwań leży kwestia energii, a w szczególności kwestia zależności transportu kołowego od paliw kopalnych. Aby skutecznie ograniczyć skalę globalnego ocieplenia, należy zacząć korzystać z energii w oszczędny sposób oraz dążyć do ograniczania zużycia paliw kopalnych, w tym gazu ziemnego, i zastępowania ich odnawialnymi źródłami energii (OZE). Jednak efektywne wykorzystanie OZE wymaga opracowania uzasadnionego ekonomicznie i możliwego ze względów technicznych sposobu magazynowania uzyskanej energii. Jednym ze sposobów magazynowania nadmiarowej energii elektrycznej rokującym duże nadzieje są technologie *power-to-gas* (Piskowska-Wasiak, 2017), w których powstały np. w wyniku hydrolizy wody wodór, będący nośnikiem energii, zostaje zatłoczony i zmagazynowany w sieci przesyłowej gazu ziemnego. Takie rozwiązanie wpływa jednak na zmianę właściwości powstałej w sieci gazowej mieszaniny gaz ziemny–wodór, zarówno w stosunku do właściwości gazu ziemnego, jak i wodoru. Dzieje się tak dlatego, że właściwości fizykochemiczne wodoru, takie jak np. gęstość właściwa czy lepkość, istotnie różnią się od właściwości fizykochemicznych składników gazu ziemnego, takich jak metan, etan, propan, butan, azot itd. Zmienione właściwości mieszaniny gaz ziemny–wodór mogą wpływać na wiele aspektów związanych z funkcjonowaniem systemu gazowniczego, w tym na prawidłowość prowadzenia pomiarów rozliczeniowych (Łach, 2016; Schuster et al., 2019; Jaworski et al., 2020), a także na możliwość bezpiecznego wykorzystania takiej mieszaniny przez odbiorcę końcowego (Wojtowicz, 2019).

Jednym z parametrów charakteryzujących mieszaninę gaz ziemny–wodór, który ulegać będzie zmianie w wyniku dodania wodoru do gazu ziemnego, jest liczba metanowa. Liczba metanowa to istotny parametr charakteryzujący jakość paliwa, gdyż określa odporność paliwa gazowego na spalanie stukowe, przy czym im większa jest jej wartość, tym większa jest odporność paliwa na spalanie stukowe. Liczba metanowa jest parametrem bezwymiarowym, ustalonym w analogiczny sposób jak liczba oktanowa dla benzyn. Podczas określania wartości liczby metanowej paliw gazowych przyjęto dwa skrajne punkty: liczbę metanową czystego metanu, wynoszącą 100, i liczbę metanową wodoru, równą 0 (Schuster i Holewa-Rataj, 2018). W związku z tym istotne jest sprawdzenie, w jak dużym stopniu dodatek wodoru do gazu ziemnego wpływa na wartość liczby metanowej powstałej mieszaniny gaz ziemny–wodór.

Liczba metanowa

Liczba metanowa informuje o jakości analizowanego paliwa, w tym o możliwości jego wykorzystania, np. do napędu silników samochodowych lub urządzeń kogeneracyjnych. Zdefiniowanie dopuszczalnych zakresów liczby metanowej dla paliw gazowych jest zatem istotne z punktu widzenia określenia możliwości ich wykorzystania. Mimo to obecnie brak jest wymagań prawnych w zakresie dopuszczalnych wartości liczby metanowej gazu ziemnego rozprowadzanego sieciami gazowymi czy też gazu CNG wykorzystywanego w transporcie (Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 30 czerwca 2016 r.; Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r.). Jedynym dokumentem normalizacyjnym, który zawiera informacje dotyczące dopuszczalnej wartości liczby metanowej, jest norma PN-EN 16726:2018 *Infrastruktura gazowa – Jakość gazu – Grupa H* (PN-EN 16726:2018), która definiuje, że gaz ziemny należący do grupy H powinien charakteryzować się minimalną liczbą metanową powyżej 65. W doniesieniach literaturowych dominuje z kolei pogląd, że optymalna wartość liczby metanowej, ze względu na efektywność pracy silnika oraz niską emisję szkodliwych substancji, dla gazów spalanych w silnikach powinna wynosić powyżej 80 (Olajossy, 2005; CARB, 2008a, 2008b; GIE, 2012). Paliwo o liczbie metanowej powyżej 80 jest rekomendowane do silników samochodów ciężarowych z otwartą pętlą oraz silników pierwszej generacji z zamkniętą pętlą (CARB, 2008b). Argumentem przemawiającym za tym, że liczba metanowa paliw gazowych powinna być wyższa od 80 jest to, że gazy o niższej liczbie metanowej będą wpływać na efektywność pracy silników tłokowych, mogą zwiększać awaryjność takich silników, a także przyczyniać się do wzrostu emisji szkodliwych substancji (Olajossy, 2005; GIE, 2012). Argumentem przeciw wprowadzeniu minimalnej wartości liczby metanowej na poziomie 80 jest natomiast fakt, że taki zapis wykluczyłby możliwość wykorzystania ciekłych gazów ziemnych (LNG) pochodzących z takich kierunków jak: Libia, Australia, Katar, Rosja, Algieria, Oman, Indonezja oraz Peru (GIE, 2012). Wymagań w zakresie liczby metanowej powyżej 80 nie spełnia również gaz ziemny wydobywany z obszaru Morza Północnego (GIE, 2012).

Rozwój technologii spowodował, że produkowane obecnie silniki wymagają paliw o konkretnej zdefiniowanej wartości liczby metanowej, przy której charakteryzują się wysoką sprawnością, niskim zużyciem paliwa oraz niską emisją, np. silniki produkowane na rynek japoński wymagają paliw gazowych o liczbie metanowej równej 65 (CIMAC, 2015). Silniki o zapłonie iskrowym w większości wymagają paliw o liczbie metanowej równej 70, przy czym spadek liczby metanowej do wartości 65 spowodować może około 10-procentowy spadek sprawności tych silników (Kramer et al., 2015). Dodatkowo istotne

jest, że w przypadku silników zoptymalizowanych pod kątem paliwa o danej wartości liczby metanowej (np. 90) zastosowanie paliwa o niższej liczbie metanowej skutkować będzie spalaniem stukowym. Zjawiska takiego nie obserwuje się natomiast w przypadku paliw o wyższej liczbie metanowej (Malenshek i Olsen, 2009). Polskie doświadczenia w zakresie stosowania gazów o niskiej wartości liczby metanowej również potwierdzają te doniesienia i wykazują, że dla gazów o liczbie metanowej około 55 sprawność elektryczna silnika jest 7% niższa niż dla gazów o liczbie metanowej równej 80 (Olajossy, 2005).

Założenia do obliczenia liczby metanowej gazu ziemnego z dodatkiem wodoru

Podczas analizy wpływu dodatku wodoru na wartość liczby metanowej gazu ziemnego wykorzystano dane dotyczące 19 składów gazu ziemnego z grupy E, charakteryzujące gaz ziemny pochodzący z polskiej sieci dystrybucyjnej. Szczegółowy skład i charakterystykę gazów ziemnych zastosowanych w obliczeniach przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Gazy ziemne zastosowane w obliczeniach charakteryzowały się zawartością metanu w przedziale 91,4–99,2 mol/mol. Ciepło spalania analizowanych gazów zmieniało się w zakresie 38,31–40,89 MJ/m³, natomiast liczba Wobbego mieściła się w zakresie 49,66–53,41 MJ/m³. Analizowane gazy ziemne, przed teoretycznym zmieszaniem z wodorem, charakteryzowały się liczbą metanową z zakresu od 81,5 do 96,9, wyliczoną na podstawie algorytmu zawartego w załączniku A normy PN-EN 16726:2018. W obliczeniach wartości liczby metanowej gazu ziemnego przed i po dodaniu wodoru wykorzystano ww. algorytm z uwagi na fakt, że jest to algorytm uniwersalny, który może być zastosowany zarówno w przypadku gazów ziemnych wysokometanowych (E lub H), jak też w przypadku gazów zaazotowanych lub mieszanin gazów ziemnych z wodorem. Wartości liczby metanowej analizowanych gazów ziemnych są znacznie wyższe niż minimalna liczba metanowa, która zgodnie z normą (PN-EN 16726:2018) wynosi 65. Wartości te spełniają także rekomendacje zawarte w literaturze, które stanowią, że optymalna liczba metanowa paliw gazowych powinna wynosić powyżej 80.

Tabela 1. Skład w % (mol/mol) gazów ziemnych zastosowanych w obliczeniach

Table 1. Composition in % (mol/mol) of natural gases used in the calculation

Składnik	Gaz A	Gaz B	Gaz C	Gaz D	Gaz E	Gaz F	Gaz G	Gaz H	Gaz I	Gaz J
metan	91,4402	91,7422	91,7453	92,2807	92,3471	92,8582	93,0800	93,4645	94,9814	95,1429
etan	4,6838	4,5879	1,6157	4,5202	3,6635	4,2597	1,6736	3,1009	2,2704	1,8431
propan	0,7941	0,4907	0,3995	0,4814	1,0238	0,5294	0,3475	0,8140	0,6113	0,4253
i-butan	0,1047	0,0798	0,0766	0,0947	0,0875	0,1017	0,0543	0,0910	0,0789	0,0805
n-butan	0,1200	0,0507	0,0605	0,0602	0,1187	0,0775	0,0641	0,1281	0,1041	0,0624
n-pentan	0,0211	0,0113	0,0087	0,0231	0,0080	0,0287	0,0103	0,0094	0,0141	0,0092
i-pentan	0,0306	0,0149	0,0119	0,0185	0,0162	0,0212	0,0137	0,0140	0,0225	0,0175
neo-pentan	–	–	–	–	0,0086	–	0,0056	0,0081	–	–
C6+	0,0144	0,0114	0,0190	0,0058	0,0105	0,0055	0,0179	0,0300	0,0149	0,0113
azot	1,4006	1,4365	5,9534	1,0117	2,7129	0,8287	4,6405	2,3337	1,4040	1,9217
CO ₂	1,3905	1,5746	0,1094	1,5037	0,0032	1,2894	0,0925	0,0063	0,4984	0,4861
Składnik	Gaz K	Gaz L	Gaz M	Gaz N	Gaz O	Gaz P	Gaz R	Gaz S	Gaz T	–
metan	95,9399	95,9400	96,6805	97,0362	97,4316	97,8901	98,1665	99,0840	99,1986	–
etan	1,5676	1,7480	1,7594	1,8498	1,1655	1,0449	0,6653	0,1879	0,1658	–
propan	0,5247	0,5092	0,5301	0,2400	0,3413	0,2960	0,2057	0,0714	0,0438	–
i-butan	0,0804	0,0700	0,0803	0,0497	0,0527	0,0442	0,0276	0,0262	0,0244	–
n-butan	0,0768	0,0598	0,0823	0,0408	0,0561	0,0467	0,0266	0,0502	0,0108	–
n-pentan	0,0077	0,0116	0,0081	0,0051	0,0083	0,0049	0,0024	0,0144	0,0059	–
i-pentan	0,0117	0,0189	0,0123	0,0072	0,0108	0,0090	0,0041	0,0445	0,0142	–
neo-pentan	–	–	–	0,0036	–	–	–	–	–	–
C6+	0,0046	0,0063	0,0054	0,0177	0,0080	0,0108	0,0011	0,0365	0,0089	–
azot	1,7317	1,0802	0,7613	0,4957	0,8647	0,6166	0,8479	0,3428	0,3931	–
CO ₂	0,0549	0,5560	0,0803	0,2542	0,0610	0,0368	0,0528	0,1421	0,1345	–

Tabela 2. Parametry fizykochemiczne gazów ziemnych zastosowanych w obliczeniach ($t_1 = 25^\circ\text{C}$, $t_2 = 0^\circ\text{C}$; $p_1 = p_2 = 101,325 \text{ kPa}$)**Table 2.** Physicochemical parameters of natural gases used in the calculations ($t_1 = 25^\circ\text{C}$, $t_2 = 0^\circ\text{C}$; $p_1 = p_2 = 101.325 \text{ kPa}$)

Parametr	Jednostka	Gaz A	Gaz B	Gaz C	Gaz D	Gaz E	Gaz F	Gaz G	Gaz H	Gaz I	Gaz J
Ciepło spalania	MJ/m ³	40,89	40,47	38,31	40,68	40,70	40,82	38,82	40,59	40,35	39,85
Wartość opałowa	MJ/m ³	36,92	36,53	34,55	36,71	36,75	36,84	35,01	36,64	36,40	35,94
Gęstość	kg/m ³	0,7880	0,7835	0,7695	0,7805	0,7731	0,7764	0,7619	0,7657	0,7581	0,7545
Gęstość względna	[-]	0,6094	0,6059	0,5951	0,6036	0,5979	0,6005	0,5892	0,5922	0,5863	0,5835
Liczba Wobbego	MJ/m ³	52,38	51,99	49,66	52,36	52,64	52,67	50,57	52,75	52,7	52,17
Liczba metanowa	[-]	81,5	83,9	89,2	83,9	81,6	83,6	89,5	83,1	87,0	89,2
Parametr	Jednostka	Gaz K	Gaz L	Gaz M	Gaz N	Gaz O	Gaz P	Gaz R	Gaz S	Gaz T	-
Ciepło spalania	MJ/m ³	40,07	40,17	40,52	40,36	40,15	40,17	39,85	39,93	39,76	-
Wartość opałowa	MJ/m ³	36,14	36,23	36,55	36,40	36,20	36,22	35,92	35,99	35,84	-
Gęstość	kg/m ³	0,7475	0,7511	0,7441	0,7407	0,7373	0,7339	0,7306	0,7272	0,7243	-
Gęstość względna	[-]	0,5781	0,5808	0,5754	0,5728	0,5702	0,5676	0,5651	0,5624	0,5601	-
Liczba Wobbego	MJ/m ³	52,7	52,71	53,41	53,32	53,17	53,32	53,01	53,24	53,13	-
Liczba metanowa	[-]	89,4	89,4	89,0	90,2	91,7	92,4	94,7	94,7	96,9	-

W ramach przeprowadzonych obliczeń do każdego z analizowanych składów gazów ziemnych wprowadzono wodór w ilości powodującej:

- w wariantcie 1 obniżenie ciepła spalania gazu do 38,0 MJ/m³. Jest to minimalne ciepło spalania gazu rozprowadzanego sieciami gazowymi, dla którego operator sieci nie może odmówić przyjęcia takiego paliwa do sieci (Gaz-System, 2019; PSG, 2019);
- w wariantcie 2 obniżenie ciepła spalania gazu do 34,0 MJ/m³. Jest to minimalne ciepło spalania gazu rozprowadzanego sieciami gazowymi zgodnie z rozporządzeniem (Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r.);
- w wariantcie 3 obniżenie wartości opałowej gazu do 31,0 MJ/m³. Jest to minimalna wartość opałowa zgodna z normą PN-C-04753:2011 *Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci dystrybucyjnej* (PN-C-04753:2011);

- w wariantcie 4 obniżenie gęstości względnej gazu do wartości minimalnej wymaganej normą (PN-EN 16726:2018), która wynosi 0,555.

Zawartości wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór wyliczone zgodnie z przyjętymi założeniami przedstawiono w tabeli 3.

Następnie dla uzyskanych mieszanin gazu ziemnego z wodorem obliczono liczby metanowe zgodnie z algorytmem zawartym w załączniku A normy PN-EN 16726:2018. Uzyskane wyniki obliczeń liczby metanowej gazu ziemnego po dodaniu wodoru przedstawiono i omówiono w dalszej części niniejszego artykułu.

Wyniki obliczeń i ich analiza

Wartości liczby metanowej gazu ziemnego po wprowadzeniu do niego różnych ilości wodoru przedstawiono w tabeli 4,

Tabela 3. Zawartość wodoru w % (mol/mol) w mieszaninach gaz ziemny–wodór otrzymanych według przyjętych wariantów**Table 3.** Hydrogen content in % (mol/mol) in natural gas-hydrogen mixtures obtained according to the adopted variants

	Gaz A	Gaz B	Gaz C	Gaz D	Gaz E	Gaz F	Gaz G	Gaz H	Gaz I	Gaz J
Wariant 1	10,21	8,87	1,22	9,53	9,61	9,89	3,14	9,27	8,47	6,81
Wariant 2	24,37	23,24	16,78	23,79	23,86	24,17	18,40	23,58	22,89	21,50
Wariant 3	22,54	21,39	14,88	21,89	22,02	22,32	16,48	21,71	20,89	19,58
Wariant 4	10,00	9,43	7,58	9,03	8,05	8,50	6,53	7,06	6,00	5,50
	Gaz K	Gaz L	Gaz M	Gaz N	Gaz O	Gaz P	Gaz R	Gaz S	Gaz T	-
Wariant 1	7,55	7,88	9,03	8,49	7,80	7,89	6,80	7,06	6,50	-
Wariant 2	22,13	22,40	23,37	22,89	22,34	22,41	21,49	21,72	21,24	-
Wariant 3	20,19	20,47	21,44	20,89	20,38	20,45	19,51	19,72	19,23	-
Wariant 4	4,50	5,01	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	1,48	1,03	-

Tabela 4. Obliczone wartości liczby metanowej gazu ziemnego oraz jego mieszanin z wodorem

Table 4. Calculated values of the methane number of natural gas and its mixtures with hydrogen

	Gaz A	Gaz B	Gaz C	Gaz D	Gaz E	Gaz F	Gaz G	Gaz H	Gaz I	Gaz J
Wariant 0	81,5	83,9	89,2	83,9	81,6	83,6	89,5	83,1	87,0	89,2
Wariant 1	75,9	78,5	89,0	77,9	76,2	77,5	87,1	77,5	81,1	84,0
Wariant 2	66,0	68,1	74,7	67,8	65,9	67,4	73,9	66,9	69,3	71,4
Wariant 3	67,3	69,3	76,2	69,0	67,3	68,7	75,6	68,0	70,9	73,2
Wariant 4	76,0	78,1	82,8	78,2	77,3	78,5	84,0	79,1	83,2	85,2
	Gaz K	Gaz L	Gaz M	Gaz N	Gaz O	Gaz P	Gaz R	Gaz S	Gaz T	–
Wariant 0	89,4	89,4	89,0	90,2	91,7	92,4	94,7	94,7	96,9	–
Wariant 1	83,5	83,1	82,0	83,2	84,7	85,3	88,1	87,3	89,3	–
Wariant 2	70,9	71,0	69,8	70,9	71,7	72,1	74,6	73,8	75,5	–
Wariant 3	72,6	72,4	71,4	72,7	73,4	73,8	76,3	75,5	77,4	–
Wariant 4	86,3	85,8	86,0	87,7	89,4	90,5	93,0	92,6	95,1	–

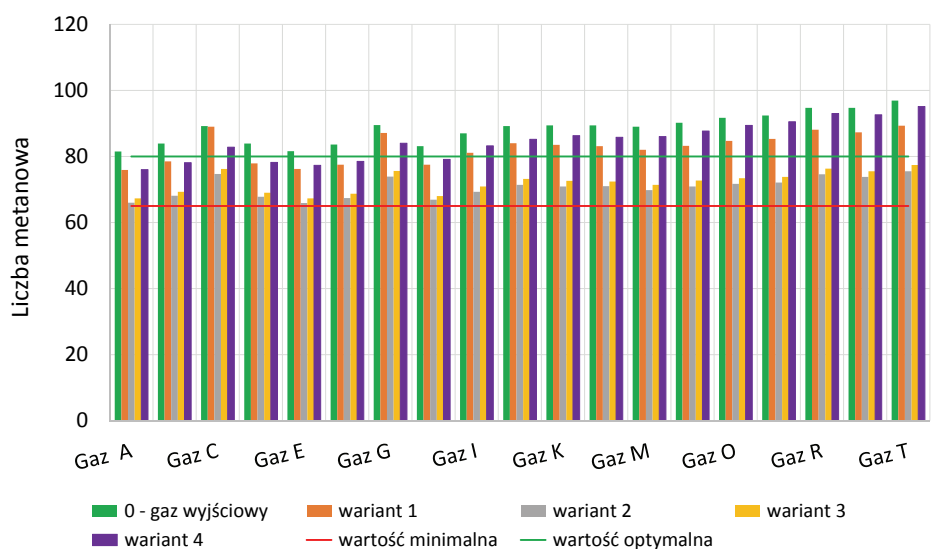
w której podano również wartości liczby metanowej analizowanych gazów ziemnych bez dodatku wodoru (wariant 0).

Analiza danych zestawionych w tabeli 4 pokazuje, że dla:

- wariantu 0 (wyjściowe gazy ziemne bez dodatku wodoru) – liczba metanowa mieści się w przedziale od 81,5 do 96,9;
- wariantu 1 – liczba metanowa mieszanin gaz ziemny–wodór mieści się w zakresie od 75,9 do 89,3 i jest mniejsza od wartości liczby metanowej wyjściowego gazu ziemnego o od 0,2 do 7,6;
- wariantu 2 – liczba metanowa mieszanin gaz ziemny–wodór mieści się w zakresie od 65,9 do 75,5 i jest mniejsza od wartości liczby metanowej wyjściowego gazu ziemnego o od 14,5 do 21,4;
- wariantu 3 – liczba metanowa mieszanin gaz ziemny–wodór mieści się w zakresie od 67,3 do 77,4 i jest mniejsza od wartości liczby metanowej wyjściowego gazu ziemnego o od 13,0 do 19,5;
- wariantu 4 – liczba metanowa mieszanin gaz ziemny–wodór mieści się w zakresie od 76,0 do 95,1 i jest mniejsza od wartości liczby metanowej wyjściowego gazu ziemnego o od 1,7 do 6,4.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń pozwalają stwierdzić, że wprowadzenie wodoru do gazu ziemnego, zgodnie z przyjętymi wariantami, powoduje obniżenie wartości liczby metanowej powstałej mieszaniny gaz ziemny–wodór. Jednak w żadnym z analizowanych przypadków uzyskana wartość liczby metanowej nie była niższa niż wartość minimalna 65, zgodna z normą PN-EN 16726:2018,

co w sposób graficzny przedstawiono na rysunku 1. Inaczej przedstawia się sytuacja, jeżeli punktem odniesienia będzie optymalna dla silników samochodowych liczba metanowa, która zgodnie z rekomendacjami nie powinna być niższa niż 80 (Olajossy, 2005; CARB, 2008a, 2008b; GIE, 2012; CIMAC, 2015). Mimo że wszystkie analizowane gazy ziemne wyjściowo charakteryzowały się liczbą metanową powyżej 80, wprowadzenie do nich wodoru zgodnie z poszczególnymi wariantami spowodowało, że dla części uzyskanych w ten sposób mieszanin wartość liczby metanowej była niższa niż 80. W wariantach 2 i 3 każda z otrzymanych mieszanin gazowych charakteryzowała się wartością liczby metanowej poniżej 80, natomiast w wariantach 1 i 4 – liczbą metanową poniżej 80 charakteryzowało się jedynie 31,6% utworzonych mieszanin gaz ziemny–wodór. Można więc stwierdzić, że wprowadzanie wodoru do gazu ziemnego, z zachowaniem przyjętych założeń

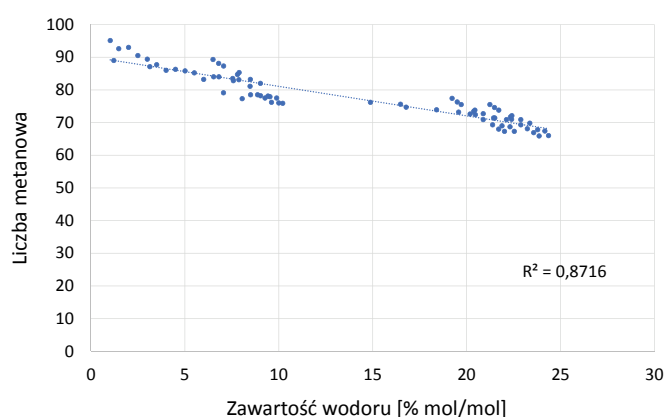


Rys. 1. Obliczone liczby metanowe gazu ziemnego oraz jego mieszanin z wodorem

Fig. 1. Calculated methane numbers of natural gas and its mixtures with hydrogen

w zakresie parametrów energetycznych i gęstości gazu, nie spowoduje obniżenia wartości liczby metanowej powstałej mieszaniny gaz ziemny–wodór poniżej wartości dopuszczalnej, może jednak powodować zwiększenie właściwości stukowych takiej mieszaniny i przyczynić się do tego, że nie będzie ona optymalnym paliwem.

Istotnym aspektem związanym z dodawaniem wodoru do gazu ziemnego jest również ocena, czy zmiana wartości liczby metanowej jest proporcjonalna w stosunku do ilości wprowadzanego do mieszaniny wodoru. Na rysunku 2 przedstawiono zależność wartości liczby metanowej charakteryzującej otrzymane mieszaniny gaz ziemny–wodór od ilości dodanego wodoru.



Rys. 2. Zależność wartości liczby metanowej od zawartości wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór

Fig. 2. Dependence of the methane number value on the hydrogen content in the natural gas-hydrogen mixture

Opierając się na skali Guillaforde, można stwierdzić, że funkcja przedstawiona na rysunku 2 wykazuje wysoką korelację pomiędzy wyznaczoną wartością liczby metanowej a zawartością wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór. Zależność tę można uznać za zależność liniową, gdyż współczynnik regresji liniowej przekracza 0,90. Pewne odstępstwa od liniowości funkcji przedstawionej na rysunku 2 mogą być spowodowane faktem, że wyjściowe gazy ziemne charakteryzowały się różnymi wartościami liczby metanowej. W związku z tym wpływ dodatku wodoru na wartość liczby metanowej lepiej oceniać, analizując zależność zmiany liczby metanowej (spadku liczby metanowej) od zawartości wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór. W tym celu obliczono różnicę w wartości liczb metanowych czystych gazów ziemnych (wariant 0) i wartości liczby metanowej gazów ziemnych z dodatkiem wodoru zgodnie z równaniem (1):

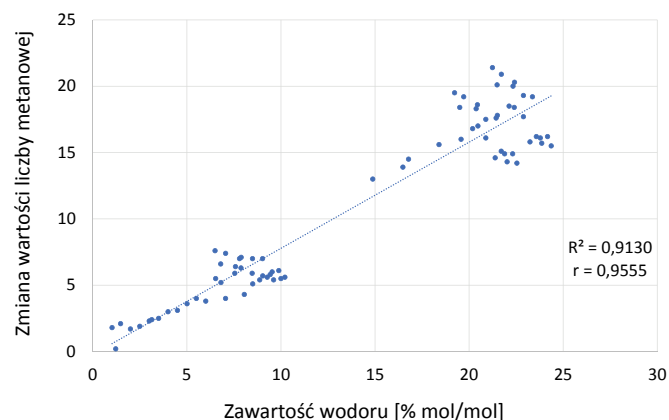
$$\Delta = MN_0 - MN_x \quad (1)$$

gdzie:

Δ – zmiana wartości liczby metanowej (rys. 3),

MN_0 – wartość liczby metanowej gazu ziemnego bez dodatku wodoru (wariant 0),

MN_x – wartość liczby metanowej mieszaniny gaz ziemny–wodór (warianty 1–4).



Rys. 3. Zależność zmiany wartości liczby metanowej od zawartości wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór

Fig. 3. Dependence of the change in the value of the methane number on the hydrogen content in the natural gas-hydrogen mixture

Dane przedstawione na rysunku 3 wykazują bardzo wysoką korelację liniową pomiędzy wyznaczoną zmianą wartości liczby metanowej mieszaniny a zawartością wodoru w mieszaninie gaz ziemny–wodór. Na podstawie danych zaprezentowanych na rysunku 3 można orzec, że dodatek wodoru w ilości:

- 5% (mol/mol) spowoduje spadek wartości liczby metanowej o 3,8, czyli o około 4,2%;
- 10% (mol/mol) spowoduje spadek wartości liczby metanowej o 7,8, czyli o około 8,8%;
- 20% (mol/mol) spowoduje spadek wartości liczby metanowej o 15,8, czyli o około 17,9%.

Reasumując, można stwierdzić, że wprowadzenie wodoru do gazu ziemnego powoduje obniżenie wartości liczby metanowej, a zmiana wartości liczby metanowej jest proporcjonalna w stosunku do ilości dodanego wodoru.

Podsumowanie i wnioski

Wprowadzanie wodoru do sieci gazu ziemnego stanowić może jeden ze sposobów dywersyfikacji źródeł energii, przyczyniając się tym samym do zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych w miksie energetycznym. Niemniej jednak należy pamiętać, że dodatek wodoru do gazu ziemnego ma wpływ na jego właściwości fizykochemiczne, co powoduje, że powstała mieszanina gaz ziemny–wodór charakteryzuje się innymi właściwościami niż sam gaz ziemny. Jedną z takich właściwości gazu ziemnego, która ulega zmianie po

dotaniu wodoru, jest liczba metanowa. Mieszanina gaz ziemny–wodór zawsze będzie się cechować niższą liczbą metanową niż wyjściowy gaz ziemny. W analizowanych w niniejszym artykule przypadkach spadek wartości liczby metanowej, będący wynikiem dodania wodoru do gazu ziemnego, nie przekraczał 22,1% w stosunku do wartości wyjściowej analizowanego gazu ziemnego. Dodatkowo wyznaczone dla używanych mieszanin gaz ziemny–wodór wartości liczby metanowej nie były niższe niż wartość minimalna 65, wymagana normą (PN-EN 16726:2018). Należy jednak zauważyć, że w niektórych przypadkach dodatek wodoru na poziomie 5% może prowadzić do wartości liczby metanowej poniżej wartości optymalnej, równej 80, a tym samym – zgodnie z przeanalizowanymi danymi literaturowymi – pogorszyć właściwości stukowe paliwa, jakim może być sprężona mieszanina gazu ziemnego oraz wodoru.

Literatura

- CARB, California Air Resources Board, 2008a. CNG Engine Performance Appendix E. <<https://www.arb.ca.gov/regact/cng-lpg/appe.doc>> (dostęp: 27.08.2020).
- CARB, California Air Resources Board, 2008b. Methane Number and Fuel Composition – Appendix D. <<https://www.arb.ca.gov/regact/cng-lpg/appd.pdf>> (dostęp: 27.08.2020).
- CIMAC, 2015. Impact of Gas Quality on Gas Engine Performance. CIMAC Position Paper, 07-2015: 8.
- Gaz-System, 2019. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej, wersja 27. *Warszawa*.
- GIE, Gas Infrastructure Europe, 2012. GIE Position Paper on impact of including Methane Number in the European Standard for Natural Gas. Ref.: 12GIE127, November: 5.
- Jaworski J., Kułaga P., Blacharski T., 2020. Study of the effect of addition of hydrogen to natural gas on diaphragm gas meters. *Energies*, 13, 3006. DOI: 10.3390/en13113006.
- Kramer U., Ferrera M., Künne H., Moreira D.C., Magnusson I., 2015. Natural Gas/Methane Fuels: European Automotive Fuel Quality and Standardization Requirements. *Erdgas*: 11–13.
- Łach M., 2016. Dokładność wyznaczania współczynnika ściśliwości gazu z podwyższoną zawartością wodoru – porównanie metod obliczeniowych. *Nafta-Gaz*, 5: 329–338. DOI: 10.18668/NG.2016.05.04.
- Malenshek M., Olsen D.B., 2009. Methane number testing of alternative gaseous fuels. *Fuel*, 88: 650–656. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.08.020.
- Olajossy A., 2005. Nowe możliwości energetycznego wykorzystania gazów o niskiej zawartości metanu. *Polityka Energetyczna*, 8: 27–39.
- Piskowska-Wasiak J., 2017. Doświadczenia i perspektywy procesu *Power to Gas*. *Nafta-Gaz*, 8: 597–604. DOI: 10.18668/NG.2017.08.07.
- PSG, 2019. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, wersja 13. *Warszawa*.
- Schuster T., Holewa-Rataj J., 2018. Statystyczna ocena zgodności wyników wyznaczania liczby metanowej paliw gazowych różnymi metodami. *Nafta-Gaz*, 4: 298–304. DOI: 10.18668/NG.2018.04.06.
- Schuster T., Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajac E., 2019. Ocena jakości paliw gazowych w kontekście wprowadzania wodoru do sieci gazu ziemnego. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2: 42–46. DOI: 10.15199/17.2019.2.1.
- Wojtowicz R., 2019. An analysis of the effects of hydrogen addition to natural gas on the work of gas appliances. *Nafta-Gaz*, 8: 465–472. DOI: 10.18668/NG.2019.08.03.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- PN-C-04753:2011 Gaz ziemny – Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci dystrybucyjnej.
- PN-EN 16726+A1:2018-11 Infrastruktura gazowa – Jakość gazu – Grupa H.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 30 czerwca 2016 r. w sprawie wymagań jakościowych dla sprężonego gazu ziemnego (CNG) (Dz.U. z 2016 r. poz. 1094).
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2 lipca 2010 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu gazowego (Dz.U. z 2010 r. nr 133, poz. 891 z późn. zm.).



Mgr Jadwiga HOLEWA-RATAJ
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Ochrony Środowiska
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: jadwiga.holewa@inig.pl



Dr Ewa KUKULSKA-ZAJĄC
Adiunkt; kierownik Zakładu Ochrony Środowiska
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: kukulska@inig.pl